УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“

ФАКУЛТЕТ ЗА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИСКИ ТЕХНОЛОГИИ

Ристо Ачковски
Мирко Тодоровски

ЗБИРКА ЗАДАЧИ ПО ЕЛЕКТРИЧНИ МРЕЖИ

Февруари 2013 год.

I. АНАЛИЗА НА КОЛАТА ЗА НАИЗМЕНИЧНА СТРУЈА. ТРИФАЗНИ СИСТЕМИ

1.1. ВОВЕДНО ИЗЛАГАЊЕ

Основната намена на електричните мрежи е да ги задоволат потребите од електрична енергија на сите потрошувачи т.е да овозможат пренос на електричната енергија од производните единици до потрошувачките центри и нејзина дистрибуција до сите крајни потрошувачи. Притоа потребно е снабдувањето на потрошувачите да биде со одреден квалитет односно потребно е одржување во зададени граници на *големината на напонот, фреквенцијата на напонот*, како и неговиот облик кој треба да биде синусоидален (без присуство на виши хармоници). Покрај тоа потребно е да постои континуитет во испораката на електрична енергија односно работењето на електричните мрежи и системи треба да биде доверливо.

Поради ова во сите фази на проектирањето, а подоцна и во текот на самата експлоатација на една електроенергетска мрежа, потребно е да се прават низа пресметки на нејзините режими на работа. Целта на овие пресметки е да се изврши проверка на техничките услови, т.е. проверка дали струите низ поедините елементи и напоните во поедините јазли се во дозволените граници. Покрај тоа, со пресметките се проценуваат и загубите на активната и реактивната моќност и енергија во мрежата, како и вредноста на овие загуби, што од своја страна, на извесен начин, ја карактеризира и економичноста на работата на мрежата.

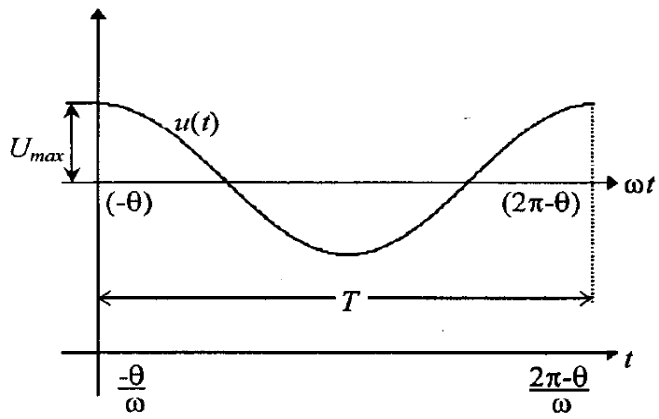
Во пресметките на стационарни состојби на електроенергетските мрежи, по правило се претпоставува дека постои целосна симетрија кај сите три фази од разгледуваниот трифазен систем. Ова е генерално точно бидејќи сите елементи на една електроенергетска мрежа се градат како симетрични исто така и потрошувачите во високо-напонските и среднонапонските мрежи се симетрични односно рамномерно распределени по трите фази. Единствено во нисконапонските мрежи каде што постојат поголем број на монофазни потрошувачи можно е постоење на несиметрија и за ваквите случаи се користат посебни техники за пресметка на мрежите.

Поради овие причини, при пресметките може да се користи монофазна шема. Терминот *монофазна шема* е еквивалентен со термините *еднофазна* односно *еднополна шема*, исто како што се рамноправни и термините *еквивалентна шема* и *заменска шема*. Врз основа на еквивалентните шеми на поединечните елементи од електроенергетските системи, со нивно соодветно поврзување се формира еквивалентна (електрична) шема на една електроенергетска мрежа. Оваа еквивалентна шема на мрежата покрај топологијата (меѓусебната поврзаност на поедниечните елементи) треба да содржи и информации за параметрите на одделните елементи.

1.2. ПРИМЕНА НА ФАЗОРИТЕ ВО АНАЛИЗАТА НА КОЛАТА ЗА НАИЗМЕНИЧНА СТРУЈА

Кога во едно линеарно коло екситациите,т.е. изворите на напон и струја се простопериодични функции од времето t, тогаш и одзивот во него, т.е. струите во гранките и напоните на јзлите ќе преставуваат исто така простопериодични функции од времето t (слика 1).

$$u(t) = U_{\max} \cdot \cos(\omega t + \theta)\,. \tag{1}$$



Слика 1. Графички приказ на зависноста *u*(*t*)

Формален приказ на временската функциите $u(t)$ со примена на комплексни броеви

$$u(t) = \mathrm{Re}\left[U_{\max}\cos(\omega t + \theta) + jU_{\max}\sin(\omega t + \theta)\right]. \tag{2}$$

Со примена на Ојлеровата формула се добива:

$$u(t) = \mathrm{Re}\left[U_{\max}e^{j(\omega t+\theta)}\right] = \mathrm{Re}\left[U_{\max}e^{j\theta}e^{j\omega t}\right] = \sqrt{2}\,\mathrm{Re}\left[\frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}e^{j\theta}e^{j\omega t}\right]. \tag{3}$$

Со примена на дефницијата за фазор:

$$\underline{U} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}e^{j\theta} \tag{4}$$

се добива:

$$u(t) = \sqrt{2}\,\mathrm{Re}\left[\underline{U}e^{j\omega t}\right]. \tag{5}$$

Фазорот е вектор, т.е. комплексен претставник на една простопериодична функција од време. Тој содржи две информации – ефективната вредност (односно амплитудата) и фазниот агол (т.е. почетната фаза) на таа функција.

Запис на фазорот во поларен облик:

$$\underline{U} = Ue^{j\theta} \tag{6}$$

или во правоаголен (декартов) облик:

$$\underline{U} = U\cos\theta + jU\sin\theta. \tag{7}$$

Ефективната вредност на напонот (струјата), се дефинира врз основа на ефектите на ослободување на топлина (дисипација на моќност) во елемент со определена активна отпорност. За простопериодични величини, ефективната вредност може да се одреди преку следната релација:

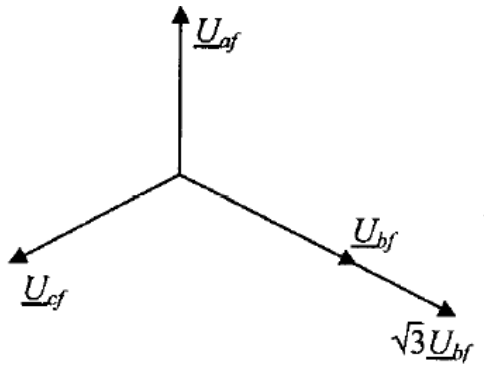
$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2(t)dt} \tag{8}$$

каде што T е периодата на промена на величината.

Врската помеѓу темената (максималната) вредност $U_{\max}$ и ефективната вредност (модулот) на напонот U за простопериодичен синусоидален напон (слика 1) е следната:

$$U = U_{\max} / \sqrt{2}\,, \tag{9}$$

Линиските (меѓуфазни) напони кај трифазните мрежи што работат во симетричен урамнотежен режим и кои што се пресметковни големини, во пресметките на електричните мрежи се дефинираат како фазори, со модул кој е за $\sqrt{3}$ пати поголем од модулот на соодветните фазни напони.



Слика 2. Илустрација на дефинициите

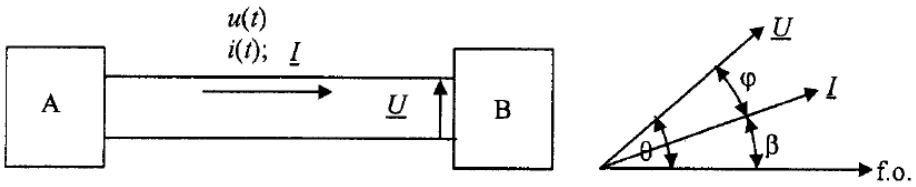
Така, на пример, кога се зборува за напон на било кој трифазен елемент (вод, трансформатор, генератор) во една трифазна мрежа тоа се однесува на меѓуфазниот (линискиот) напон. Исто така и во самите пресметки на трифазните мрежи го користиме меѓуфазниот напон.

1.3. МОЌНОСТ ВО ЕДНОФАЗНИ КОЛА ПРИ ПРОСТОПЕРИОДИЧЕН (СИНУСЕН) РЕЖИМ НА РАБОТА.

Моменталната вредност на моќноста што се внесува во некој елемент (нпр. елементот B на сликата 3) од едно монофазно коло што работи во простопериодичен режим, каде што напонот и струјата се менуваат по синусиодален закон може да се претстави со следната равенка:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U\sqrt{2}\cos(\omega t + \theta) \cdot I\sqrt{2}\cos(\omega t + \beta) \tag{10}$$

каде што θ е фазниот агол на напонот, додека β е фазниот агол на струјата, притоа и напонот и струјата имаат усголасени насоки како што е прикажано на сликата 3.



Слика 3. Пренос на моќност од делот A во делот B и фазорски дијаграм

Со користење на следниот тригонометриски идентитет:

$$\cos x \cdot \cos y = \frac{1}{2}\left[\cos(x - y) + \cos(x + y)\right], \tag{11}$$

се добива:

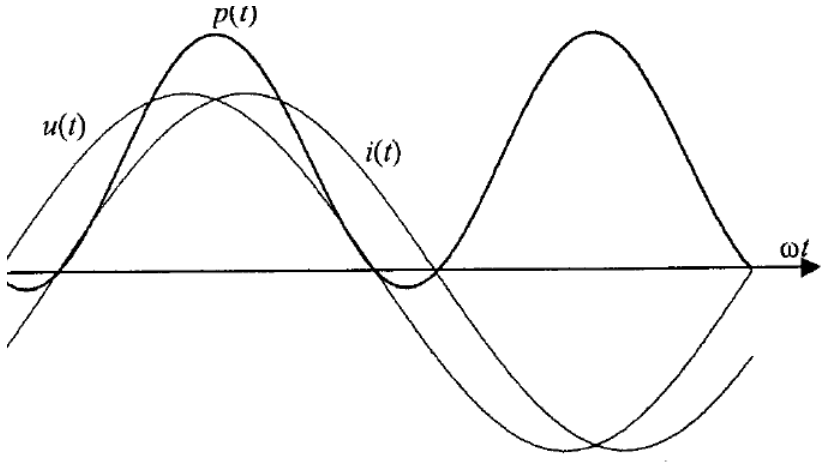
$$p(t) = 2UI\frac{1}{2}\left[\cos(\omega t + \theta - \omega t - \beta) + \cos(2\omega t + \theta + \beta)\right], \tag{12}$$

односно:

$$p(t) = UI\cos\varphi + UI\cos(2\omega t + \theta + \beta)\,. \tag{13}$$

Во последната равенка со φ е означена фазната разлика помеѓу напонот и струјата ($\varphi = \theta - \beta$).

Временската зависност на моменталната моќност $p(t)$ е дадена на слика 4.



Слика 4. Временска промена на напонот, струјата и моќноста во колото

Од равенката (13) можеме да забележиме дека моменталната моќност се состои од една константна компонента $UI{\cdot}\cos\varphi$ и простопериодична компонента со фреквенција $2\omega t$ чија средна вредност е еднаква на 0. На сликата 4 е прикажана временската зависност на моменталната моќност од каде се забележува дека истата има пулсирачки карактер. Во најголем дел од времето моменталната моќност е позитивна т.е. нејзината насока се совпаѓа со референтната насока од мрежата А кон В. Поради постоењето на фазната разлика помеѓу напонот и струјата во дел од времето моќноста тече во обратна насока.

Средната моќност во интервал со должина на периодата T, по дефиниција, се пресметува на следниот начин:

$$P_{sr} = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt = UI\cos\varphi\,. \tag{14}$$

Оваа моќност ја нарекуваме и *активна моќност*:

$$P = UI\cos\varphi \ \text{[W]}. \tag{15}$$

Моменталната моќност можеме да ја разделиме на компоненти и на следниот начин:

$$p(t) = UI\cos\varphi + UI\cos(2\omega t + \theta + \beta) = UI\cos\varphi + UI\cos(2\omega t + 2\beta + \varphi)\,. \tag{16}$$

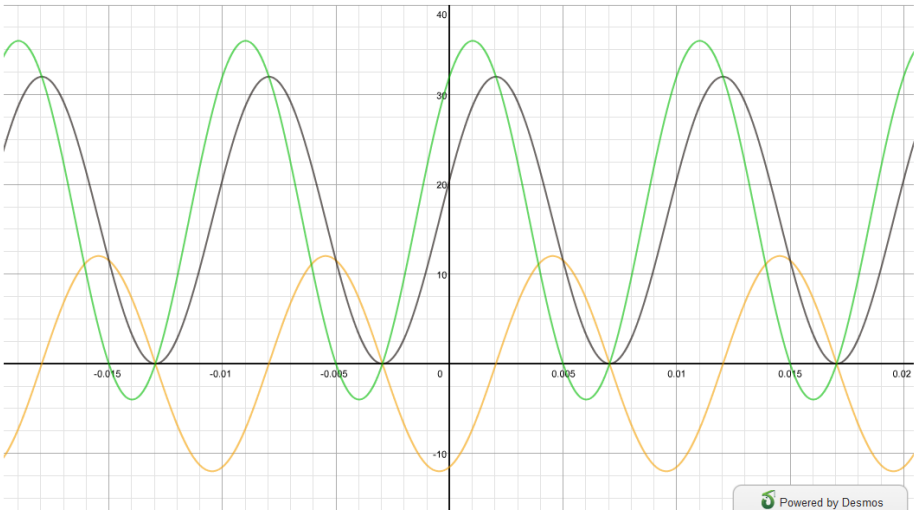
Со користење на тригонометрискиот идентитет:

$$\cos(x + y) = \cos x\cos y - \sin x\sin y\,, \tag{17}$$

се добива:

$$p(t) = UI\cos\varphi + UI\cos\varphi\cdot\cos(2\omega t + 2\beta) - UI\sin\varphi\cdot\sin(2\omega t + 2\beta)\,. \tag{18}$$

Од равенката (18) се гледа дека моменталната моќност може да се раздели на една пулсирачка компонента со амплитуда и средна вредност $UI\cos\varphi$ која што е секогаш позитивна и една наизменична компонента со амплитуда $UI\sin\varphi$ (слика 5).



Слика 5. Компоненти на моменталната моќност – пулсирачка компонента (црна боја) и наизменична компонента (жолта боја)

Втората компонента се јавува само во случај на постоење на фазна разлика помеѓу напонот и струјата во колото. Поради ова се дефинира величина наречена *реактивна моќност* Q која е еднаква на амплитудата на наизменичната компонента на моменталната моќност:

$$Q = UI\sin\varphi \ \text{[var]}. \tag{19}$$

Присуството на реактивна моќност во електричните кола и мрежи се должи на присуството на т.н. реактивни елементи кои поседуваат одредена индуктивност или капацитивност. Овие елементи во определен дел од времето примаат одредена моќност (а со тоа и енергија) од изворот, потоа истата таа моќност односно енергија ја враќаат кон изворот. Поради ова се создава наизменичната компонента на моменталната моќност.

Покрај активната и реактивната моќност се дефинира и *привидна моќност* која што е еднаква на производот од ефективните вредности на напонот и струјата:

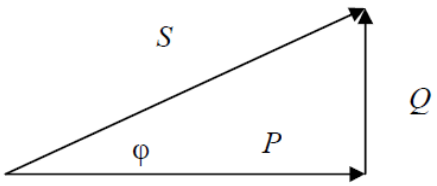
$$S = UI \ \text{[VA]}.$$

Истите изрази за активната и рекативната моќност се добиваат и со користење на фазори:

$$\underline{S} = \underline{U}\cdot\underline{I}^* = Ue^{j\theta}Ie^{-j\beta} = UIe^{j\varphi} = Se^{j\varphi}, \text{ или}$$

$$\underline{S} = UI\cos\varphi + jUI\sin\varphi = P + jQ. \tag{20}$$

Имајќи ги предвид овие дефиниции може да се нацрта триаголникот на моќности прикажан на сликата 6:



Слика 6. Триаголник на моќности

Од триаголникот на моќности следува и равенката:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{21}$$

Пример 1. Потрошувач е поврзан на наизменичен синусоидален напон со фреквенција од 50 Hz и ефективна вредност од 10 V. Да се пресметаат временските облици на напонот и струјата на потрошувачот, неговата моменталната моќност, активната и рективната моќност. Да се разгледаат следните случаи:

а) потрошувачот е со активна отпорност R = 4 Ω и индуктивност L=9,549 mH,

б) потрошувачот е со активна отпорност R = 5 Ω и индуктивност L = 0 mH.

Решение:

Имајќи во предвид дека обликот на напонот е синусоидален неговата максимална вредност ќе биде:

$U_{\max} = U \cdot \sqrt{2} = 10 \cdot \sqrt{2}$ V.

Бидејќи при пресметките во електричните кола и мрежи фазниот агол на просто-периодичните големини секогаш се разгледува релативно, како фазна разлика, секогаш се зема големина на која се доделува произволен фазен агол (најчесто се зема вредност 0), а останатите фазни агли се пресметуваат во однос на него. Во оваа задача ќе земеме дека фазниот агол на напонот θ=0.

За фреквенција од 50 Hz кружната фреквенција $\omega=2\pi f=100\pi$ rad/s. Според претходно кажаното и според равенката (1) временскиот облик на напонот ќе биде следниот:

$u(t) = 10\sqrt{2} \cdot \cos(100\pi \cdot t)$ V.

За пресметка на струјата низ потрошувачот потребно е да користиме комплексни претставници. Комплексниот претставник на напонот е следниот:

$\underline{U} = U \cdot e^{j\theta} = 10 \cdot e^{j0} = 10 \cdot (\cos 0 + j \sin 0) = 10$ V.

а) Случај кога е R = 4 Ω и L=9,549 mH

За овој случај импеданцијата на потрошувачот е следната:

$\underline{Z} = R + jX$

Реактанцијата X на потрошувачот ја пресметуваме од неговата индуктивност:

$X = \omega \cdot L = 100\pi \cdot 9{,}549 \cdot 10^{-3} = 3\,\Omega$

Според тоа:

$\underline{Z} = 4 + j3 = \sqrt{4^2 + 3^2} \cdot e^{j \arctan 3/4} = 5 \cdot e^{j \arctan 3/4}$ Ω

Аголот на импедансата $\varphi = \arctan 3/4 = 36{,}86°$.

Струјата што тече низ потрошувачот се пресметува на следниот начин:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{10}{5 \cdot e^{j \arctan 3/4}} = 2 \cdot e^{-j \arctan 3/4} \text{ A}$$

Ефективната вредност на струјата I = 2 A, додека фазниот агол β ќе биде:

$\beta = -\arctan 3/4 = -36{,}86°$.

Временската промена на струјата е следна:

$i(t) = 2\sqrt{2} \cdot \cos(100\pi \cdot t - \arctan 3/4)$

Активната рективната и привидната моќност на потрошувачот се следните:

$P = UI\cos\varphi = 16\,\text{W}, \quad Q = UI\sin\varphi = 12\,\text{var}$ и $S = UI = 20\,\text{VA}.$

Според равенката (13) моменталната моќност го има следниот временски облик:

$p(t) = UI\cos\varphi + UI\cos(2\omega t + \theta + \beta)$

$p(t) = 16 + 20\cos(200\pi \cdot t - \arctan 3/4)\ \text{VA}$

Моменталната моќност можеме да ја претставиме и во облик на пулцирачка и наизменична компонента според равенката (18):

$p(t) = UI\cos\varphi + UI\cos(2\omega t + 2\beta)\cos\varphi - UI\sin(2\omega t + 2\beta)\sin\varphi$

$p(t) = 16 + 16 \cdot \cos(2\omega t - 2\arctan 3/4) - 12 \cdot \sin(2\omega t - 2\arctan 3/4)$

б) Случај кога е R = 5 Ω и L=0 mH

Ако се разгледува потрошувач без индуктивност неговата импеднација ќе биде:

$\underline{Z} = R + jX = 5 + j0 = 5\ \Omega.$

Аголот на импедансата $\varphi = \arctan 0/5 = 0$, додека модулот е ист како во случајот под а).

Струјата која тече низ потрошувачот се пресметува на следниот начин:

$\underline{I} = \dfrac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \dfrac{10}{5} = 2\ \text{A}$

Ефективната вредност на струјата I=2A и е иста како во случајот под а), додека фазниот агол $\beta = 0$. Временската промена на струјата е следната:

$i(t) = 2\sqrt{2} \cdot \cos(100\pi \cdot t)$

Активната рективната и привидната моќност на потрошувачот се следните:

$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi = 20\,\text{W}, \qquad Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi = 0\,\text{var}, \qquad S = U \cdot I = 20\,\text{VA}.$

Според равенката (13) моменталната моќност го има следниот временски облик:

$p(t) = U \cdot I \cdot \cos\varphi + U \cdot I \cdot \cos(2\omega t + \theta + \beta)$, или

$p(t) = 20 + 20 \cdot \cos(2\omega t)\ \text{VA}$

Моменталната моќност можеме да ја претставиме и во облик на пулцирачка и наизменична компонента според равенката (18):

$p(t) = U \cdot I \cdot \cos\varphi + U \cdot I \cdot \cos(2\omega t + 2\beta) \cdot \cos\varphi - U \cdot I \cdot \cos(2\omega t + 2\beta) \cdot \sin\varphi$

$p(t) = 20 + 20 \cdot \cos(2\omega t)\ \text{W}.$

Можеме да забележиме дека во овој случај реактивната моќност е еднаква на 0 и не се јавува наизменична компонента кај моменталната моќност. Исто така се забележува дека иако ефективните вредности (големините) на напонот и струјата се исти како во случајот под а) активната моќност на потрошувачот во овај случај е поголема.

■ ■ ■

1.4. МОЌНОСТ ВО ТРИФАЗНИ КОЛА.

Моменталната моќност во едно трифазно коло може да се пресмета на следниот начин:

$$p_{3f}(t) = u_a(t) \cdot i_a(t) + u_b(t) \cdot i_b(t) + u_c(t) \cdot i_c(t)\,. \tag{22}$$

Со замена се добива:

$$\begin{aligned} p_{3f}(t) = {} & U_f\sqrt{2}\cos(\omega t+\theta)\cdot I_f\sqrt{2}\cos(\omega t+\beta)+ \\ & + U_f\sqrt{2}\cos(\omega t+\theta-2\pi/3)\cdot I_f\sqrt{2}\cos(\omega t+\beta-2\pi/3)+ \\ & + U_f\sqrt{2}\cos(\omega t+\theta+2\pi/3)\cdot I_f\sqrt{2}\cos(\omega t+\beta+2\pi/3). \end{aligned} \tag{23}$$

Со користење на идентитетот (9) се добива:

$$\begin{aligned} p_{3f}(t) = {} & U_f I_f\left[\cos\varphi+\cos(2\omega t+\theta+\beta)\right]+ \\ & + U_f I_f\left[\cos\varphi+\cos(2\omega t+\theta+\beta-2\pi/3)\right]+ \\ & + U_f I_f\left[\cos\varphi+\cos(2\omega t+\theta+\beta+2\pi/3)\right]= \\ = {} & 3U_f I_f\cos\varphi = 3P_f = \sqrt{3}UI\cos\varphi. \end{aligned} \tag{24}$$

Со анализа на последниот израз може да се заклучи дека трифазната моќност нема пулсирачки карактер, бидејќи трите собироци кои се менуваат со двојна фреквенција $2\omega t$ меѓусебно се поништуваат. Идентичен заклучок се добива и со користење на фазори. Фактот што моменталната вредност на трифазната моќност е константна е значајна предност на трифазните системи во однос на монофазните, кај кои моменталната моќност е пулсирачка. Ако на пример потрошувачот (приемникот на моќноста) е трифазен асинхрон мотор тоа значи дека и неговите брзина и момент ќе бидат константни, што е услов за мирна и стабилна работа.

Посебно значајна предност на трифазните системи е економичноста која н најлесно се илустрира преку споредување на еднофазниот (двожичен) вод со трифазниот симетричен вод без неутрален спроводник (кој не е ни потребен во услови на целосна симетрија). Во овој случај за исти пресеци на фазите спроводници потрошувачката на спроведен материјал е за 50% поголема кај трифазниот систем (3 спроводници наспроти 2 спроводника). Но моќноста што може да се пренесе преку трифаниот вод е трипати поголема, за исти напони и струи, така што економичноста на трифазната варијаната е двапати поголема од монофазната (ова се добива ако се пресмета пренесената моќност по спроводник).

Поради натамошно илустрирање на значајноста на факторот на моќност кај електричните мрежи на сликата 3 беше прикажан пренос на моќност од мрежата А кон мрежата В. Според прикажаната нотација со равенката (14) е дадена средната моќност која мрежата А и ја предава на мрежата В. Од равенката (14) се забележува дека средната моќност е исто што и активната моќност P, додека аголот φ е агол за кој струјата касни зад напонот што значи дека мрежата В е од индуктивен карактер.

Знакот на активната моќност е позитивен ако аголот φ се наоѓа во I или IV квадрант и тогаш активната моќност се пренесува од мрежата А кон В. Но кога аголот φ се наоѓа во II или III квадрант тогаш знакот на активната моќност ќе биде негативен (пренос на активна моќност од В кон А). Во согласност со вообичаениот начин на означување и во досегашното излагање со Q е означена реактивната моќност. Таа е позитивна (од А кон В) за агол φ во I и II квадрант, додека е негативна за φ во I и II квадрант.

Ако одредена мрежа, на пример мрежата B, е пасивна согласно Тевененовата теорема истата може да се претстави со една импеданција $\underline{Z}$:

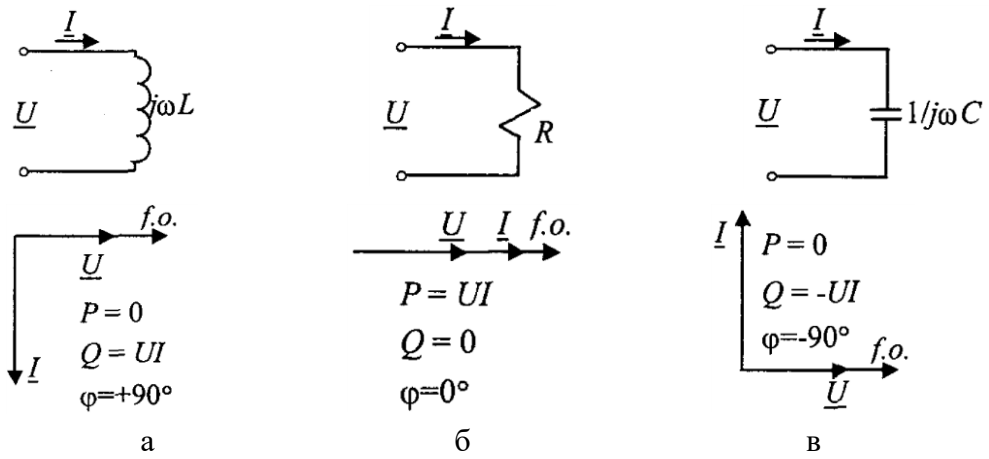
$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{U}{I} \cdot e^{j(\theta-\beta)} = \frac{U}{I} \cdot e^{j\varphi}, \tag{25}$$

односно:

$$\underline{Z} = Z \cdot e^{j\varphi}. \tag{26}$$

Се забележува дека аголот φ за вака дефинираната пасивна мрежа е всушност и агол на еквивалентната импеданција со која се што претставува мрежата.

Оваа импеданција може да се сфати како репрезент на едно потрошувачко подрачје. Карактеристични гранични случаи се оваа импеданција да биде чиста индуктивност, чиста активна отпорност и чиста капацитивност. Ова е илустрирано на сликата 7 заедно со аголот на импеднацијата и неговиот знак. На овој начин со следење на знакот на аголот φ можат да се следат и реактивните моќности. Така, на пример, ако аголот φ е позитивен тогаш станува збор за индуктивен потрошувач кој прима (апсорбира) реактивна моќност. Ако аголот φ е негативен тогаш станува збор за капацитивен потрошувач кој генерира реактивна моќност.



Слика 7. Гранични случаи за пасивниот потрошувач. φ = 0 и ±90°

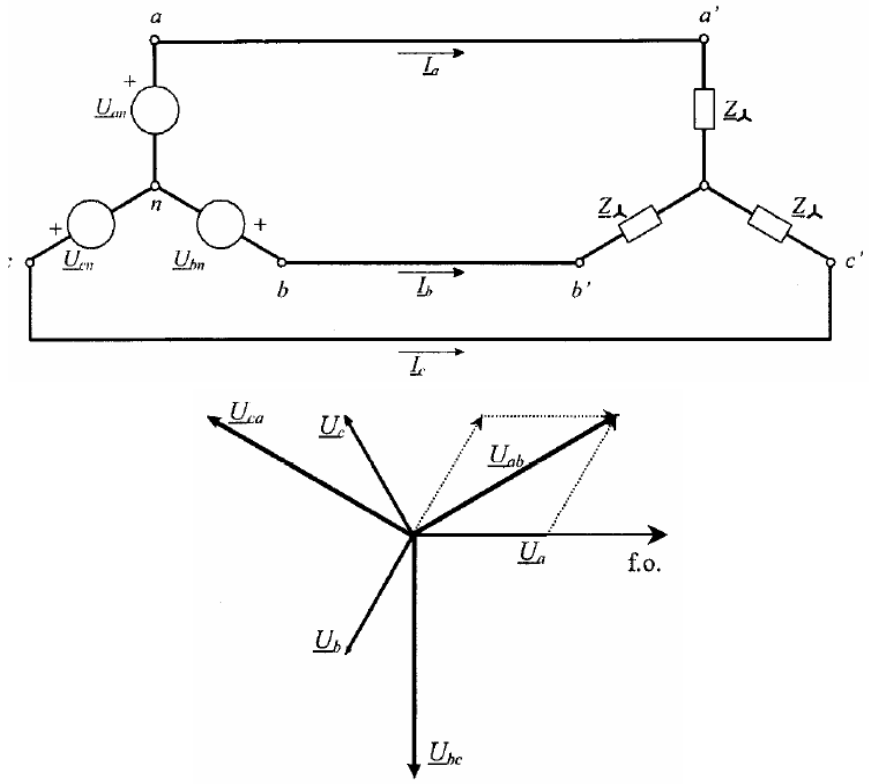
1.5. АНАЛИЗА НА ОСНОВНИТЕ СПРЕГИ НА СОЕДИНУВАЊЕ ВО ТРИФАЗНИТЕ СИСТЕМИ

Во сите наши анализи во иднина ќе сметаме дека станува збор за трифазни системи коишто работат во простопериодичен, симетричен и урамнотежен режим. Значи постои целосна симетрија на сите три фазни напони/струи во било кој елемент од системот.

Во такви услови е можно, наместо анализата да ја вршиме на трифазниот ситем таа да се спроведува на монофазната еквивалента (заменска) шема. Овде ќе ги прикажеме основните релации помеѓу фазните и меѓуфазните (линиски) величини што постојат кај трифазните елементи врзани во спрегите *ѕвезда* и *триаголник*.

Од посебен интерес се ситуациите со спрега и на изворот и на потрошувачот во ѕвезда (слика 8), и ситуацијата со спрега на изворот во ѕвезда и спрега на потрошувачот во триаголник (слика 9).

Во ситуацијата прикажана на слика 8 (со извор и потрошувач во ѕвезда) очигледно е дека и на страната на изворот и на страната на приемникот фазните вредности на струите се еднакви со линиските вредности на струите, додека линиските (меѓуфазните) напони се за $\sqrt{3}$ пати поголеми од фазните напони. Означувањето на меѓуфазните големини најлесно може да се изврши со користење на двојни индекси. Кај спрегата во ѕвезда заедничката точка се нарекува ѕвездиште, односно неутрална точка. Кај урамнотежените трифазни системи таа е на потенцијал нула. Фазорите $\underline{U}_{ab}$ $\underline{U}_{bc}$ $\underline{U}_{ca}$ се фазори на линиските напони чиишто модули и фазни агли се разликуваат од модулите и фазните агли на фазните напони $\underline{U}_{an}$ $\underline{U}_{bn}$ $\underline{U}_{cn}$. При означувањето на фазните големини може да се испушти вториот индекс или да се става само индекс f, односно да се користи ознаката U_f.



Слика 8.Трифазен систем со спрега на изворот и потрошувачот во ѕвезда и соодветен фазорски дијаграм

Фазорите на линиските напони можат да се претстават на следниот начин:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b; \quad \underline{U}_{bc} = \underline{U}_b - \underline{U}_c; \quad \underline{U}_{ca} = \underline{U}_c - \underline{U}_a. \tag{27}$$

За фазорите на фазните напони ќе имаме:

$$\underline{U}_a = U \cdot e^{j0°}; \quad \underline{U}_b = U \cdot e^{j-120°}; \quad \underline{U}_c = U \cdot e^{j120°}. \tag{28}$$

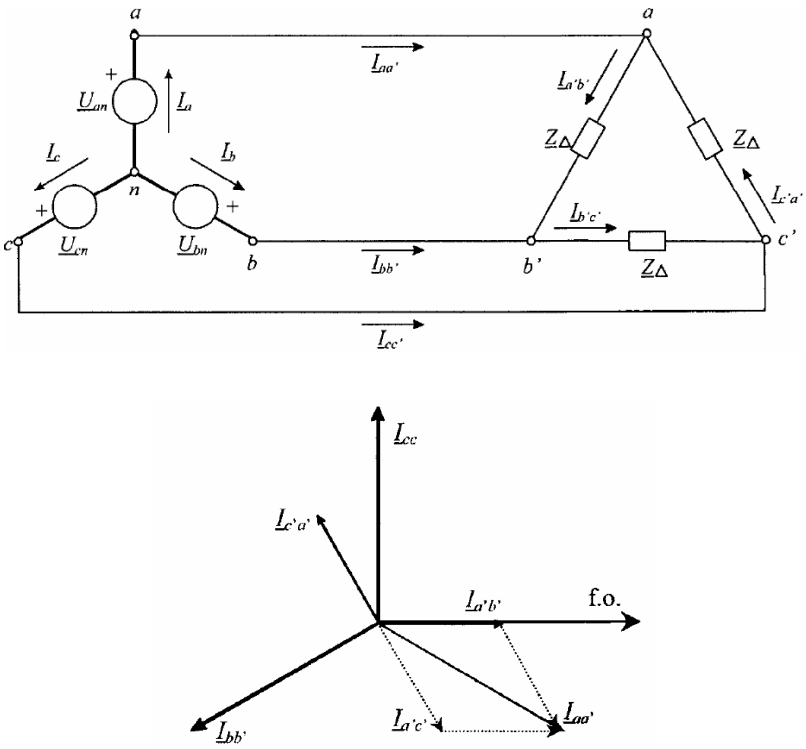
За фазорите на линиските напони ќе имаме:

$$\underline{U}_{ab} = \sqrt{3}U \cdot e^{j30°}; \quad \underline{U}_{bc} = \sqrt{3}U \cdot e^{j-90°}; \quad \underline{U}_{ca} = \sqrt{3}U \cdot e^{j150°}. \tag{29}$$

Во претходните две равенки со U е означена ефективаната вредност (модулот) на фазниот напон.

Равенките (29) означуваат дека фазорите на линиските напони, кои што се користат како пресметковни величини кај трифазните системи, формираат трифазен урамнотежен систем на напони со модули кои се за $\sqrt{3}$ пати поголеми од модулите на фазните напони.

Струјата што тече од точката *a* кон точката *a*’ (линиската струја) е еднаква на струјата која тече од *n* кон *a* (фазна струја), односно е еднаква на струјата на изворот. Истото важи и за струите во фазите *b* и *c*.



Слика 9.Трифазен систем со спрега на изворот во ѕвезда и потрошувачот во траголник и соодветен фазорски дијаграм

На сликата 9 е прикажан случајот кога трифазниот потрошувач има спрега на соединување триаголник. Во овој случај е очигледно дека на страната на потрошувачот фазните вредности на напоните се еднакви со линиските (меѓуфазните) вредности на напоните, додека линиските вредности на струите се за $\sqrt{3}$ пати поголеми од фазните струи. Фазорите на линиските струи за спрега во триаголник се добиваат со примена на I Кирхофов закон за точките *a’ b’* и *c’* од слика 9, при што се добива:

$$\underline{I}_{aa'} = \underline{I}_{a'b'} - \underline{I}_{c'a'}; \quad \underline{I}_{bb'} = \underline{I}_{b'c'} - \underline{I}_{a'b'}; \quad \underline{I}_{cc'} = \underline{I}_{c'a'} - \underline{I}_{b'c'}. \tag{30}$$

Бидејќи фазните струи го сочинуваат следниот трифазен систем:

$$\underline{I}_{a'b'} = I \cdot e^{j0°}; \quad \underline{I}_{b'c'} = I \cdot e^{-j120°}; \quad \underline{I}_{c'a'} = I \cdot e^{j120°}. \tag{31}$$

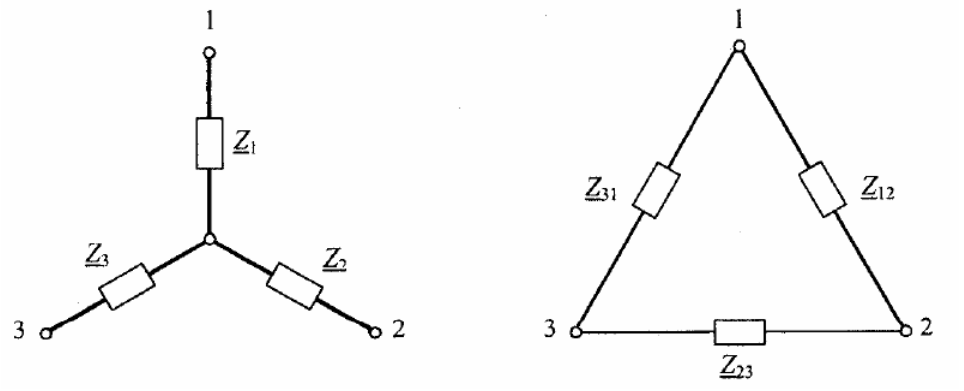
за фазорите на линиските струи ќе се добие:

$$\underline{I}_{aa'} = \sqrt{3} \cdot I \cdot e^{-j30°}; \quad \underline{I}_{bb'} = \sqrt{3} \cdot I \cdot e^{-j150°}; \quad \underline{I}_{cc'} = \sqrt{3} \cdot I \cdot e^{j90°}. \tag{32}$$

Во претходните релации со *I* е означена ефективната вредност (модулот) на фазорот на фазната струја. Равенките (32) се илустрирани на сликата 9 и покажуваат дека фазорите на линиските струи формираат трифазен урамнотежен систем со модули кои што се за $\sqrt{3}$ пати поголеми од модулите на фазните струи при спрега на потрошувачот во триаголник. Како и во претходниот случај фазните агли на линиските големини не се од посебен интерес.

Во пресметките на електричните мрежи и системи често се користат трансфигурации од типот *ѕвезда – триаголник* (или обратно) и затоа од интерес е да се покаже основниот концепт.

Ако се тргне од сликата 10, за три познати краеви (точки) во некое коло кај кои што се поврзани три импеданции спрегнати во ѕвезда, може да се најде еквивалент со три импеданции поврзани во триаголник, без да се изврши промена на состојбата во останатиот дел од колото. Ова важи за сите линеарни кола. Се покажува дека постои и обратна логика, т.е. можна е и трансформација *триаголник – ѕвезда*.



Слика 10.Трансфигурација триаголник – ѕвезда

При трансфигурација на триаголник во ѕвезда импеданциите на ѕвездата можат да се пресметаат следејќи го принципот на следната општа формула:

$$Z_{\text{ѕвездата}} = \frac{\text{производ на импеданциите од посматраниот агол на триаг.}}{\text{збир на сите импеданции на триаголникот}} \tag{33}$$

<u>Пример:</u>

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{Z}_{12}\underline{Z}_{31}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31}} \tag{34}$$

Кога се врши трансфигурација ѕвезда во триаголник имаме:

Општа формула:

$$Z_{\text{триаголник}} = \frac{\text{сума од производите на сите парови импеданции}}{\text{импеданцијата наспроти двата посматрани краја}} \tag{35}$$

<u>Пример:</u>

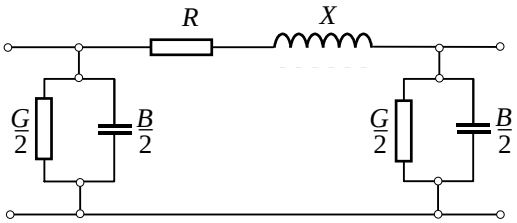
$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} = \frac{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \underline{Z}_2\underline{Z}_3 + \underline{Z}_3\underline{Z}_1}{\underline{Z}_3} \tag{36}$$

II. ЗАДАЧИ ДО ОБЛАСТА НА ПАРАМЕТРИ НА НАДЗЕМНИТЕ ВОДОВИ

2.1. ЗАМЕНСКИ ШЕМИ НА НАДЗЕМНИТЕ ВОДОВИ

Водовите се елементи со распределени параметри. Тие се наполно дефинирани со својата должина l (km) и со своите подолжни (единечни) параметри, а тоа се:

- r (Ω/km, фаза) подолжна активна отпорност;
- x (Ω/km, фаза) подолжна индуктивна отпорност;
- g (Ω/km, фаза) подолжна активна спроводност (подолжна кондуктанса);
- b (Ω/km, фаза) подолжна капацитивна спроводност (подолжна сусцептанса).



Слика 1. π – заменска шема на вод

Заменската шема на водот е најчесто еден π−четворокрајник, како што е тоа прикажано на сликата 1. Со оваа шема се претставуваат електроенергетските водови при анализите на стационарните и симетрични режими во електричните мрежи.

За надземни водови со должина до 250 km и за кабли со должина до 50 km, концентрираните параметри R, X, G и B во заменската шема се пресметуваат едноставно со помош на следните изрази:

$$R = r \cdot l\,; \quad X = x \cdot l\,; \quad G = g \cdot l\,; \quad B = b \cdot l \tag{1}$$

За водови, подолги од наведените, соодветните заменски шеми претставуваат низа од четворополи, или пак доколку сакаме да ги претставиме само со еден четворопол, неговите параметри ќе треба да бидат корегирани со помош на соодветните корекциони фактори k_r , k_x и k_b , како што следи:

$$\begin{aligned}
&k_r = 1 - \frac{x \cdot b \cdot l^2}{3}\,; \quad R = k_r \cdot r \cdot l \\
&k_x = 1 - \frac{x \cdot b \cdot l^2}{6} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{x^2}\right) \approx 1 - \frac{x \cdot b \cdot l^2}{6}; \quad X = k_x \cdot x \cdot l \\
&k_b = 1 + \frac{x \cdot b \cdot l^2}{12}\,; \quad B = k_b \cdot b \cdot l \\
&G = g \cdot l\,.
\end{aligned} \tag{2}$$

Корекционите фактори k_r , k_x и k_b се познати под името „*кенелиеви коефициенти*“ (*Kennelly*).

2.2. ПОДОЛЖНИ ПАРАМЕТРИ НА НАДЗЕМНИТЕ ВОДОВИ

Подолжните параметри на надземните водови *r, x, g* и *b* се пресметуваат преку следните изрази:

$$r = \frac{1000}{\kappa \cdot A}, \quad \frac{\Omega}{\text{km}}. \tag{3}$$

Во изразот (3) со *A* е означен вистинскиот пресек на спроводникот (а не неговиот номинален пресек), изразен во mm^2. Кај комбинираните `Al/^` јажиња под *A* се подразбира само пресекот на алуминиумовиот дел бидејќи практично сета струја тече низ него.

Величината κ (S·m/mm^2) која исто така фигурира во (3) е специфичната спроводност на материјалот од кој се направени спроводниците.

За спроводници изработени од чист алуминиум (*Al)* или бакар (*Cu*), специфичната спроводност за еднонасочна струја и при температура од 20°C ќе биде: κ_{Al} =34,8 (S·m/mm^2) и κ_{Cu} =56 (S·m/mm^2). Меѓутоа, активната отпорност на водот е секогаш поголема од отпорноста за еднонасочна струја заради скин–ефектот, ефектот на близина (особено кај каблите), ефектот на појажување, присуството на примесите на останати метали во спроводниците и др. Притоа поради појажувањето на спроводниците патот на струјата е за 1 до 2% подолг од физичката должина на јажето додека зголемената температура на спроводниците, која заради џуловите загуби е секогаш повисока за десетина па и повеќе степени во однос на амбиентната температура, доведува до зголемување на активната отпорност за околу 0,4% за секој степен над референтната температура од 20°C ($\alpha_{Cu} \approx \alpha_{Al} \approx 0{,}004$ 1/°C). Затоа при пресметувањето на подолжната активна отпорност *r*, најчесто усвојуваме κ_{Al} = 32 S·m/mm^2 (за спроводници и јажиња од Al односно Al/^) и κ_{Cu} =54 Sm/mm^2 (за спроводници од бакар).

Според тоа, за приближна пресметка на подолжната активна отпорност на хомогени *Al*–јажиња или пак комбинирани `Al/^` јажиња во работни услови, може да се користи следната формула:

$$r = \frac{1000}{32 \cdot A} = \frac{31{,}25}{A} \quad \frac{\Omega}{\text{km, фаза}}, \tag{4a}$$

додека за спроводници од бакар (Cu) формулата:

$$r = \frac{1000}{54 \cdot A} = \frac{18{,}52}{A} \quad \frac{\Omega}{\text{km, фаза}}. \tag{4b}$$

Погонската индуктивна отпорност *x* кај водовите се пресметува со изразот:

$$x = 0{,}1445 \cdot \log \frac{D_m}{D_s} \quad \frac{\Omega}{\text{km, фаза}} \tag{5}$$

каде што D_m е т.н. *D_m средно–геометриско растојание* помеѓу фазните спроводници. Ова растојание се пресметува со формулата:

$$D_m = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{AC} \cdot D_{BC}}, \tag{6}$$

Величината D_S што фигурира во релацијата (4) е т.н. *сопствено средно–геометриско растојание* (или еквивалентен полупречник) на спроводникот, Тоа зависи од неговиот вистински (геометриски) полупречник ($r_p = d_p/2$) и од неговата изведба. За масивни спроводници и за хомогени *Al* и *Cu* јажиња, имаме:

$$D_S = e^{-0,25} \cdot r_p = 0,7788 \cdot r_p \,, \tag{7}$$

додека за комбинирани Al/^ јажиња тоа е секогаш нешто поголемо. Така, на пример, за Al/^ јажиња со однос на пресеците ε = 6:1, којшто се среќава најчесто во нашите мрежи кај надземните водови, сопственото средно–геометриско растојание приближно изнесува:

$$D_S = r'_p = 0,81 \cdot r_p \,. \tag{8}$$

Кај водовите со спроводници во сноп (повеќе спроводници по фаза) сопственото средно–геометриско растојание на снопот се пресметува со формулата:

$$D_S = \sqrt[n]{r_p \cdot \prod_{i=2}^{n} a_{1i}} = \sqrt[n]{r_p \cdot a_{12} \cdot a_{13} \; . \; . \; . \cdot a_{1n}} \tag{9}$$

Во неа со n е означен бројот на спроводниците во снопот, а со a_{1i} растојанието помеѓу првиот и i–тиот спроводник во снопот. Во случајот кога соседните спроводници во снопот се разместени во темињата на рамностран n–тоаголник така што секои два соседни спроводника се меѓусебе подеднакво оддалечени, на растојание a, од формулата (9) следува:

$D_S = \sqrt[2]{r_p \cdot a}$ за $n = 2$ спроводника по фаза;

$D_S = \sqrt[3]{r_p \cdot a^2}$ за $n = 3$ спроводници по фаза;

$D_S = \sqrt[4]{\sqrt{2} \cdot r_p \cdot a^3}$ за $n = 4$ спроводници по фаза.

Во овој случај (надземен вод со спроводници во сноп), подолжната индуктивна отпорност на водот x ќе се пресметува по формулата:

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{D_S} + \frac{0,0157}{n} \quad \frac{\Omega}{\text{km, фаза}} \,. \tag{10}$$

Подолжната реактанција x на водовите е прилично константна и слабо зависи од пресекот на спроводниците. За надземни водови, таа најчесто се движи во границите:

$x = 0,33 - 0,42$ (Ω / km, фаза),

а кај каблите:

$x = 0,06 - 0,12$ (Ω/km, фаза).

Подолжната активна одводност g кај водовите не е константна величина и таа зависи на сложен начин од погонскиот напон U, од процентот на влага и нечистотии во воздухот, од рапавоста на површината од спроводниците и др. (ефект на корона). Кај нисконапонските (НН), среднонапонските (СН) и високонапонските (ВН) водови, со номинален напон до 110 kV вклучително, загубите поради короната се незначителни, се разбира доколку дијаметарот на спроводниците не е сосема мал. Затоа за нив, најчесто ги занемаруваме овие загуби, т.е. земаме $g = 0$.

Кај водовите со највисок напон (кај нас 380 kV) загубите поради корона се исто така занемарливи (само неколку kW/km) во услови на убаво време. Но при лошо време тие можат да бидат и поголеми од џуловите загуби во проводниците, па нив не смееме да ги занемаруваме. Во таквите случаи, кога станува збор за лошо и влажно време, пропратено со интензивна корона, при пресметките најчесто усвојуваме

$g = 0,1 \cdot 10^{-6}$ S/km, фаза = 0,1 μS / km, фаза.

Подолжната капацитивна одводност b се пресметува со формулата:

$$b = \frac{7{,}58 \cdot 10^{-6}}{\log(D_m / r_p)} \quad \frac{S}{\text{km, фаза}}. \tag{11}$$

Формулата (11) важи за надземни водови со еден спроводник по фаза. Доколку се работи за вод со проводници во сноп, во последниот израз наместо вистинскиот радиус на спроводниците r_p се става еквивалентниот радиус D_S , кој се пресметува на веќе познатиот начин, со помош на формулата (9).

Параметарот b, слично како и параметарот x, слабо зависи од пресекот на спроводниците и е прилично константен. Кај надземните водови со СН и ВН ($U_n \leq 220$ kV) тој изнесува приближно:

$b = 2{,}6 - 2{,}8\ \mu\text{S / km, фаза}$,

додека кај водовите со највисок напон (кај нас $U_n = 380$ kV) тој изнесува приближно:

$b = 3{,}3\ \mu\text{S / km, фаза.}$

Меѓу параметрите x и b кај надземните водови постои секогаш следната релација:

$$b \cdot x = \frac{\omega^2}{c_0^2} = \frac{(2\pi f)^2}{c_0^2} = \frac{314{,}16^2}{300000^2} \approx 1{,}1 \cdot 10^{-6}. \tag{12}$$

Во неа $\omega = 2\pi f$ е кружната фреквенција, додека c_0 претставува брзина на простирање на светлината во воздух (вакуум).

Капацитивната одводност по единица должина b кај кабелските водови е секогаш за неколку десетици пати поголема од истата кај надземните водови. Таа зависи од димензиите и изведбата на кабелот а зависи и од диелектричната константа ε на изолацијата. Затоа, таа кај каблите потешко може да се пресмета, туку нејзината вредност се добива (наоѓа) во разни каталози како готов податок, или пак се добива со мерење.

Кај надземните водови со низок и среден напон ($U_n \leq 35$ kV) и кај каблите со номинален напон до 20 kV ($U_n \leq 20$ kV), капацитивните струи I_C, односно моќности Q_C, генерирани од погонскиот капецитет на водот се занемарливо мали во однос на реактивните струи / моќности на потрошувачите. Затоа кај овие водови капацитивната одводност, како малку влијателна, најчесто не се зема предвид при пресметките, па на тој начин овие водови во заменските шеми се претставуваат со упростената I – еквивалентна шема, без попречни гранки.

2.3. ЗАДАЧИ

Задача 1. На сликата 1.1 е прикажана главата од еден 10 kV армирано–бетонски столб. Како спроводници се користат комбинирани јажиња `Al/^` 50/8 според стандардот МКС.Н.Ц1.351, за кои е познато (видете ја табелата П.2 во прилогот):

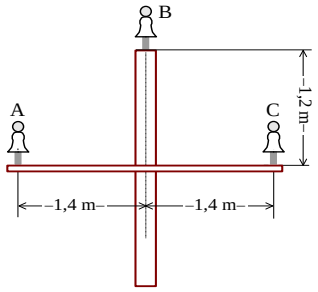
– однос на пресеците $\varepsilon = A_{Al}/A_{Fe} = 48{,}3/8{,}0 \cong 6{:}1$;

– надворешен пречник на јажето $d_p = 2r_p = 9{,}6$ mm;

– трајно дозволена струја $I_d = 170$ A;

– активна отпорност по единица должина на температура $\theta = 20^{o}$C $r_{20} = 0{,}595\ \Omega$/km.

Да се определат подолжните параметри на водот r , x, g и b.



Слика 1.1. Изглед на главата на столб од еден 10 kV надземен вод

Решение:

Најнапред ќе го пресметаме сопственото средногеометриско растојание на фазните спроводници D_S :

$r_p = d_p/2 = 4{,}8$ mm ; $D_S = r'_p = 0{,}81 \cdot r_p = 3{,}89$ mm.

Средно-геометриското растојание на фазните спроводници D_m , согласно сликата 1.1, ќе биде:

$$D_{AB} = \sqrt{1{,}4^2 + 1{,}2^2} = 1{,}84 \text{ m}; \quad D_{AC} = 1{,}4 + 1{,}4 = 2{,}80 \text{ m}; \quad D_{BC} = \sqrt{1{,}4^2 + 1{,}2^2} = 1{,}84 \text{ m}.$$

$$D_m = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{AC} \cdot D_{BC}} = \sqrt[3]{1{,}84 \cdot 2{,}8 \cdot 1{,}84} = 2{,}12 \text{ m}.$$

Погонската активна отпорност по единици должина на јажето r_{20} се однесува на случајот кога се работи за еднонасочна струја и кога температурата на спроводникот изнесува 20°C. Меѓутоа, нас обично нè интересира вредноста на активната отпорност за наизменична струја ($f = 50$ Hz) на работната температура која се разликува од споменатите 20°C. Во таквите случаи обично се користат приближни формули каков што е, на пример, изразот (4а). Според тоа, за активната отпорност по единица должина r ќе имаме:

$$r = \frac{1000}{\kappa \cdot A_{Al}} = \frac{1000}{32 \cdot 48{,}3} = 0{,}647\ \frac{\Omega}{\text{km}}.$$

Индуктивната отпорност (реактанцијата) x по единица должина на разгледуваниот вод ќе ја пресметаме со помош на формулата (5);

$$x = 0{,}1445 \cdot \log \frac{D_m}{D_s} = 0{,}1445 \cdot \log \frac{2{,}12}{3{,}89 \cdot 10^{-3}} = 0{,}395\ \frac{\Omega}{\text{km}}.$$

Капацитивната спроводност (сусцептанцијата) по единица должина на водот b ќе биде:

$$b = \frac{7{,}58 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{D_m}{r_p}} = \frac{7{,}58 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{2{,}12}{4{,}9 \cdot 10^{-3}}} = 2{,}875 \cdot 10^{-6}\ \frac{\text{S}}{\text{km}}.$$

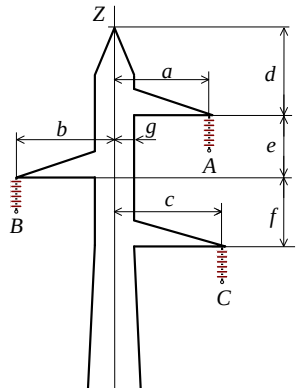
Загубите поради корона кај надземните водови со низок и среден напон ($U_n < 110$ kV) се секогаш занемарливи, поради што може да се усвои:

$g \approx 0.$

■ ■ ■

Задача 2. На сликата 2.1 е прикажана главата на челично–решеткаст столб, наменет за водови со номинален напон 110 kV. Одделните величини од сликата ги имаат следните вредности: a = 2,6 m; b = 3,0 m; c = 3,5 m; d = 3,2 m; e = 2,0 m; f = 2,0 m; g= 0,6 m.

Да се определат подолжните параметри r, x и b на водот, неговата природна моќност P_N и неговата гранична термичка моќност S_d, за различни пресеци на спроводниците. Притоа, како спроводници се користат комбинирани алучел јажиња (т.е. комбинацијата алуминиум–челик), со номинален пресек од `Al/^` 95/15 до `Al/^` 360/60 mm^2.



Слика 2.1. Глава на 110 kV челично-решеткаст столб

Решение:

Подолжните параметри (по фаза) на водот r, x и b се пресметуваат со познатите формули:

$$r = \frac{1000}{\kappa \cdot A} = \frac{1000}{32 \cdot A} = \frac{31,25}{A} \ \frac{\Omega}{\text{km}};$$

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{D_s} = 0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{0,81 \cdot r_p} \ \frac{\Omega}{\text{km}};$$

$$b = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{D_m}{r_p}} \ \frac{\text{S}}{\text{km}}.$$

каде што е:

$$D_m = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{AC} \cdot D_{BC}} \quad \text{и} \quad D_S = 0,81 \cdot r_p.$$

Од сликата (2.1) добиваме:

$$D_{AB} = \sqrt{(3+2,6)^2 + 2^2} = 5,95 \text{ m};$$

$$D_{AC} = \sqrt{(3,5-2,6)^2 + (2+2)^2} = 4,1 \text{ m};$$

$$D_{BC} = \sqrt{(3+3,5)^2 + 2^2} = 6,8 \text{ m}.$$

Според тоа, за средногеометриското растојание D_m ќе добиеме:

$$D_m = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{AC} \cdot D_{BC}} = \sqrt[3]{5,95 \cdot 4,1 \cdot 6,8} = 5,5 \text{ m}.$$

Граничната термичка привидна моќност на далекуводот S_d зависи од трајно дозволената струја I_d на спроводниците и се пресметува со формулата:

$$S_d = \sqrt{3} \cdot U_\text{n} \cdot I_d.$$

Врз основа на податоците од табелата 2.5 од учебникот [1], односно табелата П.2 од прилогот, во која се дадени карактеристиките на комбинираните `Al/^` јажиња, со помош на горе прикажаните формули, добиени се подолжните параметри на водот, за разни номинални пресеци на проводниците. Податоците за активната отпорност r не се преземени од споме-

натата табела 2.5 туку се пресметувани со помош на релацијата (4). Резултатите од пресметките се прикажани во табелата 2.1.

Табела 2.1. Карактеристики на водот во за разни пресеци на спроводниците

Номинален пресек на спроводниците mm²	95/15	120/20	150/25	185/30	210/35	240/40	360/60
A (mm²)	94,4	121,6	148,9	183,8	209,1	243,0	360,2
r_p (mm)	6,80	7,75	8,55	9,50	10,15	10,95	13,30
r (Ω/km)	0,331	0,257	0,210	0,170	0,149	0,129	0,087
x (Ω/km)	0,433	0,425	0,419	0,412	0,408	0,404	0,392
b (μS/km)	2,61	2,66	2,70	2,74	2,77	2,81	2,90
x / r	1,31	1,65	2,00	2,42	2,74	3,13	4,51
Z_V (Ω)	407	400	394	388	384	379	368
P_N (MW)	29,7	30,3	30,7	31,2	31,5	31,9	32,9
I_d (A)	290	345	400	455	490	530	675
S_d (MVA)	55,3	65,7	76,2	86,7	93,4	101,0	129,0

■ ■ ■

Задача 3. Да се пресмета погонската бранова импеданција и природната моќност на 110 kV надземен вод, чии спроводници се јажиња `Al/^` 240/40 mm². Средногеометриското растојание меѓу фазните спроводници на главата на столбот изнесува D_m = 5,5 m (видете ја претходната задача).

Колкава реактивна моќност Q_C генерира овој вод во режимот на празен од при номинален напон ако неговата должина изнесува l = 100 km.

Решение:

Погонската бранова импеданција на водот ќе биде:

$$Z_V = \sqrt{\frac{x}{b}} = \sqrt{\frac{0,404}{2,806 \cdot 10^{-6}}} = 379,2\ \Omega\ ,$$

Кога на крајот од водот е приклучен чисто активен потрошувач со импеданција Z_P=Z_V, тогаш велиме дека низ водот се пренесува природна моќност. При напон $U_2 = U_n$, природната моќност P_N што му се испорачува на потрошувачот ќе биде:

$$P_N = \frac{U_n^2}{Z_V} = \frac{110^2}{379,2} = 31,911 \text{ MW}.$$

На оваа моќност и соодветствува "природна струја" I_N. Нејзината вредност ќе биде:

$$I_2 = I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_2} = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{31,911}{\sqrt{3} \cdot 110} = 0,1675 \text{ kA} \equiv 167,5 \text{ A}.$$

Подоцна ќе видиме дека и струјата I_1 на почетокот од водот ќе биде приближно иста, а исто така и напонот U_1 на почетокот од водот многу малку ќе се разликува од напонот U_2. Забележуваме дека во режимот на пренос на природна моќност водот ќе биде струјно

оптоварен само со 32% од својата трајно дозволената струја I_d = 530 A, често пати нарекувана „термичка струја“.

Во режимот на празен ôд и при работа со номинален напон, реактивната моќност што ја генерира разгледуваниот вод ќе изнесува:

$$Q_C = b \cdot l \cdot U^2 = B \cdot U^2,$$

или

$$Q_C = 2{,}81 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 110^2 = 3{,}395 \text{ Mvar}.$$

Капацитивната струја I_C што ќе тече на почетокот од водот ќе биде:

$$I_C = B \cdot U_f = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \cdot U};$$

$$I_C = \frac{2{,}806}{\sqrt{3} \cdot 110} = 0{,}01782 \text{ kA} \equiv 17{,}82 \text{ A}.$$

Значи дури и во режимот на празен од, кога на крајот од водот нема приклучено потрошувач, на почетокот од водот ќе тече чисто капацитивна струја од околу 18 A. Таа струја се должи на постоењето на погонскиот капацитет на водот.

■ ■ ■

Задача 4. На сликата 4.1 е прикажан носечки столб тип „Y“ (наречен уште и тип „делта“ или тип „мачка“) од еден 380 kV далекувод. Познати се следните димензии на главата од столбот:

a = 20,4 m; b = 12,3 m; c = 3,4 m;

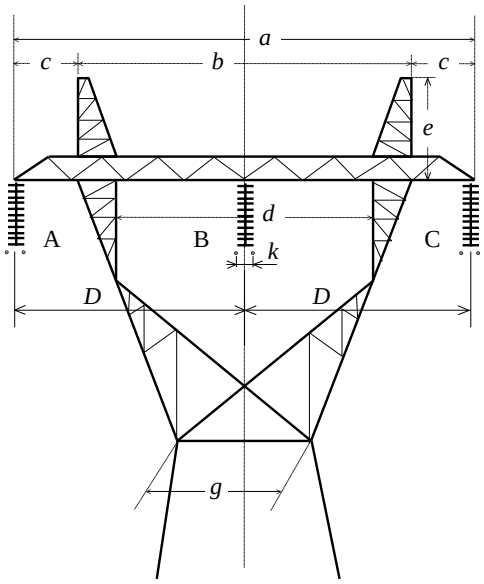
d = 7,24 m; e = 3,5 m; g = 2,45 m.

Во секоја фаза од водот има по два спроводника од типот Al/^ 490/65 mm^2 (спроводници во сноп), поставени на меѓусебно растојание k = 40 cm. Спроводниците (според табелата P.2 од Прилогот) ги имаат следните карактеристики:

– вистински пресек 490,3/63,6 mm^2,

– пречник $d_p = 2 \cdot r_p$ = 30,6 mm.

Да се одредат подолжните параметри $\underline{z}$ и $\underline{y}$ на дадениот вод и да се нацрта неговата π–заменска шема. Должината на далекуводот изнесува l = 400 km.



Слика 4.1. Изглед и димензии на главата од еден 380 kV столб

Решение:

Врз основа на прикажана диспозиција на проводниците на главата од столбот можеме да го одредиме средно–геометриското растојание D_m на фазните спроводници.

$$D_m = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{AC} \cdot D_{BC}} = \sqrt[3]{D \cdot 2D \cdot D} = 1{,}26 \cdot D = 1{,}2 \cdot 10{,}2 = 12{,}852 \text{ m}.$$

Во дадениот случај сопственото средногеометриско растојание D_S на спроводниците во снопот ќе биде:

$$D_s = \sqrt{r_p \cdot k} = \sqrt{(d_p/2)\cdot k} = \sqrt{(30,6/2)\cdot 400} = 78,23 \text{ mm}.$$

Сега можеме да ги одредиме подолжните параметри на водот.

Активната отпорност по фаза r ќе биде:

$$r = \frac{1000}{n\cdot\kappa\cdot S} = \frac{1000}{2\cdot 32\cdot 490,3} = 0,0318\ ;\ \ 0,032\ \frac{\Omega}{\text{km}}.$$

Реактивната отпорност x ќе биде:

$$x = 0,1445\cdot\log\frac{D_m}{D_S} + \frac{0,0157}{n};$$

$$x = 0,1445\cdot\log\frac{1285}{7,823} + \frac{0,0157}{2} = 0,328\ \frac{\Omega}{\text{km}}.$$

За активната одводност g ќе усвоиме вредност што одговара на екстремно неповолни временски услови:

$g = 0,1\cdot 10^{-6}$ S/km ,

додека реактивната одводност b ќе изнесува:

$$b = \frac{7,58\cdot 10^{-6}}{\log(D_m/D_S)} = \frac{7,58\cdot 10^{-6}}{\log(12,852\cdot 10^3/78,23)} = 3,421\ \frac{\mu\text{S}}{\text{km}}.$$

Според тоа, подолжните параметри на водот ќе бидат:

$$\underline{z} = (r + jx) = (0,032 + j0,328)\ \Omega/\text{km};$$

$$\underline{y} = (g + jb) = (0,1 + j3,421)\ \mu\text{S/km}\cdot$$

Бидејќи се работи за релативно долг вод (l > 250 km), неговата заменска шема ќе биде составена од повеќе каскадно споени четворополи (на пример два четворопола, од кои секој репрезентира половина од водот). Доколку, пак, сакаме водот да го претставиме само со еден четворопол, тогаш неговите параметри ќе бидат пресметани на следниот начин:

$$b\cdot x\cdot l^2 = 3,421\cdot 10^{-6}\cdot 0,328\cdot 400^2 = 0,1795341;$$

$$k_r = 1 - \frac{b\cdot x\cdot l^2}{3} = 0,940;\quad R_P = k_r\cdot r\cdot l = 0,94\cdot 0,032\cdot 400 = 12,034\ \Omega,$$

$$k_x\ ;\ 1 - \frac{b\cdot x\cdot l^2}{6} = 0,970;\quad X_P = k_x\cdot x\cdot l = 0,97\cdot 0,328\cdot 400 = 127,274\ \Omega,$$

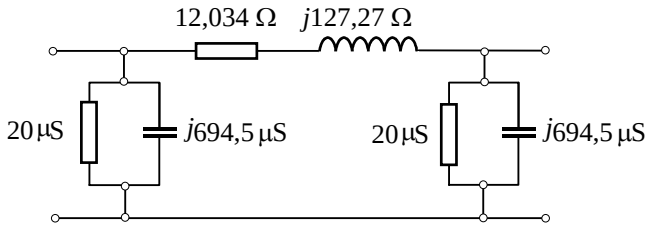
$$k_b = 1 + \frac{b\cdot x\cdot l^2}{12} = 1,015;\quad B_P = k_b\cdot b\cdot l = 1,015\cdot 3,421\cdot 10^{-6}\cdot 400 = 1389\ \mu\text{S},$$

$$G_P = g\cdot l = 0,1\cdot 10^{-6}\cdot 400 = 40\cdot 10^{-6}\ \text{S} = 40\ \mu\text{S}.$$

Значи, за параметрите $\underline{Z}_P$ и $\underline{Y}_P$ на уточнетата π–заменска шема ќе добиеме:

$$\underline{Z}_P = (R_P + jX_P) = (12,034 + j127,27)\ \Omega;\quad Y_P = (G_P + jB_P) = (20 + j694,5)\ \mu\text{S}.$$

Заменската π − шема на водот е прикажана на сликата 4.2.



Слика 4.2. π – заменска шема на водот од задачата 4

■ ■ ■

Задача 5. За водот чии столбови се изведени според скицата од задачата бр. 4 да се пресметаат подолжните параметри $\underline{z}$ и $\underline{y}$ за следните два случаја:

а) во секоја фаза од водот има по три спроводници во сноп од типот `Al/^` 490/65 mm^2, разместени во темињата од рамностран триаголник со страна k = 40 cm;

б) во секоја фаза од водот има по четири спроводници во сноп од типот `Al/^` 490/65 mm^2, разместени во темињата од еден квадрат со страна k = 40 cm.

Решение:

a) $n = 3$: $\underline{z} = (r + jx) = (0{,}021 + j0{,}291)$ Ω/km ; $\underline{y} = (g + jb) = (0{,}1 + j3{,}83)$ μS/km.

b) $n = 4$: $\underline{z} = (r + jx) = (0{,}016 + j0{,}267)$ Ω/km ; $\underline{y} = (g + jb) = (0{,}1 + j4{,}16)$ μS/km.

■ ■ ■

III. ИЗБОР И ДИМЕНЗИОНИРАЊЕ НА КАБЕЛСКИ ВОДОВИ

3.1. ВОВЕДНО ИЗЛАГАЊЕ

Електроенегретските водови можат да бидат изведени како *надземни* и *кабелски*. Во претходниот дел од оваа збирка беа третирани надземните водови, а овде ќе стане збор и за електроенергетските кабли.

Она што важи за надземните водови во поглед на заменските шеми, ќе важи и за кабелските водови. Што се однесува до подолжните параметри на кабелските водови, тие не се пресметуваат туку се добиваат како готови (измерени или пресметани) од страна на самиот производител, или пак се отчитуваат од разни прирачници. Во прилогот се дадени некои од поважните параметри на најчесто употребуваните електроенергетски кабли.

Специфичноста на кабелските водови (покрај специфичната конструкција и значително повисоката цена) е определувањето на нивната струјна оптоварливост, односно вредноста на нивното *трајно дозволено струјно оптоварување* (ТДСО) I_d. Вредноста на ТДСО на еден кабел во голема мера зависи од условите и начинот на неговото полагање како и од температурата на амбиентот (почвата или воздухот). Во основа постојат два начина на нивното полагање: *во земја* и *во воздух*. На сликите 1а и 1б се прикажани начини на полагање на каблите во земја, додека на сликите 2 ѝ 5 се прикажани најчесто употребуваните начини на каблите поставени во воздух.

За обата начина на полагање на кабелот се дефинираат т.н. „*номинални услови на полагање*“. Кога се работи за кабли положени во земја, под номинални услови на полагање се подразбираат следните услови:

1) кабелот е сам (осамен) во ровот, закопан на длабочина h = 70 cm,
2) температурата на амбиентот (земјата изнесува θ_a = 20°C;
3) специфичната топлинска отпорност на тлото изнесува ρ = 100°C·cm/W;
4) кабелот е оптоварен со т.н. дистрибутивен товар, т.е. режимот на максимално оптоварување трае најдолго 10 часови дневно.

За каблите положени во воздух под номинални услови на полагање се подразбираат следните услови:

1) кабелот е сам (осамен) и не е изложен на директно сончево зрачење;
2) температурата на воздухот изнесува θ_a = 30°C.

За секој тип кабел е позната „табличната“ вредност I_{dT} на ТДСО кога е тој поставен во номинални услови на полагање. Таа обично се добива по експериментален пат. Кога условите на полагање на кабелот (каблите) се разликуваат од номиналните услови, тогаш е потребно ТДСО на кабелот, отчитано од соодветната табела, да се корегира на следниот начин:

$I_d = k_\theta \cdot k_P \cdot k_\rho \cdot I_{dT} = k_Z \cdot I_{dT}$ – за кабли положени во земја и

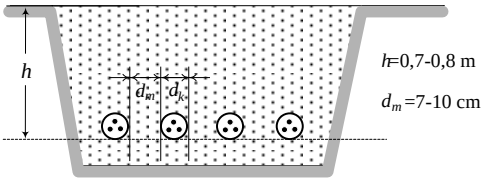
$I_d = k_\theta \cdot k_P \cdot I_{dT} = k_V \cdot I_{dT}$ – за кабли положени во воздух.

Во табелата 1 се прикажни корекционите фактори k_θ со помош на кои се уважува потребната корекција на ТДСО на кабелот поставен во земја, кога температурата на амбиентот се разликува од номиналната (20°C). Табелата 2 се однесува на кабли поставени во воздух, за температура на амбиентот (воздухот) 30°C.

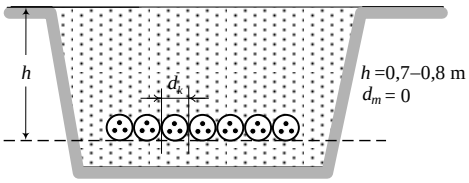
Табелата 3 се однесува на кабли поставени во воздух. Во неа се прикажни корекционите фактори k_P со помош на кои се уважува корекцијата на ТДСО заради начинот на полагање на каблите и нивниот број.

Табелата 4 се однесува на кабли поставени во земја и во неа се прикажни корекционите фактори k_P со помош на кои се уважува корекцијата на ТДСО заради начинот на полагање на кабли и нивниот број.

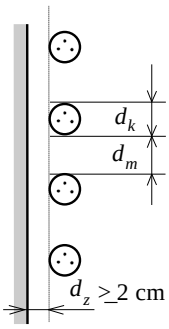
Во табелите 5 и 6 се прикажни зависностите на факторите k_A и k_B потребни за пресметување на корекциониот фактор k_ρ (релација 13) со помош на кој се уважува корекцијата на ТДСО на кабли положени во земја со специфична топлинска отпорност $\rho \neq 100$ °C·cm/W.



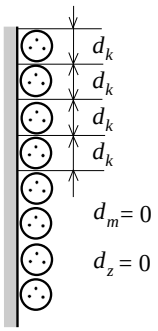
Сл. 1а. Полагање на енергетски кабли во земјен ров – каблите се размакнати



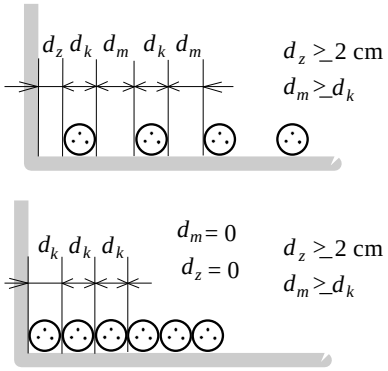
Сл. 1б. Полагање на енергетски кабли во земјен ров – каблите се допираат



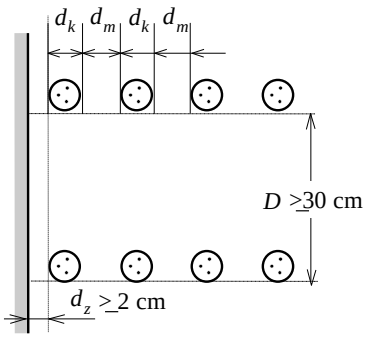
Слика 2а. Полагање на кабли на ѕид; каблите се размакнати



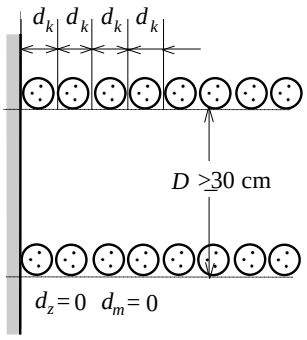
Слика 2б. Полагање на кабли на ѕид; каблите се допираат



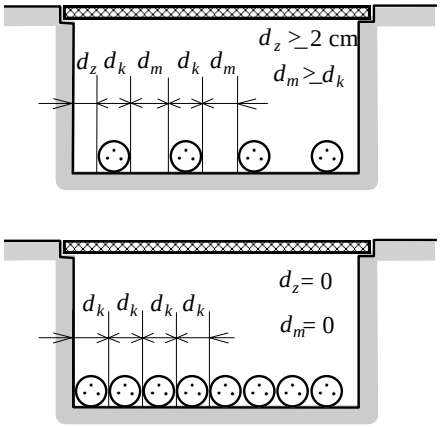
Слика 3. Полагање на кабли на под; (горе) каблите не се допираат; (долу) каблите се допираат



Слика 4а. Полагање на кабли на кабелски регали со слободна циркулација на воздухот – каблите се размакнати



Слика 4б. Полагање на кабли на кабелски регали со слободна циркулација на воздухот – каблите се допираат



Слика 5. Кабли положени во кабелски канали; каблите не се допираат (горе) и каблите се допираат (долу).

Табела 1. Зависност на температурниот корекционен фактор k_θ од температурата на амбиентот за кабли положени во земја.

Температура на тлото (°C)		5	10	15	20	25	30	35
PVC и PE кабли, до 35 kV		1,15	1,10	1,05	1,00	0,94	0,88	0,82
XPE и EPDM кабли, до 35 kV		1,10	1,07	1,04	1,00	0,97	0,92	0,89
Изолација IP, NP	Појасни до 10 kV и H-кабли, до 20 kV	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	0,88	0,82
	H-кабли, 35 kV	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93	0,87	0,79

Табела 2. Зависност на темперастурниот корекционен фактор k_θ од температурата на амбиентот за кабли положени во воздух.

Температура на воздухот (°C)		15	20	25	30	35	40	45
PVC и PE кабли, до 35 kV		1,17	1,12	1,07	1,00	0,93	0,87	0,79
XPE и EPDM кабли, до 35 kV		1,13	1,09	1,05	1,00	0,94	0,89	0,84
Изолација IP, NP	Појасни до 10 kV	1,06	1,06	1,06	1,00	0,94	0,87	0,79
	H-кабли, до 20 kV	1,06	1,06	1,06	1,00	0,94	0,87	0,79
	H-кабли, 35 kV	1,00	1,00	1,00	1,00	0,91	0,82	0,71

Табела 3.* Зависност на монтажниот корекционен фактор k_P од начинот на полагање на каблите и од бројот на паралелно положените кабли *n* – кабли положени во воздух.

Распоред на каблите (скица)	Меѓусебни растојанија	Број на каблите *n*, положени еден покрај друг				
		1	2	3	6	9
Слика 2а. Кабли положени вертикално на ѕид; каблите се размакнати	$d_z \geq 2$ cm $d_m = d_k$	1,00	0,93	0,90	0,87	0,86
Слика 2б. Кабли положени вертикално на ѕид; каблите се допираат	$d_z = 0$ $d_m = 0$	0,96	0,78	0,73	0,68	0,66
Слика 3 горе. Кабли положени на тлото; каблите се размакнати	$d_z \geq 2$ cm $d_m = d_k$	0,95	0,90	0,88	0,85	0,84
Слика .3 долу. Кабли положени на тлото; каблите се допираат	$d_z = 0$ $d_m = 0$	0,90	0,84	0,80	0,75	0,73
Слика 4а. Кабли положени на кабелски решетки; каблите се размакнати	$d_z \geq 2$ cm $d_m = d_k$	1,00	0,98	0,96	0,93	0,92
Слика 4б. Кабли положени на кабелски решетки; каблите се допираат	$d_z = 0$ $d_m = 0$	0,95	0,84	0,80	0,75	0,73
Слика 5 горе. Кабли положени в кабелски канали; каблите се размакнати	$d_z \geq 2$ cm $d_m = d_k$	0,95	0,90	0,88	0,85	0,84
Слика 5 долу. Кабли положени во кабелски канали; каблите се допираат	$d_z = 0$ $d_m = 0$	0,95	0,84	0,80	0,75	0,73

*) Забелешка: Во случајот кога каблите се поставени на кабелски регали (полици), како на сликите ??, при што е спречена циркулацијата на воздухот, тогаш корекциониот фактор се определува исто како и за случајот од сликите ?? (кои се однесуваат на каблите положени во кабелски канали).

Табела 4. Зависност на монтажниот корекционен фактор k_P од начинот на полагање на каблите и од бројот на паралелно положените кабли n – кабли положени во земја.

Број на кабли n во ист ров		2	3	4	5	6	8	10
Растојание d_m меѓу	допир	0,79	0,67	0,63	0,58	0,55	0,50	0,46
каблите односно	7 cm	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53
кабелските снопови	15 cm	0,86	0,77	0,72	0,68	0,64	0,61	0,58
(кабелските системи)	25 cm	0,87	0,78	0,74	0,71	0,67	0,64	0,52

Кога специфичната топлинска отпорност на тлото се разликува од претпоставените 100°C·cm/W, тогаш корекциониот фактор k_ρ со кој се уважува таа разлика, се пресметува со помош на релацијата (13) при што вредностите на факторите k_A и k_B се добиваат со помош на табелите 5 и 6.

$$k_\rho = k_A \cdot k_B \ . \tag{13}$$

Табела 5. Фактор k_A - зависност од пресекот на спроводниците

↓ [mm²];[°C·cm/W] →	70	100	120	150	200	250	300
до 25 mm²	1,11	1,00	0,94	0,87	0,78	0,72	0,67
35 - 95 mm²	1,13	1,00	0,93	0,86	0,76	0,70	0,64
120 - 240 mm²	1,14	1,00	0,93	0,85	0,76	0,69	0,63
300 - 500 mm²	1,15	1,00	0,92	0,85	0,75	0,68	0,63

Табела 6. Фактор k_B - зависност од U_n и типот на кабелот

Специфична топлинска отпорност [°C·cm/W]	70	100	120	150	200	250	300
3 и 4-жилни кабли, 1 kV	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2-жилни, 1 kV, појасни 6, 10 кV	0,98	1,00	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03
3-жилен Н-кабел до 35 kV	0,97	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05
3 едножилни кабли до 35 kV	1,01	1,00	1,00	0,98	0,97	0,97	0,96

3.2. ЗАДАЧИ

Задача 1. Дистрибутивен конзум со максимална моќност P_M = 4 MW, U_n = 10 kV, cosφ = 0,95 се напојува преку кабел од типот IPO 13 3x95 6/10 kV. Кабелот е положен во земја на длабочина h = 0,7 m, температура θ=20˚C и специфична термичка отпорност на тлото ρ = 100ºC·cm/W.

Да се утврди дали кабелот ќе биде термички преоптоварен ако:

а) кабелот е поставен сам на целата своја траса,

б) паралелно со кабелот на растојаниие δ = 15 cm е поставен уште еден кабел.

Решение:

Струјата која ја повлекува потрошувачот ја пресметуваме под претпоставка дека напонот на потрошувачот е еднаков на номиналниот напон на мрежата $U_p = U_n$ на следниот начин:

$$S_P = \sqrt{3}\cdot U_P \cdot I_P = \sqrt{3}\cdot U_n \cdot I_P \quad \Rightarrow \quad I_P = \frac{S_P}{\sqrt{3}\cdot U_n} = \frac{P_P}{\sqrt{3}\cdot U_n \cdot \cos\varphi_P}$$

$$I_P = \frac{4}{\sqrt{3}\cdot 10\cdot 0{,}95} = 0{,}243\,\text{kA} = 243\,\text{A}$$

а) Проверка на ТДСО кога е кабелот осамен

Трајно дозволената струја на оптоварување на кабелот се пресметува со следната равенка:

$$I_d = k_\theta \cdot k_P \cdot k_\rho \cdot I_{dT}$$

Условите на поставување на кабелот се номинални т.е. бидејќи температурата на околината θ=20˚C е номинална k_θ = 1, бидејќи кабелот во својата околина нема други кабли монтажниот корекционен фактор k_P = 1, бидејќи специфичната топлинска отпорност на тлото е номинална k_ρ = 1.

Вредноста на трајно дозволената струја I_{dT} за номинални услови можеме да ја отчитаме од табела П.10, за тип на кабел IPO13, номинален напон 10 kV и спроводници од бакар со пресек 95 mm^2.

$$I_d = I_{dT} = 255\,\text{A}$$

Бидејќи струјата на потрошувачот е помала од максималната трајно дозволена струја на кабелот т.е. $I_P = 243\,\text{A} < I_d = 255\,\text{A}$ кабелот **нема да биде преоптоварен**.

б) Проверка на ТДСО кога се поставени два кабла

Бидејќи во овој случај кабелот на дел од трасата е заедно со друг кабел монтажниот корекционен фактор ќе биде различен од 1.

Монтажниот корекционен фактор во овој случај се отчитува од табела 4, за растојание помеѓу каблите $d_m = \delta$ = 15 cm и за n = 2 заедно положени кабли.

$$k_P = 0{,}86$$

Според тоа, ќе добиеме:

$$I_d = k_\theta \cdot k_P \cdot k_\rho \cdot I_{dT} = 1\cdot 0{,}86\cdot 1\cdot 255 = 219\ \text{A}.$$

Во овој случај струјата на потрошувачот ќе биде поголема од максималната трајно дозволена струја на кабелот т.е.

$$I_P = 243\,\text{A} > I_d = 219\,\text{A}$$

што значи дека кабелот ќе биде преоптоварен.

За да се избегне преоптоварување на кабелот потребно е да се избере кабел со поголем пресек или да се избегне поставување на другиот кабел во негова близина.

■ ■ ■

Задача 2. Три едножилни кабли од типот XHP 48A 1x150/25 12/20 kV формираат трифазен кабелски вод, Каблите се положени во триаголен распоред на длабочина h=0,7 m во земја со специфична топлинска отпорност ρ = 100 ˚C·cm/W и амбиентна температура θ=20˚C.

Водот напојува дистрибутивен конзум со максимална активна моќност P_M = 8 MW, при номинален напон U_n = 20 kV и фактор на моќност cosφ = 0,9. Да се утврди:

а) дали кабелот ќе биде термички преоптоварен,

б) дали кабелот ќе биде термички преоптоварен ако на дел од трасата земјиштето има специфичен топлински отпор ρ = 300 ˚C·cm/W,

в) дали кабелот ќе биде термички преоптоварен за случајот под б) во зимски услови кога температурата на почвата θ=10˚C.

Решение:

Струјата на потрошувачот ја пресметуваме на следниот начин:

$$I_P = \frac{S_P}{\sqrt{3}\cdot U_n} = \frac{P_P}{\sqrt{3}\cdot U_n \cdot \cos\varphi_P} = \frac{8}{\sqrt{3}\cdot 20\cdot 0{,}9} = 0{,}257\ \text{kA} = 257\ \text{A}$$

а) Проверка дали кабелот ќе биде термички преоптоварен

Трајно дозволената струја на кабелот ја пресметуваме со равенката:

$$I_d = k_\theta \cdot k_P \cdot k_\rho \cdot I_{dT}$$

Бидејќи сите услови на поставување на кабелот се номинални струјата ја отчитуваме директно од табелата П.8, која се однесува за кабли со изолација од вмрежен полиетилен (кабли со ознака XPE или XHP) поставени во земја, без дополнителни корекции (k_θ= k_P= k_ρ=1). Од табелата отчитуваме вредност за спроводници од алуминум со пресек 150 mm^2, распоред на спроводниците во триаголник и номинален напон од 20 kV.

$$I_d = I_{dT} = 345\,\text{A}$$

Можеме да заклучиме дека струјата на оптоварување на кабелот е помала од максималната трајно дозволена струја т.е.

$$I_P = 257\,\text{A} < I_d = 345\,\text{A}$$

што значи дека кабелот не е преоптоварен.

б) Проверка дали е кабелот термички преоптоварен кога е ρ = 300 ˚C·cm/W

Во овој случај специфичната топлинска отпорност ρ=300 ˚C·cm/W. Иако ова се однесува само за дел од трасата на кабелот при одредувањето на трајно дозволената струја на

оптоварување треба да се земе во предвид делот од трасата каде условите на поставување на кабелот се најлоши (највисока температура, најголем број паралелни кабли, најголема топлинска отпорност на тлото итн.).

Значи за овој случај корекциониот фактор k_ρ ќе го пресметаме на следниот начин:

$$k_\rho = k_A \cdot k_B$$

Коефициентот k_A го отчитуваме од табела I.3.1 за пресек на спроводниците 120 – 240 mm^2 и ρ=300 ˚C·cm/W, коефициентот k_B го отчитуваме од табела I.3.2 за „едножилни кабли до 35 kV“ и ρ=300 ˚C·cm/W.

Според тоа:

$$k_\rho = k_A \cdot k_B = 0{,}63 \cdot 0{,}96 = 0{,}6048$$

Максималната трајно дозволена струја на кабелот е следната:

$$I_d = k_\theta \cdot k_P \cdot k_\rho \cdot I_{dT} = 1 \cdot 1 \cdot 0{,}6048 \cdot 345 = 208{,}6 \text{ A}$$

Можеме да заклучиме дека струјата на оптоварување на кабелот е поголема од максималната трајно дозволена струја т.е.

$$I_P = 257 \text{ A} > I_d = 208{,}6 \text{ A}$$

што значи дека кабелот е преоптоварен.

в) Проверка дали е кабелот термички преоптоварен во зимски услови (θ = 10°C) при ρ = 300 ˚C·cm/W во зимски услови (θ = 10°C)

Во зимски услови при температура на почвата θ=10˚C, коефициентот k_θ го отчитуваме од табела I.1.1 за „XPE и EPDM кабли, до 35 kV“:

$$k_\theta = 1{,}07$$

Според тоа:

$$I_d = k_\theta \cdot k_P \cdot k_\rho \cdot I_{dT} = 1 \cdot 1{,}07 \cdot 0{,}6048 \cdot 345 = 223{,}3 \text{ A}$$

И во овој случај струјата на оптоварување на кабелот е поголема од максималната трајно дозволена струја т.е. кабелот е преоптоварен.

■ ■ ■

Задача 3. Дистрибутивно потрошувачко подрачје со планирана максимална моќност P_M=5 MW, при U_n=10 kV, cosφ=0,9 треба да се напојува со кабел поставен во земја со изолација од вмрежен полиетилен (тип XHP), составен од три едножилни кабли поставени во триаголник. Спроводниците се од алуминиум, температурата на почвата θ=15˚C, и специфичен топлински отпор ρ=150 ˚C·cm/W

а) Да се избере минималниот пресек на жилите за кој кабелот нема да биде преоптоварен.

б) Колкава е максималната трајно дозволена струја за овој кабел?

в) Дали вака избраниот кабелот ќе биде преоптоварен ако факторот на моќност на потрошувачот cosφ=0,8.

Решение:

а) Избор на најмал пресек на кабелот

Струјата на потрошувачот ја пресметуваме на следниот начин:

$$I_P = \frac{S_P}{\sqrt{3}\cdot U_n} = \frac{P_P}{\sqrt{3}\cdot U_n \cdot \cos\varphi_P} = \frac{5}{\sqrt{3}\cdot 10\cdot 0{,}9} = 0{,}32075\ \text{kA} = 321\ \text{A}$$

За неноминални услови на полагање на кабелот (температура θ =10°C и присуство на соседен кабел во истиот ров) корекционите фактори k_θ и k_P се следните:

$$k_\theta = 1{,}04;\ k_P = 1$$

Бидејќи за одредување на факторот k_ρ потребно е да се знае пресекот на кабелот. имајќи ја во предвид струјата на потрошувачот според табелата П.9. можеме да претпоставиме дека пресекот ќе биде од 120 до 240 mm^2. Според тоа од табелите I.3.1 и I.3.2 отчитуваме:

$$k_A = 0{,}85\ ;\ k_B = 0{,}98$$

$$k_\rho = k_A \cdot k_B = 0{,}85\cdot 0{,}98 = 0{,}833$$

Имајќи предвид дека максималната трајно дозволена струја на кабелот треба да биде поголема од струјата на потрошувачот, имаме:

$$I_d = k_\theta \cdot k_P \cdot k_\rho \cdot I_{dT} > I_P$$

$$1{,}04\cdot 1\cdot 0{,}833\cdot I_{dT} > 321$$

$$I_{dT} > \frac{321}{1{,}04\cdot 0{,}833} = 370\ \text{A}.$$

Од табелата П.9 можеме да видиме дека најмал пресек на кабелот со трајно дозволена струја поголема од 370 A, за разгледуваниот случај (3 жилен 10 kV кабел од Al со жили поставени во триаголник) е пресекот 185 mm^2 кој шти има трајно дозволената струја за номинални услови од 410 A.

Ознаката на избраниот кабел е следната:

XHP 48A 3×1×185 6/10 kV

б) Пресметка на ТДСО на избраниот кабел

Максималната трајно дозволена струја на избраниот кабел ќе биде:

$$I_d = k_\theta \cdot k_P \cdot k_\rho \cdot I_{dT} = 1{,}04\cdot 1\cdot 0{,}833\cdot 410 = 355\,\text{A}$$

Можеме да забележиме дека оваа струја е поголема од струјата на потрошувачот што значи дека кабелот е добро димензиониран.

в) Проверка на ТДСО на избраниот кабел за фактор на моќност cosφ = 0,8

Ако факторот на моќност на потрошувачот е помал тогаш потрошувачот при иста преземана активна моќост P_P ќе повлекува поголема реактивна моќност Q_P. Поради тоа ќе се зголеми струјата на потрошувачот и нејзината нова вредност ќе биде:

$$I_P = \frac{P_P}{\sqrt{3}\cdot U_\text{n}\cdot \cos\varphi_P} = \frac{5}{\sqrt{3}\cdot 10\cdot 0{,}8} = 0{,}361\ \text{kA} = 361\ \text{A}$$

Во овој случај струјата на оптоварување на кабелот е поголема од максималната трајно дозволена струја т.е.

$I_P = 361\text{A} > I_d = 355\text{A}$

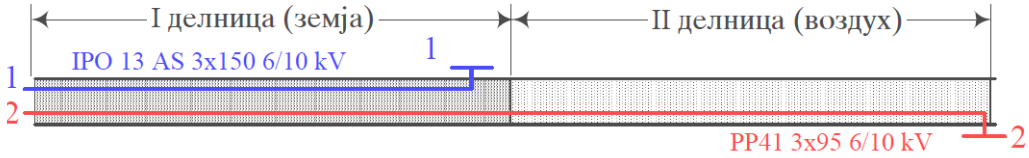
што значи дека кабелот ќе биде преоптоварен. Проблемот со преоптоварувањето на кабелот во овој случај наједноставно ќе се реши ако се примени „компензација“ на реактивната моќност, на пример, со приклучување на крајот од кабелот кондензаторска батерија која што ќе произведува дел од бараната реактивна моќност на потрошувачот.

■ ■ ■

Задача 4. На сликата 4.1 е прикажана трасата на една кабелска мрежа составена од два 10 kV појасни трижилни кабла со следнаите карактеристики:

Кабел бр.1: тип IPO 13 AS 3x150 6/10 kV, напојува индустриски конзум со константно оптоварување;

Кабел бр.2: тип PP 41 3x95 6/10 kV, напојува дистрибутивен конзум.



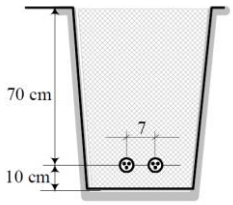
Слика 4.1

Кабелската траса се состои од две делници со различни услови на полагање:

1 Делница Обата кабли се положени во земја, на длабочина h=0,7 m и на меѓусебно растојание δ=7 cm, според слика 4.2 а. Специфичниот топлински отпор на тлото изнесува ρ = 70 ˚C·cm/W, а температурата е θ_1=20˚C.

2 Делница Кабелскиот вод бр.2 е положен сам на ѕид, спред слика 4.2 б. Температурата на амбиентот е θ_2=20˚C.

Да се пресметаат дозволените струјни оптоварувања на двата кабла.



Слика 4.2 а

Слика 4.2 б

Решение:

Кабел бр. 1

Бидејќи кабелот бр. 1 е поставен само на првата делница одредувањето на трајно дозволената струја на оптоварување се врши за условите на поставување во првата делница.

$\theta_1 = 20\,^{\circ}\text{C} \Rightarrow k_{\theta 1} = 1$

2 кабли во земја δ = 7 cm $\Rightarrow k_{P1} = 0{,}85$ (табела 4)

ρ = 70 ˚C·cm/W, 120÷240 mm^2 $\Rightarrow k_{A1} = 1{,}14$ (табела 5)

ρ=70 ˚C·cm/W, појасни 6, 10 kV $\Rightarrow k_{B1} = 0{,}98$ (табела 6)

$k_{\rho 1} = k_{A1} \cdot k_{B1} = 1{,}14 \cdot 0{,}98 = 1{,}1172$

Бидејќи потрошувачот е индустриски и кабелот е константно оптоварен додаваме уште еден множител со вредност 0,75. Според тоа:

$$I_{d1} = 0{,}75 \cdot k_{\theta 1} \cdot k_{P1} \cdot k_{\rho 1} \cdot I_{dT1}$$

Трајно дозволената струја за кабелот 1 за номинални услови ја отчитуваме од табела П.10 за кабел IPO 13, напон 10 kV, спроводници од алуминиум со пресек 150 mm^2 и изнесува 255 A.

Трајно дозволената струја за кабелот бр. 1 ќе биде:

$$I_{d1} = 0{,}75 \cdot k_{\theta} \cdot k_{P} \cdot k_{\rho} \cdot I_{dT1} = 0{,}75 \cdot 1 \cdot 0{,}85 \cdot 1{,}1172 \cdot 255 = 182\,\text{A}$$

Кабел бр. 2

За овој кабел ќе треба да се пресмета трајно дозволената струја за двете делници со различни услови на полагање.

– *Делница* 1

За оваа делница корекционите фактори за температурата и групни струјни кола се истите како во претходниот дел од задачата ($k_{\theta 1}$=1, k_{P1}=0,85). Коефициентот $k_{\rho 1}$ ќе биде малку поразличен:

$$k_{\rho 1} = k_{A1} \cdot k_{B1} = 1{,}13 \cdot 0{,}98 = 1{,}1074$$

Трајно дозволената струја за кабелот бр. 2 за номинални услови при полагање во земја се одредува од табела П.4 трижилен кабел PP 41, напон 10 kV, спроводници од бакар со пресек 95 mm^2 и изнесува 245 A.

Трајно дозволената струја за кабелот бр. 2 за делница бр.1 ќе изнесува:

$$I_{d2(1)} = k_{\theta 1} \cdot k_{P1} \cdot k_{\rho 1} \cdot I_{dT2Z} = 1 \cdot 0{,}85 \cdot 1{,}1074 \cdot 245 = 230{,}6\,\text{A}$$

– *Делница* 2

За оваа делница корекционите фактори се следните:

PVC и PE кабли до 35 kV, $\theta_2 = 20\ ^{\circ}\text{C} \Rightarrow k_{\theta 2} = 1{,}12$

сам кабел $\Rightarrow k_{P2} = 1$

Трајно дозволената струја за кабелот бр. 2 за номинални услови при полагање во воздух се одредува од табела П.5 трижилен кабел PP 41, напон 10 kV, спроводници од бакар со пресек 95 mm^2 и изнесува 235 A.

Трајно дозволената струја за кабелот бр. 2 за делница бр.2 ќе изнесува:

$$I_{d2(2)} = k_{\theta 2} \cdot k_{P2} \cdot I_{dT2V} = 1{,}12 \cdot 1 \cdot 235 = 263\,\text{A}$$

Според тоа трајно дозволена струја за кабелот бр.2 ќе биде помалата од вредностите на ТДСО за двете делници:

$$I_{d2} = \min\{I_{d2(1)}; I_{d2(2)}\} = \min\{230{,}6;\ 263\} = 230{,}6\ \text{A}.$$

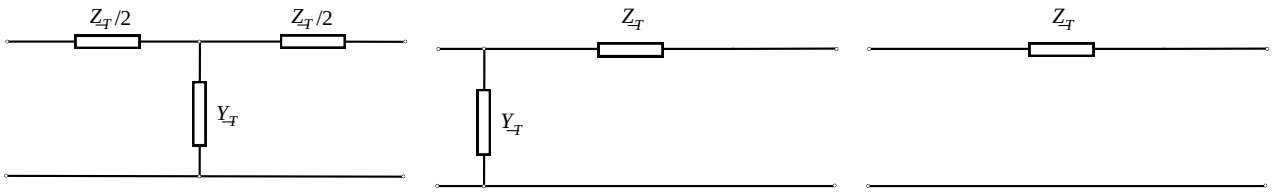
■ ■ ■

IV. ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ

4.1. ДВОНАМОТНИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Трансформаторот е еден од основните елементи во електроенергетските системи. Служи за трансформација на електричната енергија од едно на друго напонско ниво, за поврзување на два система со различни напонски нивоа, за регулација на напонот во одделни делови од мрежата и друго.

Како што е познато од теоријата на енергетските трансформатори, еквивалентната заменска шема на трансформаторот претставува еден симетричен четворокрајник (Т–еквивалентна шема). Често пати, заради упростување, енергетскиот трансформатор се претставува и поедноставно, со помош на т.н. Г–заменска шема. Понекогаш тој се прикажува уште поупростено, со помош на I–заменска шема во која нема попречна гранка (слика 1).



Слика 1. Т–заменска шема, Г–заменска шема и I–заменска шема на енергетските трансформатори

Големините $\underline{Z}_T$ и $\underline{Y}_T$ можат да се пресметаат доколку ги познаваме основните параметри на трансформаторот. Основни или номинални парамери на трансформаторот се следните:

U_{1n}/U_{2n} – номинален преносен однос на трансформаторот,

S_n – номинална привидна моќност на трансформаторот,

$u_k\%$ – напон на куса врска, изразен во проценти од номиналниот напон,

$i_0\%$ – струја на празен од (струја на магнетизирање), изразена во проценти од номиналната струја на трансформаторот,

ΔP_{Cun} – загуби во бакар, кога низ трансформаторот тече номинална струја,

ΔP_{Fe} – загуби во железо (загуби во магнетното коло на трансформаторот) во режим на празен од,

ΔQ_{Fe} (ΔQ_μ) – моќност на магнетизирање (реактивна моќност што трансформаторот ја прима во режим на празен од при номинален напон).

Покрај номиналните параметри, постојат и други големини кои што го карактеризираат еден трансформатор. Меѓу најважните од нив се шемата на врзување и групата на трансформаторот. Последните имаат посебна улога во анализите на преодните процеси во електроенергетските системи, во анализите на несиметричните режими на работа како и при анализите на режимите со куса врска во ЕЕС. Во анализата на стационарниот режим (нормален режим на работа), трансформаторот се претставува со неговата еквивалентна шема, чиишто параметри не зависат од шемата на врзување или од групата на соединување на трансформаторот, така што овде тие немаат никаква улога.

Да се задржиме малку повеќе на номиналните параметри на еден трансформатор.

Номиналниот преносен однос на трансформаторот U_{1n}/U_{2n} претставува однос на номиналните линиски напони на примарот и секундарот од трансформаторот. Овој однос зависи од односот на навивките на соодветните намотки. Со промена на бројот на навивките на една од намотките, се менува и овој однос. Тоа е истовремено и еден од начините за регулација на напонот во електричните мрежи.

Номиналната привидна моќност на трансформаторот S_n се дефинира со релацијата:

$$S_n = \sqrt{3} \cdot U_{1n} \cdot I_{1n} = \sqrt{3} \cdot U_{2n} \cdot I_{2n} \tag{1}$$

и таа е иста и за двете намотки. Одовде следува и односот:

$$I_{1n} / I_{2n} = U_{2n} / U_{1n} \tag{2}$$

Големината u_k% е една од најважните параметри на трансформаторот. Се добива од обидот на куса врска. Таа го дава напонот на куса врска (напон кој што треба да се приложи на една од намотките за струјата низ обете намотки, од кои што втората е кусо врзана, да биде еднаква на номиналната) изразен во проценти од номиналниот напон. Оваа големина се движи во доста широки граници во зависност од големината на трансформаторот. Во следната табела дадени се ориентациони вредности за големината на овој параметар, во зависност од номиналниот напон (на високонапонската страна) на трансформаторот:

U_n, kV	u_k, %
do 20	3 - 8
20 ÷110	9 ÷ 11
nad 110	10 ÷ 17

Големината i_0% претставува струја на празен од изразена во проценти од номиналната струја на трансформаторот. Таа се движи во релативно тесни граници (1 – 3 %) и е помала кај поголемите трансформатори, додека кај современите трансформатори, особено кај оние со големи номинални моќности, таа е најчесто помала и од 1%.

Врз база на номиналните параметри на трансформаторот, може да се одредат и параметрите на неговата еквивалентна шема.

$$Z_T = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}, \ \frac{\Omega}{\text{f aza}}, \tag{3}$$

$$R_T = \Delta P_{Cun} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2} \ \frac{\Omega}{\text{f aza}}, \tag{4}$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}, \ \frac{\Omega}{\text{f aza}}, \tag{5}$$

$$\underline{Z}_T = R_T + jX_T, \tag{6}$$

$$Y_T = \frac{i_o\%}{100} \cdot \frac{S_n}{U_n^2}, \ \frac{\Omega}{\text{f aza}}, \tag{7}$$

$$G_T = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_n^2}, \ \frac{\text{S}}{\text{f aza}}, \tag{8}$$

$$B_T = -\sqrt{Y_T^2 - G_T^2}, \ \frac{\text{S}}{\text{f aza}} \quad (\text{или } B_T \approx -\frac{\Delta Q_\mu}{U_n^2}), \tag{9}$$

$$\underline{Y}_T = G_T + jB_T \ . \tag{10}$$

4.2. ТРИНАМОТНИ ТРАНСФОРМАТОРИ

За разлика од претходно разгледуваните, двонамотни, трансформатори, тринамотните трансформатори имаат три намотки, условно наречени примарна (се означува со П или 1), секундарна (С или 2) и терциерна (Т или 3). Тринамотните трансформатори се, за нашите потреби, целосно дефинирани со следните номинални податоци:

$U_{1n} / U_{2n} / U_{3n}$

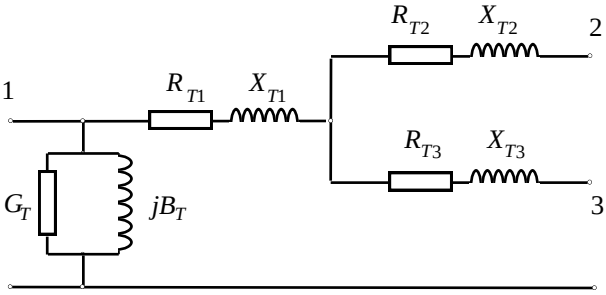
$S_{1n} / S_{2n} / S_{3n}$

$u_{k12}\% / u_{k13}\% / u_{k23}\%$

$\Delta P_{Cu12} / \Delta P_{Cu13} / \Delta P_{Cu23}$

ΔP_{Fe} , ΔQ_{μ} i (i l i) $i_o\%$.

Тринамотниот трансформатор може да се претстави со еквивалентната шема од сликата 2.



Слика 2. Заменска шема на тринамотен енергетски трансформатор

Компонентите на попречната гранка во шемата G_T и B_T се пресметуваат како и кај двонамотните трансформатори, според релациите (8) ÷ (10).

Ако ги воведеме следните означувања:

$$S_{12} = \min\{S_{1n}, S_{2n}\}; \quad S_{13} = \min\{S_{1n}, S_{3n}\} \quad \text{и} \quad S_{23} = \min\{S_{2n}, S_{3n}\},$$

тогаш реактанциите X_{T1} , X_{T2} и X_{T3} на одделните намотки од трансформаторот ги пресметуваме со формулите:

$$X_{T1} = (X_{12} + X_{13} - X_{23})/2;$$

$$X_{T2} = (X_{12} + X_{23} - X_{13})/2; \tag{11}$$

$$X_{T3} = (X_{13} + X_{23} - X_{12})/2,$$

каде што е:

$$X_{12} = \frac{u_{k12}\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{12}}; \; X_{13} = \frac{u_{k13}\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{13}} \quad \text{i} \quad X_{23} = \frac{u_{k23}\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{23}}. \tag{12}$$

На сличен начин се пресметуваат и активните отпорности на поедините намотки R_{T1}, R_{T2} и R_{T3}:

$$R_{T1} = (R_{12} + R_{13} - R_{23})/2$$

$$R_{T2} = (R_{12} + R_{23} - R_{13})/2 \tag{13}$$

$$R_{T3} = (R_{13} + R_{23} - R_{12})/2 .$$

каде што:

$$R_{12} = \Delta P_{\mathrm{Cu12}} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{12}^2};\ R_{13} = \Delta P_{\mathrm{Cu13}} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{13}^2} \ \text{ i } \ R_{23} = \Delta P_{\mathrm{Cu23}} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{23}^2} . \tag{14}$$

Во сите равенки за пресметување на параметрите на еквивалентната шема на трансформаторот, фигурира големината U_{n}. Големината U_{n} претставува номинален напон на онаа намотка од трансформаторот, на чија што страна ги сведуваме параметрите на трансформаторот.

4.3. ЗАДАЧИ

Задача 1. За трансформаторот СН/НН од 630 kVA, производ на "ЕМО" – Охрид, познати се следните технички податоци:

– номинален преносен однос $U_{1\mathrm{n}}/U_{2\mathrm{n}}$ = 10/0,4 kV,

– номинална моќност S_{n} = 630 kVA,

– загуби во обидот на празен од $\Delta P_0 = \Delta P_{\mathrm{Fe}}$ = 1300 W,

– загуби во обидот на куса врска ΔP_k = 6500 W,

– струја на празен од i_0% = 1,8 %,

– напон на куса врска u_k% = 4 %.

Трансформаторот работи со својот номинален преносен однос:

$$k_{\mathrm{T}} = k_{\mathrm{Tn}} = \frac{W_{1\mathrm{n}}}{W_{2\mathrm{n}}} = \frac{U_{1\mathrm{n}}}{U_{2\mathrm{n}}} = \frac{10,0}{0,4} = 25$$

Потребно е да се пресметаат:

а) Параметрите на Г–заменската шема на трансформаторот, сведени на примарна (10 kV) страна.

б) Параметрите на Г–заменската шема на трансформаторот, сведени на секундарна (0,4 kV) страна.

в) Загубите на активна и реактивна моќност и колкав е напонот на секундарот, во режим на празен од на трансформаторот, ако напонот на примарната страна изнесува U_1 = 10 kV.

г) Загубите на активна и реактивна моќност и колкав е напонот на секундарот во режим на празен од на трансформаторот, ако напонот на примарната страна изнесува U_1 = 10,5 kV.

Решение:

а) Параметри на трансформаторот, сведени на примарна страна:

Параметрите од заменската шема на трифазниот трансформатор се однесуваат на една од фазите. Тие имаат димензија Ω/фаза или S/фаза. Бидејќи сите елементи од електроенергетскиот систем (ЕЕС) се трифазни, а пресметките на параметрите на нивните заменски шеми се однесуваат на една од фазите, од сега па натаму, од разбирливи причини, ќе ја испуштаме ознаката „/фаза“.

$$U_{\mathrm{n}} = 10 \text{ kV} = 10 \cdot 10^3 \text{ V},$$

$$G_T = \frac{\Delta P_{\mathrm{Fe}}}{U_{\mathrm{n}}^2} \approx \frac{\Delta P_0}{U_{\mathrm{n}}^2} = \frac{1300}{(10000)^2} = 13\ \mu\mathrm{S},$$

$$B_T \approx -Y_T = -\frac{i_o\%}{100} \cdot \frac{Sn}{U_{\mathrm{n}}^2} = -\frac{1{,}8}{100} \cdot \frac{630 \cdot 10^3}{(10000)^2} = -113{,}4\ \mu\mathrm{S},$$

$$R_T = \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}}^2} \approx \Delta P_k \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}}^2} = 6500 \cdot \frac{(10 \cdot 10^3)^2}{(630 \cdot 10^3)^2} = 1{,}638\ \Omega,$$

$$Z_T = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{(10 \cdot 10^3)^2}{630 \cdot 10^3} = 6{,}349\ \Omega,$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{6{,}349^2 - 1{,}637^2} = 6{,}134\ \Omega,$$

$$\underline{Z}_T = R_T + jX_T = (1{,}338 + j6{,}134)\ \Omega.$$

б) Параметри на трансформаторот, сведени на секундарна страна

На сосема идентичен начин се добиваат вредностите на параметрите R_T, X_T, G_T и B_T, сведени на нисконапонската (U_{n} = 0,4 kV) страна. Разликата е во тоа што сега, во изразите (3) к (8) за вредноста на номиналниот напон U_{n} се заменува вредноста U_{n} = 400 V. На тој начин се добива:

$U_{\mathrm{n}} = 0{,}4$ kV; $G_T = 8{,}125\ \mu$S; $B_T = -70{,}875\ \mu$S; $R_T = 2{,}62$ mΩ; $X_T = 9{,}814$ mΩ.

в) Загуби во празен од, при U_1=10 kV:

$$\Delta P = G_T \cdot U_1^2 = 13 \cdot 10^{-6} \cdot (10 \cdot 10^3)^2 = 1300\ \mathrm{W} = 1{,}3\ \mathrm{kW}$$

$$\Delta Q = B_T \cdot U_1^2 = 113{,}4 \cdot 10^{-6} \cdot (10 \cdot 10^3)^2 = 11340\ \mathrm{var} = 11{,}34\ \mathrm{kvar}$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{W_2}{W_1} = U_1 \cdot \frac{U_{2\mathrm{n}}}{U_{1\mathrm{n}}} = 10 \cdot \frac{0{,}4}{10} = 0{,}4\ \mathrm{kV}$$

в) Загуби во празен од, при U_1=10,5 kV:

$$\Delta P = G_T \cdot U_1^2 = 13 \cdot 10^{-6} \cdot (10{,}5 \cdot 10^3)^2 = 1433\ \mathrm{W} = 1{,}433\ \mathrm{kW}$$

$$\Delta Q = B_T \cdot U_1^2 = 113{,}4 \cdot 10^{-6} \cdot (10{,}5 \cdot 10^3)^2 = 12502\ \mathrm{var} = 12{,}5\ \mathrm{kvar}.$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{W_2}{W_1} = U_1 \cdot \frac{U_{2\mathrm{n}}}{U_{1\mathrm{n}}} = 10{,}5 \cdot \frac{0{,}4}{10} = 0{,}42\ \mathrm{kV}.$$

■ ■ ■

Задача 2. Да се определат параметрите на Г–еквивалентната шема на трансформаторот, за кој се познати следните номинални податоци:

S_n = 31,5 MVA; U_{1n}/U_{2n} = 38,5/121 kV/kV; u_k% =10,5 %;

ΔP_{Fe} =73 kW; ΔP_{Cun} =180 kW; i_0% =2,7 %

Решение:

Ќе вршиме сведување на параметрите на високонапонска (ВН) страна, т.е. U_n = 121 kV. Доколку напоните и моќностите во формулите (3) ѝ (10) ги заменуваме во единиците kV и MVA, како што е тоа направено во овој пример, тогаш вредностите на параметрите на елементите ќе ги добиваме директно во Ω односно S. Според тоа ќе имаме:

$$R_T = \Delta P_{Cun} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2} = 0{,}18 \cdot \frac{121^2}{31{,}5^2} = 2{,}656\ \Omega;$$

$$Z_T = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{10{,}5}{100} \cdot \frac{121^2}{31{,}5^2} = 48{,}803\ \Omega;$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{49^2 - 2{,}66^2} = 48{,}731\ \Omega$$

Параметрите на попречната гранка (наречена гранката на магнетизирање) ќе бидат:

$$G_T = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_n^2} \approx \frac{\Delta P_0}{U_n^2} = \frac{0{,}073}{121^2} = 5 \cdot 10^{-6}\,\text{S} = 5\ \mu\text{S},$$

$$Y_T = \frac{i_0\%}{100} \cdot \frac{S_n}{U_n^2} = \frac{2{,}7}{100} \cdot \frac{31{,}5}{121^2} = 58 \cdot 10^{-6}\,\text{S} = 58\ \mu\text{S},$$

$$B_T = -\sqrt{Y_T^2 - G_T^2} = -\sqrt{58^2 - 5^2} \approx -57{,}875 \cdot 10^{-6}\,\text{S} = -57{,}875\ \mu\text{S}.$$

Според тоа, параметрите на Г-заменската шема на трансформаторот, сведени на високонапонската страна, ќе бидат:

$$\underline{Z}_T = R_T + jX_T = (2{,}656 + j48{,}803)\ \Omega;$$

$$\underline{Y}_T = G_T + jB_T = (5 - j57{,}875)\ \mu\text{S}.$$

■ ■ ■

Задача 3. Да се одредат параметрите на еквивалентната шема на тринамотниот трансформатор за којшто се познати следните податоци:

220/110/35 kV/kV/kV;

75/60/25 MVA/MVA/MVA ;

ΔP_{Fe} = 190 kW; ΔQ_μ = 2250 kvar.

u_{k12} = 10% ; u_{k13} = 5% ; u_{k23} = 6% ;

ΔP_{Cu12} = 620 kW ; ΔP_{Cu13} = 90 kW ; ΔP_{Cu23} = 106 kW .

Решение:

Бидејќи се работи за трансформатор, потребно ќе биде да вршиме сведување на неговите параметри. Нека вршиме сведување на 220 kV страна, односно U_n = 220 kV . Тогаш, ќе имаме:

$$G_T = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_n^2} = \frac{0{,}190}{220^2} = 3{,}926\ \mu S;$$

$$B_T = -\frac{\Delta Q_\mu}{U_n^2} = -\frac{2{,}250}{220^2} = -46{,}488\ \mu S$$

$$\underline{Y}_T = G_T + jB_T = (3{,}926 - j46{,}49)\ \mu S.$$

Номиналните моќности на поедините намотки изнесуваат:

S_{1n} = 75 MVA; S_{2n} = 60 MVA; S_{3n} = 25 MVA

од каде што следува:

S_{12} = min { 75, 60 } = 60 MVA ,

S_{13} = min { 75, 25 } = 25 MVA ,

S_{23} = min { 60, 25 } = 25 MVA .

Сега, реактанциите X_{12} , X_{13} и X_{23} и резистанциите R_{12}, R_{13} и R_{23} на одделните намотки од трансформаторот ќе ги пресметаме на следниот начин:

$$X_{13} = \frac{u_{k12}\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{12}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{220^2}{60} = 80{,}67\ \Omega;$$

$$X_{13} = \frac{u_{k13}\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{13}} = \frac{5}{100} \cdot \frac{220^2}{25} = 96{,}80\ \Omega;$$

$$X_{23} = \frac{u_{k23}\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{23}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{220^2}{25} = 116{,}16\ \Omega.$$

$$X_{T1} = (X_{12} + X_{13} - X_{23})/2 = (80{,}67 + 96{,}80 - 116{,}60) = 30{,}654\ \Omega;$$

$$X_{T2} = (X_{12} + X_{23} - X_{13})/2 = (80{,}67 + 116{,}16 - 96{,}80) = 50{,}014\ \Omega;$$

$$X_{T3} = (X_{13} + X_{23} - X_{12})/2 = (96{,}80 + 116{,}16 - 80{,}67) = 66{,}147\ \Omega.$$

Понатаму имаме:

$$R_{12} = \Delta P_{Cu12} \cdot \frac{U_n^2}{S_{12}^2} = 0{,}62 \cdot \frac{220^2}{60^2} = 8{,}336\ \Omega;$$

$$R_{13} = \Delta P_{Cu13} \cdot \frac{U_n^2}{S_{13}^2} = 0{,}09 \cdot \frac{220^2}{25^2} = 6{,}970\ \Omega;$$

$$R_{23} = \Delta P_{Cu23} \cdot \frac{U_n^2}{S_{23}^2} = 0{,}106 \cdot \frac{220^2}{25^2} = 8{,}209\ \Omega.$$

На сличен начин се пресметуваат и активните отпорности на поедините намотки R_{T1} , R_{T2} и R_{T3}:

$$R_{T1} = (R_{12} + R_{13} - R_{23})/2 = (8,336 + 6,970 - 8,209) = 3,55\ \Omega;$$

$$R_{T2} = (R_{12} + R_{23} - R_{13})/2 = (8,336 + 8,209 - 6,970) = 4,79\ \Omega;$$

$$R_{T3} = (R_{13} + R_{23} - R_{12})/2 = (6,970 + 8,209 - 8,336) = 3,42\ \Omega.$$

Параметрите на еквивалентната шема на тринамотниот трансформатор, сведена на 220 kV страна, значи, ќе бидат:

$\underline{Z}_{T1}$ = (3,55 + j30,654) Ω ;

$\underline{Z}_{T2}$ = (4,79 + j50,014) Ω;

$\underline{Z}_{T3}$ = (3,42 + j66,147) Ω;

$\underline{Y}_{T}$ = (3,93 – j46,49) μS.

V. ЗАМЕНСКИ ШЕМИ НА ЕЛЕКТРИЧНИТЕ МРЕЖИ. СВЕДУВАЊЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ. РАБОТА СО ЕДИНИЧНИ ГОЛЕМИНИ

5.1. ОПШТО ЗА СВЕДУВАЊЕТО НА ПАРАМЕТРИТЕ

Во мрежите што содржат трансформатори, покрај сведувањето на импеданциите од елементите на шемата, потребно е да се врши сведување и на сите напони и струи. Сведувањето на одделните напони, струи, импеданции и адмитанции ($\underline{U}$, $\underline{I}$, $\underline{Z}$ и $\underline{Y}$) ќе го објасниме на прикажаниот пример.

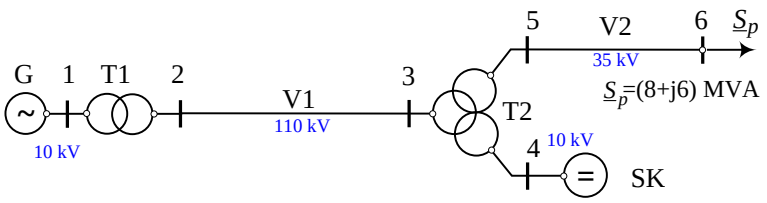
Нека со $k_T = W_2/W_1$ го означиме односот на актуелниот број на навивките на трансформаторот преку кој преминуваме при сведувањето, при што со „2“ е означена онаа намотка на чија што страна сведуваме. Доколку актуелната вредност k_T на трансформаторот не н‹ е позната, ќе претпоставиме дека трансформаторот работи со својот номинален преносен однос, т.е. $k_T = k_{Tn}$. Понатаму, сведувањето се врши на следниот начин:

1. Сведување на импеданција $\underline{Z}$: $\underline{Z}_{\text{сведено}} = \underline{Z} \cdot k^2 = \underline{Z} \cdot (W_2/W_1)^2$
2. Сведување на адмитанција $\underline{Y}$: $\underline{Y}_{\text{сведено}} = \underline{Y}/k^2 = \underline{Y} \cdot (W_1/W_2)^2$
3. Сведување на напон $\underline{U}$: $\underline{U}_{\text{сведено}} = \underline{U} \cdot k = \underline{U} \cdot (W_2/W_1)$
4. Сведување на струја $\underline{I}$: $\underline{I}_{\text{сведено}} = \underline{I}/k = \underline{I} \cdot (W_1/W_2)$
5. Сведување на моќност $\underline{S}$: $\underline{S}_{\text{сведено}} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_{\text{сведено}} \cdot \underline{I}^*_{\text{сведено}} = \sqrt{3} \cdot \underline{U} \cdot k \cdot (\underline{I}/k)^* = \sqrt{3} \cdot \underline{U} \cdot \underline{I}^* \equiv \underline{S}$.

Знаејќи ги правилата на сведување, можеме да извршиме сведување на параметрите од елементите во секој конкретен случај. Притоа ќе водиме сметка за вредностите на актуелните преносни односи на енергетските трансформатори во системот. Доколку нивните актуелни вредности k_T не н£ се познати, ќе претпоставиме дека тие трансформатори работат со својот номинален преносен однос, т.е. $k_T = k_{Tn}$.

5.2. ЗАДАЧИ

Задача 1. Да се нацрта еднофазната заменска шема на прикажаниот електроенергетски систем (ЕЕС) и да се пресметаат нејзините параметри, сведени на 110 kV напонско ниво.



Слика 1.1. ЕЕС соствен од мрежи со различни напонски нивоа

Податоци за елементите од системот:

Генератор G: S_n = 31,5 MVA; U_n = 10,5 kV; x_d = 150 %

Трансформатор T1: 10,5/115 kV; S_n =31,5 MVA; u_k%=10%; ΔP_{Cun} =200 kW; ΔP_{Fe} =45 kW; i_0% = 0,6%

Трансформатор T2: 110/36,75/10,5 kV 40/40/10 MVA; u_{k12} = 10%; u_{k13} = 17%; u_{k23} = 6%; ΔP_{Cu12} = 858 kW; ΔP_{Cu13} = 96 kW; ΔP_{Cu23} = 82,7 kW; ΔP_{Fe} = 80 kW ; ΔQ_{μ} = 860 kvar.

Надземен 110 kV вод V1: l = 20 km; $\underline{z}$ = (0,1 + j0,4) Ω/km; $\underline{y}$ = (0,1 + j2,7) μS/km

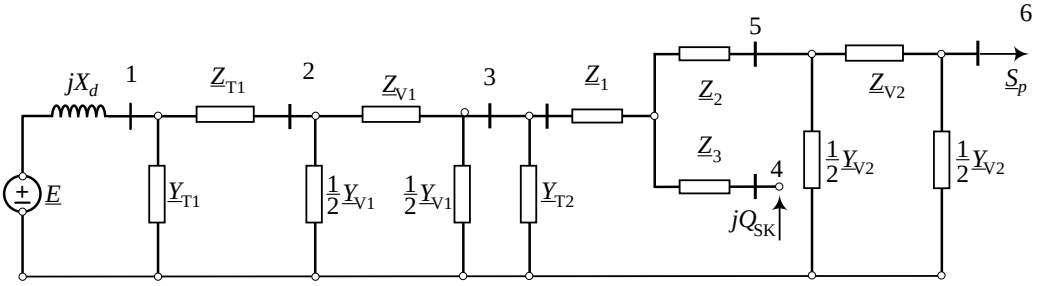
Надземен 35 kV вод V2: l = 15 km; $\underline{z}$ = (0,25 + j0,35) Ω/km; $\underline{y}$ = j3,13 μS/km

Синхрон компензатор SK: Q_{SK} = 10 Mvar ; U_n = 10,5 kV.

Трансформаторот T1 работи со актуелен преносен однос k_{T1} = 10,5/110 kV/kV, додека трансформаторот T2 работи со својот номинален преносен однос: 110/36,75/10,5 kV/kV/kV.

Решение:

На сликата 1.2 е прикажана еквивалентната монофазна (еднополна) заменска шема на дадениот ЕЕС. Во неа секој елемент е претставен со соодветната заменска шема.



Слика 1.2. Заменска шема на ЕЕС од сликата 1.1

Параметарот X_d од заменската шема на генераторот G го добиваме слично како реактанциите кај енергетските трансформатори:

$$X_d = \frac{x_d\%}{100}\cdot\frac{U_n^2}{S_n} = \frac{150}{100}\cdot\frac{10,5^2}{31,5} = 5,25\ \Omega.$$

Внатрешната емс $\underline{E}$ на генераторот не можеме да ја пресметаме бидејќи не н‹ се познати параметрите на режимот во кој работи прикажаниот систем.

Параметрите на останатите елементи од ЕЕС ги пресметуваме според познатите релации, на начин како во претходите примери. Параметрите на трансформаторите T1 и T2 ќе ги сведуваме на високонапонската, 110 kV, страна. На тој начин добиваме:

Трансформатор T1:

$$\underline{Z}_{T1} = R_{T1} + jX_{T1} = (2,666 + j41,90)\ \Omega;$$

$$\underline{Y}_{T1} = G_{T1} + jB_{T1} = (3,4 - j13,88)\ \mu S$$

Вод V1:

$$\underline{Z}_{V1} = \underline{z}_{V1}\cdot l_1 = (0,1 + j0,4)\cdot 20 = (2 + j8)\ \Omega;$$

$$\underline{Y}_{V1} = \underline{y}_{V1}\cdot l_1 = (0,1 + j2,7)\cdot 20 = (2 + j54)\ \mu S$$

Трансформатор T2:

$$\underline{Y}_{T2} = G_{T2} + jB_{T2} = (6,61 - j71,07)\ \mu S;$$

$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1 = (4,05 + j81,67)\ \Omega;$

$\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2 = (2,43 - j51,42)\ \Omega;$

$\underline{Z}_3 = R_3 + jX_3 = (7,57 + j24,02)\ \Omega.$

Вод V2:

$\underline{Z}_{V2} = \underline{z}_{V2} \cdot l_2 = (0,25 + j0,35) \cdot 15 = (3,75 + j5,25)\ \Omega;$

$\underline{Y}_{V2} = \underline{y}_{V2} \cdot l_2 = j3,13 \cdot 15 = j46,95\ \mu S$

На тој начин ние ги пресметавме вистинските, т.е. природните, параметри на одделните елементи. Бидејќи се работи за мрежа со еден или повеќе трансформатори, потребно ќе биде да извршиме сведување на овие параметри на едно исто напонско ниво. Во нашиов случај ние ќе сведуваме на 110 kV ниво. Инаку, во принцип, сведување се врши на она напонско ниво кое опфаќа најмногу елементи од системот бидејќи на тој начин се минимизира потребниот број пресметковни операции сврзани со сведувањето.

Во согласност со правилата за сведување, опишани во точката 5.1, ќе го започнеме со сведувањето на првиот елемент на мрежата – генераторот G. Бидејќи во задачата е специфициран актуелниот преносен однос на трансформаторот T1, односно дека е k_{T1} = 110/10,5 = 0,957·k_{T1n} = 10,4762, ќе добиеме:

Генератор G:

$X_{d.\text{сведено}} = X_d \cdot k_{T1}^2 = 5,25 \cdot 10,4672^2 = 576,19\ \Omega.$

Трансформатор T1:

Бидејќи параметрите $\underline{Z}_{T1}$ и $\underline{Y}_{T1}$ на трансформаторот ги пресметавме со U_n = 115 kV, со тоа ние автоматски ги сведовме на високонапонската страна така што сега сведувањето не е потребно.

Вод V1:

Бидејќи водот V1 се наоѓа на страната на која што сведуваме и неговите параметри не треба да се сведуваат.

Трансформатор T2:

Слично како и со трансформаторот T1, параметрите на овој трансформатор се веќе сведени на високонапонската страна (U_n = 110 kV).

Вод V2:

Сведувањето на водот V2 ќе го вршиме со коефициентот на трансформација на трансформаторот T2 на релација примар – секундар $k_T = W_{1n}/W_{2n}$ = 110/36,75 = 2,9932. На тој начин за сведените вредности на параметрите $\underline{Z}_{V2}$ и $\underline{Y}_{V2}$ од водот V2 ќе добиеме:

$\underline{Z}_{V2.\text{сведено}} = \underline{Z}_{V2} \cdot (110/36,75)^2 = (3,75 + j5,25) \cdot 2,9932^2 = (33,597 + j47,036)\ \Omega,$

$\underline{Y}_{V2.\text{сведено}} = \underline{Y}_{V2} \cdot (36,75/110)^2 = j46,95 \cdot 10^{-6} / 2,9932^2 = j5,24 \cdot 10^{-6}\,S = j5,24\ \mu S.$

■ ■ ■

Задача 2. Да се одредат параметрите на елементите од мрежата прикажани во претходната задача, изразени во единични (pu) вредности. За базни големини да се усвојат:

S_B = 50 MVA ; U_B = 110 kV.

Решение:

Прикажаната мрежа има четири различни напонски нивоа, што ќе ги означиме со броевите 1, 2, 3 и 4. Со ниво бр. 1 ќе го означиме 110 kV напонско ниво а со ниво бр. 2 ќе го означиме 35 kV напонско ниво во мрежата. Понатаму со ниво бр. 3 ќе го означиме 10 kV напонско ниво при синхрониот генератор G и конечно, со ниво бр. 4 ќе го означиме 10 kV напонско ниво при синхрониот компензатор SK.

Притоа, за 110 kV напонско ниво ќе имаме:

1. 110 kV naponsko nivo

$S_{B1} = S_B$ = 50 MVA; $U_{B1} = U_B$ = 110 kV;

$$I_{B1} = \frac{S_{B1}}{\sqrt{3}\cdot U_{B1}} = 0,262 \text{ kA}; \; Z_{B1} = \frac{U_{B1}^2}{S_{B1}} = 242\ \Omega; \; Y_{B1} = \frac{1}{Z_{B1}} = 4,13 \text{ mS}.$$

2. 35 kV naponsko nivo

За 35 kV ниво (ниво бр. 2), каде што се наоѓа водот V2, поради трансформацијата $k_2 = k_{T2}$ = 110/36,75 kV/kV = 2,9932 при трансформаторот T2, ќе имаме нови базни големини. Новите базни големини ги пресметуваме на следниот начин:

k_2 = 36,75/110 = 0,33409;

$$S_{B2} = S_{B1} = 50 \text{ MVA} \; ; \; U_{B2} = U_{B1}\cdot k_2 = 110\cdot 0,33409 = 36,75 \text{ kV};$$

$$I_{B2} = \frac{S_{B2}}{\sqrt{3}\cdot U_{B2}} = \frac{50}{\sqrt{3}\cdot 36,75} = 0,7855 \text{ kA}.$$

Но базната струја I_{B2} може да се пресмета и вака:

$$I_{B2} = \frac{I_{B1}}{k_2} = \frac{0,262}{0,33409} = 0,7855 \text{ kA}.$$

Понатаму имаме:

$$Z_{B2} = \frac{U_{B2}^2}{S_{B2}} = 27,011\ \Omega. \text{ Но исто така е: } Z_{B2} = Z_{B1}\cdot k_2^2 = 242\cdot 0,33409^2 = 27,011\ \Omega.$$

$$Y_{B2} = \frac{1}{Z_{B2}} = 37,022 \text{ mS}.$$

3. 10 kV naponsko nivo kaj generatorot G

Базните големини за 10 kV напонско ниво, при генераторот G, сега ќе бидат:

$$k_3 = k_{T1} = (W_1/W_2)_{T1} = 10,5/110 = 0,09545; \; S_{B3} = S_B = 50 \text{ MVA};$$

$$U_{B3} = U_{B1}\cdot k_3 = 110\cdot 0,09545 = 10,5 \text{ kV}; \; I_{B3} = I_{B1}/k_3 = 0,262/0,09545 = 2,775 \text{ kA};$$

$$Z_{B3} = Z_{B1}\cdot k_3^2 = 242\cdot 0,09545^2 = 2,205\ \Omega; \; Y_{B3} = 1/Z_{B3} = 1/2,205 = 0,45352 \text{ S}.$$

4. 10 kV naponsko nivo kaj sinhroniot kompenzator SK

За 10 kV напонско ниво при синхрониот компензатор, базните големини ќе бидат:

$k_4 = k_{T2} = (W_{3n}/W_{1n})_{T2} = 10,5/110 = 0,09545;\ S_{B4} = S_B = 50\ \text{MVA}$;

$U_{B4} = U_{B1} \cdot k_4 = 110 \cdot 0,09545 = 10,5\ \text{kV}$;

$I_{B4} = I_{B1}/k_4 = 0,262/0,09545 = 2,775\ \text{kA}$;

$Z_{B4} = Z_{B1} \cdot k_4^2 = 242 \cdot 0,09545^2 = 2,205\ \Omega$;

$Y_{B4} = 1/Z_{B4} = 1/2,205 = 0,45352\ \text{S}$.

Откога ги пресметавме соодветните базни величини за секое напонско ниво, преминуваме кон втората фаза од задачата а тоа е пресемтување на единичните (pu) величини.

Ако со $\underline{X}$ ја означиме физичката, во општ случај комплексна, големина (напон, струја, моќност, импеданција или адмитанција), а со X_B нејзината базна вредност (која што секогаш е реална вредност), тогаш единичната (pu) големина на X ќе ја бележиме со X_{pu} и таа ќе биде:

$$X_{pu} = \frac{X}{X_B}.$$

Единичната големина X_{pu}, во општ случај претставува комплексен број и има димензија (pu) (per unit), односно се изразува во релативни единици.

Сега, на ваков начин лесно ќе ги пресметаме pu параметрите (односно параметрите изразени во pu) во заменска та шема на прикажаната мрежа:

$X_{G\,pu} = X_G / Z_{B3} = 5,25/2,205 = 2,38095\,\text{pu}$.

Понатаму, за трансформаторот T1, чии што параметри $\underline{Z}_{T1}$ и $\underline{Y}_{T1}$ се сведени на 110 kV ниво, ќе имаме:

$Z_{T1\,pu} = Z_{T1}/Z_{B1} = (2,66 + j41,98)/242 = (10,992 + j173,471) \cdot 10^{-3}\,\text{pu}$;

$$\underline{Y}_{T1\,pu} = \underline{Y}_{T1}/Y_{B1} = \frac{\underline{Y}_{T1}}{Y_{B1}} = \frac{4,91 - j47,64) \cdot 10^{-6}}{4,130^{-3}} = (1,189 - j11,535) \cdot 10^{-3}\,\text{pu},$$

За водот V1, чии што параметри се, исто така , на 110 kV ниво, ќе имаме:

$\underline{Z}_{V1\,pu} = \underline{Z}_{V1}/Z_{B1} = (2 + j8)/242 = (8,264 + j33,05) \cdot 10^{-3}\,\text{pu}$;

$\underline{Y}_{V1\,pu} = \underline{Y}_{V1}/Y_{B1} = (2 + j54) \cdot 10^{-6} \cdot 242 = (0,484 + j13,075) \cdot 10^{-3}\,\text{pu}$

Слично ги добиваме вредностите на параметрите од останатите елементи на мрежата:

$\underline{Z}_{V2\,pu} = (0,153 + j0,2143)\,\text{pu}$; $\underline{Y}_{V2\,pu} = j1,1503 \cdot 10^{-3}\,\text{pu}$;

$\underline{Y}_{T1\,pu} = (1,602 - j17,199) \cdot 10^{-3}\,\text{pu}$; $\underline{Z}_{1\,pu} = (0,017 + j0,337)\,\text{pu}$

$\underline{Z}_{2\,pu} = (0,010 - j0,212)\ \text{pu}$; $\underline{Z}_{3\,pu} = (0,031 + j0,041)\ \text{pu}$

Моќноста на потрошувачот $\underline{S}$ и моќноста Q_{SK} што синхрониот компензатор ја произведува, изразени во релативни единици, ќе бидат:

$$\underline{S}_{pu} = \frac{\underline{S}}{S_B} = \frac{8 + j6}{50} = (0,16 + j0,12)\ \text{pu}; \qquad Q_{SK\,pu} = \frac{Q_{SK}}{S_B} = \frac{10}{50} = 0,2\ \text{pu}.$$

■ ■ ■

Задача 3. За мрежата прикажана на сликата да се нацрта заменската шема и да се изврши сведување на нејзините параметри на 10 kV напонско ниво.

Податоци за елементите на мрежата:

T1 и T2: 25 MVA; 110/10,5 kV /kV; u_k% = 11%; ΔP_{Cun} = 130 kW; ΔP_{Fe} = 30 kW; i_0% = 1 %.

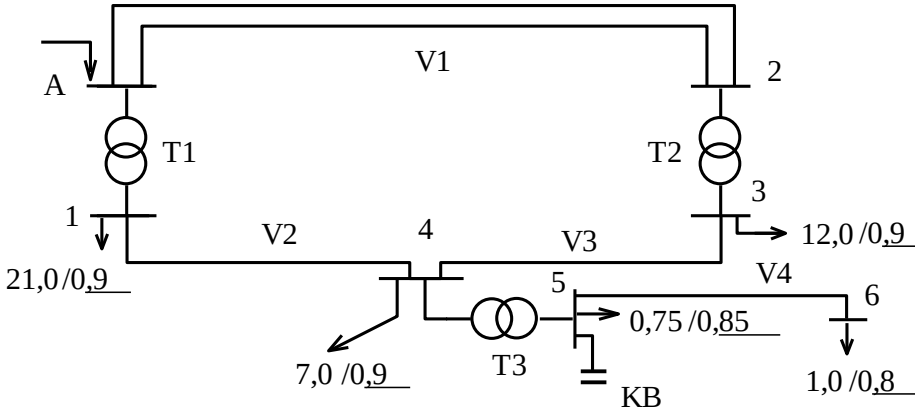
T3: 2×1 MVA; 10/0,4 kV/kV; u_k% = 6%; ΔP_{Cun} = 24 kW; ΔP_{Fe} = 5,5; i_0% = 0,7 %.

V1: Al/^ 240/40 mm^2 ; D_m = 5 m; l_1 = 25 km.

V2 и V3: Al/^ 95/15 mm^2 ; D_m = 1 m; l_2 = 10 km; l_3 = 5 km.

V4: НН кабелски вод $\underline{z}$ = (0,124 + j0,06) Ω/km ; l_4 = 0,3 km.

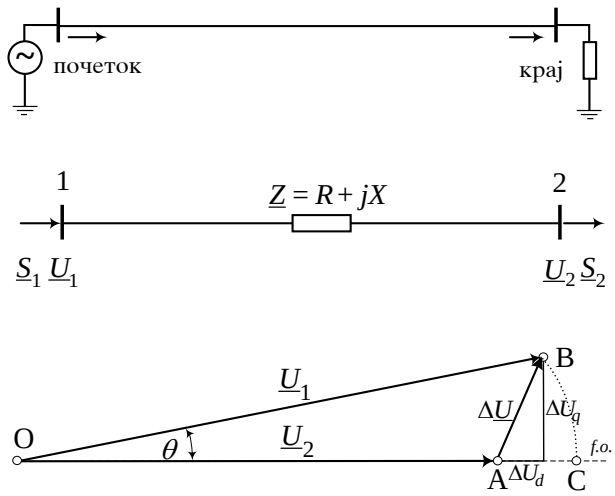
KB: Q_{KB} = 0,5 Mvar.



■ ■ ■

VI. ПРЕСМЕТКА НА НА ОТВОРЕНИ (РАДИЈАЛНИ) МРЕЖИ

6.1. ЗАГУБА НА НАПОН И ЗАГУБА НА МОЌНОСТ ВО ТРИФАЗЕН ВОД



Слика 2.1. Шематски приказ на трифазен вод и негов фазорски дијаграм

Водот претставува четворопол со два пристапа. Оној пристап каде што се наоѓа изворот на моќност се нарекува *почеток на водот* (sending end), додека другиот, на којшто е приклучен потрошувачот се нарекува *крај на водот* (receiving end).

На сликата (горе) е прикажан вод упростено, само со неговата редната импеданција $\underline{Z} = (R+jX)$. Водот е оптоварен на крајот со потрошувач кој зема моќност $\underline{S}_2 = (P_2+jQ_2)$ при напон $\underline{U}_2$. Напонот $\underline{U}_1$ и моќноста $\underline{S}_1$ на почетокот на водот, во општ случај, се разликуваат од напонот $\underline{U}_2$ и моќноста $\underline{S}_2$ на неговиот крај, т.е.

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta\underline{U} \tag{1}$$

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_2 + \Delta\underline{S} \tag{2}$$

Величината $\Delta\underline{U}$ што фигурира во релацијата (1) и која претставува разлика на комплексните претставници на напоните $\underline{U}_1$ и $\underline{U}_2$ се нарекува *пад на напон во водот*. Величината $\Delta\underline{S}$ што фигурира во релацијата (2.2) претставува разлика помеѓу моќноста што се испраќа на почетокот $\underline{S}_1$ и моќноста $\underline{S}_2$ што пристигува на крајот од водот. Таа се нарекува *загуба на моќност во водот*. Кога се зема предвид и капацитивноста на водот, тогаш загубата на моќност во водот $\Delta\underline{S}$ ќе биде еднаква на загубата $\Delta\underline{S}_Z$ во редната гранка, намалена за реактивната моќност Q_C произведена од погонскиот капацитет на водот.

Овие две величини можат да се изразат и преку приликите $\underline{S}_1$ и $\underline{U}_1$ на почетокот од водот:

$$\Delta\underline{U} = \Delta U_d + j\Delta U_q = \frac{P_1 \cdot R + Q_1 \cdot X}{\underline{U}_1^*} + j\frac{P_1 \cdot X - Q_1 \cdot R}{\underline{U}_1^*}, \tag{3}$$

$$\Delta\underline{S}_Z = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} \cdot (R + jX), \tag{4}$$

$$\Delta\underline{S} = \Delta\underline{S}_Z - jQ_C = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} \cdot (R + jX) - j\frac{B}{2} \cdot (U_1^2 + U_2^2). \tag{4a}$$

Но исто така тие две величини можат да се изразат и преку приликите $\underline{S}_2$ и $\underline{U}_2$ на крајот од водот:

$$\Delta\underline{U} = \Delta U_d + j\Delta U_q = \frac{P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X}{\underline{U}_2^*} + j\frac{P_2 \cdot X - Q_2 \cdot R}{\underline{U}_2^*} \tag{5}$$

$$\Delta\underline{S}_Z = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \cdot (R + jX)\,. \tag{6}$$

$$\Delta\underline{S} = \Delta\underline{S}_Z - jQ_C = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \cdot (R + jX) - j\frac{B}{2} \cdot (U_1^2 + U_2^2)\,. \tag{6a}$$

Како што гледаме, загубата на моќност во редната гранка $\Delta\underline{S} = (\Delta P + j\Delta Q)$ зависи од моќноста на потрошувачот. Таа, значи, може да се изрази или преку приликите на почетокот (P_1, Q_1 и U_1) или преку приликите на крајот од водот (P_2, Q_2 и U_2).

Слично, падот на напон $\Delta\underline{U}$ исто така зависи од оптоварувањето и може да се изрази било преку приликите на почетокот (P_1, Q_1 и U_1), било преку приликите на крајот (P_2, Q_2 и U_2) на водот.

Разликата на ефективните вредности (модулите) на напоните $\underline{U}_1$ и $\underline{U}_2$ се вика *загуба на напон* во водот:

$$\Delta U = |\underline{U}_1| - |\underline{U}_2| = U_1 - U_2 \tag{7}$$

Во согласност со фазорскиот дијаграм на напони од сликата 1 се добива релацијата:

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_d)^2 + \Delta U_q^2} = (U_2 + \Delta U_d) \cdot \sqrt{1 + \frac{\Delta U_q^2}{(U_2 + \Delta U_d)^2}} \tag{8}$$

или приближно:

$$U_1 \approx U_2 + \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot (U_2 + \Delta U_d)} \approx U_2 + \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot U_\mathrm{n}} \tag{9}$$

Кај нисконапонските и среднонапонските водови ($U_\mathrm{n} \leq 35$ kV), вклучувајќи ги тука и 110 kV надземни водови, односот $\Delta U_q / U_2 \ll 1$ и членот $(\Delta U_q / U_2)^2$ слободно може да се занемари. На тој начин, за загубата на напон (со голема точност) можеме да напишеме:

$$\Delta U = U_1 - U_2 \approx \Delta U_d = \frac{P_1 \cdot R + Q_1 \cdot X}{U_1} = \frac{P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X}{U_2}\,. \tag{10}$$

Бидејќи во нормалните режими на работа напоните во јазлите на електричните мрежи малку се разликуваат од својата номинална вредност, често пати, кога точноста на пресметките не е особено важна, а во недостаток на податок за напонот обично усвојуваме $U \approx U_\mathrm{n}$ и на тој начин се служиме и со следните упростени формули за пресметување на загубите на напон и моќност во електричен вод:

$$\Delta U \approx \frac{P_1 \cdot R + Q_1 \cdot X}{U_\mathrm{n}} \quad \text{i l i} \quad \Delta U \approx \frac{P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X}{U_\mathrm{n}} \tag{11}$$

$$\Delta\underline{S}_Z = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_\mathrm{n}^2} \cdot (R + jX) \quad \text{i l i} \quad \Delta\underline{S}_Z = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_\mathrm{n}^2} \cdot (R + jX) \tag{12}$$

Вкупните загуби на моќност во водот $\Delta\underline{S}$ ќе се добијат кога од загубите $\Delta\underline{S}_Z$ во импеданцијата на водот $\underline{Z}$ се одземе генерираната капацитивна моќност на водот $Q_C \approx B \cdot U_n^2$:

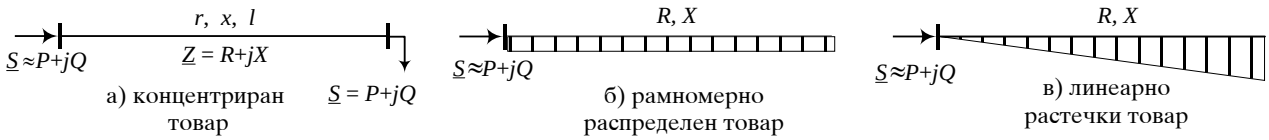
$$\Delta\underline{S} \approx \Delta\underline{S}_Z - jB \cdot U_n^2 \approx \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_n^2} \cdot (R + jX) - jB \cdot U_n^2 \text{ или :}$$
$$\Delta\underline{S} \approx \Delta\underline{S}_Z - jB \cdot U_n^2 \approx \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_n^2} \cdot (R + jX) - jB \cdot U_n^2. \tag{13}$$

6.2. ЗАГУБА НА НАПОН И ЗАГУБА НА МОЌНОСТ ВО СН И НН ВОДОВИ

При пресметувањето на СН и НН ($U_n \leq 35$ kV) водови се дозволени следните упростувања:

1) бидејќи реактивната моќност генерираната од капацитноста на водовите е мала и изнесува само неколку проценти од реактивната моќност на товарот, се занемарува влијанието на капацитивноста на водовите;
2) при пресметките на напонските прилики во мрежата се занемарува влијанието на попречната компонента на падот на напон, т.е. се зема дека е $\Delta U_q \approx 0$. Тоа дозволува загубата на напон и падот на напон во водот да се изедначат а фазорите на напоните во мрежата да се третираат како колинеарни вектори;
3) Напонските прилики кај СН мрежи, а особено кај НН мрежи, заради построгите критериуми за квалитет на испорачаната електрична енергија на потрошувачите, треба да бидат контролирани така што напоните во било која точка од мрежата се движат во тесен интервал околу неговата номинална вредност (нпр. $U_n \pm 5\% \cdot U_n$), Тргнувајќи од тој факт пресметките можат да се вршат упростено, со претпоставката $U \approx U_n$.

Се посматра вод со должина l и со параметри на редната гранка $R = r \cdot l$ и $X = x \cdot l$, со вкупно (сумарно оптоварување) $\underline{S} = (P+jQ)$. Врз основа на општите изрази (1) … (13), уважувајќи ги притоа упростувањата изложени во оваа точка, се добиваат следните приближни изрази за пресметување на загубата на напон ΔU и загубата на моќност ΔP во НН и СН водови за неколку специфични случаи што се јавуваат во практиката, означени на сликата 2 со а) б) и в):



Слика 2. Три случаи на оптоварување на еден магистрален НН вод

а) Товарот S = (P+jQ) е концентриран на крајот од водот.

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n} = \frac{P \cdot r + Q \cdot x}{U_n} \cdot l = P \cdot l \cdot \frac{r + x \cdot tg\varphi}{U_n}, \tag{14}$$

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = P \cdot l \cdot \frac{100 \cdot (r + x \cdot tg\varphi)}{U_n} = \frac{P \cdot l}{M}, \tag{15}$$

каде што е:

$$M = \frac{U_n^2}{100 \cdot (r + x \cdot tg\varphi)}. \tag{16а}$$

Кога моќноста P се изразува во kW, должината l во km и напонот U_n во kV, тогаш константата M се пресметува со изразот (2.26б):

$$M = \frac{10 \cdot U_n^2}{r + x \cdot tg\varphi}. \tag{16б}$$

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \cdot R = \frac{P^2 \cdot R}{U_n^2 \cdot \cos^2\varphi} = \frac{P^2 \cdot R}{U_n^2} \cdot \left(1 + tg^2\varphi\right), \tag{17}$$

$$\Delta P\% = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100 = \frac{100 \cdot P \cdot R}{U_n^2} \cdot \left(1 + tg^2\varphi\right); \tag{18}$$

$$\frac{\Delta P\%}{\Delta U\%} = \frac{1 + tg^2\varphi}{1 + (x/r) \cdot tg\varphi}. \tag{19}$$

б) Товарот S = (P+jQ) е рамномерно распределен по должината на водот.

$$\Delta U = \frac{1}{2} \cdot \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n} = \frac{P \cdot l}{2} \cdot \frac{r + x \cdot tg\varphi}{U_n}, \tag{20}$$

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{P \cdot l}{2} \cdot \frac{100 \cdot (r + x \cdot tg\varphi)}{U_n} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P \cdot l}{M}, \tag{21}$$

$$\Delta P = \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \cdot R = \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 \cdot R}{U_n^2 \cdot \cos^2\varphi} = \frac{P^2 \cdot R}{3 \cdot U_n^2} \cdot \left(1 + tg^2\varphi\right), \tag{22}$$

$$\Delta P\% = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100 = \frac{100 \cdot P \cdot R}{3 \cdot U_n^2} \cdot \left(1 + tg^2\varphi\right); \tag{23}$$

$$\frac{\Delta P\%}{\Delta U\%} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1 + tg^2\varphi}{1 + (x/r) \cdot tg\varphi}. \tag{24}$$

в) Товарот S = (P+jQ) е со линеарно растечка распределба по должината на водот.

$$\Delta U = \frac{2}{3} \cdot \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n} = \frac{2}{3} \cdot \frac{r + x \cdot tg\varphi}{U_n} \cdot P \cdot l, \tag{25}$$

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{2}{3} \cdot \frac{100 \cdot (r + x \cdot tg\varphi)}{U_n} \cdot P \cdot l = \frac{2}{3} \cdot \frac{P \cdot l}{M}, \tag{26}$$

$$\Delta P = \frac{8}{15} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \cdot R = \frac{8}{15} \cdot \frac{P^2 \cdot R}{U_n^2 \cdot \cos^2\varphi} = \frac{8}{15} \cdot \frac{P^2 \cdot R}{U_n^2} \cdot \left(1 + tg^2\varphi\right), \tag{27}$$

$$\Delta P\% = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100 = \frac{800 \cdot P \cdot R}{15 \cdot U_{\mathrm{n}}^2} \cdot \left(1 + tg^2\varphi\right); \tag{28}$$

$$\frac{\Delta P\%}{\Delta U\%} = \frac{4}{5} \cdot \frac{1 + tg^2\varphi}{1 + (x/r) \cdot tg\varphi}. \tag{29}$$

6.3. ЗАГУБА НА НАПОН И ЗАГУБА НА МОЌНОСТ ВО РАЗГРАНЕТИ ОТВОРЕНИ СН И НН МРЕЖИ

Пресметката на режимот на работа на една мрежа се врши, во принцип, заради исполнување на една од следните две задачи:

1) Задача: утврдување на прифатливоста на режимот на работа на една мрежа. Во овој случај станува збор за зададена конкретна мрежа со точно дефинирани параметри (должини и пресеци на водовите, номинални моќности на трансформаторите и сл.) и за прецизно дефиниран конзум, т.е. потрошувачи со точно дефинирани локации и моќности. Кај ваквата задача најчесто се бара да се утврди:

– дали струите во гранките од мрежата се под своите максимални вредности (задоволување на термичкиот критериум);
– дали напоните во одделните потрошувачки јазли се наоѓаат во однапред специфицираните граници со што се обезбедува определен квалитет на напонот при испораката на електричната енергија (задоволување на напонскиот критериум, т.е. критериумот за квалитет);
– колкави се загубите на моќност во мрежата (задоволување на критериумот за економичност);
– да се направи проценка на годишните загуби на електрична енергија во мрежата (повторно задоволување на критериумот за економичност/рентабилност).

2 Задача: избор (димензионирање) на пресеците на одделните делници од мрежата при точно дефиниран конзум и точно дефинирана топологија и структура на самата мрежа. Овде, пак, станува збор за некоја идна мрежа којашто допрва ќе се гради. Таа ќе треба да напојува некој иден конзум. Кај оваа задача се воведуваат и определени услови и ограничувања кои ќе овозможат со изборот на параметрите на мрежата да се постигнат некои дополнителни критериуми односно цели. Најчесто се бара, безусловно, да биде задоволен критериумот за квалитет на испорачаната електрична енергија којшто се исполнува преку задоволување на напонскиот критериум ($\Delta U \leq \Delta U_{doz}$). Честопати се воведуваат и дополнителни критериуми каков што е, на пример, критериумот за минимални инвестиции за новата мрежа, критериумот за минимални загуби на моќност и енергија во мрежата, критериумот на константен пресек на водовите од мрежата и слично.

Дистрибутивните мрежи за коишто овде станува збор се најчесто големи по обем, разгранети и отворени. Отворена мрежа се нарекува онаа мрежа која што не содржи ниту една контура. Такви се најчесто нисконапонските (НН) и среднонапонските (СН) дистрибутивни и индустриски мрежи. Тие се, по правило, и доста разгранети. Основна одлика на разгранетите среднонапонски и нисконапонски мрежи е таа што се тие составени од водови со релативно мали должини и од нив се напојува поголем број потрошувачи. Како илустрација ќе го наведеме податокот дека, на пример, во скопската СН дистрибутивна мрежа во 2005 година постојеа околу 2800 трансформаторски станици СН/НН. Од друга страна секоја таква трансформаторска станица (ТС), за СН дистрибутивна мрежа претставува

„потрошувач“, а самата ТС СН/Н, пак, напојува сопствена НН мрежа (0,4 kV) која може да се состои од десетици па и стотици локални НН потрошувачи, што значи дека вкупниот број потрошувачи во целата скопска дистрибутибна мрежа изнесува неколку десетици илјади.

Во случаите кога станува збор за една дистрибутивна мрежа со поголем број гранки и јазли многу е непрактично, дури и неможно, пресметките на разните режими на работа на таквите мрежи да се вршат со висока точност и со висок степен на детаљизација, како што тоа вообичаено се прави кај ВН преносни водови и мрежи. Затоа за ваквиот тип мрежи во практиката се развиени и се користат специјални постапки со кои се дозволуваат низа упростувања и занемарувања, без тоа значително да се одрази врз точноста на пресметките.

Повеќето од тие занемарувања и упростувања се веќе изложени во претходната точка 2.2, а овде ќе биде наведена уште една. Определувањето на распределбата на моќностите во ваквите мрежи може да се врши само врз основа на моќностите на потрошувачите, без да се води сметка за загубите на моќност во оделните нејзини елементи. Значи, тргнувајќи од претпоставката (или поточно кажано апроксимацијата) $U \approx U_n$, директно, од примената на I Кирхофов закон за струи за одделните јазли во мрежата, произлегува дека пресметката на моќноста низ некоја гранка од мрежата се сведува на директно сумирање на моќностите на сите потрошувачи што се напојуваат преку таа гранка.

Сите наведени упростувања овозможуваат развивање на специјални методи за решавање на ваквите мрежи кои значително ја олеснуваат пресметковната процедура без тоа во голема мера да влијае врз точноста на пресметките.

6.4. ЗАДАЧИ ОД ОБЛАСТА НА РЕШАВАЊЕ НА ПРЕНОСНИТЕ ВОДОВИ

Задача 1. Се посматра 110 kV вод со должина l =100 km, со подолжни параметри: $\underline{z}$ =(0,13+j0,4) Ω/km и $\underline{y} = jb$ = j2,75 μS/km. Водот е оптоварен на крајот со потрошувач чија моќност изнесува $\underline{S}_2 = (P_2 + jQ_2)$ = (30 + j10) MVA и притоа напонот при потрошувачот изнесува U_2 = 110 kV.

Да се пресметаат приликите на почетокот од водот U_1 = ? P_1 = ? и Q_1 = ?.

Решение:

Задачата ќе ја решиме на два начина: најнапред со помош на монофазната (еднополната) π–заменска шема, а потоа со помош на т.н. метод на „биланси на моќности“, користејќи ги притоа релациите (5) и (6).

Со оглед на тоа дека се работи за вод со нормална должина (l < 250 km), параметрите на π−заменската шема на водот се пресметуваат со слеените равенки:

$R = r \cdot l = 0{,}13 \cdot 100 = 13\ \Omega$; $X = x \cdot l = 0{,}40 \cdot 100 = 40\ \Omega$; $(B/2) = 0{,}5 \cdot b \cdot l = 137{,}5\ \mu S$.

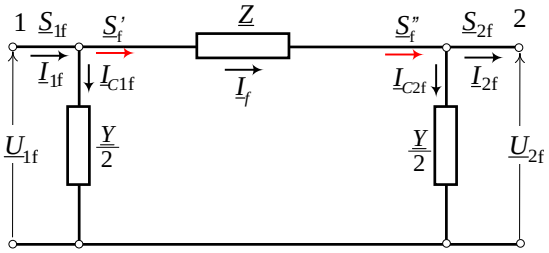
а) Решавање на водот со помош на еднофазната π–заменска шема

Ефективната вредност на фазниот напон на крајот од водот ќе биде:

$$U_{2f} = U_2 / \sqrt{3} = 110 / \sqrt{3} = 63{,}508 \text{ kV}.$$

Трифазната привидна моќност на потрошувачот S_2 ќе биде:

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = \sqrt{30^2 + 10^2} = 31{,}623 \text{ MVA}.$$



Слика 1.1. π–заменска шема на водот

Аргументот φ_2 на моќноста $\underline{S}_2$ кој е наедно и агол помеѓу фазорите $\underline{U}_{2f}$ и $\underline{I}_{2f}$ ќе биде:

$$\varphi_2 = \operatorname{arc\,tg}\frac{Q_2}{P_2} = \operatorname{arc\,tg}\frac{10}{30} = 18,435° \quad \Rightarrow \quad \cos\varphi_2 = 0,949 \text{ i } \sin\varphi_2 = 0,316\cdot$$

Ефективната вредност на фазната струја (а тоа ќе биде наедно и на линиската струја) на крајот од водот ќе биде:

$$\underline{S}_2 = 3\cdot\underline{U}_{2f}\cdot\underline{I}_{2f}^* \quad \Rightarrow \quad I_{2f} = \frac{S_2}{3\cdot U_{2f}};$$

$$\underline{S}_2 = \frac{31,623\cdot 10^6}{3\cdot 63,508\cdot 10^3} = 166 \text{ A} \equiv 0,166 \text{ kA}.$$

За полесно натамошно пресметување, ќе го поставиме фазорот $\underline{U}_{2f}$ на фазната оска:

$$\underline{U}_{2f} = U_{2f}\cdot e^{j0} = U_{2f}\angle 0° \text{ kV} = (63,508 + j0) \text{ kV}.$$

Тогаш, за струјата $\underline{I}_{2f}$ ќе добиеме:

$$\underline{I}_{2f} = I_{2f}\cdot e^{-j\varphi_2} = I_{2f}\cdot(\cos\varphi_2 - j\sin\varphi_2) = (0,158 - j0,052) \text{ kA}.$$

Понатаму, струјата $\underline{I}_{C2}$ низ попречната гранка на крајот од водот ќе биде:

$$\underline{I}_{C2} = \frac{\underline{Y}}{2}\cdot\underline{U}_{2f} = j137,5\cdot 10^{-6}\cdot 63,508\cdot 10^3 = j9 \text{ A} = j\ 0,009 \text{ kA}.$$

Струјата $\underline{I}_f$ во редната гранка од водот, во согласност со I Кирхофов закон за струи за јазолот „2“, ќе биде:

$$\underline{I}_f = \underline{I}_{2f} + \underline{I}_{C2f} = (0,158 - j0,052) + j0,009 = (0,158 - j0,043) \text{ kA}.$$

Падот на напон $\Delta\underline{U}$ во редната гранка од π–заменската шема на водот ќе биде:

$$\Delta\underline{U}_f = \underline{Z}\cdot\underline{I}_f = (13 + j40)\cdot(0,158 - j0,043) = (3,797 + j5,730) \text{ kV}.$$

$$\underline{U}_{1f} = \underline{U}_{2f} + \Delta\underline{U}_f = (67,306 + j5,730) \text{ kV},$$

$$\underline{U}_1 = \sqrt{3}\cdot\underline{U}_{1f} = (116,577 + j9,924) \text{ kV} = 117\angle 4,866° \text{ kV}.$$

Струјата $\underline{I}_{C1}$ низ првата напречна гранка од водот ќе биде:

$$\underline{I}_{C1} = (\underline{Y}/2)\cdot U_{1f} = j137,5\cdot 10^{-6}\cdot(67,284 + j5,761)\cdot 10^3 = (-0,8 + j9,3) \text{ A} \approx j0,009 \text{ kA}.$$

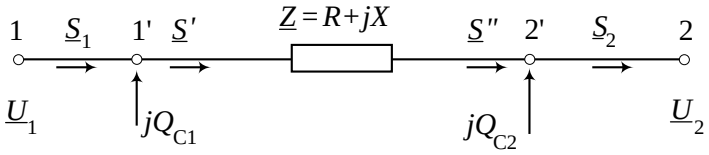
$$\underline{I}_{1f} = \underline{I}_{12f} + \underline{I}_{C1f} = (0,158 - j0,043) + j0,01 = (0,157 - j0,034) \text{ kA}.$$

$$\underline{S}_1 = 3\cdot\underline{U}_{1f}\cdot\underline{I}_{1f}^* = 3\cdot(67,306 + j5,730)\cdot(0,157 - j0,034)^* = (31,042 + j9,659) \text{ MVA}.$$

Значи, бараните величини ќе бидат:

$\underline{U}_1 = 117 \cdot e^{j4,866°}$ kV; $P_1 = 31,042$ MW; $Q_1 = 9,659$ Mvar.

б) Решавање на водот со методот на биланси на моќности



Слика 1.2. Решавање на водот со помош на методот на биланс на моќности

Реактивната моќност Q_{C2} што ја генерира капацитивната попречна гранка на крајот од водот ќе биде:

$$Q_{C2} = (B/2) \cdot U_2^2 = 137,5 \cdot 10^{-6} \cdot 110^2 \cdot 10^6 = 1,664 \text{ Mvar.}$$

Од билансот на моќностите (I Кирхофов закон за моќности) за јазелот "2'" добиваме:

$$\underline{S}'' = \underline{S}_2 - jQ_{C2} = (30 + j10) - j1,664 = (30 + j8,336) \text{ MVA.}$$

Загубата на моќност $\Delta\underline{S}_Z$ во импеданцијата $\underline{Z}$ на водот ќе биде:

$$\Delta\underline{S}_Z = \frac{P''^2 + Q''^2}{U_2^2} \cdot (R + jX) = \frac{30^2 + 8,336^2}{110^2} \cdot (13 + j40) = (1,042 + j3,205) \text{ MVA}.$$

Загубата на напон $\Delta\underline{U}$ во импеданцијата на водот $\underline{Z}$ ќе биде:

$$\Delta\underline{U} = \Delta U_d + j\Delta U_q = \frac{P'' \cdot R + Q'' \cdot X}{\underline{U}_2^*} + j\frac{P'' \cdot X - Q'' \cdot R}{\underline{U}_2^*}; \quad \Delta\underline{U} = (6,577 + j9,924) \text{ kV.}$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta\underline{U} = (110 + j0) + (6,577 + j9,924);$$
$$\underline{U}_1 = (116,577 + j9,924) \text{ kV} = 117\angle 4,866° \text{ kV.}$$

$$\underline{S}' = \underline{S}'' + \Delta\underline{S}_Z = (30 + j8,336) + (1,042 + j3,205) = (31,042 + j11,541) \text{ MVA}.$$

Моќноста $\underline{S}_1$ што изворот му ја предава на водот на неговиот почетокот ќе биде:

$$Q_{C1} = (B/2) \cdot U_1^2 = 1,882 \text{ Mvar;}$$
$$\underline{S}_1 = \underline{S}' - jQ_{C1} = (31,042 + j11,541) - j1,882 = (31,042 + j9,659) \text{ MVA.}$$

Значи, решението гласи:

$$\underline{U}_1 = 117\angle 4,87° \text{ kV}; \quad P_1 = 31,042 \text{ MW}; \quad Q_1 = 9,659 \text{ Mvar}.$$

За загубите на напон и моќност во водот, според тоа, ќе добиеме:

$\Delta U = U_1 - U_2 = 117 - 110 = 7$ kV;

$\Delta P = P_1 - P_2 = 31,042 - 30 = 1,042$ MW ;

$\Delta Q = Q_1 - Q_2 = 9,659 - 10 = -0,341$ Mvar.

*) ***Забелешка:*** Бидејќи фазните и линиските струи кај трифазните надземни водови се исти ($I_f = I$), од сега па натаму индексот „f“ кај струите низ водот најчесто ќе го испуштаме како непотребен.

■ ■ ■

Задача 2. Даден е 110 kV вод, долг l = 30 km, со подолжни параметри $\underline{z}$ = (0,21 + j0,40) Ω/km. Водот е оптоварен на крајот со моќност $\underline{S}_2$ = (40 + j20) MVA, а напонот на неговиот почеток изнесува U_1 =115kV.

Да се определат напонот на крајот на водот U_2, и моќноста на неговиот почеток $\underline{S}_1$ за следните два случаја:

а) ако се занемари погонскиот капацитет на водот,

б) со уважување на погонскиот капацитет на водот.

Решение:

а) Решавање на водот со занемарување на погонскиот капацитет

Бараното решение може да се добие на два начина. Според првиот начин, за одредување на напонот U_2 ќе се користиме со напонската равенка:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta\underline{U} = \underline{U}_2 + \frac{P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X}{\underline{U}_2^*} + j\frac{P_2 \cdot X - Q_2 \cdot R}{\underline{U}_2^*}$$

во која што падот на напон $\Delta\underline{U}$ се изразува преку познатите моќности на крајот од водот.

Последната равенка најнапред ја множиме со конјугираната вредност на напонот на крајот $(\underline{U}_2)^*$:

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{U}_2^* = [U_2^2 + (P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X)] + j[P_2 \cdot X - Q_2 \cdot R]$$

а потоа, со изедначување на модулите на левата и десната страна и нивно квадрирање, ја добиваме следната биквадратна равенка:

$$U_1^2 \cdot U_2^2 = [U_2^2 + (P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X)]^2 + [P_2 \cdot X - Q_2 \cdot R]^2.$$

Понатаму, со воведување на смената:

$$v = (U_2/U_1)^2,$$

ја добиваме следната квадратна равенка:

$$v^2 - v \cdot (1 - 2\frac{P_2 R + Q_2 X}{U_1^2}) + \frac{(P_2^2 + Q_2^2) \cdot (R^2 + X^2)}{U_1^4} = 0, \quad \text{ili:}$$

$$v^2 - 0{,}9259955 \cdot v - 0{,}00210051 = 0.$$

Решенијата на оваа равенка гласат:

v_1 = 0,9233205 i v_2 = 0,0022748.

Според тоа, разгледуваниот проблем ќе има вкупно четири решенија:

$$U_2 = \pm U_1 \cdot \sqrt{v_1} = \pm 115 \cdot \sqrt{0{,}9233205} = \pm 110{,}503 \text{ kV i}$$

$$U_2 = \pm U_1 \cdot \sqrt{v_2} = \pm 115 \cdot \sqrt{0{,}0022748} = \pm 5{,}485 \text{ kV}.$$

Од сите четири решенија, единствено можно и логично е првото позитивно решение, односно решението на задачата гласи:

U_2 =110,503 kV.

Во тој случај, за загубите $\Delta\underline{S}$ и за моќноста $\underline{S}_1$ ќе добиеме:

$$\Delta\underline{S} = \Delta\underline{S}_Z = (\Delta P + j\Delta Q) = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2}\cdot(R + jX) = (1{,}032 + j1{,}966)\ \text{MVA},$$

$\underline{S}_1 = \underline{S}_2 + \Delta\underline{S} = (41{,}032 + j21{,}966)$ MVA.

Ако не го земеме превид фактот дека погонскиот капацитет на водот во пресметките е занемарен, ова решение може да се третира како „егзактно“ бидејќи е добиено без какво и да е друго занемарување. Но во натамошниот дел од задачата ќе видиме дека кај ВН водови ($U_n \geq 110$ kV) погонскиот капацитет на водовите не би требало да се занемарува.

Истиот проблем може да се реши на многу поедноставен начин, ако тргнеме од приближната равенка за пад на напон:

$$U_1 = U_2 + \frac{P_2R + Q_2X}{U_2},$$

odnosno:

$$U_2 = U_1 - \frac{P_2R + Q_2X}{U_2}.$$

во која е занемарена попречната компонента ΔU_q (што може сосема слободно да се направи за сите надземни водови со номинален напон $U_n \leq 110$ kV).

Во последната равенка единствена непозната е напонот U_2. Од неа следува релацијата:

$$U_2^2 = U_1 \cdot U_2 - (P_2R + Q_2X),$$

или

$$U_2^2 - U_1 \cdot U_2 + (P_2R + Q_2X) = 0.$$

Со замена на конкретните вредности, ќе добиеме:

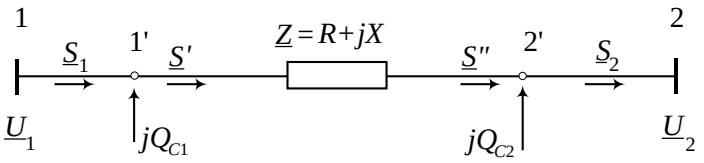
$$U_2^2 - 115 \cdot U_2 + 492 = 0; \quad \Rightarrow \quad U_2 = 110{,}55 \ \text{kV} \ \text{ i } \ U_2 = 4{,}45 \ \text{kV}.$$

Второто решение нема логична смисла, па според тоа, резултатот гласи:

$U_2 = 110{,}55$ kV,

што е за само 0,04% поголемо од неговата, условно кажано, „точна“ вредност.

б) Решавање на водот со уважување на погонскиот капацитет



Слика 2.1. Решавање на ВН вод со методот „биланс на моќности“

Во овој случај моќноста $\underline{S}''$ на крајот од редната гранка на водот и моќноста на потрошувачот $\underline{S}_2$ се разликуваат поради инјекцијата на моќност Q_{C2} што ја генерира попречната капацитивна гранка на крајот од водот. Затоа сега решавањето на водот ќе го вршиме со помош на шемата прикажана на сликата 2.1. Во оваа шема водот не е претставен со соодветната π–еквивалентна шема, во која покрај редната гранка $\underline{Z}$ фигурираат и 2 попречни гранки со адмитанции Y/2, туку тој е претставен само со редната гранка, додека попречните гранки, со кои се опфаќа погонскиот капацитет на водот, се симулираат со соодветни инјекции на реактивна моќност Q_{C1} и Q_{C2}.

Затоа, најнапред, со помош на следната општа релација ќе ја пресметаме подолжната капацитивна спроводност на водот b:

$$b \cdot x = \frac{\omega^2}{c_o^2} \approx 1{,}1 \cdot 10^{-6} \Rightarrow \quad b = \frac{\omega^2}{x \cdot c_o^2} = \frac{1{,}1 \cdot 10^{-6}}{0{,}4} = 2{,}74\ \mu\text{S/km}; \quad B = b \cdot l = 82{,}2\,\mu\text{S}.$$

За да ја пресметаме реактивната моќност Q_{C2} генерирана од капацитетот на крајот од водот, потребно е да ни биде познат напонот U_2. Бидејќи тој не ни е познат, но сепак знаеме дека тој не може во голема мера да отстапува од својата номинална вредност U_n, моќноста Q_{C2} ќе ја пресметаме приближно, земајќи дека е $U_2 = U_n$. Тогаш ќе имаме:

$$Q_{C2} = (B/2) \cdot U_2^2 = (B/2) \cdot U_n^2 = 0{,}497 \text{ Mvar}.$$

Понатаму имаме:

$\underline{S}'' = \underline{S}_2 - jQ_{C2} = (40 + j19{,}503)$ MVA.

За модулите на напоните $\underline{U}_1$ и $\underline{U}_2$ приближно ќе важи:

$$U_1 = U_2 + \Delta U \approx U_2 + \Delta U_d = U_2 + \frac{P'' \cdot R + Q''' \cdot X}{U_2};$$

$$U_2^2 - U_1 \cdot U_2 + (P'' \cdot R + Q'' \cdot X) = 0; \quad \Rightarrow \quad U_2 = 110{,}605 \text{ kV}.$$

Загубите на моќност $\Delta\underline{S}_Z$ во редната гранка на водот $\underline{Z}$ ќе бидат:

$$\Delta\underline{S}_Z = \frac{P''^2 + Q''^2}{U_2^2} \cdot (R + jX) = \frac{40^2 + 19{,}503^2}{110{,}6^2} \cdot (6{,}3 + j12);$$

$$\Delta\underline{S}_Z = (1{,}02 + j1{,}943) \text{ MVA}.$$

$$Q_{C1} = (B/2) \cdot U_1^2 = 0{,}543 \text{ Mvar},$$

$$\underline{S}_1 = \underline{S}' - jQ_{C1} = (\underline{S}'' + \Delta\underline{S}_Z) - jQ_{C1} = (41{,}02 + j20{,}903) \text{ MVA}.$$

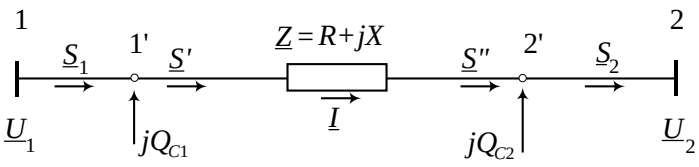
Се разбира дека вака добиеното решение е приближно бидејќи тоа се темелеше на претпоставката $U_2 = U_n$. Доколку е протребно, него можеме да го уточнуваме на тој начин што истата постапка ќе ја повториме повеќе пати. При секое повторување на постапката за напонот U_2 ќе се зема претходно добиената вредност. Уточнувањата ќе ги правиме с¢ додека разликите помеѓу новодобиената вредност на напонот U_2 и неговата претходно добиена вредност станат доволно мали. Инаку, со таква итративна постапка се добива егзактното решение на проблемот. Тоа гласи:

$$U_2 = 110{,}558 \text{ kV}; \ \theta = \angle(\underline{U}_1, \underline{U}_2) = 1{,}61°; \quad \underline{S}_1 = (41{,}0206 + j20{,}9031) \text{ MVA}.$$

■ ■ ■

Задача 3. Се посматра повторно случајот од задачата 2. Водот ги има следните параметри: l = 30 km, $\underline{z} = (0{,}21 + j0{,}40)\,\Omega$/km, $b = 2{,}74\,\mu$S/km. Моќноста на потрошувачот, приклучен на крајот од водот изнесува $\underline{S}_2 = (P_2 + jQ_2) = (40 + j20)$ MVA, а напонот на неговиот почеток изнесува U_1 =115kV. Приближно да се реши водот на начин според кој што се оперира со приликите на неговиот почеток P_1, Q_1 и U_1.

Решение:



Слика 3.1.

Во овој случај падот на напон во водот $\Delta\underline{U}$ ќе го пресметуваме со помош на равенката (2.10) во која струјата $\underline{I}$ низ редната гранка $\underline{Z}$ е изразена преку приликите на почетокот од водот P_1, Q_1 и U_1. Притоа задачата ќе ја решиме на два начина – со и без уважување на погонскиот капацитет на водот.

а) Решавање на водот со занемарување на погонскиот капацитет

Кога се занемарува погонскиот капацитет на водот врз основа на сликата 3.1 можеме да пишуваме:

$$\underline{S}'' = \underline{S}_2 = (40 + j20)\ \text{MVA};\quad \underline{S}' = \underline{S}'' + \Delta\underline{S}_Z;$$

$$\Delta S_Z = \frac{(S'')^2}{U_2^2}\cdot(R + jX) \approx \frac{P''^2 + Q''^2}{U_\text{n}^2}\cdot(R + jX);$$

$$\Delta\underline{S}_Z = \frac{40^2 + 20^2}{110^2}\cdot(6{,}3 + j12) = (1{,}041 + j1{,}984)\ \text{MVA};$$

$$\underline{S}_1 = \underline{S}' = \underline{S}'' + \Delta\underline{S} = (41{,}041 + j21{,}983)\ \text{MVA}.$$

$$\Delta U \approx \Delta U_d \approx \frac{P_1\cdot R + Q_1\cdot X}{U_1} = \frac{41{,}041\cdot 6{,}3 + 21{,}984\cdot 12}{115} = 4{,}542\ \text{kV},$$

$$U_2 = U_1 - \Delta U = 110{,}458\ \text{kV}.$$

Значи решението на задачата гласи:

$$U_2 = 110{,}458\ \text{kV};\quad P_1 = 41{,}041\ \text{MW};\quad Q_1 = 21{,}984\ \text{Mvar};\quad \underline{S}_1 = (41{,}041 + j21{,}984)\ \text{MVA}.$$

б) Решавање на водот со уважување на погонскиот капацитет

Падот на напон во водот $\Delta U = U_1 - U_2$, во согласност со сликата 2.7.1, може да се изрази и на следниот начин:

$$\Delta\underline{U} = \sqrt{3}\cdot\underline{Z}\cdot\underline{I} = \sqrt{3}\cdot(R + jX)\cdot\frac{(\underline{S}')^*}{\sqrt{3}\cdot\underline{U}_1^*} = \frac{P'\cdot R + Q'\cdot X}{\underline{U}_1^*} + j\frac{P'\cdot X - Q'\cdot R}{\underline{U}_1^*};\quad \underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \Delta\underline{U}.$$

Во прикажаната равенка фигурира моќноста $\underline{S}' = (P' + jQ')$ која што е непозната така што оваа равенка директно не може да биде решена. Но непознатата моќност $\underline{S}'$ можеме да ја „процениме“ со помош на релациите (6) и (12а), на следниот начин:

$$Q_{C2} = \frac{B}{2}\cdot U_2^2 \approx \frac{b\cdot l}{2}\cdot U_\text{n}^2 = \frac{2{,}74\cdot 10^{-6}\cdot 30}{2}\cdot 110^2\cdot 10^6 = 0{,}497\ \text{Mvar};$$

$$\Delta\underline{S}_Z = 3\cdot\underline{Z}\cdot I^2 = \frac{S''^2}{U_2^2}\cdot(R + jX) = \frac{P''^2 + Q''^2}{U_2^2}\cdot(R + jX) \approx \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{C2})^2}{U_n^2};$$

$$P'' = P_2 = 40\ \text{MW};\quad Q'' = Q_2 - Q_{C2} = 19{,}503\ \text{Mvar};$$

$$\Delta \underline{S}_Z \approx \frac{40^2 + 19{,}503^2}{110^2} \cdot (6{,}3 + j12) = (1{,}031 + j1{,}964)\ \text{MVA};$$

$$\underline{S}' = \underline{S}'' + \Delta \underline{S} = (41{,}031 + j21{,}467)\ \text{MVA}.$$

Значи добивме: $P' = 41{,}031$ MW и $Q' = 21{,}467$ Mvar. Сега, значи, моќноста $\underline{S}'$ е позната.

Заради поедноставно пресметување напонот $\underline{U}_1$ ќе го поставиме на фазната оска, т.е. усвојуваме $\underline{U}_1 = U_1 \cdot e^{j0} = (115 + j0)$ kV. Понатаму следи пресметка на падот на напон $\Delta \underline{U}$:

$$\Delta \underline{U} = \frac{P' \cdot R + Q' \cdot X}{\underline{U}_1^*} + j\frac{P' \cdot X - Q' \cdot R}{\underline{U}_1^*} = (4{,}488 + j3{,}105)\ \text{kV};$$

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \Delta \underline{U} = 115 - (4{,}488 + j3{,}105) = 110{,}512 - j3{,}105)\ \text{kV} = 110{,}556 \cdot e^{-j1{,}61^\circ}\ \text{kV}.$$

Капацитивната моќност Q_{C1} што ја генерира првата попречна гранка на водот ќе биде:

$$Q_{C1} = \frac{B}{2} \cdot U_1^2 = \frac{82{,}2 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot 115^2 = 0{,}544\,\text{Mvar}.$$

Сега, врз основа на сликата 3.1, со примена на I Кирхофов закон за моќности за јазолот 1', ја пресметуваме моќноста на почетокот од водот $\underline{S}_1$:

$$\underline{S}_1 + jQ_{C1} = \underline{S}_1' \quad \Rightarrow \quad \underline{S}_1 = \underline{S}_1' - jQ_{C1} = (41{,}031 + j20{,}923)\ \text{MVA}.$$

Значи, решението на задачата гласи:

$U_2 = 110{,}556$ kV; $P_1 = 41{,}031$ MW; $Q_1 = 20{,}923$ Mvar.

Забележуваме дека тоа се разликува сосема малку од решението добиено во првиот дел од задачата каде што генерираната реактивна моќност на водот $Q_C = Q_{C1} + Q_{C2}$ не беше земена предвид во пресметувањата. Главната разлика помеѓу овие две решенија е во големината на реактивната моќност Q_1 на почетокот од водот. Таа разлика изнесува:

21,984 – 20,923 = 1,061 Mvar,

и по својата вредност е сосема блиску до капацитивната моќност што ја генерираат напречните гранки на водот и која, приближно, изнесува:

$$Q_C = Q_{C1} + Q_{C2} = \frac{B}{2} \cdot \left(U_1^2 + U_2^2\right) = \frac{82{,}2 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot (115^2 + 110{,}556^2) \cdot 10^6 = 1{,}05\ \text{Mvar}.$$

Инаку, за потсетување, оваа задача беше веќе решена во примерот 2.5 на поинаков начин и притоа точното нејзино решение гласеше:

$$U_2 = 110{,}558\ \text{kV}; \quad \theta = \angle(\underline{U}_1, \underline{U}_2) = 1{,}61^\circ; \quad \underline{S}_1 = (41{,}0206 + j20{,}9031)\ \text{MVA}.$$

■ ■ ■

Задача 4. 110 kV надземен вод, со должина l = 30 km и подолжни параметри r = 0,21 Ω/km, x = 0,40 Ω/km и b = 2,74 μS/km, пренесува природна моќност. Напонот на крајот од водот изнесува $U_2 = U_n$ = 110 kV. Да се одредат приликите на почетокот од водот $\underline{U}_1$ и $\underline{S}_1$.

Решение:

Брановата погонска импеданција на водот Z_V и природната моќност на водот P_N ќе бидат:

$$Z_V = \sqrt{\frac{x}{b}} = \sqrt{\frac{0,4}{2,74\cdot 10^{-6}}} = 382\ \Omega\,; \quad P_N = \frac{U_2^2}{Z_V} = \frac{110^2}{382} = 31,7\ \text{MW}.$$

Кога водот пренесува природна моќност имаме:

$$P_2 = P_N = 31,7\ \text{MW}\,; \quad Q_2 = 0\,; \quad \underline{S}_2 = (31,7 + j0)\ \text{MVA}.$$

Во согласност со ознаките од сликата 3.1, реактивната моќност Q_{C2} што ја генерира попречната капацитивна гранка на крајот од водот ќе биде:

$$Q_{C2} = (B/2)\cdot U_2^2 = 41,1\cdot 10^{-6}\cdot 110^2 = 0,497\ \text{Mvar}.$$

Понатаму имаме:

$$\underline{S}'' = \underline{S}_2 - jQ_{C2} = (31,7 - j0,497)\ \text{MVA}.$$

Ако усвоиме $\underline{U}_2 = U_2\cdot e^{j0} = 110\underline{/0}$ kV и ако не ја занемариме капацитивната моќност Q_{C2}, за напонот на почетокот од водот ќе добиеме:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta\underline{U} = \underline{U}_2 + \frac{P''\cdot R + Q''\cdot X}{\underline{U}_2^*} + j\frac{P''\cdot X - Q''\cdot R}{\underline{U}_2^*}$$

$$\underline{U}_1 = 110 + \frac{31,7\cdot 6,3 - 0,497\cdot 12}{110} + j\frac{31,7\cdot 12 + 0,497\cdot 6,3}{110};$$

$$\underline{U}_1 = 111,81\angle 1,79°\ \text{kV}.$$

За загубите во редната гранка од водот ќе добиеме:

$$\Delta\underline{S}_Z = (\Delta P + j\Delta Q) = \frac{P''^2 + Q''^2}{U_2^2}\cdot(R + jX);$$

$$\Delta\underline{S}_Z = \frac{31,7^2 + 0,497^2}{110^2}\cdot(6,3 + j12) = (0,523 + j0,997)\,\text{MVA}.$$

Реактивната моќност Q_{C1} генерирана од капацитивната попречна гранка на почетокот од водот ќе биде:

$$Q_{C1} = (B/2)\cdot U_1^2 = 41,1\cdot 10^{-6}\cdot 111,81^2 = 0,514\ \text{Mvar}.$$

Според тоа, моќноста на почетокот од водот ќе биде (слика 5.5.1):

$$\underline{S}_1 = \underline{S}' - jQ_{C1} = (\underline{S}'' + \Delta\underline{S}_Z) - jQ_{C1} = (32,223 - j0,014)\ \text{MVA} \approx (32,223 + j0)\ \text{MVA}.$$

Овие резултати се добиени со уважување на капацитивноста на водот, што е неопходно бидејќи се работи за високонапонски вод. Но кога се работи за среднонапонски или нисконапонски надземни водови или пак се работи за високонапонски водови со релативно мала должина l, па според тоа, ќе се работи и за релативно мала генерирана реактивна моќност Q_C, тогаш, заради упростување на пресметките, можеме да го занемариме присуството на капацитивната спроводност на водот. Доколку постапиме така и во овој случај, за приликите на почетокот од водот ќе добиеме нови вредности:

$$\underline{U}_1 = 111,87\underline{/1,79^o}\ \text{kV}; \qquad \underline{S}_1 = (32,192 - j0,995)\ \text{MVA}$$

кои малку се разликуваат од претходно добиените.

■ ■ ■

Задача 5* Потрошувач со моќност $\underline{S}_2$ = (15 + j10) MVA се напојува преку 110 kV вод со параметри $\underline{Z}$ = (26,4 + j33,9) Ω и $\underline{Y}$ = j219 μS. Напонот на другиот крај од водот изнесува U_1 = 116 kV. Да се одреди моќноста на почетокот од водот $\underline{S}_1$ и напонот на крајот U_2.

Решение:

Решението на задачата гласи:

$$U_2 = 109,711 \text{ kV}; \quad \underline{S}_1 = (15,66 + j8,049) \text{ MVA}.$$

Од резултатот заклучуваме дека загубите на активната моќност во преносот изнесуваат ΔP = 0,66 MW, додека загубите на реактивната моќност се негативни, т.е. ΔQ = −1,951 Mvar. Негативните загуби на реактивната моќност се должат на фактот што е водот подоптоварен, т.е. тој пренесува привидна моќност која е помала од неговата природна моќност.

■ ■ ■

5.4. ЗАДАЧИ ОД ОБЛАСТА НА ДИСТРИБУТИВНИТЕ МРЕЖИ

Задача 1. Трифазен четирижилен НН кабел од типот PP 00 A 4×70 0,6/1 kV, со спроводници од алуминиум (r = 0,443 Ω/km; x = 0,074 Ω/km) и со должина l = 200 m, напојува на својот крај група потрошувачи со сумарна моќност P = 100 kW, cosφ = 0,95.

Да се пресмета загубата на напон ΔU и загубата на активна моќност ΔP во кабелот.

Решение:

Параметрите R и X на редната импеданција на кабелот ќе бидат:

$$R = r \cdot l = 0,443 \cdot 0,2 = 0,0886\ \Omega; \quad X = x \cdot l = 0,074 \cdot 0,2 = 0,0148\ \Omega.$$

За реактивната моќност Q на потрошувачот ќе имаме:

$$\cos\varphi = 0,95; \quad \varphi = 18,2°; \quad \text{tg}\varphi = 0,32868 \approx 0,329; \quad Q = P \cdot tg\varphi = 32,87 \text{ kvar}.$$

Во согласност со изразите (2.2.1) и (2.2.4) што важат за НН водови ќе имаме:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n} = \frac{P \cdot r + Q \cdot x}{U_n} \cdot l = \frac{100 \cdot 0,443 + 32,87 \cdot 0,074}{0,4} \cdot 0,2 = 23,366 \text{ V}.$$

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{23,366}{400} \cdot 100 = 5,842\%.$$

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \cdot R = \frac{100^2 + 32,87^2}{0,4^2} \cdot 0,0886 = 6136 \text{ W} \equiv 6,136 \text{ kW},$$

$$\Delta P\% = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100 = \frac{6,136}{100} \cdot 100 = 6,136\%.$$

Истата задача ќе ја решиме и на друг начин. Врз основа на изразите (15) и (19) можеме да пишуваме:

$$M = \frac{10 \cdot U_n^2}{r + x \cdot tg\varphi} = \frac{10 \cdot 0,4^2}{0,443 + 0,074 \cdot 0,32868} = 3,43375 \frac{\text{kW×km}}{\%}.$$

$$\Delta U\% = \frac{P \cdot l}{M} = \frac{100 \cdot 0,2}{3,43375} = 5,842\%.$$

$$\frac{\Delta P\%}{\Delta U\%} = \frac{1+tg^2\varphi}{1+(x/r)\cdot tg\varphi} = \frac{1+0,32868^2}{1+(0,4343/0,074)\cdot 0,32868} = 1,0504;$$

$$\Delta P\% = 1,0504 \cdot 5,842 = 6,136\%.$$

■ ■ ■

Задача 2. Нисконапонски надземен вод (U_n = 0,4 kV) е изведен со спроводници Al/^ 50/8 mm^2 (D_m = 0,6 m) и има подоложни параметри r = 0,639 Ω/km и x = 0,316 Ω/km. Трајно дозволената струја на спроводниците изнесуваат I_d = 170 A а привидната термичка моќност S_t = 118 kVA. Водот е на крајот оптоварен со потрошувач со активна моќност P и фактор на моќност cos φ.

Да се определи зависноста $P = f(l)$ така што загубата на напон во водот да изнесува ΔU=5%.

Решение:

Од приближниот израз за загуба на напон во водот (1?) произлегува следната релација:

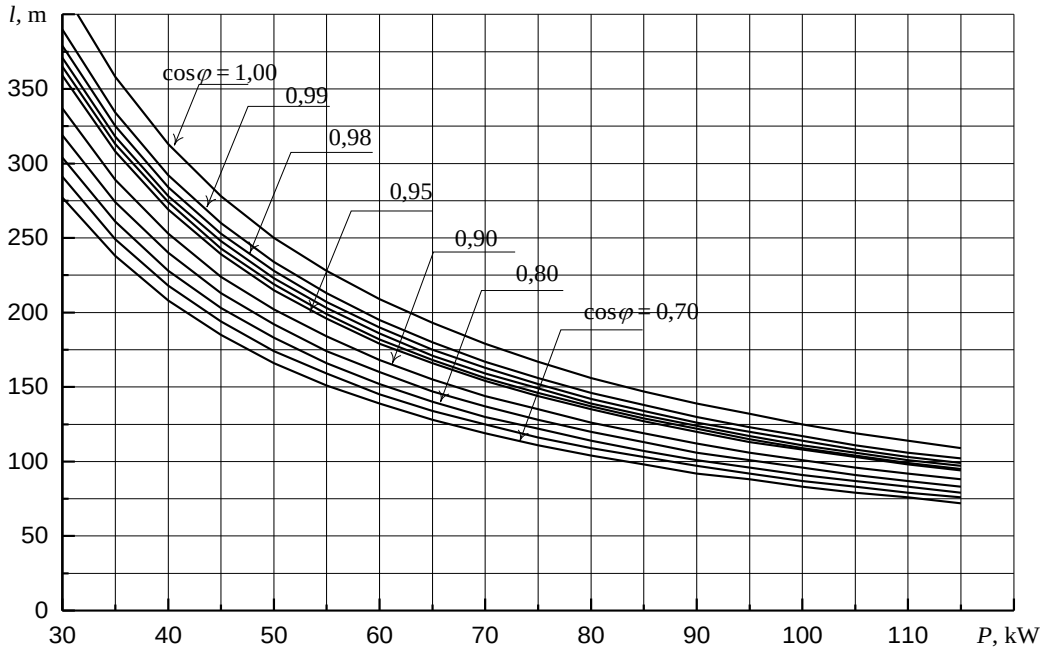
$$\Delta U \approx \Delta U_d \approx \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n} = \frac{P \cdot l \cdot r \cdot (1+\frac{x}{r}\cdot \mathrm{tg}\varphi)}{U_n}; \quad \Rightarrow \quad P \cdot l = \frac{\Delta U \cdot U_n}{r + x \cdot \mathrm{tg}\varphi} = \text{const.}$$

Со помош на последната релација, за разни вредности на моќноста на потрошувачот P се определува должината на водот l за која загубата на напон во водот ќе биде точно еднаква на зададената вредност ΔU = 5%. На тој начин се добиваат податоците прикажани во табелата 2.1. Во неа се разгледуваат и случаите кога факторот на моќност на потрошувачот cos φ има и други вредности во интервалот од 0,7 до 1. Овие зависности се прикажани и на дијаграмот од слика 2.1.

Табела 2.1. Зависност на граничната должина *l* (m) на водот од оптоварувањето на неговиот крај при услов ΔU = 5%

cos φ	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70
20 kW	626	585	569	557	547	538	505	479	457	436	416
25 kW	501	468	455	446	438	431	404	383	365	349	333
30 kW	417	390	379	371	365	359	337	319	304	291	277
35 kW	358	334	325	318	313	308	289	274	261	249	238
40 kW	313	292	284	278	274	269	253	240	228	218	208
45 kW	278	260	253	248	243	239	224	213	203	194	185
50 kW	250	234	228	223	219	215	202	192	183	174	166
55 kW	228	213	207	203	199	196	184	174	166	159	151
60 kW	209	195	190	186	182	179	168	160	152	145	139
65 kW	193	180	175	171	168	166	155	147	140	134	128
70 kW	179	167	163	159	156	154	144	137	130	125	119
75 kW	167	156	152	149	146	144	135	128	122	116	111
80 kW	156	146	142	139	137	135	126	120	114	109	104
85 kW	147	138	134	131	129	127	119	113	107	103	98
90 kW	139	130	126	124	122	120	112	106	101	97	92

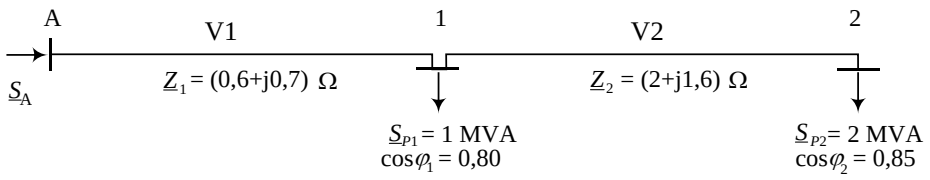
95 kW	132	123	120	117	115	113	106	101	96	92	88
100 kW	125	117	114	111	109	108	101	96	91	87	83
105 kW	119	111	108	106	104	103	96	91	87	83	79
110 kW	114	106	103	101	99	98	92	87	83	79	76
115 kW	109	102	99	97	95	94	88	83	79	76	72
120 kW	104	97	95	93	91	90	84	80	76	73	69



Слика 2.1. Зависност $l_{gr}(P)$, за нисконапонски надземен вод со спроводници Al/^ 50/8 mm² при услов ΔU = 5%

■ ■ ■

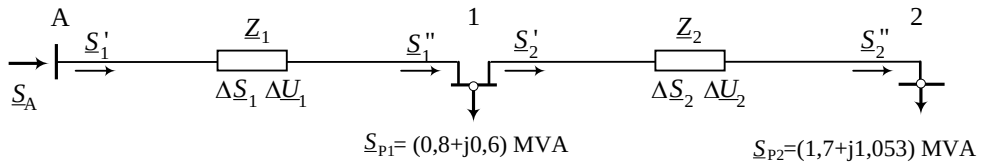
Задача 3. На сликата 3.1 е прикажана 10 kV надземна мрежа. Познат е напонот при потрошувачот приклучен во точката 2, $\underline{U}_2 = 10/\underline{0}^{o}$ kV. Потребно е да се одредат напонот во напојната точка А, $\underline{U}_A$, загубата на моќност во мрежата $\Delta\underline{S}$ и загубата на напон во мрежата ΔU.



Слика 3.1. 10 kV надземна мрежа од задачата 3.

Решение:

Бидејќи се работи за среднонапонска надземна мрежа, задачата ќе ја решиме без да водиме сметка за капацитивноста на водовите па водовите ќе ги претставуваме сдамо со нивните редни импеданции (слика 3.2).



Слика 3.2. Приказ на водовите од мрежата со нивните редни импеданции

Најнапред ќе ги пресметаме привидните моќности на обата потрошувача $\underline{S}_{P1}$ и $\underline{S}_{P2}$:

$$\underline{S}_{P1} = 1\cdot(0,80 + j0,60) = (0,8 + j0,6)\ \text{MVA};$$

$$\underline{S}_{P2} = 2\cdot(0,85 + j0,527) = (1,7 + j1,053)\ \text{MVA}.$$

Тогаш, во согласност со сликата 3.2, моќноста $\underline{S}_2''$ на крајот од водот V2 ќе биде еднаква на моќноста на потрошувачот $\underline{S}_{P2}$, т.е.

$$\underline{S}_2'' = \underline{S}_{P2} = (1,7 + j1,053)\ \text{MVA}.$$

Загубата на моќност $\Delta\underline{S}_2$ во водот V2 ќе изнесува:

$$\Delta\underline{S}_2 = \frac{P_2''^2 + Q_2''^2}{U_2^2}\cdot(R_2 + jX_2) = \frac{1,7^2 + 1,053^2}{10^2}\cdot(2 + j1,6);$$

$$\Delta\underline{S}_2 = (0,08 + j0,064)\ \text{MVA}.$$

Моќноста $\underline{S}_2'$ на почетокот од водот V2 сега ќе изнесува:

$$\underline{S}_2' = \underline{S}_2'' + \Delta\underline{S}_2 = (1,7 + j1,053) + (0,08 + j0,064);$$

$$\underline{S}_2' = (1,78 + j1,117)\ \text{MVA}.$$

Падот на напон $\Delta\underline{U}_2$ во водот V2 ќе биде:

$$\Delta\underline{U}_2 = \frac{P_2''\cdot R_2 + Q_2''\cdot X_2}{\underline{U}_2^*} + j\frac{P_2''\cdot X_2 - Q_2''\cdot R_2}{\underline{U}_2^*} = (0,508 + j0,06)\ \text{kV}$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta\underline{U}_2 = (10 + j0) + (0,508 + j0,06);$$

$$\underline{U}_1 = (10,508 + j0,06)\ \text{kV} = 10,508\angle 0,33°\ \text{kV}.$$

Сега напонот $\underline{U}_1$ ќе го поставиме на референтна оска, т.е:

$$\underline{U}_1 = U_1\,\underline{/0^o}\ \text{kV}.$$

Како последица на тоа ќе имаме промена на фазниот агол θ_2 на фазорот $\underline{U}_2$, т.е.:

$$\underline{U}_2 = U_2\,\underline{/-0,33^o}\ \text{kV} = 10\cdot e^{-j0,33^o}\ \text{kV}.$$

Според Кирхофовиот закон за струи (моќности), моќноста $\underline{S}_1''$ на крајот од водот V1 ќе биде:

$$\underline{S}_1'' = \underline{S}_2' + \underline{S}_{P1} = (2,58 + j1,717)\ \text{MVA}.$$

Понатаму, пресметката на приликите во водот V1 се изведува на наполно ист начин како што беше тоа направено и со водот V2. На тој начин за загубата на моќност $\Delta\underline{S}_1$ во водот V1 се добива:

$$\Delta\underline{S}_1 = \frac{P_1''^2 + Q_1''^2}{U_1^2}\cdot(R_1 + jX_1) = \frac{2,58^2 + 1,717^2}{10,508^2}\cdot(0,6 + j0,7);$$

$$\Delta\underline{S}_1 = (0,052 + j0,074)\ \text{MVA}.$$

додека за моќноста $\underline{S}_1'$ на почетокот од водот V1 ќе добиеме:

$$\underline{S}_{\text{A}} = \underline{S}_1' = \underline{S}_1'' + \Delta\underline{S}_1 = (2,632 + j1,778)\ \text{MVA}.$$

Падот на напон $\Delta\underline{U}_1$ во водот V1 ќе биде:

$$\Delta\underline{U}_1 = \frac{P_1''\cdot R_1 + Q_1''\cdot X_1}{\underline{U}_1^*} + j\frac{P_1''\cdot X_1 - Q_1''\cdot R_1}{\underline{U}_1^*} = (0{,}262 + \text{j}0{,}074)\ \text{kV},$$

$$\underline{U}_{\text{A}} = \underline{U}_1 + \Delta\underline{U}_1 = (10,77 + j0,074)\ \text{kV} = 10,77\angle 0,39°\ \text{kV}.$$

Загубата на напон во мрежата ΔU претставува разлика на ефективните вредности на напонот во напојната точка U_{A} и напонот во крајната точка „2“ (како точка со најмал напон во мрежата), т.е:

$$\Delta U = U_{\text{A}} - U_2 = 10{,}77 - 10 = 0{,}77\ \text{kV}.$$

Значи, за дадениот режим на работа, во прикажаната мрежа ќе имаме:

- загуба на напон: $\Delta U = 0{,}77$ kV,
- загуба на активна моќност ΔP: $\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = P_{\text{A}} - (P_{P1} + P_{P2}) = 0{,}132$ MW и
- загуба на реактивна моќност ΔQ: $\Delta Q = Q_{\text{A}} - (Q_{P1} + Q_{P2}) = 0{,}125$ Mvar.

Приближен начин на решавање

Истата задача ќе ја решиме со користење на приближните формули за пресметување на тековите на моќности, загубите на напони ΔU и загубите на моќности $\Delta\underline{S}$ во елементите од мрежата со цел да ја оцениме големината на грешката што се прави решавајќи ја мрежата со приближната постапка. Значи, ќе ги користиме следните приближни формули:

$$\underline{S}_{\Sigma} = \Sigma\underline{S};$$

$$\Delta U \approx \Delta U_d = \frac{P\cdot R + Q\cdot X}{U} \approx \frac{P\cdot R + Q\cdot X}{U_n};$$

$$\Delta\underline{S} \approx \Delta\underline{S}_Z = \frac{P^2 + Q^2}{U^2}\cdot(R + jX) \approx \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2}\cdot(R + jX).$$

Овие формули, иако приближни, даваат резултати со задоволителна точност кога се работи за нисконапонски (НН) и среднонапонски (СН) мрежи, каде што напонските прилики во мрежата се движат во тесен интервал околу вредноста на номиналниот напон U_{n}.

Работејќи на тој начин за приближните текови на моќности во мрежата ќе добиеме:

$$\underline{S}_{\Sigma 1} = \underline{S}_{\text{P}1} + \underline{S}_{\text{P}2} = (0,8 + j0,6) + (1,7 + j1,053) = (2,5 + j1,653)\ \text{MVA};$$

$$\underline{S}_{\Sigma 2} = \underline{S}_{\text{P}2} = (1,7 + j1,053).$$

Понатаму, за загубата на напон во одделните водови ќе имаме:

$$\Delta U_1 = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot R_1 + Q_{\Sigma 1} \cdot X_1}{U_n} = \frac{2,5 \cdot 0,6 + 1,653 \cdot 0,7}{10} = 0,266 \text{ kV};$$

$$\Delta U_2 = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot R_2 + Q_{\Sigma 2} \cdot X_2}{U_n} = \frac{1,7 \cdot 2,0 + 1,053 \cdot 1,6}{10} = 0,508 \text{ kV}.$$

$U_2 = 10$ kV;

$U_1 = U_2 + \Delta U_2 = 10 + 0,508 = 10,508$ kV;

$U_A = U_1 + \Delta U_1 = 10,508 + 0,266 = 10,778$ kV.

Загубите на моќност $\Delta \underline{S}_1$ и $\Delta \underline{S}_2$ во одделните делници на мрежата ќе бидат:

$$\Delta \underline{S}_1 = \frac{P_{\Sigma 1}^2 + Q_{\Sigma 2}^2}{U_n^2} \cdot (R_1 + jX_1) = \frac{2,5^2 + 1,653^2}{10^2} \cdot (0,6 + j0,7) = (47,4 + j55,3) \cdot 10^{-3} \text{ MVA};$$

$$\Delta \underline{S}_2 = \frac{P_{\Sigma 2}^2 + Q_{\Sigma 2}^2}{U_n^2} \cdot (R_2 + jX_2) = \frac{1,7^2 + 1,053^2}{10^2} \cdot (2,0 + j1,6) = (78 + j64) \cdot 10^{-3} \text{ MVA}.$$

Вкупните загуби во мрежата ќе се добијат како збир од загубите во сите елементи:

$$\Delta \underline{S} = \Delta \underline{S}_1 + \Delta \underline{S}_2 = (125,4 + j119,3) \cdot 10^{-3} \text{ MVA}.$$

$\underline{S}_A = \underline{S}_1' = \underline{S}_1'' + \Delta \underline{S}_1 = (2,638 + j1,784)$ MVA.

Значи, со упростениот начин на пресметување ги добивме следните резултати:

$\Delta U = U_A - U_2 = 0,778$ kV ili $\Delta U\% = \Delta U / U_n \cdot 100 = 7,78$ %;

$\Delta P = 127,4$ kW i $\Delta Q = 119,3$ kvar.

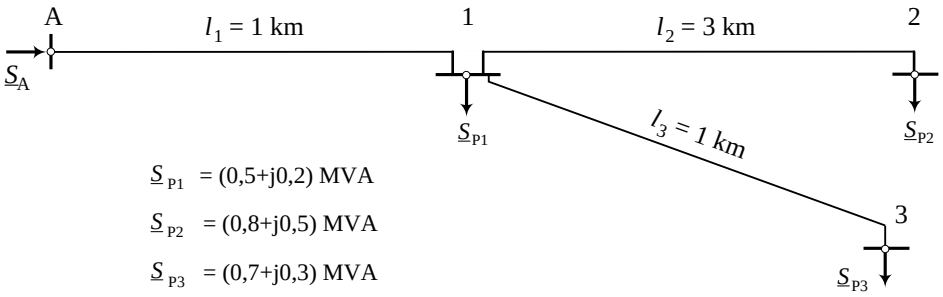
Очигледно е дека отстапувањето на овие резултати од нивните точни вредности, во конкретниов случај, е сосема мало, а начинот на нивното добивање многу поедноставен.

Во општ случај може да се каже дека кога се работи за НН и СН мрежи ($U_n < 110$ kV) грешките што ги правиме решавајќи ги мрежите со приближните формули се релативно мали. Затоа, кај овие мрежи најчесто работиме со упростениот метод кој базира на примената на приближните формули за пресметка тековите на моќности и на загубите $\Delta \underline{S}$ и $\Delta \underline{U}$ во мрежата. Со тоа пресметките значително се поедноставуваат (што е од особено големо значење за потребното време и обемот на пресметките, неопходни за решавање кај разгранетите мрежи), а сепак добиените резултати се доволно (за практични цели) точни.

■ ■ ■

Задача 4. На сликата 4.1 е прикажана 10 kV дистрибутивна мрежа. Сите водови од мрежата имаат ист пресек и исти карактеристики: $\underline{z}$ = (0,40 + j0,40) Ω/km. Должините на поедините делници (во km) и моќностите на потрошувачите (во MVA) се дадени на сликата.

Приближно да се одреди загубата на напон ΔU (%) и загубата на активна моќност ΔP (%) во мрежата, за дадениот режим на работа.



Слика 4.1. 10 kV радијална дистрибутивна мрежа.

Решение:

Со оглед на изнесеното во претходната задача, за решавањето и на оваа задача ќе ги применуваме приближните формули. Најнапред ќе ја определиме распределбата на моќности во мрежата. Моќностите во поедините делници (приближно, со занемарување на загубите на моќност во водовите) ќе бидат:

$$\underline{S}_3 = \underline{S}_{P3} = (0,7 + j0,3)\ \text{MVA};$$

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_{P2} = (0,8 + j0,5)\ \text{MVA};$$

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_{\Sigma 1} = \underline{S}_{P1} + \underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3} = (2,0 + j1,0)\ \text{MVA}.$$

Загубите на напон во поедините делници ќе бидат:

$$\Delta U_3 \approx \Delta U_{d3} = \frac{P_3 \cdot r + Q_3 \cdot x}{U_n} \cdot l_3 = 0,04\ \text{kV};$$

$$\Delta U_2 \approx \Delta U_{d2} = \frac{P_2 \cdot r + Q_2 \cdot x}{U_n} \cdot l_2 = 0,156\ \text{kV};$$

$$\Delta U_1 \approx \Delta U_{d1} = \frac{P_1 \cdot r + Q_1 \cdot x}{U_n} \cdot l_1 = 0,120\ \text{kV}.$$

Бидејќи е $\Delta U_2 > \Delta U_3$, ќе биде $U_2 < U_3$, па загубата на напон во мрежата ќе биде:

$$\Delta U = U_A - U_2 = \Delta U_1 + \Delta U_2 = 0,276\ \text{kV},$$

ili:

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{0,276}{10} \cdot 100 = 2,76\%.$$

Загубите на моќност ΔP во мрежата ќе бидат:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3;$$

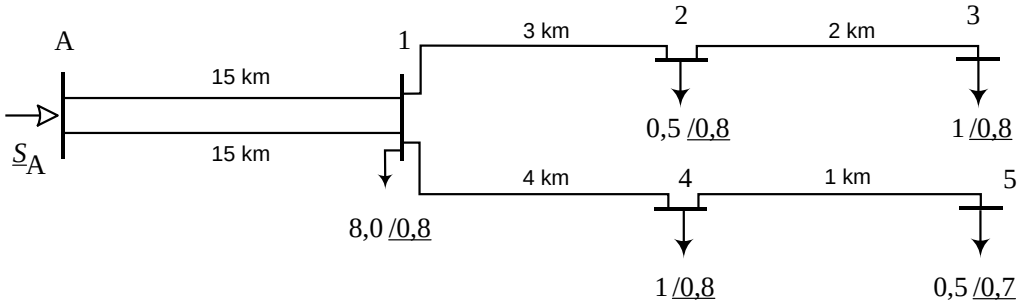
$$\Delta P = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_n^2} \cdot r \cdot l_1 + \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_n^2} \cdot r \cdot l_2 + \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_n^2} \cdot r \cdot l_3;$$

$$\Delta P = 20 + 10,7 + 2,3 = 33\ \text{kW}.$$

$$\Delta P\% = \frac{\Delta P}{P_A} \cdot 100 = 1,65\%.$$

■ ■ ■

Задача 5. На сликата 5.1 е прикажана една 35 kV дистрибутивна мрежа. На главниот дел од мрежата (делница А-1) паралелно работат два вода со спроводници `Al/^` 95/16 mm^2. Останатите водови се изведени со спроводници `Al/^` 70/12 mm^2. Водовите со спроводници `Al/^` 95/16 mm^2 имаат подолжни параметри r_{95} = 0,33 Ω/km и x_{95} = 0,41 Ω/km. Останатите водови со спроводници `Al/^` 70/12 mm^2 имаат подолжни параметри r_{70} = 0,45 Ω/km и x_{70} = 0,43 Ω/km. Моќностите на потрошувачите се дадени во MVA а должините на одделните водови во km. Потребно е да се одреди загубата на напон во мрежата за дадениот режим на работа.



Слика 5.1. 35 kV дистрибутивна надземна мрежа.

Решение:

Пресметувањето на напонските прилики во мрежата, како што е вообичаено, ќе го вршиме со приближните текови на моќности, пресметани со занемарување на загубите на моќност $\Delta\underline{S}$ во поедините водови од мрежата и занемарување на капацитивноста на надземните водови. Ќе ги занемаруваме, исто така, и напречните компоненти на падот на напон па напоните ќе ги пресметуваме со приближните формули за пад (загуба) на напон во водовите.

Моќностите на поедините потрошувачи ќе бидат:

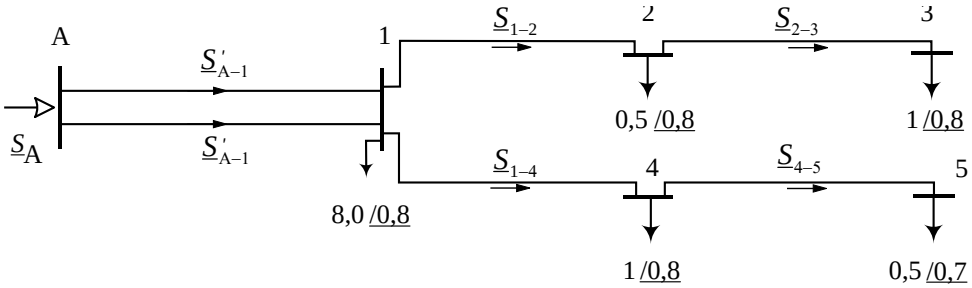
$\underline{S}_{P1}$ = 8 · (0,8 + j0,6) = (6,4 + j4,8) MVA;

$\underline{S}_{P2}$ = 0,5 · (0,8 + j0,6) = (0,4 + j0,3) MVA;

$\underline{S}_{P3}$ = 1 · (0,9 + j0,436) = (0,9 + j0,436) MVA;

$\underline{S}_{P4}$ = 1 · (0,8 + j0,6) = (0,8 + j0,6) MVA;

$\underline{S}_{P5}$ = 0,5 · (0,7 + j0,7) = (0,35 + j0,35) MVA.



Слика 5.2. Приближни текови на моќноста во посматраната 35 kV мрежа.

Моќноста $\underline{S}_{A-1}$ низ главниот дел А-1 приближно (со занемарување на загубите на моќност во мрежата $\Delta\underline{S}$) изнесува:

$\underline{S}_{A-1} = \underline{S}_{\Sigma 1} = \Sigma\underline{S}_{Pi} = \underline{S}_{P1} + \underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3} + \underline{S}_{P4} + \underline{S}_{P5}$ = (8,85 + j6,436) MVA.

и при тоа, низ секој вод на главниот дел ќе тече по половина моќност.

$\underline{S}'_{A\text{-}1} = 0{,}5 \cdot \underline{S}_{A\text{-}1} = (4{,}425 + j3{,}218)$ MVA

Загубите на напон на поедините делници ќе бидат:

$$\Delta U_{A-1} = \frac{P'_{A-1} \cdot r_{95} + Q'_{A-1} \cdot x_{95}}{U_n} \cdot l_{A-1};$$

$$\Delta U_{A-1} = \frac{4{,}425 \cdot 0{,}33 + 3{,}218 \cdot 0{,}41}{35} \cdot 15 = 1{,}19 \text{ kV}.$$

$$S_{1-2} = \underline{S}_{\Sigma 2} = \underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3} = (1{,}3 + j0{,}736) \text{ MVA};$$

$$S_{2-3} = \underline{S}_{\Sigma 3} = \underline{S}_{P3} = (0{,}9 + j0{,}436) \text{ MVA}.$$

$$S_{1-4} = \underline{S}_{\Sigma 4} = \underline{S}_{P4} + \underline{S}_{P5} = (1{,}15 + j0{,}95) \text{ MVA};$$

$$S_{4-5} = \underline{S}_{\Sigma 5} = \underline{S}_{P5} = (0{,}35 + j0{,}35) \text{ MVA}.$$

$$\Delta U_{1-2} = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot r_{70} + Q_{\Sigma 2} \cdot x_{70}}{U_n} \cdot l_{1-2}; \quad \Delta U_{1-2} = \frac{1{,}3 \cdot 0{,}45 + 0{,}736 \cdot 0{,}43}{35} \cdot 3 = 0{,}077 \text{ kV}.$$

$$\Delta U_{2-3} = \frac{P_{\Sigma 3} \cdot r_{70} + Q_{\Sigma 3} \cdot x_{70}}{U_n} \cdot l_{2\text{-}3}; \quad \Delta U_{2-3} = \frac{0{,}9 \cdot 0{,}45 + 0{,}436 \cdot 0{,}43}{35} \cdot 3 = 0{,}051 \text{ kV}.$$

$$\Delta U_{A-3} = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-2} + \Delta U_{2-3} = 1{,}318 \text{ kV}.$$

На сличен начин се добива:

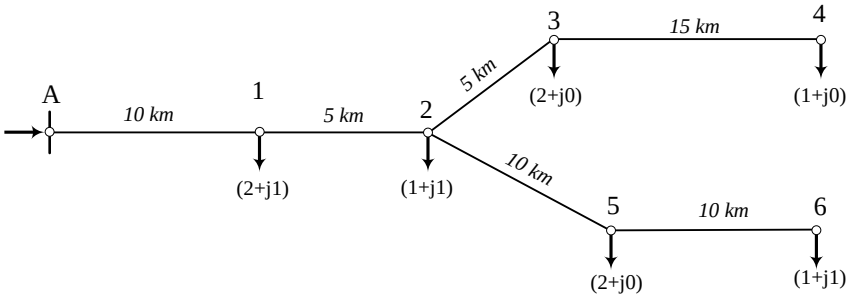
$$\Delta U_{1-4} = 0{,}106 \text{ kV}; \ \Delta U_{4-5} = 0{,}009 \text{ kV} \ \text{ i } \ \Delta U_{A-5} = 1{,}305 \text{ kV}.$$

Гледаме дека најголема загуба на напон во мрежата се има до точката „3“, односно загубата на напон во мрежата ΔU ќе биде:

$$\Delta U = \Delta U_{A\text{-}5} = 1{,}318 \text{ kV или } \Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{1{,}318}{35} \div 100 = 3{,}77\%.$$

■ ■ ■

Задача 6. На сликата 6.1 е прикажана 35 kV мрежа. Сите водови се со исти подолжни параметри $\underline{z}$ = (0,35+j0,35) Ω/km, а нивните должини, изразени во km, се прикажани на сликата. Моќностите на поедините потрошувачи, во MVA, се дадени исто така на сликата. Приближно да се определи најголемата загуба на напон во мрежата.



Слика 6.1.

Решение:

Од самата конфигурација на мрежата но и од карактерот на потрошувачите, можеме да заклучиме дека најмал напон ќе имаат потрошувачите приклучени во периферните точки од мрежата „4“ или „6“, т.е. најголемата загуба на напон во мрежата ќе биде $\Delta U_{A\text{-}4}$ или $\Delta U_{A\text{-}6}$.

За да ја одредиме максималната загуба на напон во мрежата ΔU потребно е, најнапред, да ја одредиме распределбата на моќности низ поедините водови, односно да ги одредиме моќностите $\underline{S}_{A\text{-}1}$, $\underline{S}_{1\text{-}2}$ и $\underline{S}_{5\text{-}6}$. Нив ќе ги определиме приближно, со просто сумирање на моќностите на потрошувачите што се напојуваат преку секоја од овие делници, без земање предвид на загубите на моќност во водовите и на генерираните реактивни моќности Q_{Ci} , т.е.:

$$\underline{S}_{A-1} = \underline{S}_{\Sigma 1} = \underline{S}_{P1} + \underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3} + \underline{S}_{P4} + \underline{S}_{P5} + \underline{S}_{P6} = (9 + j3)\ \text{MVA};$$

$$\underline{S}_{1-2} = \underline{S}_{\Sigma 2} = \underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3} + \underline{S}_{P4} + \underline{S}_{P5} + \underline{S}_{P6} = (7 + j2)\ \text{MVA};$$

$$\underline{S}_{2-3} = \underline{S}_{\Sigma 3} = \underline{S}_{P3} + \underline{S}_{P4} = (3 + j0)\ \text{MVA}; \quad \underline{S}_{3-4} = \underline{S}_{\Sigma 4} = \underline{S}_{P4} = (1 + j0)\ \text{MVA};$$

$$\underline{S}_{2-5} = \underline{S}_{\Sigma 5} = \underline{S}_{P5} + \underline{S}_{P6} = (3 + j1)\ \text{MVA}; \quad \underline{S}_{5-6} = \underline{S}_{\Sigma 6} = \underline{S}_{P6} = (1 + j1)\ \text{MVA}.$$

Сега можеме да ги пресметаме загубите на напон во одделните делници од мрежата. Притоа ќе го користиме упростениот израз за пресметка на загубата на напон ΔU (2.2.1). На тој начин ќе добиеме:

$$\Delta U_{A-1} = \frac{P_{A-1} \cdot r + Q_{A-1} \cdot x}{U_n} \cdot l_{A-1} = \frac{9 \cdot 0{,}35 + 3 \cdot 0{,}35}{35} = 1{,}2\ \text{kV}.$$

Слично се пресметуваат загубите на напон и во останатите делници. Тие изнесуваат:

$$\Delta U_{1-2} = 0{,}45\ \text{kV};\ \Delta U_{2-3} = 0{,}15\ \text{kV};\ \Delta U_{3-4} = 0{,}15\ \text{kV};\ \Delta U_{4-5} = 0{,}40\ \text{kV};\ \Delta U_{5-6} = 0{,}20\ \text{kV}.$$

Според тоа, ќе имаме:

$$\Delta U_{2-4} = \Delta U_{2-3} + \Delta U_{3-4} = 0{,}30\ \text{kV};\ \Delta U_{2-6} = \Delta U_{2-5} + \Delta U_{5-6} = 0{,}60\ \text{kV}.$$

Бидејќи $\Delta U_{2-6} > \Delta U_{2-4}$ следува дека напонот ќе биде најнизок во точката "6" т.е. дека најголемата загуба на напон во мрежата ќе биде:

$$\Delta U = \Delta U_{A-6} = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-2} + \Delta U_{2-5} + \Delta U_{5-6};$$

$$\Delta U = 1{,}20 + 0{,}45 + 0{,}40 + 0{,}20 = 2{,}25\ \text{kV}.$$

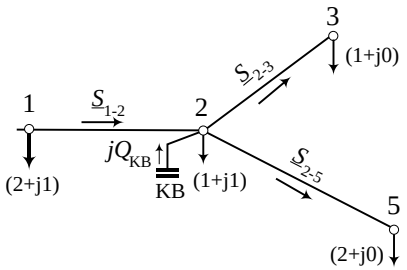
Значи најголемата загуба на напон во мрежата ќе биде:

$$\Delta U_{A-6} = U_A - U_6 = 2{,}25\ \text{kV};$$

или

$$\Delta U_{A-6}\% = \Delta U_{A\text{-}6} / U_n \cdot 100 = 7{,}43\ \%.$$

Што ќе се случи ако сега, при истите оптоварувања, во јазелот „2“ приклучиме кондензаторска батерија која ќе дава реактивна моќност $Q_{KB} = 2$ MVA.



Слика 6.2.

Од билансот на моќности за јазлите 3, 4, 5, и 6 заклучуваме дека моќностите $\underline{S}_{2-3}$, $\underline{S}_{3-4}$, $\underline{S}_{2-5}$ и $\underline{S}_{5-6}$ ќе останат непроменети. Како последица на тоа непроменети ќе останат и соодветните загуби на напон во тие водови:

$\Delta U_{2\text{-}4}$ = 0,3 kV и $\Delta U_{2\text{-}6}$ = 0,6 kV.

Билансот на моќности за јазелот „2“ е изразен со равенката:

$\underline{S}_{1\text{-}2} + jQ_{KB} = \underline{S}_{2\text{-}3} + \underline{S}_{2\text{-}5} + \underline{S}_{P2}$,

од каде што следува:

$\underline{S}_{1\text{-}2} = \underline{S}_{2\text{-}3} + \underline{S}_{2\text{-}5} + \underline{S}_{P2} - jQ_{KB}$ = (7 + j0) MVA,

и понатаму:

$\underline{S}_{A\text{-}1} = \underline{S}_{1\text{-}2} + \underline{S}_{P1}$ = (9 + j1) MVA.

Значи, моќностите низ водовите А-1 и 1-2 се променети, а како последица на тоа, ќе се променат и загубите на напон $\Delta U_{A\text{-}2}$ и $\Delta U_{1\text{-}2}$.

$$\Delta U_{A-1} = \frac{9\cdot 0,35 + 1\cdot 0,35}{35}\cdot 10 = 1,00 \text{ kV};$$

$$\Delta U_{1-2} = \frac{7\cdot 0,35 + 01\cdot 0,35}{35}\cdot 10 = 0,35 \text{ kV};$$

$$\Delta U_{A-2} = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-2} = 1,35 \text{ kV}.$$

$$\Delta U_{A-4} = \Delta U_{A-2} + \Delta U_{2-4} = 1,65 \text{ kV},$$

$$\Delta U_{A-6} = \Delta U_{A-2} + \Delta U_{2-6} = 1,95 \text{ kV}..$$

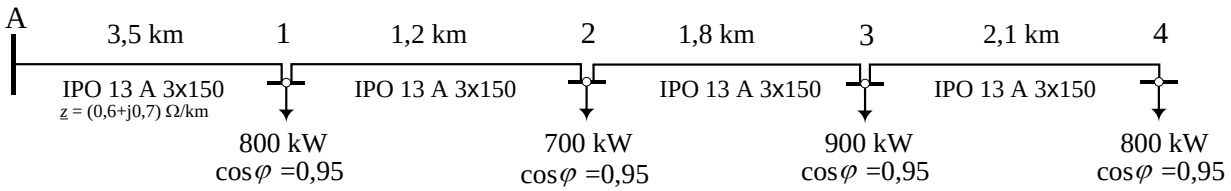
Според тоа, во овој случај ќе имаме:

$\Delta U = \Delta U_{A\text{-}6}$ = 1,95 kV ili ΔU% = (1,95/35)·100 = 5,57 %.

■ ■ ■

РЕШАВАЊЕ НА МАГИСТРАЛНИ МРЕЖИ

Задача 7. Кабелски 10 kV извод со вкупна должина $L = l_\Sigma$ = 8,6 km напојува 4 потрошувачи со вкупно оптоварување P_Σ = 3,2 MW. (слика 7.1). Сите потрошувачи имаат ист фактор на моќност cosφ = 0,95. Нивните моќности, изразен во kW, се прикажани на самата слика 7.1. Сите секции (делници) од кабелскиот извод се изведени со кабли од типот IPO13A3×150 6/10 kV и имаат подолжни параметри $\underline{z} = (r+jx)$=(0,21+j0,08) Ω/km; b=157 μS/km, а нивните должини, изразени во km, се исто така прикажани на сликата 7.1.



Слика 7.1. Магистрален вод со 4 делници

Да се пресмета загубата на напон во мрежата ΔU.

Решение:

Во случајов се работи за магистрален вод, т.е. неразгранета мрежа во која сите секции се од ист тип и имаат исти карактеристики. Тоа овозможува задачата да се реши поедноставно, со помош на релацијата (4.25) или, пак, релацијата (4.33) од [1], како што ќе биде направено во оваа задача.

$$\Delta U = \sum_{k=1}^{4} \Delta U_k = \sum_{k=1}^{4} \frac{P_{\Sigma k} \cdot R_k + Q_{\Sigma k} \cdot X_k}{U_{\mathrm{n}}} \equiv \sum_{k=1}^{4} \frac{P_k \cdot R_{A-k} + Q_k \cdot X_{A-k}}{U_{\mathrm{n}}}.$$

Бидејќи сите делници имаат исти подолжни параметри и сите потрошувачи имаат ист фактор на моќност, ќе важи:

$R_{A-k} = r \cdot l_{A-k}$; $X_{A-k} = x \cdot l_{A-k}$; $k \in (1,4)$ и

$Q_k = P_k \cdot tg\,\varphi$; $k \in (1,4)$,

па во тој случај формулата за пресметка на загубата на напон ќе се упрости уште повеќе:

$$\Delta U = \sum_{k=1}^{4} P_k \cdot l_{A-k} \cdot \frac{r + x \cdot tg\varphi}{U_{\mathrm{n}}} = \frac{r + x \cdot tg\varphi}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{k=1}^{4} P_k \cdot l_{A-k}.$$

Од самата слика добиваме:

$$\sum_{k=1}^{4} P_k \cdot l_{A-k} = 800 \cdot 3,5 + 700 \cdot 4,7 + 900 \cdot 6,5 + 800 \cdot 8,6 = 18.200 \text{ kW×km} = 18,82 \text{ MW×km}.$$

Лесно може да се провери дека истиот резултат може да се добие и на поинаков начин, т.е. дека во исто време важи:

$$\sum_{k=1}^{4} P_{\Sigma k} \cdot l_k = 3.200 \cdot 3,5 + 2.500 \cdot 1,2 + 1.700 \cdot 1,8 + 800 \cdot 2,1 = 18.200 \text{ kW×km} = 18,82 \text{ MW×km}.$$

што значи дека истовремено важи и општата релација (4.25):

$$\sum_{k=1}^{n} P_k \cdot l_{A-k} = \sum_{k=1}^{n} P_{\Sigma k} \cdot l_k.$$

Според тоа, за загубата на напон во мрежата ќе добиеме:

$$\Delta U = \frac{r + x \cdot tg\varphi}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{k=1}^{4} P_k \cdot l_{A-k} = \frac{0,21 + 0,08 \cdot 0,32868}{10} \cdot 18,82 = 0,445 \text{ kV} \text{ или}$$

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_{\mathrm{n}}} \cdot 100 = \frac{0,445}{10} \cdot 100 = 4,45\%.$$

Задачата може да се реши и на поинаков начин, сличен на оној на којшто беше решена задачата бр. 1 во ова потпоглавје.

За секоја делница k на мрежата ќе важи:

$$\Delta U_k\% = \frac{P_{\Sigma k} \cdot l_k}{M_k}; \quad M_k = \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{100 \cdot (r_k + x_k \cdot tg\varphi_k)}; \quad p_k = \frac{\Delta P_k\%}{\Delta U_k\%} = \frac{1 + tg^2\varphi_k}{1 + (x_k / r_k) \cdot tg\varphi_k}; \quad k \in (1,4).$$

Бидејќи сите делници имаат исти карактеристики, тогаш за секое k ќе биде:

$$M_k = M = \frac{10^2/100}{(0,21+0,08\cdot 0,32868)} = 4,232\ \frac{\text{MW}\times\text{km}}{\%};\quad p_k = p = \frac{1+0,32868^2}{1+0,08/0,21\cdot 0,32868} = 0,98473,$$

$$\Delta U = \sum_{k=1}^{4}\frac{P_{\Sigma k}\cdot l_k}{M_k} = \frac{1}{M}\cdot\sum_{k=1}^{4}P_{\Sigma k}\cdot l_k = \frac{18,82}{4,232} = 4,45\%\,.$$

Значи го добивме истиот резултат како и претходно.

Да ги пресметаме сега и загубите на активна моќност ΔP во мрежата.

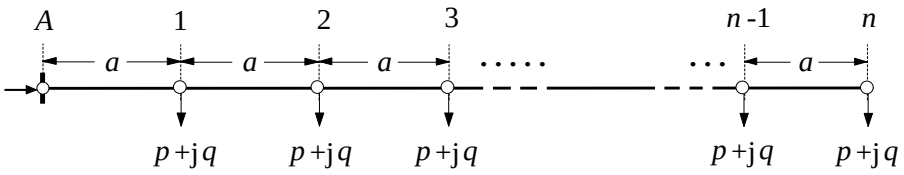
$$\Delta P = \sum_{k=1}^{n}\Delta P_k = \sum_{k=1}^{n}\frac{P_{\Sigma k}^2+Q_{\Sigma k}^2}{U_{\text{n}}^2}\cdot R_k = \frac{r}{U_{\text{n}}^2\cdot\cos^2\varphi}\cdot\sum_{k=1}^{n}P_{\Sigma k}^2\cdot l_k\ ;$$

$$\sum_{k=1}^{4}P_{\Sigma k}^2\cdot l_k = 3,2^2\cdot 3,5+2,4^2\cdot 1,2+1,7^2\cdot 1,8+0,8^2\cdot 2,1 = 49,298\ \text{MW}\times\text{km}\,,$$

$$\Delta P = \frac{0,21}{10^2\cdot 0,95^2}\cdot 29,298 = 0,1147\ \text{MW} \equiv 114,7\ \text{kW}\ \ (3,58\%)\,.$$

■ ■ ■

Задача 8. Да се изведат изразите за пресметка на загубата на напон ΔU и загубата на моќност ΔP во магистрален вод со должина $l = n\cdot a$ и подолжни параметри $\underline{z} = (r+jx)$ којшто напојува n идентични потрошувачи разместени на еднакви меѓусебни растојанија a, според сликата 8.1.



Слика 8.1. Идеализиран модел на рамномерно оптоварен магистрален вод

Решение:

Посматраниот случај е прикажан на сликата 8.1. Нека со $\underline{s} = (p+jq)$ го означиме оптоварувањето на еден од потрошувачите. Во тој случај вкупното оптоварување на водот ќе биде:

$\underline{S} = (P+jQ) = n\cdot\underline{s}$; $P = n\cdot p$ и $Q = n\cdot q$.

Со $\underline{S}_{\Sigma k} = (P_{\Sigma k}+jQ_{\Sigma k})$, како и досега, го означиме моќноста низ делницата k од мрежата. Тогаш, во согласност со сликата 8.1 ќе имаме:

$P_{\Sigma n} = p$;

$P_{\Sigma n-1} = 2\cdot p$;

. . . . . .

$P_{\Sigma k} = (n+1-k)\cdot p$

. . . . . .

$P_{\Sigma 1} = n\cdot p$.

Наполно идентични односи ќе имаме и за реактивните моќности $Q_{\Sigma k}$ и q. Понатаму имаме:

$$\sum_{k=1}^{n} P_{\Sigma k} = p + 2\cdot p + \mathrm{K} + n\cdot p = p\cdot\frac{n\cdot(n+1)}{2} = P\cdot\frac{n+1}{2} \text{ и}$$

$$\sum_{k=1}^{n} Q_{\Sigma k} = Q\cdot\frac{n+1}{2}.$$

Загубата на напон ΔU_k во k–тата делница од мрежата ќе биде:

$$\Delta U_k = \frac{P_{\Sigma k}\cdot R_k + Q_{\Sigma k}\cdot X_k}{U_{\mathrm{n}}} = \frac{P_{\Sigma k}\cdot r + Q_{\Sigma k}\cdot x}{U_{\mathrm{n}}}\cdot a;\ \forall k\in(1,n).$$

Тогаш вкупната загуба на напон ΔU во целиот магистрален вод ќе биде:

$$\Delta U = \sum_{k=1}^{n}\Delta U_k = \sum_{k=1}^{n}\frac{P_{\Sigma k}\cdot r + Q_{\Sigma k}\cdot x}{U_{\mathrm{n}}}\cdot a = \sum_{k=1}^{n}\frac{P_{\Sigma k}\cdot r + Q_{\Sigma k}\cdot x}{U_{\mathrm{n}}}\cdot\frac{l}{n}.$$

$$\Delta U = \frac{n+1}{2n}\cdot\sum_{k=1}^{n}\frac{P\cdot R + Q\cdot X}{U_{\mathrm{n}}} = \frac{n+1}{2n}\cdot\Delta U_{\text{конц}}. \tag{8.1}$$

Во последниот израз со $\Delta U_{\text{конц}}$ е означена загубата на напон во водот за случајот кога сите потрошувачи се концентрирани на крајот од водот.

На сличен начин се постапува и при пресметувањето на загубите на активна моќност ΔP. Во општ случај, загубата на моќност во k–тата делница од мрежата ќе биде:

$$\Delta P_k = \frac{P_{\Sigma k}^2 + Q_{\Sigma k}^2}{U_{\mathrm{n}}^2}\cdot r\cdot a = \frac{P_{\Sigma k}^2 + Q_{\Sigma k}^2}{U_{\mathrm{n}}^2}\cdot\frac{R}{n};\ \forall k\in(1,n).$$

Сумарните загуби на активна моќност ΔP ќе бидат:

$$\Delta P = \sum_{k=1}^{n}\Delta P_k = \frac{R}{n\cdot U_{\mathrm{n}}^2}\cdot\left[\sum_{k=1}^{n}P_{\Sigma k}^2 + \sum_{k=1}^{n}Q_{\Sigma k}^2\right].\ \text{Притоа важи:}$$

$$\sum_{k=1}^{n}P_{\Sigma k}^2 = p^2 + (2p)^2 + \mathrm{K} + (np)^2 = p^2\cdot(1^2 + 2^2 + \mathrm{K} + n^2) \text{ или}$$

$$\sum_{k=1}^{n}P_{\Sigma k}^2 = p^2\cdot\frac{n\cdot(n+1)\cdot(2n+1)}{6} = \frac{(n+1)\cdot(2n+1)}{6n}\cdot P^2.$$

Слично: $\sum_{k=1}^{n}Q_{\Sigma k}^2 = \frac{(n+1)\cdot(2n+1)}{6n}\cdot Q^2$.

Според тоа, за вкупните загуби ΔP ќе добиеме:

$$\Delta P = \sum_{k=1}^{n}\Delta P_k = \frac{R}{n\cdot U_{\mathrm{n}}^2}\cdot\frac{(n+1)\cdot(2n+1)}{6n}\cdot\left(P^2 + Q^2\right), \text{ или}$$

$$\Delta P = \frac{(n+1)\cdot(2n+1)}{6n^2}\cdot\frac{P^2 + Q^2}{U_{\mathrm{n}}^2}\cdot R = \frac{(n+1)\cdot(2n+1)}{6n^2}\cdot\Delta P_{\text{конц}}. \tag{8.2}$$

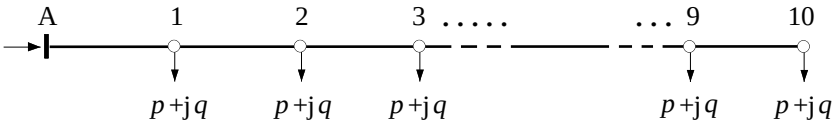
Слично како и во претходниот случај со вкупната загуба на напон, во последниот израз со $\Delta P_{\text{конц}}$ е означена загубата на активна моќност во водот за случајот кога сите потрошувачи се концентрирани на крајот од водот.

■ ■ ■

Задача бр. 9. Нисконапонски (НН) надземен вод (U_{n} = 400 V) со должина l = 300 m и со подолжни параметри r = 0,647 Ω/km и x = 0,33 Ω/km се состои од вкупно n = 10 распони со приближно еднакви должини $a = l/n$ = 30 m, како што е тоа прикажано на сликата. Водот напојува 20 индивидуални станбени објекти од типот П+1 во кои живеат вкупно 40 домаќинства, чија што сумарна врвна моќност изнесува $P = P_{\Sigma}$ = 92 kW; $\cos\varphi$ = 0,97. Може да се смета дека потрошувачите се рамномерно распределени по должината на водот и дека од секој столб, на сликата означен со мал круг, потрошувачите одземаат трифазна моќност p = 9,2 kW при $\cos\varphi$ = 0,97. Напонот на почетокот од водот изнесува U_{A} = 400 V. Да се пресмета:

а) загубата на напон во водот ΔU% во проценти и ΔU во волти;
б) напонот кај крајниот потрошувач U_{10};
в) вкупните загуби на активна моќност во водот ΔP.

Решение:



Слика 9.1. Мрежа со рамномерно распределен товар

За прикажаниот вод ќе имаме:

P_{Σ} = 92 kW ; $Q_{\Sigma} = P_{\Sigma}\,\text{tg}\,\varphi = 92\cdot 0{,}25 = 23$ kvar ; $R = r\cdot l = 0{,}194\ \Omega$; $X = x\cdot l = 0{,}1\ \Omega$.

1) Пресметка на загубата на напон

Загубата на напон во водот ΔU, според изнесеното во задачата бр. 2.18 ќе биде:

$$\Delta U = \frac{n+1}{2n}\cdot\frac{P_{\Sigma}\cdot R + Q_{\Sigma}\cdot X}{U_{\text{n}}} = \frac{n+1}{2n}\cdot\Delta U_{\text{конц}};$$

$$\Delta U_{\text{конц}} = \frac{92\cdot 0{,}194 + 23\cdot 0{,}1}{0{,}4} = 50{,}37\ \text{V}; \quad \Delta U = \frac{11}{20}\cdot 50{,}37 = 27{,}7\ \text{V}.$$

а процентуалната загуба на напон ќе биде:

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_{\text{n}}}\cdot 100 = \frac{27{,}7}{400}\cdot 100 = 6{,}93\%.$$

Значи крајниот потрошувач ќе прима електрична енергија при напон:

$$U_n = U_{10} = U_{\text{A}} - \Delta U = 400 - 27{,}7 = 372{,}3\ \text{V}.$$

2) Пресметка на загубата на моќност

Во согласност со изразите (2.18.2) за загубите на активна моќност во водот ќе имаме:

$$\Delta P_{\text{конц}} = \frac{P^2 + Q^2}{U_{\text{n}}^2}\cdot R = \frac{92^2 + 23^2}{0{,}4^2}\cdot 0{,}194 = 10{,}94\ \text{kW};$$

$$\Delta P = \frac{(n+1)\cdot(2n+1)}{6n^2}\cdot\Delta P_{\text{конц}} = \frac{11\cdot 21}{6\cdot 100}\cdot 10,94 = 0,385\cdot 10,94 = 4,2 \text{ kW}.$$

$$\Delta P\% = \frac{\Delta P}{P_\Sigma}\cdot 100 = \frac{4,2}{92}\cdot 100 = 4,56\%.$$

■ ■ ■

Задача 10. Проблемот обработен во задачата 9 да се реши со примена на моделот за рамномерно распределен континуиран товар. Колкави се разликите што се прават при пресметката на загубите на напон ΔU и на моќност ΔP во мрежата.

Бројни вредности:

U_n =400 V; l =300 m; $\underline{z}=(r+jx)$ = (0,647+j0,33) Ω/km; $P = P_\Sigma$ = 92 kW; $\cos\varphi$ = 0,97.

Решение:

Загубата на напон $\Delta U_{\text{конц}}$ и загубата на моќност $\Delta P_{\text{конц}}$ во водот кога целиот товар е концентриран на крајот од водот ќе бидат:

$$\Delta U_{\text{конц}} = \frac{P_\Sigma\cdot R + Q_\Sigma\cdot X}{U_n} = \frac{92\cdot 0,194 + 23\cdot 0,1}{0,4} = 50,37 \text{ V};$$

$$\Delta P_{\text{конц}} = \frac{P_\Sigma^2 + Q_\Sigma^2}{U_n^2}\cdot R = \frac{92^2 + 23^2}{0,4^2}\cdot 0,194 = 10,94 \text{ kW}.$$

Според тоа, загубата на напон ΔU и загубата на моќност ΔP во водот кога товарот е континуиран и рамномерно распределен по неговата должина ќе биде:

$$\Delta U = \frac{1}{2}\cdot\Delta U_{\text{конц}} = \frac{1}{2}\cdot 50,37 = 25,19 \text{ V} \quad (6,3\%);$$

$$\Delta P = \frac{1}{3}\cdot\Delta P_{\text{конц}} = \frac{1}{3}\cdot 10,94 = 3,65 \text{ kW} \quad (3,97\%).$$

Во примерот 9 за истите овие величини ги добивме следните вредности:

ΔU = 27,7 V (6,93%) и ΔP = 4,2 kW (4,56%).

Значи добивме вредности што се помали од вистинските.

Може да се констатира дека моделот на континуиран, рамномерно распределен, товар секогаш дава помали вредности за загубите ΔU и ΔP во мрежата во однос на вистинските. Во принцип, со зголемувањето на бројот n на потрошувачите во мрежата овие разлики ќе се намалуваат.

■ ■ ■

Задача 11. За општиот случај на мрежа со рамномерно распределен товар (слика 9.1), со произволен број потрошувачи n, да се изведе изразот за пресметка на напонот U_i во произволен јазел од мрежата. Потоа, за случајот анализиран во задачата 9 (n = 10) да се пресмета колкав ќе биде напонот на средината од водот $U_{\text{средина}} = U_5$ = ?

Решение:

Загубата на напон $\Delta u = \Delta U_n$ во последната делница од мрежата ќе изнесува (приближно):

$$\Delta U_{k=n} = \Delta u = \frac{p \cdot r + q \cdot x}{U_{\text{n}}} \cdot a = \frac{(P_\Sigma / n) \cdot (R / n) + (Q_\Sigma / n) \cdot (X / n)}{U_{\text{n}}} \text{ , или}$$

$$\Delta u = \frac{1}{n^2} \cdot \frac{P_\Sigma \cdot R + Q_\Sigma \cdot X}{U_{\text{n}}} = \frac{1}{n^2} \cdot \Delta U_{\text{конц}} \, .$$

Бидејќи според изразот (8.1) важи:

$$\Delta U = \frac{n+1}{2n} \cdot \Delta U_{\text{конц}} \;\Rightarrow\; \Delta U_{\text{конц}} = \frac{2n}{n+1} \cdot \Delta U \, .$$

Понатаму следува:

$$\Delta u = \frac{1}{n^2} \cdot \Delta U_{\text{конц}} = \frac{1}{n^2} \cdot \frac{2n}{(n+1)} \cdot \Delta U = \frac{2}{n \cdot (n+1)} \cdot \Delta U \, .$$

Во согласност со изведеното во примерот обработуван од задачата 8, моќноста во k–тата делница од мрежата ќе биде:

$$P_{\Sigma k} = (n+1-k) \cdot p = \frac{n+1-k}{n} \cdot P_\Sigma; \;\; Q_{\Sigma k} = \frac{n+1-k}{n} \cdot Q_\Sigma; \;\; \forall k \in (1,\, n).$$

Загубата на напон ΔU_k во k–тата делница од мрежата ќе биде:

$$\Delta U_k = \frac{P_{\Sigma k} \cdot (R / n) + Q_{\Sigma k} \cdot (X / n)}{U_{\text{n}}} = \frac{n+1-k}{n^2} \cdot \frac{P_\Sigma \cdot R + Q_\Sigma \cdot X}{U_{\text{n}}}; \;\; \forall k \in (1,\, n) \, ,$$

$$\Delta U_k = \frac{n+1-k}{n^2} \cdot \Delta U_{\text{конц}} = (n+1-k) \cdot \Delta u; \quad \forall k \in (1,\, n).$$

Понатаму, за напонот U_i кај i–тиот потрошувач ќе имаме:

$$U_i = U_{\text{A}} - \Delta U_1 - \Delta U_2 - \text{K} \; - \Delta U_i \, ,$$

или тргнувајќи од крајот на водот:

$$U_i = U_n + \Delta U_n + \Delta U_{n-1} + \text{K} \; + \Delta U_{i+1} = (U_{\text{A}} - \Delta U) + \sum_{k=i+1}^{n} \Delta U_k \, ,$$

$$U_i = U_{\text{A}} - \Delta U + \Delta u + 2\Delta u + 3\Delta u + \text{K} + (n-i) \cdot \Delta u;$$

$$U_i = U_{\text{A}} - \Delta U + \Delta u \cdot (1 + 2 + 3 + \text{K} \; + n - i) = U_A - \Delta U + \Delta u \cdot \frac{(n-i) \cdot (n+1-i)}{2};$$

$$U_i = U_{\text{A}} - \Delta U + \frac{2 \cdot \Delta U}{n \cdot (n+1)} \cdot \frac{(n-i) \cdot (n+1-i)}{2};$$

$$U_i = U_{\text{A}} - \Delta U \cdot \left[1 - \frac{(n-i) \cdot (n+1-i)}{n \cdot (n+1)} \right]; \quad \forall i \in (1,\, n) \, . \tag{11.1}$$

За $i = 5$ ќе добиеме:

$$U_5 = 400 - 27{,}7 \cdot \left[1 - \frac{5 \cdot 6}{10 \cdot 11} \right] = 379{,}85 \text{ V} \, .$$

Подоцна, во задачата ?? 2.27, ќе се покаже дека доколку проблемот се посматра идеализирано (случај на континуиран, рамномерно распределен товар) за напонот на средината од водот $U_{\text{средина}}$ ќе се добие вредност:

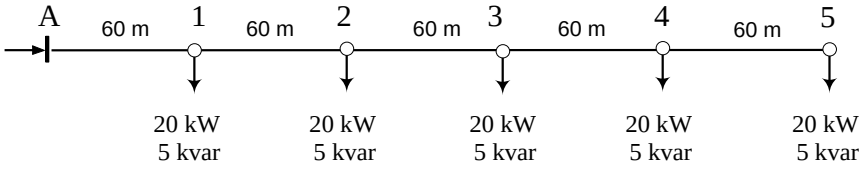
$$U_{\text{средина}} = U_{\text{A}} - (3/4)\cdot \Delta U = 400 - 0,75\cdot 27,7 = 379,23 \text{ V}.$$

■ ■ ■

Задача бр. 12. Нисконапонски (НН) надземен вод (U_{n} = 400 V) со должина l = 200 m и со подолжни параметри r = 0,647 Ω/km и x = 0,33 Ω/km се состои од вкупно n = 5 распони со приближно еднакви должини $a = l/n$ = 40 m, како што е тоа прикажано на сликата 2.22.1. Водот напојува 5 потрошувачи со приближно исти карактеристики. Сумарната врвна моќност на потрошувачите изнесува $P = P_{\Sigma}$ = 100 kW; $\cos\varphi$ = 0,97. Може да се смета дека потрошувачите се рамномерно распределени по должината на водот и дека од секој столб, на сликата означен со мал круг, потрошувачите одземаат трифазна моќност p = 20 kW при $\cos\varphi$ = 0,95. Напонот на почетокот од водот изнесува U_{A} = 405 V. Да се пресметаат напоните U_1, U_2, U_3, U_4 и U_5 во одделните точки по должината на водот.

Бројни вредности:

l = 0,2 km; r =0,647 Ω/km; x =0,33 Ω/km; P_{Σ} =100 kW; $\cos\varphi$ =0,95; U_{A} = 405 V.



Слика 12.1. Мрежа со 5 идентични, рамномерно распределени потрошувачи

Решение:

Во претходната задача 11 беше изведен изразот (11.1) за пресметка на напонот U_i кај i–тиот потрошувач од мрежата:

$$\Delta U = \frac{n+1}{2n}\cdot\frac{P_{\Sigma}\cdot R + Q_{\Sigma}\cdot X}{U_{\text{n}}} = \frac{n+1}{2n}\cdot \Delta U_{\text{конц}};$$

$$U_i = U_{\text{A}} - \Delta U\cdot\left[1 - \frac{(n-i)\cdot(n+1-i)}{n\cdot(n+1)}\right]; \quad \forall i \in (1,\, n).$$

Применувајќи ја оваа формула добиваме:

$$\Delta U_{\text{конц}} = \frac{P_{\Sigma}\cdot r + Q_{\Sigma}\cdot x}{U_{\text{n}}}\cdot l = \frac{100\cdot 0,647 + 32,87\cdot 0,33}{0,4}\cdot 0,2 = 37,8 \text{ V}.$$

Според тоа, вкупната загуба на напон во воот од слика 12.1 ќе биде:

$$\Delta U = \frac{n+1}{2n}\cdot \Delta U_{\text{конц}} = \frac{6}{2\cdot 5}\cdot 37,8 = 0,6\cdot 37,8 = 22,7 \text{ V}.$$

За напоните U_i (i = 1ѝ 5) во одделните потрошувачки јазли ќе добиеме:

$$U_1 = 405 - 22,7\cdot\left(1 - \frac{4\cdot 5}{5\cdot 6}\right) = 397,4 \text{ V};$$

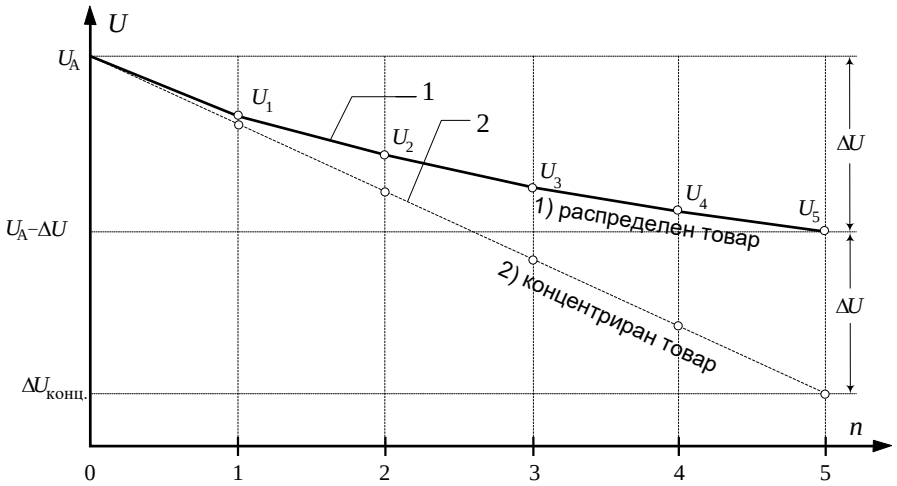
$$U_2 = 405 - 22,7 \cdot \left(1 - \frac{3 \cdot 4}{5 \cdot 6}\right) = 391,4\,\text{V};$$

$$U_3 = 405 - 22,7 \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot 3}{5 \cdot 6}\right) = 386,8\ \text{V};$$

$$U_4 = 405 - 22,7 \cdot \left(1 - \frac{1 \cdot 2}{5 \cdot 6}\right) = 383,8\ \text{V};$$

$$U_5 = 405 - 22,7 \cdot \left(1 - \frac{0 \cdot 1}{5 \cdot 6}\right) = 382,3\ \text{V}.$$

На сликата 12.2 е прикажан напонскиот профил долж разгледуваниот вод (крива 1 – со полна линија). На истата слика е прикажан и напонскиот профил за случајот кога целиот товар би бил концентриран на крајот од водот (крива 2 – со испрекината линија).



Слика 12.2. Напонски профил по должината на водот: 1) кога товарот е распределен, 2) кога товарот е концентриран на крајот од водот

■ ■ ■

Задача бр. 13. Се посматра водот од претходната задача бр.12. Во некој режим на работа е утврдено со мерење дека напонот на почетокот изнесувал U_A = 395 V, а во исто време напонот на крајот од водот изнесувал U_5 = 370 V. Да се процени колкави се во тој момент напоните во мрежата и колкаво е сумарното оптоварување P_Σ. Во пресметките да се усвои дека сите потрошувачи имаат исти карактеристики и ист фактор на моќност $\cos\varphi$ = 0,97.

Решение:

Во претходната задача беа изведени изразите за пресметка на вкупната загуба на напон во мрежата ΔU како и загубите ΔU_i во поедините делници:

$$\Delta U = \frac{n+1}{2n} \cdot \Delta U_{\text{конц}} = \frac{n+1}{2n} \cdot \frac{P_\Sigma \cdot R}{U_\text{n}} \cdot (1 + \frac{x}{r} \cdot tg\varphi);$$

$$\Delta U_i = \frac{P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_\text{n}} = \frac{2(n+1-i)}{n \cdot (n+1)} \cdot \Delta U_i;\ \ i = 1, 2, \ldots, n.$$

Разликата на напоните U_A и U_5 ќе биде:

$$U_A - U_5 = \Delta U_{A-5} = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \Delta U_4 + \Delta U_5 = 395 - 375 = 20\ \text{V}.$$

Понатаму имаме:

$$\Delta U_{A-5} = \frac{2\cdot\Delta U}{n\cdot(n+1)}\cdot[n+(n-1)+(n-2)+(n-3)+(n-4)] = \frac{2\Delta U}{10\cdot 11}\cdot 40 = \frac{8}{11}\cdot\Delta U,$$

од каде што се добива:

$$\Delta U = \frac{11}{8}\cdot\Delta U_{A-5} = \frac{11}{8}\cdot 20 = 27{,}5\,\text{V}.$$

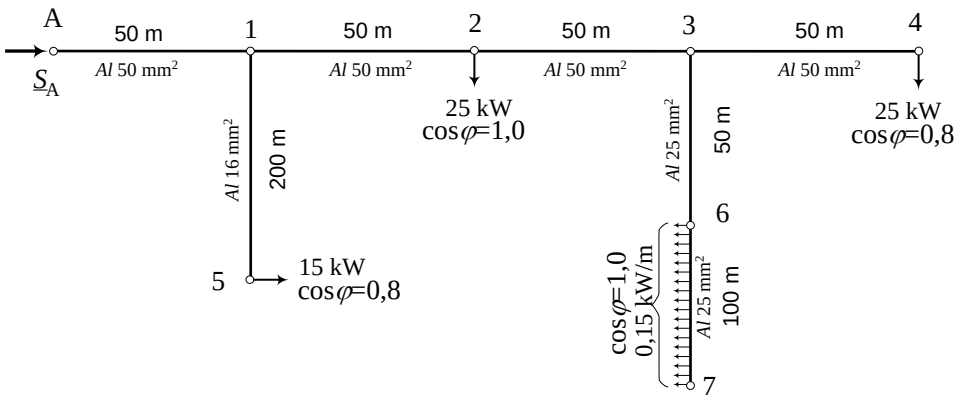
$$U_{10} = U_A - \Delta U = 395 - 27{,}5 = 367{,}5\,\text{V}.$$

Откога ја пресметавме (проценивме) вкупната загуба на напон во водот ΔU, ќе можеме да го процениме и вкупното оптоварување на водот P_Σ:

$$P_\Sigma = \frac{2n}{n+1}\cdot\frac{\Delta U\cdot U_n}{R}\cdot\frac{1}{1+(x/r)\cdot\text{tg}\varphi} = \frac{20}{11}\cdot\frac{27{,}5\cdot 380}{0{,}1875}\cdot\frac{1}{1{,}184} = 85{,}6\,\text{kW};\ S_\Sigma = \frac{P_\Sigma}{\cos\varphi} = 90\ \text{kVA}.$$

■ ■ ■

Задача 14. Разгранета радијална трифазна мрежа со номинален напон 380 V напојува поголем број на потрошувачи (сл. 14.1). Сите водови се изведени со спроводници од алумиминум, прицврстени на дрвени столбови со потпорни изолатори, при што спроводниците се сместени во темињата на рамностран триаголник со страна D = 60 cm. Должините на поедините делници се дадени во метри, а оптоварувањата во kW. Магистралниот дел од мрежата, потегот А-4, е изведен со ист пресек Al 50 mm^2 (r_{50} = 0,63 Ω/km, x_{50} = 0,325 Ω/km).



Слика 14.1. Разгранета НН мрежа од задачата 2.26

Отцепот 1–5 има пресек 16 mm^2 (r_{16} = 1,96 Ω/km, x_{16}= 0,358 Ω/km), додека отцепот 3–7 има пресек 25 mm^2 (r_{25} = 1,27 Ω/km, x_{25} = 0,345 Ω/km).

Потребно е да се одреди загубата на напон и загубата на активна моќност во прикажаната мрежа.

Решение:

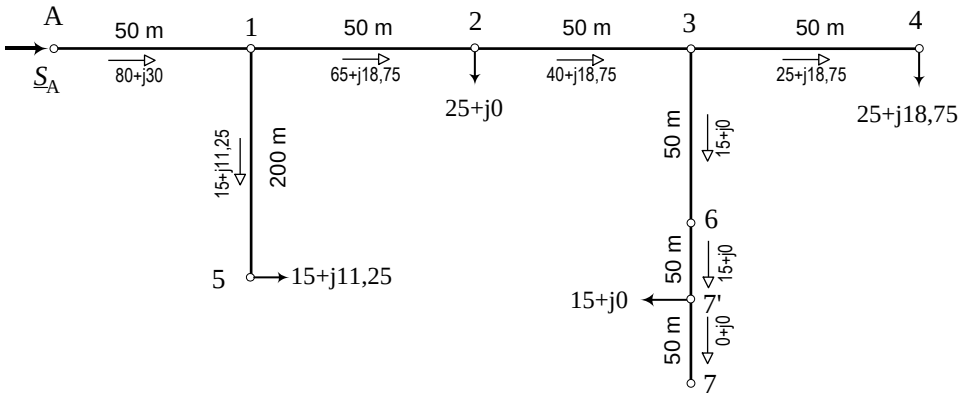
Најнапред ќе ги определиме приближните текови на моќностите во мрежата. Активните и реактивните моќности на одделните потрошувачи ќе бидат:

$\underline{S}_{P2} = 25 + j25 \cdot 0 = (25 + j0)$ kVA;

$\underline{S}_{P4} = 25 + j25 \cdot 0{,}75 = (25 + j18{,}75)$ kVA;

$\underline{S}_{P5} = 15 + j15 \cdot 0{,}75 = (15 + j11{,}25)$ kVA;

$\underline{S}_{\Sigma 6} = 15 + j15 \cdot 0 = (15 + j0)$ kVA.



Слика 14.2. Еквивалента шема за пресметка на напонските прилики во мрежата

Распределбата на моќности во мрежата се одредува лесно, со примена на I Кирхофов закон за моќности, бидејќи мрежата е радијална (отворена). Притоа, бидејќи се работи за определување на загубата на напон во мрежата, распределениот товар на потегот 6-7 ќе го претставиме како концентриран, поставен во средината, како што е тоа прикажано на сликата. Пресметаните, приближни, вредности на моќностите низ гранките од мрежата се прикажани на самата слика:

Понатаму следува пресметка на загубата на напон по поедините делници од мрежата. Загубата на напон во магистралниот дел А-1 од мрежата ќе биде:

$$\Delta U_{A-1} = \frac{P_{A-1} \cdot r_{50} + Q_{A-1} \cdot x_{50}}{U_n} \cdot l_{A-1};$$

$$\Delta U_{A-1} = \frac{80 \cdot 0{,}63 + 30 \cdot 0{,}325}{0{,}38} \cdot 0{,}050 = 7{,}9 \text{ V}.$$

Слично се добива загубата на напон и во останатите делници:

$\Delta U_{1\text{-}2} =$ 6,2 V; $\Delta U_{2\text{-}3} =$ 4,2 V; $\Delta U_{3\text{-}4} =$ 2,9 V; $\Delta U_{1\text{-}5} =$ 17,6 V; $\Delta U_{3\text{-}7'} =$ 5,0 V.

Од овде произлегува:

$\Delta U_{A\text{-}4} = \Delta U_{A\text{-}1} + \Delta U_{1\text{-}2} + \Delta U_{2\text{-}3} + \Delta U_{3\text{-}4} = 21{,}2$ V;

$\Delta U_{A\text{-}5} = \Delta U_{A\text{-}1} + \Delta U_{1\text{-}5} = 25{,}5$ V;

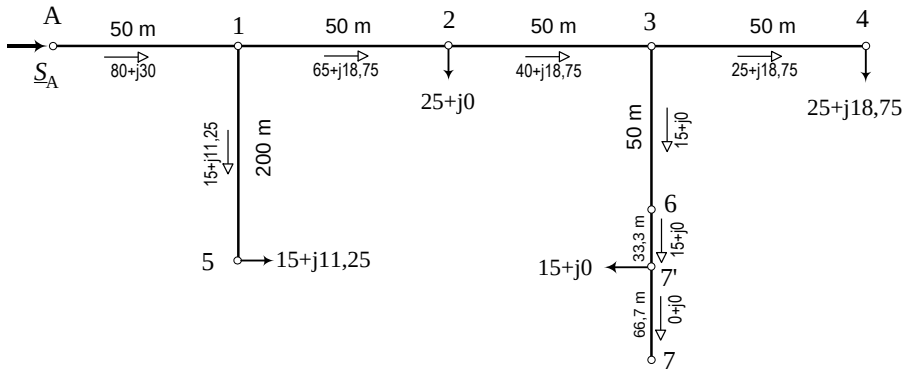
$\Delta U_{A\text{-}7'} = \Delta U_{A\text{-}1} + \Delta U_{1\text{-}2} + \Delta U_{2\text{-}3} + \Delta U_{3\text{-}6} + \Delta U_{6\text{-}7'} = 23{,}3$ V.

Значи, најголемата загуба на напон во мрежата изнесува:

$\Delta U = \Delta U_{A\text{-}5} = 25{,}5$ V.

За пресметка на загубата на моќност во мрежата распределениот товар ќе го претставиме повторно како концентриран, но сега поставен на една третина оддалечен од почетокот на делницата 6-7 (слика 14.3).

Понатаму ќе биде потребно да се определат загубите на моќност $\Delta P_{i\text{-}j}$ во секоја делница од мрежата. За првата делница А-1 ќе добиеме:



Слика 14.3. Пресметка на загубите на моќност во мрежата

$$\Delta P_{A-1} = \frac{P_{A-1}^2 + Q_{A-1}^2}{U_n^2} \cdot r_{50} \cdot l_{A-1};$$

$$\Delta P_{A-1} = \frac{80^2 + 30^2}{0,38^2} \cdot 0,63 \cdot 0,050 = 1592 \text{ W} = 1,592 \text{ kW}.$$

Слично ги пресметуваме загубите на моќност и во останатите делници. Како резултат добиваме:

ΔP_{1-2} = 0,998 kW; ΔP_{2-3} = 0,426 kW; ΔP_{3-4} = 0,213 kW;

ΔP_{1-5} = 0,954 kW; $\Delta P_{3-7'}$ = 0,165 kW; $\Delta P_{7'-7}$ = 0,165 kW.

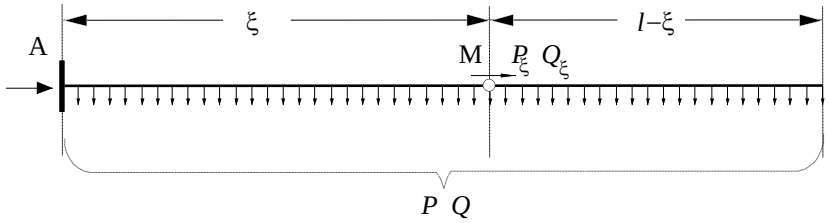
Вкупните загуби на активна моќност во мрежата ΔP ќе бидат збир од загубите што се остваруваат во поедините делници од мрежата:

$\Delta P = \Delta P_{A-1} + \Delta P_{1-2} + \Delta P_{2-3} + \Delta P_{3-4} + \Delta P_{1-5} + \Delta P_{3-7'}$ = 4,35 kW.

■ ■ ■

Задача бр. 15. Да се определи напонскиот профил, т.е. зависноста $U=U(x)$ $(0 \le x \le l)$ по должината на магистрален вод оптоварен по својата должина со континуиран, рамномерно распределен, товар (слика 15.1) чиешто сумарно оптоварување $\underline{S} = P+jQ$ е познато. Должината l и подолжните параметри на водот r и x се исто така познати.

Решение:



Слика 15.1. Вод со континуиран, рамномерно распределен, товар

Ќе посматраме точка M што се наоѓа на растојание ξ од почетокот на водот, како што е тоа прикажано на сликата 15.1. Со P_ξ и Q_ξ ќе ги означиме активната и реактивната моќност што течат низ водот во точката M. Таа моќност ќе биде збир од моќностите на сите потрошувачи коишто се наоѓаат десно од неа, т.е. ќе имаме:

$$P_\xi = P \cdot \frac{l-\xi}{l}; \quad Q_\xi = Q \cdot \frac{l-\xi}{l}.$$

Напонот U_ξ во произволната точка М која се наоѓа на растојание ξ од почетокот на водот ќе го пресметаме како разлика помеѓу напонот во напојната точка U_A и загубата на напон ΔU_ξ на потегот А – ξ, т.е.

$$U_\xi = U_A - \int_0^\xi dU = U_A - \Delta U_\xi,$$

каде што е:

$$\Delta U_\xi = \int_0^\xi \frac{P_\xi \cdot r + Q_\xi \cdot x}{U_n} \cdot d\xi = \int_0^\xi \frac{P_\xi \cdot (1 + x/r \cdot tg\varphi)}{U_n} \cdot r \cdot d\xi.$$

Со решавање на последниот интеграл добиваме:

$$\Delta U_\xi = \frac{P \cdot R \cdot (1 + x/r \cdot tg\varphi)}{2U_n} \cdot \frac{\xi \cdot (2l - \xi)}{l^2}, \text{ и}$$

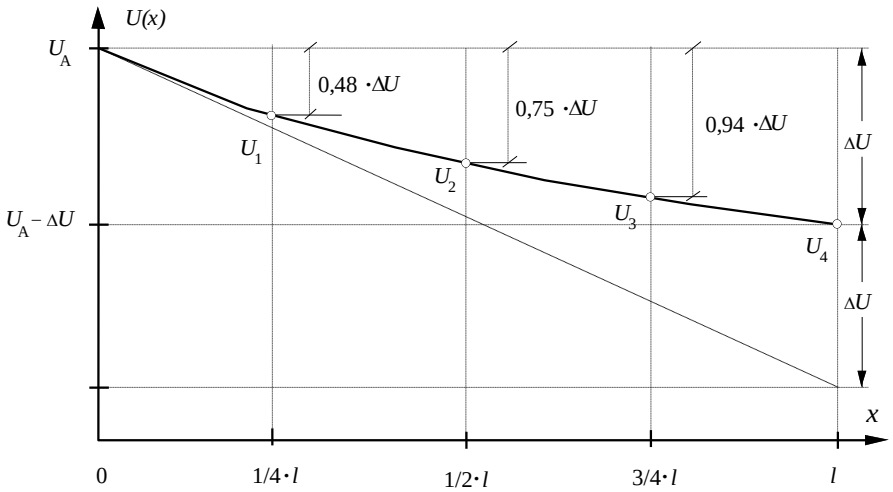
$$\Delta U = \Delta U_{(\xi = l)} = \frac{P \cdot R \cdot (1 + x/r \cdot \mathrm{tg}\varphi)}{2U_n} = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{2U_n}.$$

Според тоа, за напонот U_ξ во произволна точка на растојание ξ од почетокот на водот ќе го добиеме следниот израз:

$$U_\xi = U_A - \Delta U_\xi = U_A - \Delta U \cdot \frac{\xi \cdot (2l - \xi)}{l^2}, \text{ или} \tag{15.1}$$

$$U_\xi = U_A - \frac{\xi \cdot (2l - \xi)}{2 \cdot l^2} \cdot \Delta U_{\text{конц}}. \tag{15.2}$$

На сликата 15.2 е во форма на дијаграм прикажана промената на напонот $U_\xi = U(\xi)$ по должината водот со континуиран, рамномерно распределен, товар.



Слика 15.2. Напонски профил по должината на водот

Задача бр. 16♣. На кое растојание ξ од почетокот на водот разгледуван во задачата бр. 6 загубата на напон ја има вредноста 50% од вкупната загуба на напон во водот ΔU.

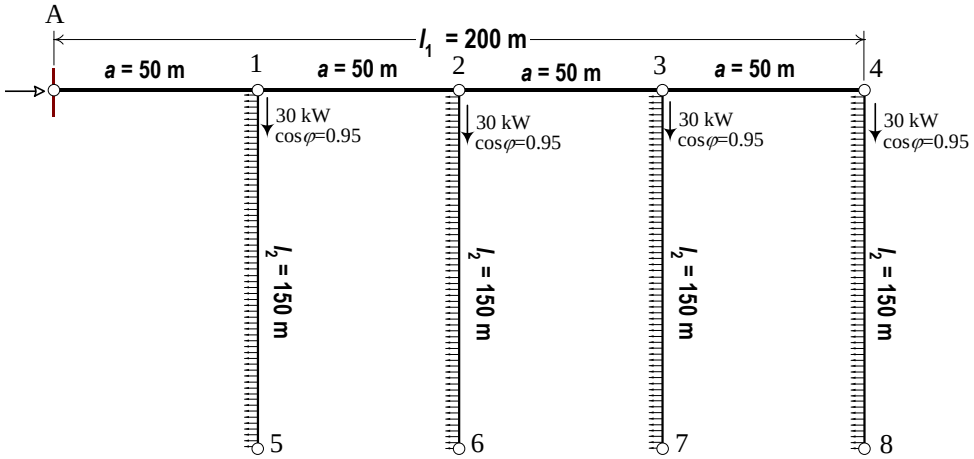
Решение:

$$\frac{\xi\cdot(2l-\xi)}{l^2}=\frac{1}{2}\quad\Rightarrow\quad \xi=\frac{2-\sqrt{2}}{2}\cdot l\approx 0{,}3\cdot l$$

■ ■ ■

Задача 17. На сликата 17.1 е прикажана надземна нисконапонска дистрибутивна мрежа што напојува дел од една приградска населба. Таа се состои од главен напоен вод (фидер) со должина l_1 = 200 m, со спроводници E-Al-јаже 70 mm^2 [$\underline{z}_1$ = 0,45+j0,35) Ω/km] и 4 идентични отцепи со должини l_2 = 150 m и пресек E-Al-јаже 25 mm^2 [$\underline{z}_2$ = 1,25+j0,38) Ω/km]. Познат е напонот во напојната точка A, U_A = 400 V. По должината на секој отцеп се рамномерно распределени поголем број потрошувачи со приближно исти карактеристики така што нивниот товар може да се третира како раномерно распределен. Вкупното оптоварување на секој таков отцеп изнесува P_1 = 30 kW; $\cos\varphi$ = 0,95. ($Q_1 = P_1\cdot\mathrm{tg}\varphi$ = 30·0,3287 = 9,86 kvar)

Да се пресметаат напоните во почетните и крајните точки од секој таков отцеп. Колкави се сумарните загуби на моќност во мрежата ΔP_Σ, изразени во kW и во %.



Слика 17.1. НН надземна мрежа на приградска населба

Решение:

1) Пресметка на напоните и загубите во главниот вод (фидер)

Главниот напоен вод е оптоварен со вкупно n = 4 концентрирани товари (отцепите заедно со нивните потрошувачи). Вкупното оптоварување на фидерот ќе биде:

$$P_{\text{фидер}} = n\cdot P_1 = 4\cdot 30 = 120\ \text{kW};$$

$$Q_{\text{фидер}} = n\cdot Q_1 = 4\cdot 9{,}86 = 39{,}44\ \text{kvar}.$$

Загубата на напон во фидерот $\Delta U_{\text{конц.}}$ за случајот кога целиот негов товар би бил приклучен на неговиот крај ќе биде:

$$\Delta U_{\text{конц}} = \frac{P_{\text{фидер}} \cdot R + Q_{\text{фидер}} \cdot X}{U_{\text{n}}} = \frac{120 \cdot 0,35 + 39,44 \cdot 0,35}{0,4} \cdot 0,2 = 33,9 \text{ V};$$

Во тој случај вкуната загуба на напон во него, во согласност со релацијата (11.1), изведена во примерот (11) ќе биде:

$$\Delta U_{\text{фидер}} = \frac{n+1}{2n} \cdot \Delta U_{\text{конц}} = \frac{4+1}{2 \cdot 4} \cdot 33,9 = 21,2 \text{ V}.$$

Загубата на моќност во фидерот $\Delta P_{\text{конц.}}$ за случајот кога целиот негов товар би бил приклучен на неговиот крај ќе биде:

$$\Delta P_{конц} = \frac{P_{\text{фидер}}^2 + P_{\text{фидер}}^2}{U_{\text{n}}^2} \cdot R = \frac{120^2 + 39,44^2}{0,4^2} \cdot 0,35 \cdot 0,2 = 8,975 \text{ kW}.$$

Во согласност со релацијата (2.18.2), изведена во примерот (2.18), ќе биде:

$$\Delta P_{\text{фидер}} = \frac{(n+1) \cdot (2n+1)}{6n^2} \cdot \Delta P_{\text{конц}} = \frac{4 \cdot 5 \cdot 11}{6 \cdot 4^2} \cdot 8,975 = 4,207 \text{ kW}.$$

Напоните во поедините точки од фидерот ќе ги пресметаме со помош на општиот образец (11.1), изведен во примерот 11:

$$U_i = U_A - \Delta U \cdot \left[1 - \frac{(n-i) \cdot (n+1-i)}{n \cdot (n+1)}\right]; \quad \forall i \in (1,\ n),$$

$$U_1 = U_{\text{A}} - \Delta U \cdot \left[1 - \frac{(n-1) \cdot (n+1-1)}{n \cdot (n+1)}\right] = 400 - 33,9 \cdot \left[1 - \frac{3 \cdot 4}{4 \cdot 5}\right] = 391,5 \text{ V};$$

$$U_2 = U_{\text{A}} - \Delta U \cdot \left[1 - \frac{(n-2) \cdot (n+1-2)}{n \cdot (n+1)}\right] = 400 - 33,9 \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot 3}{4 \cdot 5}\right] = 385,2 \text{ V};$$

$$U_3 = U_{\text{A}} - \Delta U \cdot \left[1 - \frac{(n-3) \cdot (n+1-3)}{n \cdot (n+1)}\right] = 400 - 33,9 \cdot \left[1 - \frac{1 \cdot 2}{4 \cdot 5}\right] = 380,9 \text{ V};$$

$$U_4 = U_{\text{A}} - \Delta U \cdot \left[1 - \frac{(n-4) \cdot (n+1-4)}{n \cdot (n+1)}\right] = 400 - 33,9 \cdot \left[1 - \frac{0 \cdot 1}{4 \cdot 5}\right] = 378,8 \text{ V}.$$

1) Пресметка на напоните и загубите во отцепите

Бидејќи сите отцепи имаат исти карактеристики и исто оптоварување ($P_{\text{отцеп}}$ = 30 kW; $Q_{\text{отцеп}}$ = 9,86 kvar; $R_{\text{отцеп}}$ = 0,1875 Ω; $X_{\text{отцеп}}$ = 0,057 Ω), резултатите за пресметаните загуби на напон и моќност во нив ќе бидат исти. Во недостаток на други податоци ќе усвоиме дека товарот $\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1$ на секој отцеп е рамномерно распределен по неговата должина. Во тој случај ќе имаме:

$$\Delta U_{\text{отцеп}} = \frac{P_1 \cdot R_{\text{отцеп}} + Q_1 \cdot X_{\text{отцеп}}}{2 \cdot U_{\text{n}}} = \frac{30 \cdot 1,25 + 9,86 \cdot 0,38}{2 \cdot 400} \cdot 0,15 = 15,5 \text{ V};$$

$$\Delta P_{\text{отцеп}} = \frac{P_{\text{отцеп}}^2 + Q_{\text{отцеп}}^2}{3 \cdot U_{\text{n}}^2} \cdot R_{\text{отцеп}} = \frac{30^2 + 9,86^2}{3 \cdot 400^2} \cdot 1,25 \cdot 0,15 = 1,169 \text{ kW}.$$

Вкупните загуби на моќност во мрежата ќе бидат:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{фидер}} + 8 \cdot \Delta P_{\text{отцеп}} = 4,207 + 8 \cdot 1,169 = 13,556 \text{ kW}.$$

Напоните во крајните точки од отцепите на мрежата ќе бидат:

$$U_5 = U_1 - \Delta U_{\text{отцеп}} = 391{,}5 - 15{,}5 = 376{,}5 \text{ V};$$

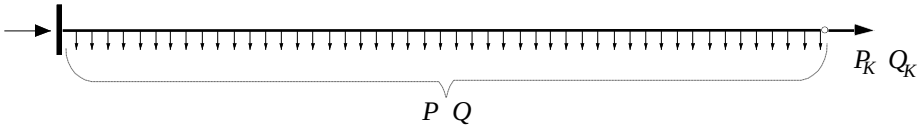
$$U_6 = U_2 - \Delta U_{\text{отцеп}} = 385{,}2 - 15{,}5 = 369{,}7 \text{ V};$$

$$U_7 = U_3 - \Delta U_{\text{отцеп}} = 380{,}9 - 15{,}5 = 365{,}5 \text{ V};$$

$$U_8 = U_4 - \Delta U_{\text{отцеп}} = 378{,}8 - 15{,}5 = 363{,}3 \text{ V}.$$

■ ■ ■

Задача бр. 18. На сликата 18.1 е прикажан магистрален вод со позната должина l и познати подолжни параметри r и x. На крајот од водот е приклучен концентриран потрошувач $\underline{S}_K = P_K + jQ_K$. Водот е во исто време оптоварен со потрошувачи и по сета своја должина. Сумарната моќност на тие потрошувачи изнесува $\underline{S} = P + jQ$ и може да се смета дека тие се приближно рамномерно распределени по неговата должина.

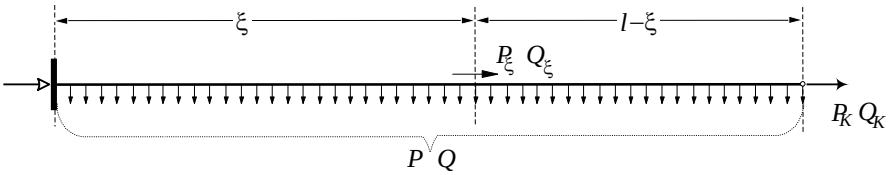


Слика 18.1. Магистрален вод со комбиниран товар

Да се изведат изразите за пресметка загубата на напон ΔU и вкупните загуби на моќност ΔP во разгледуваниот вод. Да се посматра идеализираниот модел кога бројот на потрошувачите распределени долж водот е многу голем ($n \to \infty$).

Решение:

Посматраме точка на водот која се наоѓа на растојание ξ од неговиот почеток. Во согласност со сликата 18.2, за моќностите P_ξ и Q_ξ што течат во посматраната точка ќе имаме:



Слика 18.2. Кон изведувањето на изразите за загуба на напон и моќност во водот од слика 18.1

$$P_\xi = P_K + P \cdot \frac{l-\xi}{l} \; ; \quad Q_\xi = Q_K + Q \cdot \frac{l-\xi}{l}$$

Понатаму, за елементот од водот со елементарна должина $d\xi$ низ којшто тече моќноста $\underline{S}_\xi = P_\xi + jQ_\xi$ за диференцијалните загуби на напон и моќност можеме да пишуваме:

$$d(\Delta U) = \frac{P_\xi \cdot r \cdot d\xi + Q_\xi \cdot x \cdot d\xi}{U_n} = \frac{P_\xi \cdot r + Q_\xi \cdot x}{U_n} \cdot d\xi;$$

$$d(\Delta P) = \frac{P_\xi^2 + Q_\xi^2}{U_n^2} \cdot r \cdot d\xi.$$

Со интегрирање на горната равенка во интервалот $\xi \in (0, l)$ се добива вкупната загуба на напон во водот ΔU:

$$\Delta U = \int_0^l d(\Delta U) = \int_0^l \frac{P_\xi \cdot r + Q_\xi \cdot x}{U_\text{n}} \cdot d\xi \quad \text{или}$$

$$\Delta U = \frac{P_K \cdot R + Q_K \cdot X}{U_\text{n}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_\text{n}}. \tag{18.1}$$

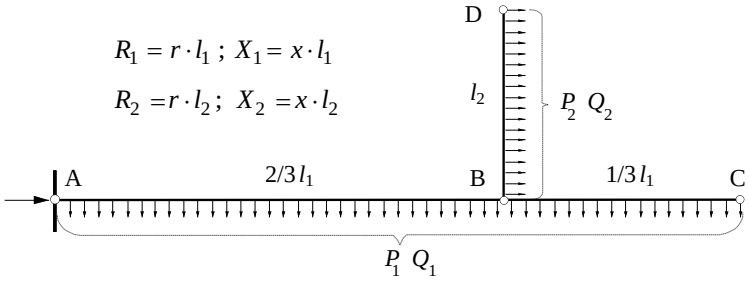
Слично, со интегрирање на втората равенка ги добиваме вкупните загуби на активна моќност во водот ΔP:

$$\Delta P = \int_0^l d(\Delta P) = \int_0^l \frac{P_\xi^2 + Q_\xi^2}{U_\text{n}^2} \cdot r \cdot d\xi \quad \text{или}$$

$$\Delta P = \frac{P_K^2 + Q_K^2}{U_\text{n}^2} \cdot R + \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U_\text{n}^2} \cdot R + \frac{P \cdot P_K + Q \cdot Q_K}{U_\text{n}^2} \cdot R. \tag{18.2}$$

■ ■ ■

Задача бр. 19. На сликата 19.1 е прикажана нисконапонска (НН) хомогена мрежа. Сите водови се со ист пресек и имаат исти подолжни параметри r и x. По должината на магистралниот вод "V1" на потегот A–B–C, со позната должина l_1 се напојува рамномерно распределен товар со сумарна моќност $\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1$. По должината на отцепниот вод „V2“ со позната должина l_2 се напојува рамномерно распределен товар со сумарна моќност $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$.



Слика 19.1. НН мрежа со континуиран товар

Да се изведат изразите за пресметка на загубата на напон ΔU и вкупните загуби на моќност ΔP во мрежата. Да се посматра идеализираниот случај кога бројот на потрошувачите распределени долж водовите n е многу голем и тежи кон бесконечност ($n \to \infty$).

Решение:

Набљудуваната мрежа привремено ќе ја поделиме на три сегменти (делници): A–B; B–C и B–D. Сегментите B–C и B–D претставуваат,сами за себе, мрежи со континуиран товар. Нив можеме да ги решаваме со помош на општите изрази (18.1) и (18.2) што важат за ваквиот вид мрежи.

На тој начин за загубите на напон и моќност во овие две делници ќе добиеме:

$$\Delta U_\text{B-C} = \frac{P_\text{B-C} \cdot R_\text{B-C} + Q_\text{B-C} \cdot X_\text{B-C}}{2 \cdot U_\text{n}} = \frac{(P_1/3) \cdot (R_1/3) + (Q_1/3) \cdot (X_1/3)}{2 \cdot U_\text{n}} = \frac{P_1 \cdot R_1 + Q_1 \cdot X_1}{18 \cdot U_\text{n}};$$

$$\Delta P_{\text{B-C}} = \frac{P_{\text{B-C}}^2 + Q_{\text{B-C}}^2}{3 \cdot U_{\text{n}}^2} \cdot R_{\text{B-C}} = \frac{(P_1/3)^2 + (Q_1/3)^2}{3 \cdot U_{\text{n}}^2} \cdot (R_1/3) = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{81 \cdot U_{\text{n}}^2} \cdot R_1,$$

$$\Delta U_{\text{B-D}} = \frac{P_{\text{B-D}} \cdot R_{\text{B-D}} + Q_{\text{B-D}} \cdot X_{\text{B-D}}}{2U_{\text{n}}} = \frac{P_2 \cdot R_2 + Q_2 \cdot X_2}{2U_{\text{n}}};$$

$$\Delta P_{\text{B-D}} = \frac{P_{\text{B-D}}^2 + Q_{\text{B-D}}^2}{3 \cdot U_{\text{n}}^2} \cdot R_{\text{B-D}} = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{3 \cdot U_2^2} \cdot R_2.$$

Сега сегментите B–C и B–D ќе ги замениме (симулираме) со еден концентриран потрошувач $\underline{S}_K = (P_K + jQ_K)$ поставен на крајот од сегментот A–B:

$$P_K = P_{\text{B-C}} + P_{\text{B-D}} = P_1/3 + P_2; \quad Q_K = Q_{\text{B-C}} + Q_{\text{B-D}} = Q_1/3 + Q_2.$$

Конечно, сегментот A–B од мрежата ќе го решиме со помош на моделот од претходната задача, со помош на изразите (17.1) и (17.2). на тој начин за загубите на напон $\Delta U_{\text{A–B}}$ и на моќност $\Delta P_{\text{A–B}}$ во овој дел од мрежата добиваме:

$$\Delta U_{\text{A-B}} = \frac{P_{\text{A-B}} \cdot R_{\text{A-B}} + Q_{\text{A-B}} \cdot X_{\text{A-B}}}{2 \cdot U_{\text{n}}} + \frac{P_K \cdot R_{\text{A-B}} + Q_K \cdot Q_{\text{A-B}}}{U_{\text{n}}}; \text{ или}$$

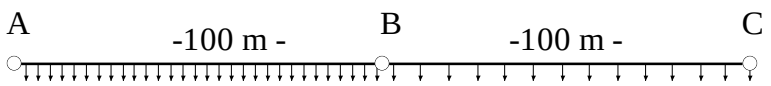
$$\Delta P_{\text{A-B}} = \frac{P_K^2 + Q_K^2}{U_{\text{n}}^2} \cdot R + \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{\text{A-B}}^2 + Q_{\text{A-B}}^2}{U_{\text{n}}^2} \cdot R + \frac{P_{\text{A-B}} \cdot P_K + Q_{\text{A-B}} \cdot Q_K}{U_{\text{n}}^2} \cdot R.$$

Вкупните загуби на моќност во мрежата ΔP_Σ ќе бидат збир од загубите во одделните делници: $\Delta P_\Sigma = \Delta P_{\text{A-B}} + \Delta P_{\text{B-C}} + \Delta P_{\text{B-D}}$.

■ ■ ■

Задача 20 (испитна). На сликата 20.1 е прикажана нисконапонска дистрибутивна мрежа, изведена како надземна, со спроводници Al/^ 50/8 mm^2 ($r = 0.6$ Ω/km; $x = 0{,}35$ Ω/km). Делницата A-B е долга l_1 = 100m и е оптоварена со рамномерно распределен товар, чија подолжна густина изнесува p_1 = 1 kW/m; cos φ_1 = 0,95. Делницата B-C е исто така долга l_2 = 100 m и е оптоварена со рамномерно распределен товар но со двојно помала густина ($p_2 = p_2/2$ = 0,5 kW/m; cos φ_2 = 0,95. Напонот во напојната точка A изнесува U_A = 400 V.

Да се пресметаат напоните во точките B и C како и вкупните загуби на активна моќност ΔP во мрежата.



Слика 20.1

Решение:

Дел B-C:

$$\Delta U_{\text{B-C}} = \frac{1}{2} \frac{P_{\text{B-C}} \cdot r + Q_{\text{B-C}} \cdot x}{U_{\text{n}}} \cdot l_{\text{B-C}} = \frac{50 \cdot 0{,}6 + 16{,}44 \cdot 0{,}35}{2 \cdot 0{,}4} \cdot 0{,}1 = 4{,}47 \text{ V},$$

$$\Delta P_{\text{B-C}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{\text{B-C}}^2 \cdot l_{\text{B-C}}}{U_{\text{n}}^2 \cdot \cos^2 \varphi} = \frac{50^2 \cdot 0{,}6 \cdot 0{,}1}{3 \cdot 0{,}4^2 \cdot 0{,}95^2} = 346 \text{ W}.$$

Дел А-В:

$$\Delta U_{\text{A-B}} = \frac{1}{2}\cdot\frac{P_{\text{A-B}}\cdot r + Q_{\text{A-B}}\cdot x}{U_{\text{n}}}\cdot l_{\text{A-B}} + \frac{P_{\text{B-C}}\cdot r + Q_{\text{B-C}}\cdot x}{U_{\text{n}}}\cdot l_{\text{A-B}},$$

$$\Delta U_{\text{A-B}} = \frac{1}{2}\cdot\frac{100\cdot 0,6 + 32,87\cdot 0,35}{0,35}\cdot 0,1 + \frac{50\cdot 0,6 + 16,44\cdot 0,35}{0,4}\cdot 0,1 = 8,94 + 8,94 = 17,88\ \text{V},$$

$$\Delta P_{\text{A-B}} = \frac{1}{3}\frac{P_{\text{A-B}}^2\cdot r\cdot l_{\text{A-B}}}{U_{\text{n}}^2\cdot\cos^2\varphi} + \frac{P_{\text{A-B}}^2\cdot r\cdot l_{\text{A-B}}}{U_{\text{n}}^2\cdot\cos^2\varphi} + \frac{P_{\text{A-B}}\cdot P_{\text{B-C}}\cdot r\cdot l_{\text{A-B}}}{U_{\text{n}}^2\cdot\cos^2\varphi},$$

$$\Delta P_{\text{A-B}} = \frac{100^2\cdot 0,06}{3\cdot 0,4^2\cdot 0,95^2} + \frac{50^2\cdot 0,06}{0,4^2\cdot 0,95^2} + \frac{100\cdot 50\cdot 0,06}{0,4^2\cdot 0,95^2} = 4501\ \text{W}.$$

На тој начин се добиваат селдните напонски прилики:

$U_{\text{A}} = 400$ V; $U_{\text{B}} = U_{\text{A}} - \Delta U_{\text{A-B}} = 381,12$ V;

$U_{\text{C}} = U_{\text{B}} - \Delta U_{\text{B-C}} = 77,65$ V; $\Delta U = 22,35$ V (5,6%).

Според тоа, загубата на напон во мрежата ќе биде:

$\Delta U = U_{\text{A}} - U_{\text{C}} = 22,35$ V (5,6%).

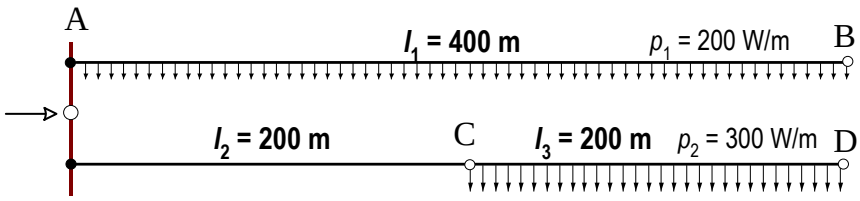
Вкупните загуби на моќност во мрежата ќе бидат:

$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{A-B}} + \Delta P_{\text{B-C}} = 4501 + 346 = 4847\ \text{W} \approx 4,85\ \text{kW}.$

■ ■ ■

Задача 21 (испитна). На сликата 21.1 се прикажани два нисконапонски извода од една дистрибутивна мрежа, напојувана од точката А со познат напон U_{A} = 400 V. Мрежата е изведена како надземна, со спроводници Al/^ 50/8 mm^2 (r = 0.6 Ω/km; x = 0,35 Ω/km). Првиот извод (делница А–В) е долг l_1 = 400 m и е оптоварен со рамномерно распределен товар, чија подолжна густина изнесува p_1 = 0,2 kW/m; cos φ_1 = 0,95. Вториот извод се состои од две делници А–С и С–D, обете долги по 200 m (l_2 = 200 m; l_3 = 200 m). Притоа делницата С–D е оптоварена со рамномерно распределен товар со густина p_2 = 0,3 kW/m; cos φ_2 = 0,95.

Да се пресметаат напоните U_{B} и U_{D} во точките В и D како и вкупните загуби на моќност во мрежата ΔP_{Σ}.



Слика 21.1

Решение:

Дел A-B:

$p_1 = 0,2$ kW/m = 200 kW/km;

$q_1 = p_1 \cdot \mathrm{tg}\varphi_1 = 200 \cdot 0,3287 = 65,74$ kvar/km;

$$\Delta U_{\mathrm{A-B}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(p_1 \cdot l_1) \cdot r + (q_1 \cdot l_1) \cdot x}{U_{\mathrm{n}}} \cdot l_1$$

$$\Delta U_{\mathrm{A-B}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{80 \cdot 0,6 + 65,74 \cdot 0,35}{0,4} \cdot 0,4 = 28,6\,\mathrm{V};$$

$$U_{\mathrm{B}} = U_{\mathrm{A}} - \Delta U_{\mathrm{A-B}} = 400 - 28,64 = 371,4\ \mathrm{V};$$

$$\Delta P_{\mathrm{A-B}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{(p_1 \cdot l_1)^2 + (q_1 \cdot l_1)^2}{U_{\mathrm{n}}^2} \cdot r \cdot l_1 = \frac{1}{3} \cdot \frac{80^2 + 26,3^2}{0,4^2} \cdot 0,6 \cdot 0,4 = 3,546\,\mathrm{kW};$$

$$\Delta P_{\Sigma\mathrm{A-B}} = \Delta P_{\mathrm{A-B}} = 3,546\ \mathrm{kW}.$$

Дел C-D:

$p_2 = 0,3$ kW/m = 300 kW/km;

$q_2 = p_2 \cdot \mathrm{tg}\varphi_1 = 300 \cdot 0,3287 = 98,61$ kvar/km;

$$\Delta U_{\mathrm{C-D}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(p_2 \cdot l_2) \cdot r + (q_2 \cdot l_2) \cdot x}{U_{\mathrm{n}}} \cdot l_2;$$

$$\Delta U_{\mathrm{C-D}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{60 \cdot 0,6 + 19,72 \cdot 0,35}{0,4} \cdot 0,2 = 10,73\ \mathrm{V};$$

$$\Delta P_{\mathrm{C-D}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{(p_2 \cdot l_2)^2 + (q_2 \cdot l_2)^2}{U_{\mathrm{n}}^2} \cdot r \cdot l_2;$$

$$\Delta P_{\mathrm{C-D}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{60^2 + 19,72^2}{0,4^2} \cdot 0,6 \cdot 0,2 = 0,997\,\mathrm{kW};$$

$$\Delta U_{\mathrm{A-C}} = 2 \cdot \Delta U_{\mathrm{C-D}} = 2 \cdot 10,73 = 21,46\ \mathrm{V};$$

$$\Delta P_{\mathrm{A-C}} = 3 \cdot \Delta P_{\mathrm{C-D}} = 3 \cdot 0,997 = 2,991\ \mathrm{kW};$$

$$U_{\mathrm{C}} = U_{\mathrm{A}} - \Delta U_{\mathrm{A-C}} = 400 - 21,46 = 378,54\ \mathrm{V};$$

$$U_{\mathrm{D}} = U_{\mathrm{C}} - \Delta U_{\mathrm{C-D}} = 378,54 - 10,73 = 367,81\ \mathrm{V};$$

$$\Delta P_{\Sigma\mathrm{A-D}} = \Delta P_{\Sigma\mathrm{A-C}} + \Delta P_{\Sigma\mathrm{C-D}} = 2,991 + 0,997 = 3,988\ \mathrm{kW}.$$

Загуба на напон во мрежата:

$$\Delta U = U_{\mathrm{A}} - U_{\mathrm{C}} = 400 - 367,81 = 32,19\ \mathrm{V} \quad (8,05\%).$$

Вкупни загуби на моќност:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma.\mathrm{A-B}} + \Delta P_{\Sigma.\mathrm{A-D}} = 3,546 + 3,988 = 7,534\ \mathrm{kW}\ (5,38\%)$$

■ ■ ■

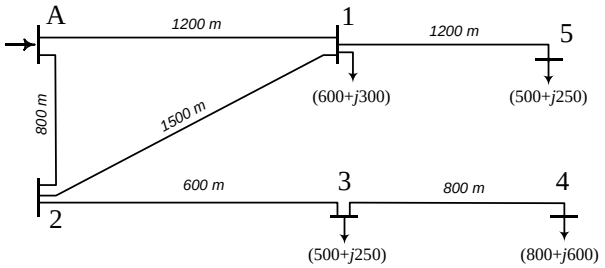
VII. РЕШАВАЊЕ НА СЛОЖЕНО-ЗАТВОРЕНИ МРЕЖИ

Задача 1. Да се определи распределбата на моќности и загубата на напон ΔU во прикажаната 10 kV мрежа (слика 1.1):

а) за нормален режим на работа;

б) за режим на најтежок дефект во мрежата.

Оптоварувањата изразени во MVA и должините на одделните водови, изразени во m, се прикажани на самата слика. Напонот во напојната точка "A" изнесува $\underline{U}_A = 10 \cdot e^{j0}$ kV.

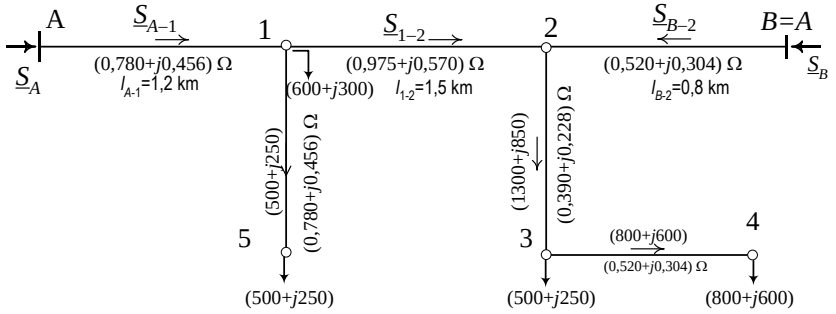


Слика 1.1. 10 kV надземна мрежа со една контура

Решение

а) Пресметка на мрежата во нормален режим на работа

Во нормален режим на работа сите елементи од мрежата се исправни и се во погон. Во таквиот работен режим во мрежата има една контура, како што е тоа прикажано на сликата 1.1. Мрежата ќе ја решиме на тој начин што прстенот A–1–2 ќе го расечеме во напојната точка A и ќе го отвориме (развиеме) како што е тоа прикажано на сликата 1.2.



Слика 1.2. Нормален режим на работа на мрежата.

Најнапред ќе ја одредиме (приближно) распределбата на моќности во магистралниот дел од мрежата A–1–2–B. За таа цел ќе ги занемариме загубите на моќност во водовите 2–3, 3–4 и 1–5, и привремено, моќноста $\underline{S}_5$ ќе ја пренесеме во јазелот "1", додека моќностите $\underline{S}_3$ и $\underline{S}_4$ ќе ги пренесеме во јазелот „2“. Во тој случај, за еквивалентните оптоварувањата $\underline{S}'_1$ и $\underline{S}'_2$ во јазлите „1“ и „2“ ќе добиеме:

$$\underline{S}'_1 = \underline{S}_1 + \underline{S}_5 = (1100 + j550)\ \text{kVA};$$

$$\underline{S}'_2 = \underline{S}_3 + \underline{S}_4 = (1300 + j850)\ \text{kVA}.$$

Понатаму, во согласност со изразите (4.1) од [1], за моќностите $\underline{S}_A$ и $\underline{S}_B$ што се инјектираат во јазлите А и В од мрежата, ќе добиеме:

$$\underline{S}_A = \underline{S}_1' \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{1B}}{\underline{Z}_{AB}}\right)^* + \underline{S}_2' \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{2B}}{\underline{Z}_{AB}}\right)^* = \underline{S}_1' \cdot \frac{l_{1\text{-}B}}{l_{A\text{-}B}} + \underline{S}_2' \cdot \frac{l_{2\text{-}B}}{l_{A\text{-}B}} = (1020 + j556)\ \text{kVA};$$

$$\underline{S}_B = \underline{S}_1' \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{1A}}{\underline{Z}_{AB}}\right)^* + \underline{S}_2' \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{2A}}{\underline{Z}_{AB}}\right)^* = \underline{S}_1' \cdot \frac{l_{1\text{-}A}}{l_{A\text{-}B}} + \underline{S}_2' \cdot \frac{l_{2\text{-}A}}{l_{A\text{-}B}} = (1380 + j844)\ \text{kVA}.$$

Како проверка на точноста на решението ќе ни послужи контролата:

$$\underline{S}_A + \underline{S}_B = \Sigma\underline{S} = (600 + j300) + (500 + j250) + (800 + j600) + (500 + j250).$$

$$\underline{S}_A + \underline{S}_B = \Sigma\underline{S} = (2400 + j1400)\ \text{kVA}.$$

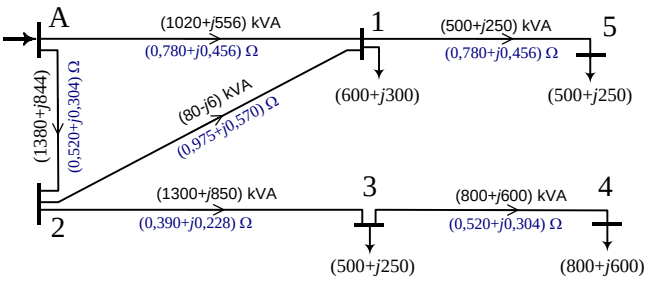
И навистина од добиените решенија за $\underline{S}_A$ и $\underline{S}_B$ произлегува:

$$\underline{S}_A + \underline{S}_B = \Sigma\underline{S} = (1020 + j556) + (1380 + j844) = (2400 + j1400)\ \text{kVA}.$$

За моќноста што тече во водот 1-2 ќе добиеме:

$$\underline{S}_{1-2} = \underline{S}_A - \underline{S}_1' = (1020 + j556) - (1100 + j550) = (-80 + j6)\ \text{kVA}.$$

Со тоа ја определивме распределбата на моќности во затворената контура А-1-2-А. Бидејќи во останатиот дел од мрежата на која што и припаѓаат водовите 1-5, 2-3 и 3-4, моќностите се добиваат едноставно со примена на Кирхофовиот закон за моќнсоти, ја добиваме следната приближна распределба на моќности во мрежата (слика 1.3).



Слика 1.3. Распределба на моќности во нормален режим на работа на мрежата.

Сега можеме да ги пресметаме и загубите на напон во поедините делници од мрежата, како и напоните во јазлите од мрежата:

$$\Delta U_{\text{A-1}} = \frac{1020 \cdot 0,78 + 556 \cdot 0,456}{10} = 105\ \text{V};$$

$$U_1 = U_{\text{A}} - \Delta U_{\text{A-1}} = 9,895\ \text{kV}$$

$$\Delta U_{1-5} = \frac{500 \cdot 0,78 + 250 \cdot 0,456}{10} = 50\ \text{V};$$

$$U_5 = U_1 - \Delta U_{1-5} = 9,845\ \text{kV}$$

$$\Delta U_{\text{A-2}} = \frac{1380 \cdot 0,52 + 844 \cdot 0,304}{10} = 97\ \text{V};$$

$$U_2 = U_{\text{A}} - \Delta U_{\text{A-2}} = 9,903\ \text{kV}$$

$$\Delta U_{2-3} = \frac{1300 \cdot 0,39 + 850 \cdot 0,228}{10} = 70\,\text{V};$$

$$U_3 = U_2 - \Delta U_{2-3} = 9,833\ \text{kV}$$

$$\Delta U_{3-4} = \frac{800 \cdot 0,52 + 60 \cdot 0,304}{10} = 60\,\text{V};$$

$$U_4 = U_3 - \Delta U_{3-4} = 9,773\ \text{kV}.$$

Загубата на напон во мрежата претставува разлика помеѓу напонот во напојната точка А и точката со најнизок напон, во случајов јазелот 4, т.е.:

$$\Delta U = U_{\text{A}} - U_4 = 10 - 9,773 = 0,227\ \text{kV}$$

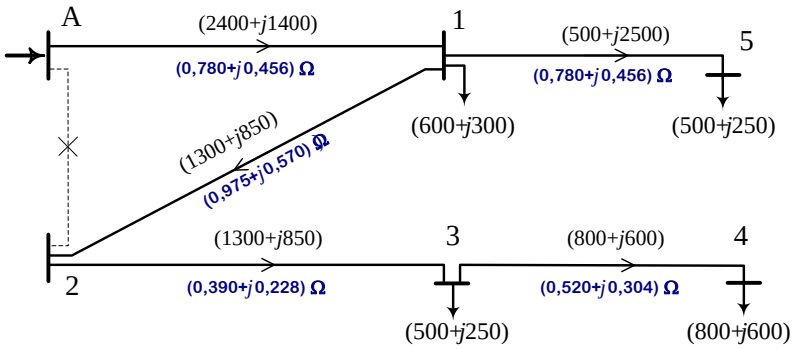
или

$$\Delta U\% = 2,27\%.$$

б) Пресметка на мрежата во режим на најтежок дефект

Режим на најголем дефект ќе имаме тогаш кога водот којшто пренесува најголема моќност излезе од погон. Во тој случај, сите потрошувачи ќе се снабдуваат со електрична енергија само од една страна (од еден извор).

Во нашиот пример, делницата А–2 е оној вод кој што пренесува најголема моќност. Со неговото испаѓање од погон ќе ја имаме состојбата во мрежата, претставена на сликата 1.4.



Слика 1.4. Распределба на моќности во режим со најтежок дефект.

Во овој случај, распределбата на моќности се одредува сосема едноставно, со примена на првиот Кирхофов закон за струи (моќности), т.е со нивно просто сумирање. Резултатите од пресметките на приближните вредности на моќностите во мрежата за овој режим се прикажани на самата слика 1.4. Загубите на напон во поедините делници од мрежата како и напоните во јазлите од мрежата сега ќе бидат:

$$\Delta U_{\text{A-1}} = \frac{2400 \cdot 0,78 + 1400 \cdot 0,456}{10} = 251\ \text{V};$$

$$U_1 = U_{\text{A}} - \Delta U_{\text{A-1}} = 9,749\ \text{kV};$$

$$\Delta U_{1-5} = \frac{500 \cdot 0,78 + 250 \cdot 0,456}{10} = 50\,\text{V};$$

$$U_5 = U_1 - \Delta U_{1-5} = 9{,}845 \text{ kV};$$

$$\Delta U_{1-2} = \frac{1300 \cdot 0{,}975 + 850 \cdot 0{,}228}{10} = 146 \text{ V};$$

$$U_2 = U_1 - \Delta U_{1-2} = 9{,}603 \text{ kV}$$

$$\Delta U_{2-3} = \frac{1300 \cdot 0{,}39 + 850 \cdot 0{,}228}{10} = 70 \text{ V};$$

$$U_3 = U_2 - \Delta U_{2-3} = 9{,}533 \text{ kV}$$

$$\Delta U_{3-4} = \frac{800 \cdot 0{,}52 + 60 \cdot 0{,}304}{10} = 60 \text{ V};$$

$$U_4 = U_3 - \Delta U_{3-4} = 9{,}473 \text{ kV}.$$

Јасно е дека и во овој режим најголемата загуба на напон ќе се има повторно до точката „4“, односно загубата на напон во мрежата сега ќе биде:

$$\Delta U = U_A - U_4 = 10 - 9{,}473 = 0{,}527 \text{ kV}$$

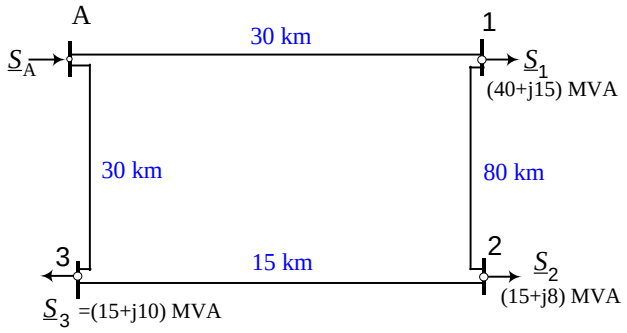
или

$$\Delta U\% = 5{,}27\%.$$

■ ■ ■

Задача 2. На сликата 2.1 е прикажана една прстенеста 110 kV мрежа. Сите водови од мрежата се изведени на челично-решеткасти столбови, со средно-геометриско растојание D_m= 5.3 m и со спроводници Al/Č 185/30 mm^2 (r = 0,17 Ω/km; x = 0,41 Ω/km). Поедините оптоварувања (во MVA) и должини на водовите (во km) се прикажани на шемата. Напонот во напојната точка „A“ се држи на константна вредност U_A = 115 kV.

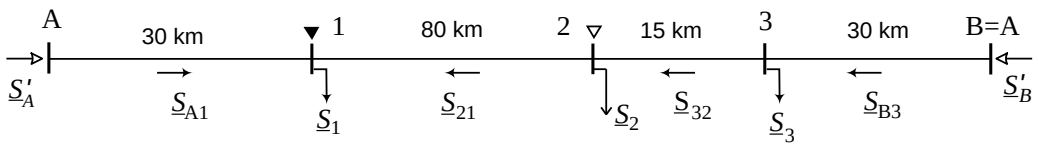
Потребно е да се одреди распределбата на моќности во мрежата, уважувајќи ги загубите на моќности и фактичките напони во јазлите. Заради упростување, генерираните реактивни моќности од водовите во пресметките да се занемарат.



Слика 2.1. 110 kV прстенеста мрежа.

Решение

Дадената прстенеста мрежа најнапред ќе ја расечеме во напојната точка „A“ и на тој начин ќе ја добиеме двострано напојувана мрежа, прикажана на сликата 2.2. Оваа мрежа потоа лесно ја решаваме со помош на познатите равенки (4.1).



Слика 2.2. 110 kV мрежа од слика 2.1 во развиена форма.

Бидејќи сите водови од мрежата имаат исти подолжни параметри, за одредувањето на моќностите $\underline{S}_{A-1}$, $\underline{S}_{2-1}$, $\underline{S}_{3-2}$ и $\underline{S}_{B-3}$, наместо со импеданциите, ќе работиме со должини:

$$\underline{S}'_A \equiv \underline{S}_{A-1} = \underline{S}_1 \cdot \frac{l_{1B}}{l_{AB}} + \underline{S}_2 \cdot \frac{l_{2B}}{l_{AB}} + \underline{S}_3 \cdot \frac{l_{3B}}{l_{AB}};$$

$$\underline{S}'_A \equiv \underline{S}_{A-1} = (40 + j15) \cdot \frac{125}{155} + (15 + j8) \cdot \frac{45}{155} + (15 + j10) \cdot \frac{30}{155};$$

$$\underline{S}'_A = (39,5 + j16,3) \text{ MVA}$$

$$\underline{S}'_B \equiv \underline{S}_{B-3} = (\underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3) - \underline{S}'_A = (30,5 + j16,3) \text{ MVA},$$

$$\underline{S}_{32} = \underline{S}_{B-4} - \underline{S}_3 = (15,5 + j6,7) \text{ MVA},$$

$$\underline{S}_{21} = \underline{S}_{3-2} - \underline{S}_2 = (0,5 + j1,3) \text{ MVA}.$$

Значи, разделната точка за активни моќности е јазелот 1, додека за реактивни моќности е јазелот „2“. Понатаму загубите на моќност $\Delta\underline{S}$ во поедините водови ќе бидат:

$$\Delta\underline{S}_i = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_n^2} \cdot l_i \cdot (r + jx); \quad i = 1,..,4;$$

$$\Delta\underline{S}_{A-1} = \frac{39,5^2 + 16,3^2}{110^2} \cdot 30 \cdot (0,17 + j0,41) = (0,77 + j1,85) \text{ MVA}.$$

Со оглед на фактот дека моќноста $\underline{S}_{A1}$ тече од јазелот „А“ кон јазелот „1“, јасно е дека загубите во делницата А–1 ќе ги покрива изворот во точката „А“, односно, моќноста на почетокот од водот А-1 ќе изнесува:

$$\underline{S}'_{A-1} = \underline{S}_{A-1} + \Delta\underline{S}_{A-1} = (40,27 + j18,15) \text{ MVA}.$$

Моќноста $\underline{S}_{2-1}$ низ водот 2–1 е многу мала, па загубите $\Delta\underline{S}_{1-2}$ во овој вод, кои изнесуваат,

$$\Delta\underline{S}_{1-2} = \frac{0,5^2 + 1,3^2}{110^2} \cdot 80 \cdot (0,17 + j0,41) = (0,002 + j0,005) \text{ MVA},$$

можеме да ги занемариме т.е. ќе сметаме дека е приближно:

$$\underline{S}'_{2-1} = \underline{S}''_{2-1} = \underline{S}_{2-1}.$$

Загубите $\Delta\underline{S}_{2-3}$ во водот 2-3 ќе бидат:

$$\Delta\underline{S}_{2-3} = \frac{15,5^2 + 6,7^2}{110^2} \cdot 15 \cdot (0,17 + j0,41) = (0,06 + j0,145) \text{ MVA}.$$

Моќноста на почетокот од водот 2-3 ќе биде:

$$\underline{S}'_{3-2} = \underline{S}''_{3-2} + \Delta\underline{S}_{2-3} = \underline{S}_3 + \Delta\underline{S}_{2-3} = (15,56 + j6,71) \text{ MVA}.$$

Моќноста $\underline{S}''_{4-3}$ на крајот од водот 3-4 сега ќе биде:

$$\underline{S}''_{4-3} = \underline{S}'_{3-2} + \underline{S}_3 = (30,56 + j16,71) \text{ MVA}.$$

Загубите $\Delta\underline{S}_{3-4}$ во водот 3-4 ќе бидат:

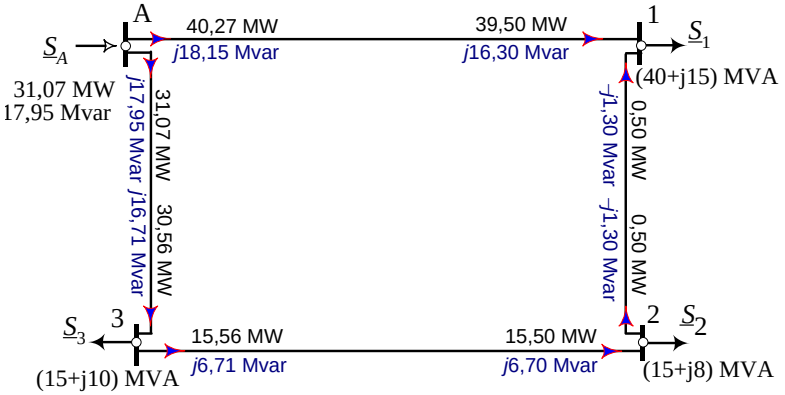
$$\Delta\underline{S}_{3-4} = \frac{30,56^2 + 16,71^2}{110^2} \cdot 30 \cdot (0,17 + j0,41)\,;$$

$$\Delta\underline{S}_{3-4} = (0,515 + j1,24)\ \text{MVA}$$

и конечно:

$$\underline{S}'_{4-3} = \underline{S}''_{4-3} + \Delta\underline{S}_{3-4} = (31,07 + j17,95)\ \text{MVA}.$$

Конечната распределба на моќности во мрежата, прикажана е на сликата 2.3:



Слика 2.3. Текови на моќности мрежа.

Сега лесно можеме да ги одредиме напоните во јазлите од мрежата:

$$U_1 = U_A - \frac{P'_{A-1} \cdot r \cdot l_{A-1} + Q'_{A-1} \cdot x \cdot l_{A-1}}{U_A}\,;$$

$$U_1 = 115 - \frac{40,27 \cdot 5,1 + 18,15 \cdot 12,3}{115} = 111,27\ \text{kV};$$

$$U_3 = U_A - \frac{P'_{A-3} \cdot r \cdot l_{A-3} + Q'_{A-3} \cdot x \cdot l_{A-3}}{U_A}\,;$$

$$U_3 = 115 - \frac{31,57 \cdot 5,1 + 17,95 \cdot 12,3}{115} = 111,71\ \text{kV}$$

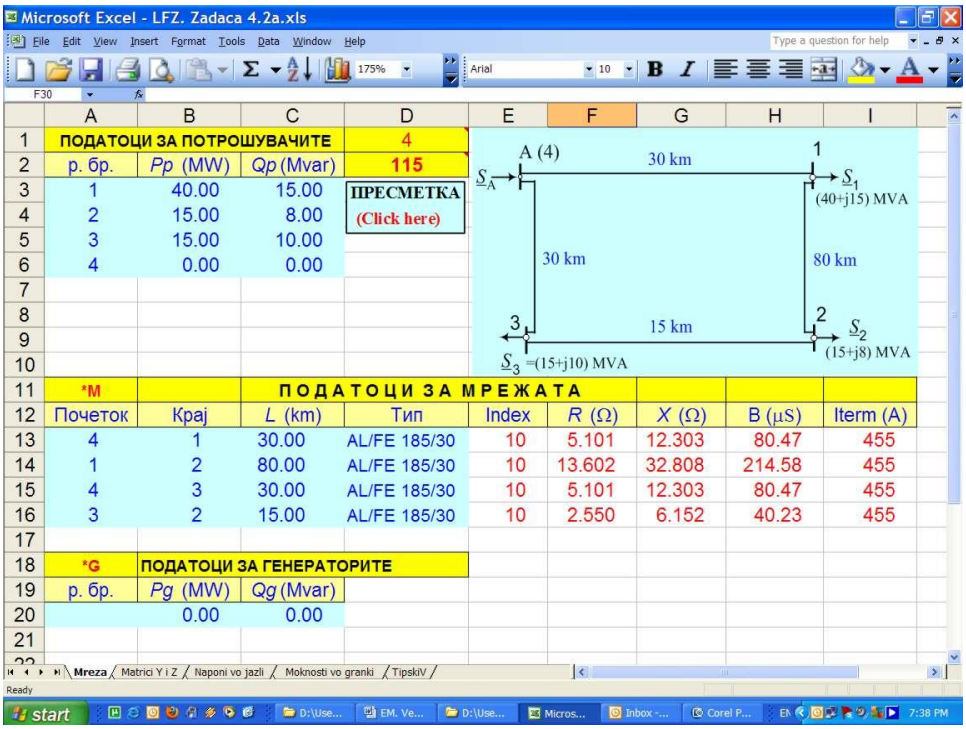
$$U_2 = U_3 - \frac{P'_{3-2} \cdot r \cdot l_{2-3} + Q'_{3-2} \cdot x \cdot l_{2-3}}{U_3}\,;$$

$$U_2 = 111,71 - \frac{15,56 \cdot 2,55 + 6,71 \cdot 6,15}{111,71} = 110,98\ \text{kV}.$$

■ ■ ■

Задача 3. Со помош на компјутерската програма „LFZ.xls“ да се пресметаат напонските прилики и тековите на моќности во мрежата од претходната задача за истиот режим режим на работа.

Решение



Слика 3.1. Приказ на првиот работен лист М.

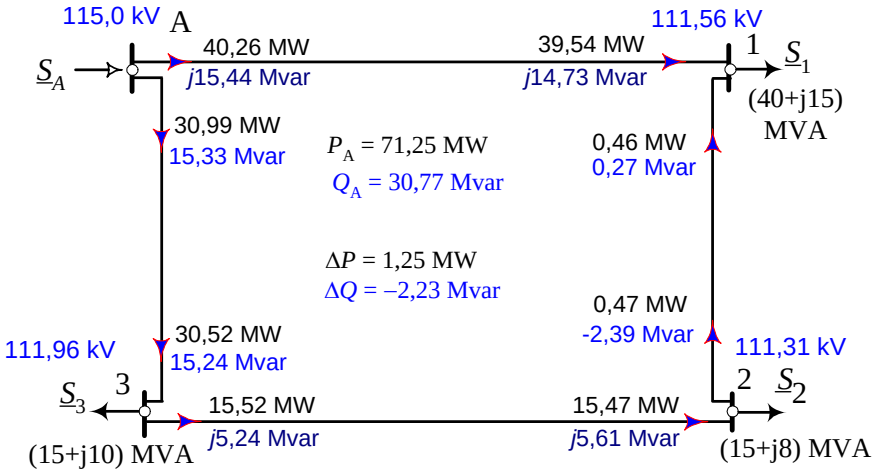
Податоците за мрежата и моќностите на потрошувачите ќе ги внесеме во првиот работен лист од компјутерската програма „LFZ.xls“ (слика 3.2). Потоа со едноставно кликнување на иконата „ПРЕСМЕТКА“ програмата го решава зададениот режим на работа а резултатите од пресметките ги печати во работните листови „Naponi vo jazli“ (за пресметаните напони) и „Moknosti vo gramki“ (за пресметаните моќности). Резултатите од пресметките, добиени во претходната задача (приближни вредности) и добиени со програмата „LFZ.xls“, се прикажани во табелите 3.1 и 3.2, додека на сликата 3.2 се прикажани точните вредности на напоните и моќностите за случајот кога во пресметките, вршени со комјутерската програма „LFZ.xls“ се земени предвид и реактивните моќности генерирани од капацитивноста на водовите.

Табела 3.1. Приближни и точни вредности на напоните во мрежата

Собирница	Приближна вредност (kV)	Точна вредност (kV)
1	111,27	111,33
2	110,98	111,00
3	111,71	111,72
4	115,00	115,00

Табела 3.2. Приближни и точни вредности (MVA) на моќностите во мрежата

#	Гранка	Приближни вредности (MVA)		Точни вредности (kV)	
		почеток	*крај*	*почеток*	*крај*
1	4 – 1	40,27+*j*18.15	39,50+*j*16,30	40.295+*j*15.444	39.542+*j*16.317
2	2 – 1	0,50-*j*1,30	0,50-*j*1,30	0.458+*j*0.268	0.460-*j*1.312
3	4 – 3	31,07+*j*17,95	30,56+*j*16,71	31.015+*j*15.330	30.519+*j*16.830
4	3 – 2	15,56+*j*6,71	15,50+*j*6,70	15.519+*j*5.239	15.460+*j*6.688



Слика 3.2. Текови на моќности мрежа пресметани со уважување на капацитивноста на водовите – точни вредности.

Од пресметаната распределба на моќностите во гранките од мрежата може да се заклучи дека водот „1-2“ е практично неоптоварен така што дури и кога тој не би постоел ништо во поглед на напоните, струите и загубите на моќност и енергија во мрежата значитечно не би се променило. Сепак неговото постоење е оправдано во смисла на постигнување сигурност во електроснабдувањето на потрошувачлите во мрежата, како што ќе може да се види во наредниот пример.

■ ■ ■

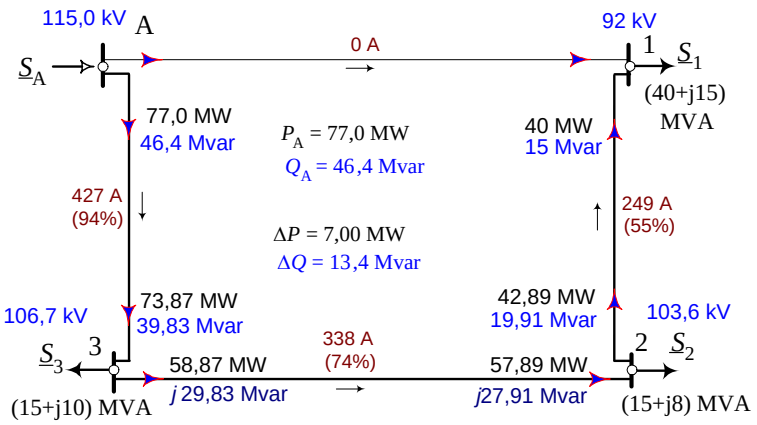
Задача 4. Со помош на компјутерската програма „LFZ.xls“ да се утврди дали е мрежата од задачата 2. го задоволува критериумот *N*-1 за случаите со единечни испади на нејзините елементи.

Решение

Според „Мрежните правила на нашиот електропреносен систем-оператор“ (МЕПСО) виосоконапонската преносна мрежа треба секогаш да го задоволува т.н. „критериум за сигурност *N*-1“. Според овој критериум за случај на испад на било кој елемент од мрежата (вод, генератор, трансформатор) во било кој момент време режимот на работа на системот ќе мора да ги задоволи следните ограничувања:

1) напоните во сите јазли од мрежата да бидат во интервалот $U_n \pm 10\%$ (во случајов $99 \leq U \leq 121$ kV);
2) струјните оптоварувањата на сите елементи од мрежата да не ја надминуваат трајно дозволената (термичка) струја.

Од анализите вршени во претходната задача за т.н. случај „*N*-0“ т.е. случај без испаднати елементи на системот, гледаме дека најтежок дефект во мрежата ќе се има ако дојде до испад (поради дефект или некоја друга причина) на најоптоварен вод „A–1“. За овој случај ќе направиме пресмстка на тековите на моќности во системот со помош на програмата „LFZ.xls“ и притоа ќе ги добиеме следните резултати, прикажани на сликата.



Слика 4.1. Текови на моќности, струи и напонски прилики во мрежата за случај на испаднат вод „А – 1“

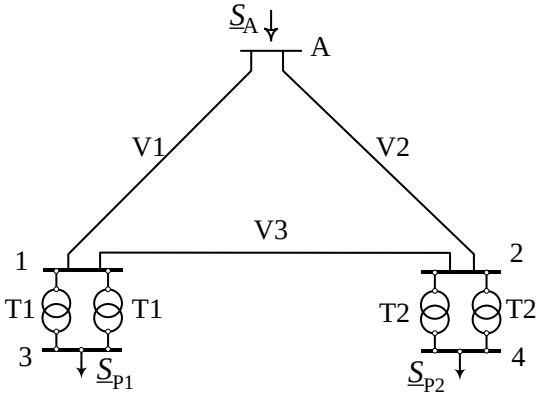
Гледаме дека критериумот за сигурност „*N*-1“ за случајот на испад на делницата „А-1“ од мрежата не е исполнет поради тоа што напонот во јазелот бр. 1 е под долната граница (U_1 = 92 kV < 99 kV). иако во поглед на струјните оптоварувања тој е насекаде исполнет.

Слична е и состојбата со напоните и за случајот на испад на делницата „А-3“. Во тој случај се добиваат следните напонски прилики: U_1 = 107,5 kV; U_2 = 97,3 kV; U_3 = 96,3 kV и U_A = 115 kV, додека струјните оптоварувања се и понатаму во прифатливите граници.

За сите други случаи со единечен испад режимските параметри се во дозволените граници. Сепак, може да се констатира дека прикажаната мрежа не го задоволува сигурностниот критериум *N*-1.

■ ■ ■

Задача 5. На сликата 5.1 е прикажан 110 kV систем. Системот се напојува од собирницата А, чиј што напон се држи на константна вредност U_A =115 kV. Потрошувачите $\underline{S}_{P1}$ = (30+*j*15) MVA и $\underline{S}_{P2}$ =(20+*j*5) MVA се напојуваат од СН собирници на трансформаторските станици TS1 и TS2 во кои се инсталирани трансформатори со моќности 2×25 MVA и 2×16 MVA респективно. За дадениот режим на работа да се определи распределбата на моќности и напони во системот.



Слика 5.1. 110 kV систем

Податоци за елементите од системот:

V1: l_1 = 50 km; $\underline{z}_1$ =(0,27+j0,423) Ω/km; b_1=2,69 μS/km

V2: l_2 = 40 km; $\underline{z}_2$ =(0,21+j0,416) Ω/km; b_2=2,74 μS/km;

V3: l_3 = 25 km; $\underline{z}_3$ =(0,45+j0,440) Ω/km; b_3=2,58 μS/km.

T1: 110/10,5 kV; 25 MVA; $u_{k\%}$ =10,5%; ΔP_{Cun} =120 kW; ΔP_{Fe} = 36 kW; i_0 = 0,8%;

T2: 110/10,5 kV; 16 MVA; $u_{k\%}$ =10,5%; ΔP_{Cun} = 85 kW; ΔP_{Fe} = 26 kW; i_0 = 0,85%

Решение

Пред да започнеме со решавањето на мрежата, најнапред, потрошувачите $\underline{S}_{\text{P1}}$ и $\underline{S}_{\text{P2}}$, заедно со соодветните загуби на моќност $\Delta\underline{S}_{TS1}$ и $\Delta\underline{S}_{TS2}$ во групите трансформатори 2×T1 и 2×T2, ќе ги претставиме со соодветни "еквивалентни" потрошувачи $\underline{S}'_{P1}$ и $\underline{S}'_{P2}$:

$$\underline{S}'_{\text{P1}} = \underline{S}_{\text{P1}} + \Delta\underline{S}_{TS1} = (30 + j15) + (0{,}18 + j2{,}76) = (30{,}18 + j17{,}76)\,\text{MVA};$$

$$\underline{S}'_{\text{P2}} = \underline{S}_{\text{P2}} + \Delta\underline{S}_{TS2} = (20 + j5) + (0{,}12 + j1{,}67) = (20{,}12 + j6{,}67)\ \text{MVA}.$$

Притоа загубите $\Delta\underline{S}_{TS1}$ и $\Delta\underline{S}_{TS2}$ во групите трансформатори 2×T1 и 2×T2 се пресметани на вече познатиот начин како што е тоа направено во задачата 2.35.

Погонскиот капацитет на водовите ќе го уважиме приближно, на тој начин што ќе сметаме (согласно со π–еквивалентната шема на водовите) дека во обата краја од секој вод се инјектира реактивна моќност која приближно изнесува:

$$Q'_C \approx Q''_C \approx \frac{1}{2}Q_C \approx \frac{1}{2}b \cdot l \cdot U_{\text{n}}^2..$$

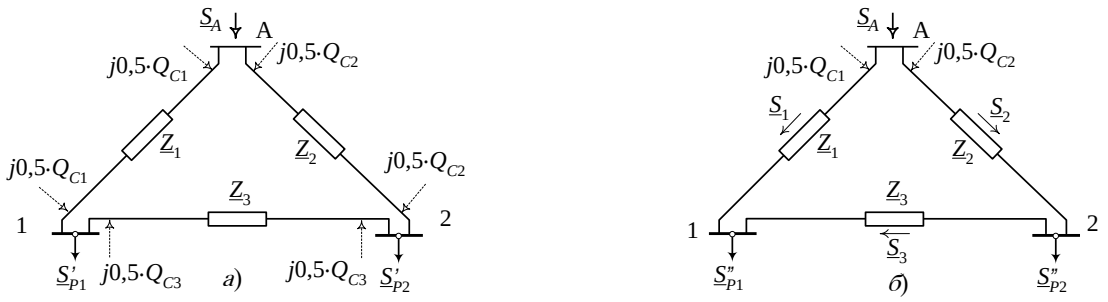
Со оглед на горе реченото, за поедините водови ќе имаме:

$$½ \cdot Q_{C1} = 0{,}5 \cdot 2{,}69 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 110^2 = 0{,}814\ \text{Mvar},$$

$$½ \cdot Q_{C2} = 0{,}5 \cdot 2{,}74 \cdot 10^{-6} \cdot 40 \cdot 110^2 = 0{,}663\ \text{Mvar},$$

$$½ \cdot Q_{C3} = 0{,}5 \cdot 2{,}58 \cdot 10^{-6} \cdot 25 \cdot 110^2 = 0{,}390\ \text{Mvar}.$$

На таков начин ги добиваме следните две слики:



Слика 5.2. Еквиваленти на мрежата од слика 5.1

Во согласност со сликата 5.2, моќностите $\underline{S}''_{\text{P1}}$ и $\underline{S}''_{\text{P2}}$ изнесуваат:

$$\underline{S}''_{\text{P1}} = \underline{S}'_{\text{P1}} - j(Q_{C1} + Q_{C3})/2 = (30{,}18 + j15{,}55)\ \text{MVA};$$

$$\underline{S}''_{\text{P2}} = \underline{S}'_{\text{P2}} - j(Q_{C2} + Q_{C3})/2 = (20{,}12 + j5{,}61)\ \text{MVA}.$$

Понатаму, со помош на познатите формули ја одредуваме приближната распределба на моќности во редните гранки од мрежата:

$$\underline{S}_1 = \underline{S}''_{P1} \cdot \frac{(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3)^*}{(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3)^*} + \underline{S}''_{P2} \cdot \frac{(\underline{Z}_2)^*}{(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3)^*};$$

$$\underline{S}_1 = (24,4 + j10,2)\ \text{MVA};$$

$$\underline{S}_2 = \underline{S}''_{P1} + \underline{S}''_{P2} - \underline{S}_1 = (25,9 + j11,97)\ \text{MVA},$$

$$\underline{S}_3 = \underline{S}_2 - \underline{S}''_{P2} = (5,78 + j6,36)\ \text{MVA}.$$

Значи, јазелот 1 претставува разделна точка истовремено како за активни така и за реактивни моќности. Сега можеме да ги уважиме и загубите на моќност во поедините водови:

$$\underline{\Delta S}_1 = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_n^2} \cdot \underline{Z}_1 = \frac{24,4^2 + 10,2^2}{110^2} \cdot (13,5 + j21,15);$$

$$\underline{\Delta S}_1 = (0,78 + j1,22)\ \text{MVA},$$

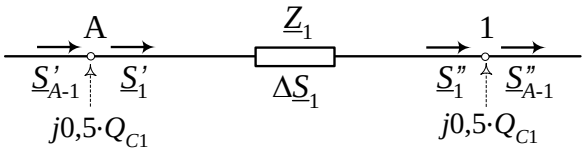
$$\underline{\Delta S}_2 = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_n^2} \cdot \underline{Z}_2 = \frac{25,9^2 + 11,97^2}{110^2} \cdot (8,4 + j16,56);$$

$$\underline{\Delta S}_2 = (0,56 + j1,12)\ \text{MVA},$$

$$\underline{\Delta S}_3 = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_n^2} \cdot \underline{Z}_3 = \frac{5,78^2 + 6,36^2}{110^2} \cdot (11,25 + j11);$$

$$\underline{\Delta S}_3 = (0,069 + j0,067)\ \text{MVA}.$$

Тргнувајќи од разделната точка према напојниот јазел, ја одредуваме точната распределба на моќности во мрежата, најнапред во водот V1, а потоа и во останатите водови. Притоа ознаките за моќностите на почетокот и крајот од водовите се во согласност со сликата 5.3:



Слика 5.3. Пресметка на распределбата на моќности во водот V1

$$\underline{S}''_1 = \underline{S}_1 = (24,4 + j10,2)\ \text{MVA};$$

$$\underline{S}'_1 = \underline{S}''_1 + \underline{\Delta S}_1 = (25,18 + j11,42)\ \text{MVA};$$

$$\underline{S}''_{A-1} = \underline{S}''_1 + j0,5 \cdot Q_{C1} = (24,40 + j11,14)\ \text{MVA};$$

$$\underline{S}'_{A-1} = \underline{S}'_1 - j0,5 \cdot Q_{C1} = (25,18 + j10,606)\ \text{MVA}.$$

Слично се добиваат и моќностите во останатите водови V3 и V2:

$$\underline{S}''_3 = \underline{S}_3 = (5,78 + j6,36)\ \text{MVA};$$

$$\underline{S}'_3 = \underline{S}''_3 + \underline{\Delta S}_3 = (5,85 + j6,43)\ \text{MVA};$$

$$\underline{S}''_{2-3} = \underline{S}''_3 + j0,5 \cdot Q_{C3} = (5,78 + j6,75)\ \text{MVA};$$

$$\underline{S}'_{2-3} = \underline{S}'_3 - j0,5 \cdot Q_{C3} = (5,85 + j6,04)\ \text{MVA};$$

$$\underline{S}''_2 = \underline{S}'_3 + \underline{S}''_{P2} = (25,97 + j12,04)\ \text{MVA};$$

$\underline{S}_2' = \underline{S}_2'' + \Delta\underline{S}_2 = (26,53 + j13,16)\,\text{MVA};$

$\underline{S}_{A-2}'' = \underline{S}_2'' + j0,5 \cdot Q_{C2} = (25,97 + j12,703)\ \text{MVA};$

$\underline{S}_{A-2}' = \underline{S}_2' - j0,5 \cdot Q_{C2} = (26,53 + j12,497)\ \text{MVA}.$

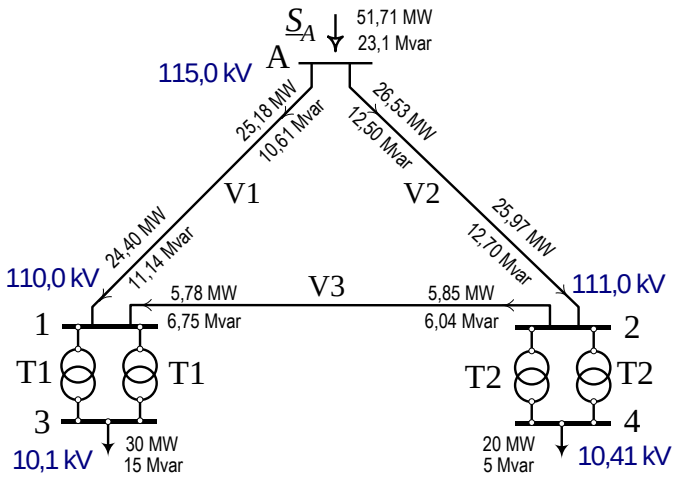
Моќноста $\underline{S}_A$ што се вложува во системот ќе биде:

$\underline{S}_A = \underline{S}_{A-1}' + \underline{S}_{A-2}' = (51,71 + j23,1)\ \text{MVA}.$

Вкупните загуби на моќност $\underline{\Delta S}$ во системот ќе бидат:

$\Delta\underline{S} = \underline{S}_A - \underline{S}_{P1} - \underline{S}_{P2} = (1,71 + j3,1)\ \text{MVA}.$

На сликата 5.4 е прикажана вкупната распределба на моќностите во мрежата:



Слика 5.4. Распределба на моќностите во мрежата

После ова, можеме да пристапиме кон пресметувањето на напоните во јазлите од мрежата:

Падот на напон во водот V1 ќе изнесува:

$$\Delta\underline{U}_1 = \frac{P_1' \cdot R_1 + Q_1' \cdot X_1}{U_A} + j\,\frac{P_1' \cdot X_1 - Q_1' \cdot R_1}{U_A} = (5,06 + j3,44)\ \text{kV},$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_A - \Delta\underline{U}_1 = (109,94 - j3,44)\,\text{kV} = 110 \cdot e^{-j1,79°}\,\text{kV}.$$

Падот на напон во водот V2 ќе изнесува:

$$\Delta\underline{U}_2 = \frac{P_2' \cdot R_2 + Q_2' \cdot X_2}{U_A} + j\,\frac{P_2' \cdot X_2 - Q_2' \cdot R_2}{U_A} = (3,85 + j2,88)\ \text{kV},$$

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_A - \Delta\underline{U}_2 = (111,16 - j2,88)\ \text{kV} = 111 \cdot e^{-j1,49°}\,\text{kV}.$$

За определувањето на напоните $\underline{U}_{1SN}$ и $\underline{U}_{2SN}$ при потрошувачите, потребно е да се одредат и падовите на напон во трансформаторите T1 и T2. Нив ги одредуваме со помош на соодветните *I*–еквивалентни шеми на трансформаторите. Параметрите на подолжните гранки на трансформаторите ќе бидат:

$$R_{T1} = \Delta P_{Cun} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2} = 0,12 \cdot \frac{110^2}{25^2} = 2,26\ \Omega;$$

$$X_{T1} = \frac{u_k\,\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{110^2}{25} = 56,03\ \Omega,$$

$\underline{Z}_{T1} = (R_{T1} + jX_{T1}) = (2,56 + j56,03)\ \Omega.$

Слично се добива и за другиот трансформатор:

$R_{T2} = 4,43\ \Omega\ ;\quad X_{T2} = 87,55\ \Omega;\quad \underline{Z}_{T2} = (4,43 + j87,55)\ \Omega.$

Понатаму имаме:

$$\Delta\underline{U}_{T1} = \frac{1}{2}\cdot\frac{P_{P1}\cdot R_{T1} + Q_{P1}\cdot X_{T1}}{U_1} + j\cdot\frac{1}{2}\cdot\frac{P_{P1}\cdot X_{T1} - Q_{P1}\cdot R_{T1}}{U_1};$$

$$\Delta\underline{U}_{T1} = (4,87 + j8,23)\ \text{kV}.$$

Напонот во јазелот „3“, сведен на високонапонска страна, ќе биде:

$$\underline{U}_3' = \underline{U}_1 - \Delta\underline{U}_{T1} = (105,07 - j11,67)\ \text{kV} = 105,71\cdot e^{-j6,34°}\text{kV}.$$

Неговата вистинска вредност ќе биде:

$$\underline{U}_3 = \underline{U}_3' / k_{T1} = 105,71\cdot(10,5/110) = 10,1\cdot e^{-j6,34°}\text{kV}.$$

Слично ќе имаме и во јазелот "2SN":

$$\Delta\underline{U}_{T2} = \frac{1}{2}\cdot\frac{P_{P2}\cdot R_{T2} + Q_{P2}\cdot X_{T2}}{U_2} + j\frac{1}{2}\cdot\frac{P_{P2}\cdot X_{T2} - Q_{P2}\cdot R_{T2}}{U_2};$$

$$\Delta\underline{U}_{T2} = (2,61 + j7,81)\ \text{kV},$$

$$\underline{U}_4' = \underline{U}_2 - \Delta\underline{U}_{T2} = (108,54 - j10,69)\,\text{kV} = 109,1\cdot e^{j-5,62°}\ \text{kV}.$$

$$\underline{U}_4 = \underline{U}_4' / k_{T2} = 109,1\cdot(10,5/110) = 10,41\cdot e^{-j5,62°}\text{kV}.$$

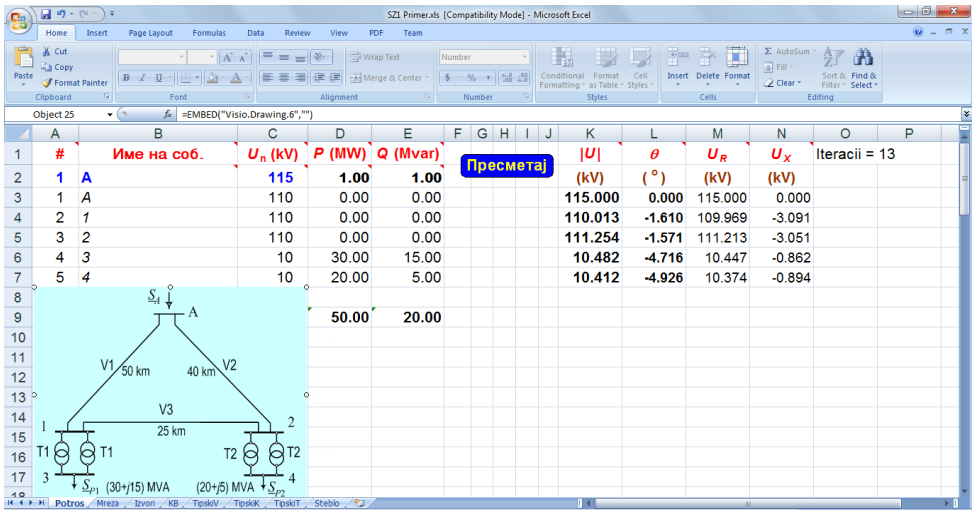
■ ■ ■

Задача 6. Системот анализиран прикажан во претходната задача 5 да се реши со примена на компјутерската програма „SZ.xls“.

Решение

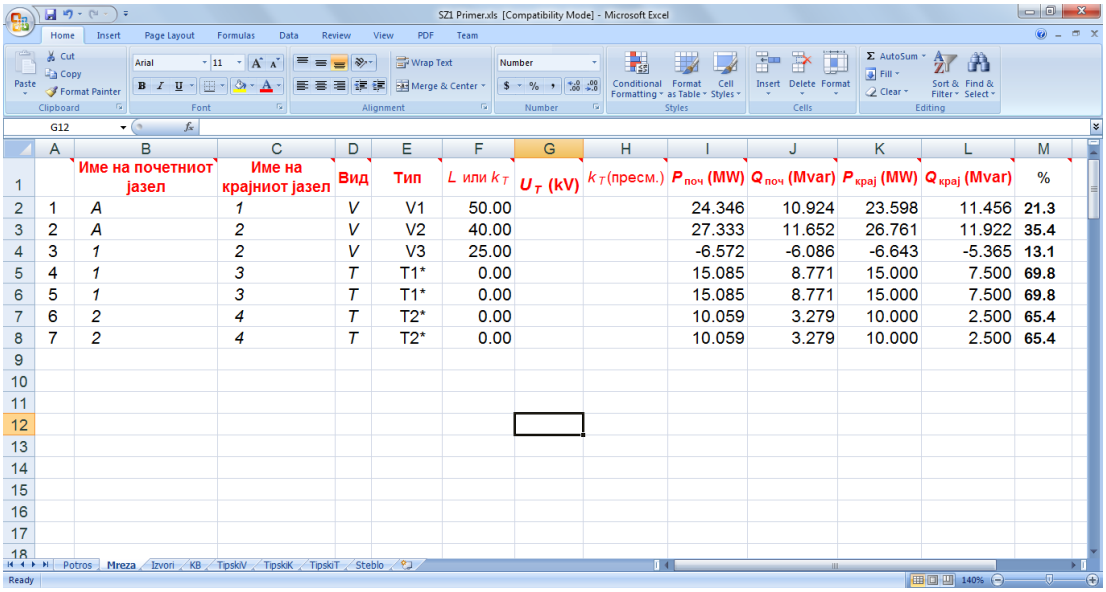
Програмата „SZ.xls“ овозможува одредување на распределба на моќности на мрежи со било какви конфигурации, меѓутоа истата е специјализирана за пресметка на преносни мрежи. Таа е организирана во форма на Microsoft Excel датотека. Во ваквата датотека потребно е да се внесат податоците за мрежата која што сакаме да ја решиме. Влезите податоци се организирани во неколку работни листови.

Во работниот лист „Potros” се внесуваат податоци за потрошувачите т.е. јазлите (собирници). Во колоната A се внесени редните броеви на јазлите, колоната B ги содржи имињата на јазлите, колоната C номиналниот напон на секој јазол, додека во колоните D и E се внесуваат активната и реактивната моќност на потрошувачите во секој јазол. Како прв јазол во овој работен лист се внесува балансниот (напојниот) јазол и за него се задава точната вредност на напонот во колона C, додека во колоните D и E кај овој јазол се внесуваат коефициенти со кои се множат сите потрошувачи и овозможуваат на лесен начин да се менува оптоварувањето на мрежата. По решавањето на мрежата во овој работен лист се добиваат напоните на јазлите (по модул, агол, реален и имагинарен дел) и бројот на потребни итерации за решавање на мрежата.



Слика 6.1. Изглед на пополнетиот работен лист „Potros“ од програмата „SZ. Primer 5.1.xls“

Во работниот лист „Mreza“ се внесува топологијата на мрежата т.е. се внесуваат сите гранки од мрежата. Во колоните B и C се внесуваат имињата на почетниот и крајниот јазол на секоја гранка, соодветно. Во колоната D се внесува видот на гранката т.е. V за вод, и T за трансформатор. Во колоната E се внесува типот на гранката со кој се дефинирани параметрите на гранката. Типовите на гранки се внесени во работните листови „TipskiV”, „TipskiT“ и „TipskiK“, за водови, трансформатори и кабли соодветно. Во колоната F се внесува должината во km за водовите, додека за трансформаторите се внесува положбата на регулационата преклопка *a* %. Во колоната G може да се внесе пожелуваната (оптималната) вредност на напонот на секундарот од трансформаторот и во овој случај програмот самиот го пресметува преносниот однос на трансформаторот за кој ќе се добие вредност на напонот на секундарот најблиска до оптималната. По решавањето на мрежата во овој работен лист се добиваат тековите на активни и реактивни моќности на почетокот и крајот на секоја гранка, и струјното оптоварување на секоја гранка во %.



Слика 6.2. Изглед на пополнетиот работен лист „Mreza“ од програмата „SZ. Primer 6.xls“

Во работниот лист “Izvori“, можат да се внесат податоци за генераторите во мрежата. Во колоната B се внесуваат имињата на јазлите во кои имаме генератори. Притоа ако за генераторите е позната нивната произведена активна и реактивна моќност (станува збор за PQ-генератор и PQ-јазол) тие се внесуваат во колоните C и D, Ако генераторот ја менува реактивната моќност за да го одржува напонот на јазолот каде е приклучен на некоја однапред зададена вредност (станува збор за PU-генератор и PU-јазол) се внесуваат активната моќност во колона C и напонот во колона E, додека во колона F програмот ја запишува пресметаната реактивна моќност на генераторот. Во овој работен лист по завршувањето на пресметките се впишуваат и активната и реактивната моќност во балансниот јазол и вкупните загуби на активна и реактивна моќност во целата мрежа, кои се резултат од пресметките.

Програмата за решавање на мрежата го користи методот на јазлови потенцијали. Притоа не се извршуваат никакви упростувања и занемарувања. Сега можеме да извршиме споредба на резултатите добиени со програмот кои ги сметаме дека се точни и резултатите од решавањето во задача 5 кои се приближни.

Табела 6.1. Приближни и точни вредности на напоните во мрежата

Собирница	Приближна вредност (kV)	Точна вредност (kV)
A	115,000	115,000
1	110,000	109,996
2	111,000	111,244
3	10,100	10,143
4	10,410	10,411

Табела 6.2. Приближни и точни вредности (MVA) на моќностите во мрежата

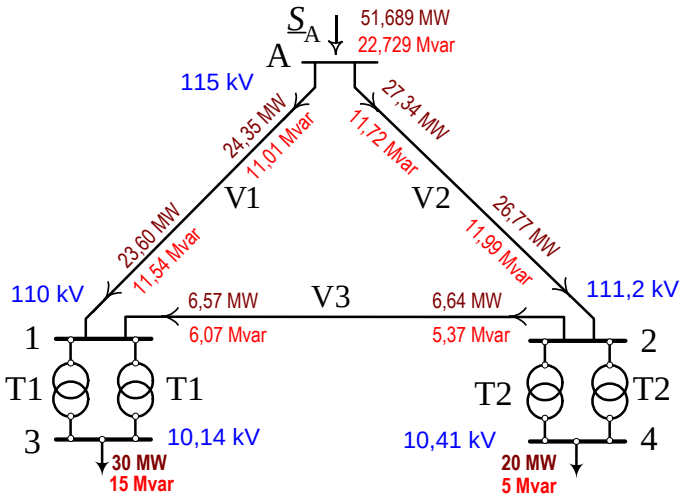
#	Гранка	Приближни вредности (MVA)		Точни вредности (kV)	
		почеток	*крај*	*почеток*	*крај*
1	A – 1	25,18+*j*10,61	24,4+*j*11,14	24,35+*j*11,01	23,60+*j*11,54
2	A – 2	26,53+*j*12,50	25,97+*j*12,70	27,34+*j*11,72	26,77+*j*11,99
3	2 – 1	5,85+*j*6,04	5,78+*j*6,75	6,64+*j*5,37	6,57+*j*6,07

Од резултатите прикажани во табелите 6.1 и 6.2 можеме да заклучиме дека грешката што се прави при решавање на мрежата со приближниот метод на погоре изложениот начин е многу мала.

За загубите на моќност во системот со помош на компјутерската програма се добиени следните резултати:

$\Delta \underline{S} = (1,689 + j2,729)$ MVA.

На сликата 6.3 се прикажани резултатите за пресметаните напони и моќностите во анализираната мрежа.



Слика 6.3. Решение на ЕЕС од задачата 6.1

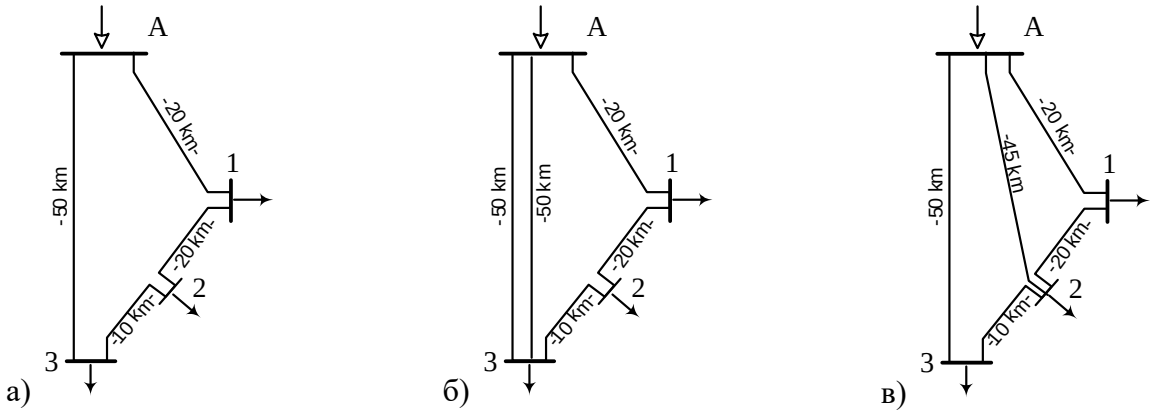
■ ■ ■

Задача 7. На сликата 7.1 е прикажана 110 kV надземна мрежа, изведена со спроводници од типот Al/^ 240/40 mm^2. Сите водови имаат исти подолжни параметри $\underline{z} = (r+jx)$= (0,13+j0,40) Ω/km. Должините на водовите се прикажани на самата слика, додека потрошувачите од мрежата во режимот на максималното оптоварување ги имаат следните моќности: $\underline{S}_1$ = (40+j20) MVA; $\underline{S}_2$ = (30+j15) MVA; $\underline{S}_3$ = (70+j35) MVA Да се пресметааат загубите на активна моќност во мрежата за следните три случаи:

а) за постојната состојба, според шемата од сликата 7.1а;

б) доколку се изгради вод помеѓу собирниците А и 3 (слика 7.1б) со должина l = 50 km и со подолжни параметри како и останатите водови;

в) доколку се изгради вод помеѓу собирниците А и 2 (слика 7.1в) со должина l = 45 km и со подолжни параметри како и останатите водови.

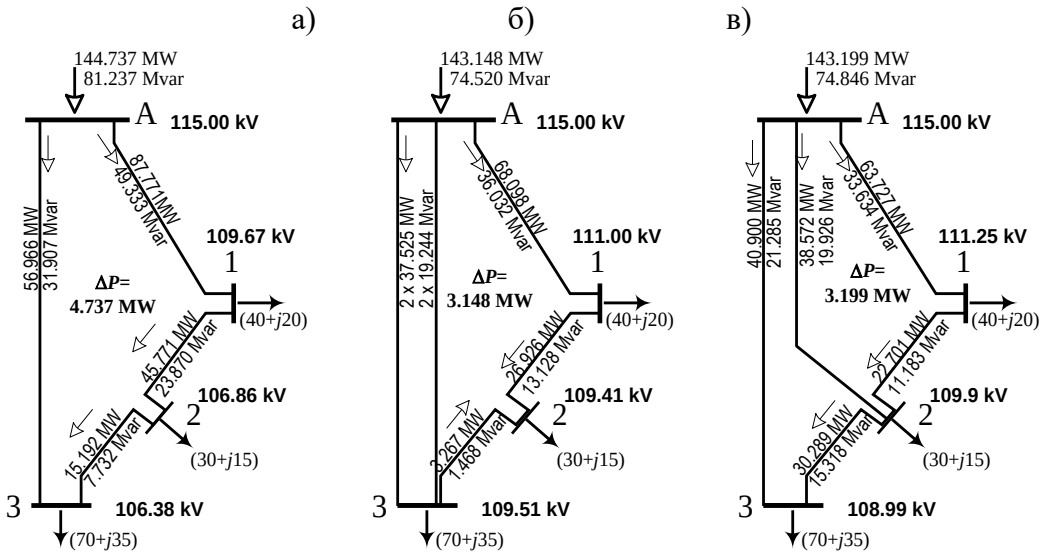


Слика 7.1. 110 kV хомогена надземна јамкаста мрежа пред и после појавањето на новоизградениот вод

Решение:

Загубите на моќност ΔP_M ќе ги добиеме со решавање на тековите на моќности во мрежата во максималниот режим. Бидејќи е мрежата хомогена и престенеста, со една контура во случајот а), односно сложено–затворена со две контури во случаите б) и в), решавањето на тековите на моќности во неа можеме да го вршиме, на пример, со методот на контурни

струи, применувајќи го истовремено и методот на раздвојување. Но во случајов решавањето ќе го извршиме со примена на компјутерската програма „LFZ.xls“.



Слика 7.2. Текови на моќности на мрежата за секоја на мрежата конфигурација

Како резултат од пресметките на секоја од мрежите од сликата 7.1, се добива следната распределба, прикажана на слика 7.2. Во пресметките е претпоставено дека напонот во напојната точка изнесува U_A =115 kV. Резултатите од пресметките за моќностите и напоните се прикажани и во табелата 7.1.

Табела 7.1. Моќности (MVA) и напони (kV) во мрежата за разни конфигурации

а) Постојна состојба на мрежата според сликата 7.1а. (ΔP_a=4,737 MW)							
Гранка	*P'* (MW)	*Q'* (Mvar)	*P''* (MW)	*Q''* (Mvar)	*S* (%)	*U*	kV
A – 1	87.771	49.330	85.771	43.870	**78.6**	U_A	115.000
1 – 2	45.771	23.870	45.192	22.732	**42.4**	U_1	109.672
2 – 3	15.192	7.732	15.158	7.942	**14.4**	U_2	106.857
A – 3	56.966	31.907	54.842	27.058	**51.5**	U_3	106.378
б) Состојба со нов вод A–3, според сликата 7.1.б. ($\Delta P_б$=3,148 MW)							
A – 1	68.098	36.032	66.926	33.128	**60.2**	U_A	115.000
1 – 2	26.926	13.128	26.734	13.208	**24.4**	U_1	110.998
2 – 3	-3.266	-1.793	-3.267	-1.468	**3.0**	U_2	109.408
A – 3	37.525	19.244	36.634	18.234	**33.4**	U_3	109.507
A – 3	37.525	19.244	36.634	18.234	**33.4**		
в) Состојба со нов вод A–2, според сликата 7.1в. ($\Delta P_в$=3,199 MW)							
A – 1	63.727	33.634	62.701	31.183	**56.3**	U_A	115.000
1 – 2	22.701	11.183	22.565	11.436	**20.6**	U_1	111.254
2 – 3	30.289	15.318	30.164	15.264	**27.8**	U_2	109.904
A – 3	40.900	21.285	39.836	19.736	**36.5**	U_3	108.986
A – 2	38.572	19.926	37.724	18.881	**34.4**		

■ ■ ■

VIII. ДИМЕНЗИОНИРАЊЕ НА РАЗГРАНЕТИ МРЕЖИ

Задача 1. Прикажаната 10 kV надземна мрежа да се димензионира:

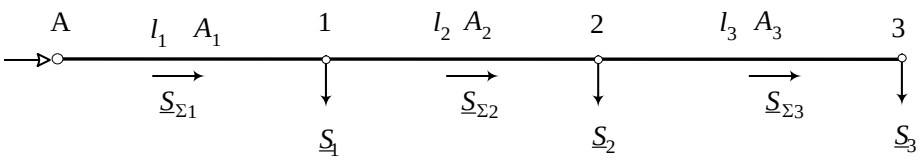
а) според критериумот на константен пресек и

б) според критериумот на константна густина на струјата.

Дозволената загуба на напон во мрежата изнесува ΔU_{doz} = 5%. Спроводниците на водовите се `Al/^` јажиња со средногеометриско растојание D_m = 1,25 m.

Останати податоци: l_1 = 2 km; l_2 = 2 km; l_3 = 1,5 km;

$\underline{S}_1 = (800+j600)$ kVA; $\underline{S}_2 = (450+j220)$ kVA; $\underline{S}_3 = (320 + j240)$ kVA



Слика 1.1. Димензионирање на 10 kV мрежа според критериумот *J* = const.

Решение:

Најнапред ќе ги пресметаме моќностите во гранките од мрежата:

$$\underline{S}_{\Sigma 1} = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3 = (1,57 + j1,06) = 1,894 \cdot e^{j34,03^\circ} \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{\Sigma 2} = \underline{S}_2 + \underline{S}_3 = (0,77 + j0,46) = 0,897 \cdot e^{j30,85^\circ} \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{\Sigma 3} = \underline{S}_3 = (0,45 + j0,24) = 0,51 \cdot e^{j28,07^\circ} \text{ MVA}.$$

Дозволената загуба на напон, изразена во kV, изнесува:

$$\Delta U_{doz} = \frac{\Delta U_{doz}\%}{100} \cdot U_{\text{n}} = \frac{5}{100} \cdot 10 = 0,5 \text{ kV}.$$

За просечната реактанција на 10 kV водови ќе усвоиме вредност x = 0,36 Ω/km. Во тој случај ќе имаме:

$$\Delta U_r \approx \frac{x}{U_{\text{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{3} Q_{\Sigma i} \cdot l_i = \frac{0,36}{10} \cdot (1,06 \cdot 2 + 0,46 \cdot 2 + 0,24 \cdot 1,5) = 0,1224 \text{ kV};$$

Дозволената вредност на компонентата $\Delta U_{a.doz}$ на загубата на напон ќе биде:

$$\Delta U_{a.doz} = \Delta U_{doz} - \Delta U_r = 0,5 - 0,1224 = 0,3776 \text{ kV}.$$

а) Димензионирање според критериумот на константен пресек

$$\sum_{i=1}^{3} P_{\Sigma i} \cdot l_i = 1,57 \cdot 2 + 0,77 \cdot 2 + 0,45 \cdot 1,5 = 5,355 \text{ MW×km}$$

$$A \geq \frac{1000 \cdot \sum_{i=1}^{3} P_{\Sigma i} \cdot l_i}{\kappa \cdot U_{\text{n}} \cdot \Delta U_{a.doz}} = \frac{1000 \cdot 5,355}{32 \cdot 10 \cdot 0,3776} = 44,3 \text{ mm}^2$$

Усвојуваме:

Al/^ 50/8 mm^2 ; A_1 = 48,3 mm^2; $\underline{z}_1$ = (0,647 + j0,364) Ω/km.

Потоа вршиме проверка на загубата на напон во мрежата:

$$\Delta U = \frac{r}{U_n}\cdot\sum_{i=1}^{3} P_{\Sigma i}\cdot l_i + \frac{x}{U_n}\cdot\sum_{i=1}^{3} Q_{\Sigma i}\cdot l_i = \frac{0,647}{10}\cdot 5,355 + \frac{0,364}{10}\cdot 3,4$$

$$\Delta U = 0,347 + 0,124 = 0,471 \text{ kV}; \quad \Delta U < \Delta U_{doz}.$$

б) Димензионирање според критериумот на константна густина

Во овој случај најнапред ја пресметуваме сумата:

$$\sum_{i=1}^{3} l_i\cdot\cos\varphi_{\Sigma i} = 2\cdot 0,829 + 2\cdot 0,858 + 1,5\cdot 0,882 = 4,698 \text{ km}.$$

Потребната густина на струјата J_{const} =J за која ќе биде задоволен условот $\Delta U = \Delta U_{doz}$ изнесува:

$$J_{const} = \frac{\kappa\cdot\Delta U_{a.doz}}{\sqrt{3}\cdot\sum_{i=1}^{3} l_i\cdot\cos\varphi_{\Sigma i}} = \frac{32\cdot 0,3776}{\sqrt{3}\cdot 4,698} = 1,485\,\frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Пресеците на поедините водови ќе бидат:

$A_1 = I_{\Sigma 1}/J_{const} = S_{\Sigma 1}/(\sqrt{3}\cdot U_n\cdot J_{const})$ = 1894/ ($\sqrt{3}$ ·10·1,485) = 73,7 mm^2;

$A_2 = I_{\Sigma 2}/J_{const} = S_{\Sigma 2}/(\sqrt{3}\cdot U_n\cdot J_{const})$ = 897/ ($\sqrt{3}$ ·10·1,485) = 34,9 mm^2;

$A_1 = I_{\Sigma 1}/J_{const} = S_{\Sigma 3}/(\sqrt{3}\cdot U_n\cdot J_{const})$ = 510/ ($\sqrt{3}$ ·10·1,485) = 19,8 mm^2;

За спроводниците од поедините делници ќе ги усвоиме следните стандардни пресеци:

V1: Al/^ 70/12 mm^2 ; A_1 = 69,9 mm^2; $\underline{z}_1$ = (0,447 + j0,352) Ω/km;

V2: Al/^ 35/6 mm^2 ; A_2 = 34,3 mm^2; $\underline{z}_2$ = (0,911 + j0,375) Ω/km;

V3: Al/^ 25/4 mm^2 ; A_3 = 23,8 mm^2; $\underline{z}_3$ = (1,313 + j0,386) Ω/km.

Контролата на загубата на напон во мрежата дава:

$$\Delta U = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-2} + \Delta U_{2-3} = 0,215+0,175+0,103=0,492 \text{ kV}.$$

$$\Delta U = < \Delta U_{doz} = 0,5 \text{ kV}.$$

■ ■ ■

Задача 2. На сликата 2.1 е прикажана 10 kV кабелски извод, кој треба да биде изведен со кабли од типот XHP 48 A, 10 kV со спроводници од алуминиум (κ = 32 S·mm^2/km). Податоците за подолжните параметри r и x како и податоците за трајно дозволените струи I_d на овие кабли, во зависност од нивниот пресек A, се дадени во табелата 2.1. Да се изврши димензионирање на изводот според критериумите на:

а) константен пресек и

б) константна густина на струјата.

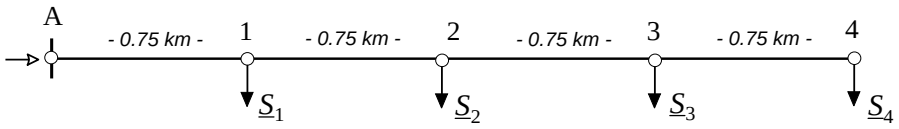
Да се користат само пресеците што се дадени во табелата 2.1. Дозволената загуба на напон изнесува ΔU_{doz} = 3%.

Сите секции од мрежата (изводот) имаат иста должина l = 0,75 km. Сите потрошувачи од мрежата имаат иста моќност:

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_2 = \underline{S}_3 = \underline{S}_4 = \underline{S} = (600 + j250)\,\text{kVA}.$$

Табела 2.1. Податоци за подолжните параметри на предвидените кабелски водови.

A, (mm^2)	**16**	**25**	**35**	**50**	**70**	**95**	**120**	**150**
r, (Ω/km)	2,003	1,282	0,866	0,641	0,443	0,320	0,253	0,206
x, (Ω/km)	0,136	0,131	0,126	0,121	0,116	0,112	0,108	0,105
I_d, (A)	85	130	155	180	225	270	305	340



Слика 2.1. Кабелски извод што треба да се димензионира

Решение:

Распределбата (приближна) на моќности во мрежата ќе биде:

$$\underline{S}_{\Sigma 1} = 4 \cdot \underline{S} = (2,4 + j1,0)\ \text{MVA} = 2,6\angle 22,62°\ \text{MVA};$$

$$I_{\Sigma 1} = S_{\Sigma 1} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{n}}) = 150\ \text{A}.$$

$$\underline{S}_{\Sigma 2} = 3 \cdot \underline{S} = (1,8 + j0,75)\ \text{MVA} = 1,95\angle 22,62°\ \text{MVA};$$

$$I_{\Sigma 2} = S_{\Sigma 2} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{n}}) = 112,5\ \text{A}.$$

$$\underline{S}_{\Sigma 3} = 2 \cdot \underline{S} = (1,2 + j0,5)\ \text{MVA} = 1,3\angle 22,62°\ \text{MVA};$$

$$I_{\Sigma 3} = S_{\Sigma 3} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{n}}) = 75\ \text{A}.$$

$$\underline{S}_{\Sigma 4} = \underline{S} = (0,6 + j0,25)\ \text{MVA} = 0,65\angle 22,62°\ \text{MVA};$$

$$I_{\Sigma 4} = S_{\Sigma 4} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{n}}) = 37,5\ \text{A}.$$

Дозволената загуба на напон во мрежата изнесува $\Delta U_{doz} = (3/100) \cdot U_{\text{n}} = 0,3$ kV. Од табелата 2.1 гледаме дека реактанциите на каблите по единица должина се движат во границите $0,105 \le x \le 0,136$ Ω/km. Со оглед на тоа ќе усвоиме $x = 0,12$ Ω/km. Во тој случај вкупната загуба на напон ΔU_r што се должи на течењето на реактивните моќности во мрежата ќе биде:

$$\Delta U_r = \frac{x}{U_{\text{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} Q_{\Sigma i} \cdot l_i;\ \Delta U_r = \frac{0,12}{10} \cdot (1,0 \cdot 0,75 + 0,75 \cdot 0,75 + 0,5 \cdot 0,75 + 0,25 \cdot 0,75) = 0,0225\ \text{kV}.$$

Дозволената загуба на напон поради течењето на активните моќности тогаш ќе биде:

$$\Delta U_{a,doz} = \Delta U_{doz} - \Delta U_r = 0,3 - 0,0225 = 0,2775 \text{ kV}.$$

а) Димензионирање според критериумот на константен пресек

Потребниот пресек A на поедините делници од мрежата ќе биде:

$$A \geq \frac{\sum_{i=1}^{4} P_{\Sigma i} \cdot l_i}{\sigma \cdot U_n \cdot \Delta U_{a,doz}} = \frac{(2,4+1,8+1,2+0,6) \cdot 0,75 \cdot 10^9}{32 \cdot 10 \cdot 0,2775 \cdot 10^6} = 50,7 \text{ mm}^2.$$

Усвојуваме $A = 50$ mm^2. Подолжните параметри за овој пресек се: $\underline{z} = (r + jx)$ = (0,641+j0,121) Ω/km.

Пресметката на загубата на напон во водот заради проверка на условот $\Delta U < \Delta U_{doz}$ дава:

$$\Delta U = r \cdot \frac{\sum_{i=1}^{4} P_{\Sigma i} \cdot l_i}{U_n} + x \cdot \frac{\sum_{i=1}^{4} Q_{\Sigma i} \cdot l_i}{U_n} = 0,641 \cdot \frac{4,5}{10} + 0,121 \cdot \frac{1,875}{10} = 0,311 \text{ kV}.$$

Бидејќи е $\Delta U > \Delta U_{doz}$, потребна е корекција на пресекот. Го усвојуваме следниот поголем стандарден пресек A = 70 mm^2. За него важи: r=0,443 Ω/km, x=0,116 Ω/km. Новата проверка дава ΔU = 0,221 kV $\leq \Delta U_{doz}$. Значи пресекот на магистралниот вод, добиен според овој критериум, ќе изнесува 70 mm^2.

а) Димензионирање според критериумот наконстантна густина на струјата

Потребната густина на струјата $J_{const} = J$ за која ќе биде задоволен условот $\Delta U = \Delta U_{doz}$ изнесува:

$$J_{\text{const}} = \frac{\kappa \cdot \Delta U_{a.doz}}{\sqrt{3} \cdot \sum_{i=1}^{4} l_i \cdot \cos\varphi_{\Sigma i}} = \frac{32 \cdot 0,2775}{\sqrt{3} \cdot 2,769} = 1,85 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Притоа е:

$$\cos\varphi_{\Sigma i} = \cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{600}{\sqrt{600^2 + 250^2}} = 0,923;$$

$$\sum_{i=1}^{4} l_i \cdot \cos\varphi_{\Sigma i} = 0,923 \cdot 3 = 2,769 \text{ km}.$$

Врз основа на релацијата $A_i = I_{\Sigma i}/J$; (i = 1,4) ги добиваме следните потребни пресеци:

$$A_1 = \frac{I_{\Sigma 1}}{J_{\text{const}}} = \frac{150}{1,85} = 81 \text{ mm}^2;$$

$$A_2 = \frac{I_{\Sigma 2}}{J_{\text{const}}} = \frac{112,5}{1,85} = 69 \text{ mm}^2;$$

$$A_3 = \frac{I_{\Sigma 3}}{J_{\text{const}}} = \frac{75}{1,85} = 40,5 \text{ mm}^2;$$

$$A_4 = \frac{I_{\Sigma 4}}{J_{\text{const}}} = \frac{37,5}{1,85} = 20 \text{ mm}^2.$$

Добиените пресеци ќе треба да ги заокружиме до најблиските стандардни пресеци. Заокружуваме на следниот начин:

– Прва делница: $A_1 = 95\ \text{mm}^2$; $r_1 = 0{,}320\ \Omega/\text{km}$; $x_1 = 0{,}112\ \Omega/\text{km}$.

– Втора делница: $A_2 = 50\ \text{mm}^2$; $r_2 = 0{,}641\ \Omega/\text{km}$; $x_2 = 0{,}121\ \Omega/\text{km}$.

– Трета делница: $A_3 = 35\ \text{mm}^2$; $r_3 = 0{,}866\ \Omega/\text{km}$; $x_3 = 0{,}126\ \Omega/\text{km}$.

– Четврта делница: $A_4 = 25\ \text{mm}^2$; $r_4 = 1{,}282\ \Omega/\text{km}$; $x_4 = 0{,}131\ \Omega/\text{km}$.

Се разбира дека се можни и други начини на заокружување. Во принцип, кога начинот на заокружување не е јасно видлив (како во овдешниот случај) правилно би било почетните делници да се заокружуваат нагоре додека последните делници да се заокружуваат надолу.

Пресметката на загубата на напон во водот и проверка на условот $\Delta U < \Delta U_{doz}$ дава:

$$\Delta U = \frac{\sum_{i=1}^{4}(P_{\Sigma i} r_i + Q_{\Sigma i} x_i)\cdot l_i}{U_\text{n}} = 66 + 92 + 82 + 60 = 300\ \text{V} \equiv 3\%.$$

Значи усвоените пресеци задоволуваат. Доколку последниот услов не беше исполнет, тогаш вториот пресек, којшто беше заокружен надолу, ќе го зголемевме на 70 mm^2.

■ ■ ■

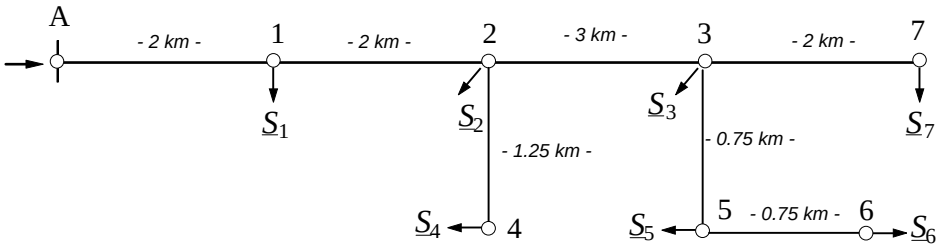
Задача 3. На сликата 3.1 е прикажана 10 kV разгранета кабелска мрежа, која треба да биде изведена со кабли од типот IPO 13 A, 10 kV со спроводници од алуминиум (κ = 32 Smm^2/km). Податоците за подолжните параметри r и x како и податоците за трајно дозволените струи I_d на овие кабли, во зависност од нивниот пресек A, се дадени во табелата 3.1. Да се изврши димензионирање на мрежата според критериумот на константен пресек. Да се користат само пресеците што се дадени во табелата 3.1. Дозволената загуба на напон изнесува $\Delta U_{doz} = 5\%$.

Должините на поедините секции од мрежата, изрзени во (km) се прикажани на самата слика 3.1. Моќностите на потрошувачите, изразени во (kVA), се како што следува:

$\underline{S}_1 = \underline{S}_2 = \underline{S}_3 = \underline{S}_4 = \underline{S}_7 = (600 + j250)\,\text{kVA}$; $\underline{S}_5 = \underline{S}_6 = (360 + j200)\,\text{kVA}$.

Табела 3.1. Податоци за подолжните параметри на предвидените кабелски водови тип IPO 13 A.

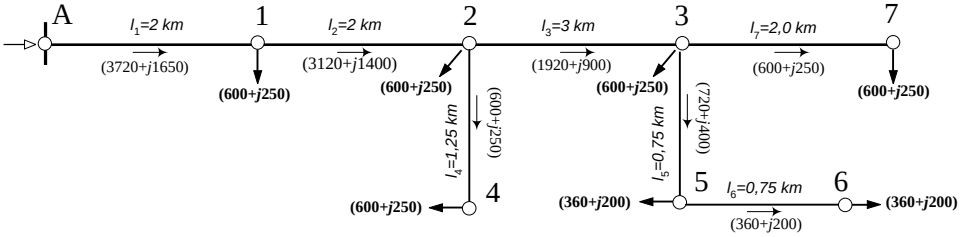
A, (mm^2)	**16**	**25**	**35**	**50**	**70**	**95**	**120**	**150**	**185**	**240**
r, (Ω/km)	2,003	1,282	0,866	0,641	0,443	0,320	0,253	0,206	0,169	0,130
x, (Ω/km)	0,109	0,103	0,098	0,093	0,088	0,085	0,082	0,080	0,078	0,076
I_d, (A)	69	89	110	130	165	195	225	255	285	325
S_d, (kVA)	1195	1542	1905	2252	2858	3377	3897	4417	4936	5629



Слика 3.1.

Решение:

Приближната распределба на моќности во мрежата (со занемарување на загубите на моќност во поедините делници), добиена со просто сумирање на моќностите на потрошувачите, ќе биде како на сликата 3.2. Притоа секоја гранка е нумерирана според редниот број на нејзиниот краен јазел.



Слика 3.2. Распределба на моќности во мрежата

Пред да се пристапи кон определувањето на пресеците на одделните делници, ќе биде потребно да се се утврди кои делници од мрежата го сочинуваат магистралниот вод, т.е. магистралата на мрежата. Потоа се врши избор на пресекот на магистралата по некаков критериум (во случајов критериумот на константен пресек), па дури потоа се врши димензионирање на останатите делови од мрежата коишто се нарекуваат „отцепи“.

а) Определување на магистралата на мрежата

Магистралата на една мрежа ја претставува низата од гранки што се наоѓа на патеката што ги поврзува напојната точка „А“ и точката којашто е „електрички“ најоддалечена од точката „А“. Таква електрички најоддалечена точка може да биде било која од крајните т.е. „периферните“ точки на мрежата (точки кои се поврзани само со една гранка). Според тоа, врз основа на самата слика 3.2 лесно може да се утврди дека периферни точки на мрежата се точките 4, 6 и 7. Ако со ω_k го означиме множеството на гранки на патеката помеѓу напојната точка „А“ и крајната точка k, тогаш трите можни магистрали на мрежата се дефинирани со следните низи гранки:

$\omega_4 = \{1, 2, 4\}$; $\omega_6 = \{1, 2, 3, 5, 6\}$ и $\omega_7 = \{1, 2, 3, 7\}$.

Нека претпоставиме дека сите делници имаат ист пресек и исти подолжни параметри $\underline{z} = (r+jx)$. Тогаш загубата на напон од напојната точка „А“ до произволна точка k ќе се се добие со помош на следната релација:

$$\Delta U_{\mathrm{A}-k} = \sum_{i\in\omega_k} \frac{\underline{Z}_i \cdot \underline{S}_i^*}{\underline{U}_i^*} = \underline{z} \cdot \sum_{i\in\omega_k} \frac{l_i \cdot \underline{S}_i^*}{\underline{U}_i^*} \approx \frac{\underline{z}}{U_{\mathrm{n}}^2} \cdot \sum_{i\in\omega_k} l_i \cdot \underline{S}_i^* .$$

Во последната релација со ω_k е означено множеството гранки што ѝ припаѓаат на патеката помеѓу напојната точка „А“ и посматраната точка k додека со $\underline{S}_i$ е означена привидната моќност низ i–тата гранка од мрежата.

Од тука е јасно дека најмал ќе биде напонот во онаа точка од мрежата k за која што сумата од производите на моќностите по должините на делниците ќе биде најголема. Таа точка е „електрички“ најоддалечена од напојната точка „А“. Но кога потрошувачите имаат ист (или приближно ист) фактор на моќност $\cos\varphi$, како што е случај во разгледуваната задача, тогаш наместо со производите $l_i \cdot \underline{S}_i^*$ може да се оперира и со производите $l_i \cdot P_{\Sigma i}$.

На тој начин за трите можни магистрали на мрежата ќе имаме:

$$\Sigma_4 = P_{\Sigma 1} \cdot l_1 + P_{\Sigma 2} \cdot l_2 + P_{\Sigma 4} \cdot l_4 = 12870 \text{ kW×km};$$
$$\Sigma_6 = P_{\Sigma 1} \cdot l_1 + P_{\Sigma 2} \cdot l_2 + P_{\Sigma 5} \cdot l_5 + P_{\Sigma 6} \cdot l_6 = 19650 \text{ kW×km};$$
$$\Sigma_7 = P_{\Sigma 1} \cdot l_1 + P_{\Sigma 2} \cdot l_2 + P_{\Sigma 3} \cdot l_3 + P_{\Sigma 7} \cdot l_7 = 20040 \text{ kW×km}.$$

Значи магистралата е дефинирана со множеството гранки $\omega_7 = \{1, 2, 3, 7\}$.

б) Димензионирање на магистралата на мрежата

Како што се бара во задачата, магистралата на мрежата треба да се димензионира според критериумот на константен пресек. За таа цел најнапред ќе ги пресметаме величините ΔU_{doz}, ΔU_r и $\Delta U_{a.\,doz}$. Врз основа на податоците од табелата 3.1 заклучуваме дека просечната вредност на реактанцијата по единица должина на каблите изнесува x = 0,085 Ω/km.

Понатаму ќе ја пресметаме загубата на напон ΔU_r во магистралниот вод што се должи на течењето на реактивните моќности во мрежата:

$$\Delta U_r = \sum_{i \in \omega_7} \frac{Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_\text{n}} \approx \frac{x}{U_\text{n}} \cdot \sum_{i \in \omega_7} Q_{\Sigma i} \cdot l_i;$$

$$\Delta U_r = \frac{0,085}{10} \cdot \left(1650 \cdot 2 + 1400 \cdot 2,0 + 1150 \cdot 3,0 + 250 \cdot 2,0\right) =$$
$$= \frac{0,085}{10} \cdot 10050 = 85,4 \text{ V}.$$

$$\Delta U_{doz} = \frac{\Delta U_{doz}\%}{100} \cdot U_n = \frac{5}{100} \cdot 10 = 0,5 \text{ kV} \equiv 500 \text{ V}.$$

$$\Delta U_{a.doz} = \Delta U_{doz} - \Delta U_r = 500 - 81,5 = 418,5 \text{ V} = 0,415 \text{ kV}.$$

Сега можеме да го определиме потребниот пресек A на магистралата:

$$A \geq \frac{1000 \cdot \sum_{i \in \omega_7} P_{\Sigma i} \cdot l_i}{\kappa \cdot U_\text{n} \cdot \Delta U_{a.doz}} = \frac{1000 \cdot 22440}{32 \cdot 10 \cdot 415} = 169,1 \text{ mm}^2.$$

Според тоа најблиску до добиената вредност е стандардниот пресек A=185 mm^2 за кого од табелата 3.1 отчитуваме: r = 0,169 Ω/km и x = 0,078 Ω/km. Проверката на загубата на напон до крајната точка 7 ќе даде:

$$\Delta U = \Delta U_{A-7} = \frac{r}{U_n} \cdot \sum_{i \in \omega_7} P_{\Sigma i} \cdot l_i + \frac{x}{U_n} \cdot \sum_{i \in \omega_7} Q_{\Sigma i} \cdot l_i;$$

$$\Delta U = \frac{0{,}169}{10}\cdot 22440 + \frac{0{,}078}{10}\cdot 10050 = 458\ \text{V} < 500\ \text{V}.$$

Проверката на термичкото оптоварување на кабелот, чија што трајна дозволена струја изнесува I_d = 285 A ќе даде:

$$\underline{S}_{\Sigma 1} = (3720 + j1650) = 4069.51\cdot e^{j23.9^\circ}\ \text{kVA}$$

$$I_{\Sigma 1} = S_{\Sigma 1}/(\sqrt{3}\cdot U_{\text{n}}) = 4069{,}51/1{,}732/10 = 235\ \text{A};\quad I_{\Sigma 1} < I_d.$$

в) Димензионирање на отцепите на мрежата

Пред да преминеме кон димензионирањето на отцепите од мрежата ќе биде потребно да ги пресметаме загубите на напон $\Delta U_{\text{A–2}}$ и $\Delta U_{\text{A–3}}$ до точките 2 и 3 коишто претставуваат почетни (напојни) точки за отцепите (2–4) и (3–5–6) а потоа да ги пресметаме остатоците од дозволената загуба на напон $\Delta U_{1.\text{ost}}$ и $\Delta U_{2.\text{ost}}$ за првиот и вториот отцеп.

$$\Delta U_{\text{A–1}} = \Delta U_1 = \frac{P_{\Sigma 1}\cdot r + Q_{\Sigma 1}\cdot x}{U_{\text{n}}}\cdot l_1 = \frac{3720\cdot 0{,}169 + 1650\cdot 0{,}078}{10}\cdot 2 = 151{,}5\ \text{V};$$

$$\Delta U_{1\text{–}2} = \Delta U_2 = \frac{P_{\Sigma 2}\cdot r + Q_{\Sigma 2}\cdot x}{U_{\text{n}}}\cdot l_2 = \frac{3120\cdot 0{,}169 + 1400\cdot 0{,}078}{10}\cdot 2 = 127{,}3\ \text{V}.$$

$$\Delta U_{2\text{–}3} = \Delta U_3 = \frac{P_{\Sigma 3}\cdot r + Q_{\Sigma 3}\cdot x}{U_{\text{n}}}\cdot l_3 = \frac{1920\cdot 0{,}169 + 900\cdot 0{,}078}{10}\cdot 3{,}0 = 155\ \text{V};$$

$$\Delta U_{\text{A–2}} = \Delta U_{\text{A–1}} + \Delta U_{1\text{–}2} = 151{,}5 + 127{,}3 = 279\ \text{V};$$

$$\Delta U_{\text{A–3}} = \Delta U_{\text{A–1}} + \Delta U_{1\text{–}2} + \Delta U_{2\text{–}3} = 151{,}5 + 127{,}3 + 154{,}7 = 433{,}5\ \text{V};$$

Според тоа дозволената загуба на напон за првиот отцеп ќе биде:

$$\Delta U_{1.\text{ост.}} = \Delta U_{doz} - \Delta U_{\text{A–2}} = 500 - 279 = 221\ \text{V};$$

$$\Delta U_{2.\text{ост.}} = \Delta U_{doz} - \Delta U_{\text{A–3}} = 500 - 433{,}5 = 66{,}5\ \text{V}.$$

Потребниот пресек за првиот отцеп ќе го добиеме со помош на релацијата:

$$\Delta U_{r.1} = \frac{l_4}{U_{\text{n}}}\cdot Q_{\Sigma 4}\cdot x = \frac{1{,}25}{10}\cdot 250\cdot 0{,}085 = 2{,}7\ \text{V};$$

$$\Delta U_{1a.doz} = \Delta U_{1.\text{ост.}} - \Delta U_{1.r} = 221 - 2{,}7 = 218{,}3\ \text{V};$$

$$A_4 \geq \frac{1000\cdot\left(P_{\Sigma 4}\cdot l_4\right)}{\kappa\cdot U_{\text{n}}\cdot \Delta U_{a1.doz}} = \frac{1000\cdot(600\cdot 1{,}25)}{32\cdot 10\cdot 218{,}3} = 13{,}4\ \text{mm}^2.$$

Го усвојуваме првиот стандарден поголем пресек: A_4 = 16 mm^2 (иако во практиката кај 10 kV мрежи не се усвојуваат толку мали пресеци). За овој пресек од табелата 3.1 отчитуваме: $\underline{z}$ = (2,003+j0,109) Ω/km.

Проверката на загубата на напон во водот 4 покажува дека е:

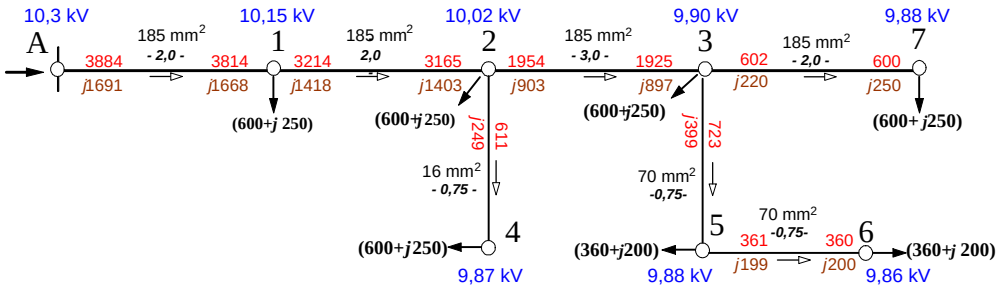
$$\Delta U_4 = \Delta U_{2\text{–}4} = \frac{P_{\Sigma 4}\cdot r + Q_{\Sigma 4}\cdot x}{U_{\text{n}}}\cdot l_4 = \frac{600\cdot 2{,}003 + 250\cdot 0{,}109}{10}\cdot 1{,}25;\quad \Delta U_4 = 157\,\text{V};\ (\Delta U_4 < \Delta U_{1.\text{ост.}} = 221\ \text{V}).$$

На сличен начин се постапува и за вториот отцеп (3-5-6). Лесно се добива дека минималниот пресек на делниците 3-5 и 5-6 за којшто загубата на напон во отцепот не е поголема од дозволените 39,4 V изнесува: $A_5 = A_6 = 70\ \text{mm}^2\ [\underline{z} = (0,443 + j0,088)\ \Omega/\text{km}.]$

За овој пресек се добиваат следните загуби на напон во поедините делници од овој отцеп:

$$\Delta U_{3-5} = \Delta U_5 = 26,6\ \text{V};$$
$$\Delta U_{5-6} = \Delta U_6 = 13,3\ \text{V};$$
$$\Delta U_{3-6} = \Delta U_{3-5} + \Delta U_{5-6} = 26,6 + 13,2 = 39,8\ \text{V};$$
$$\Delta U_{A-6} = \Delta U_{A-3} + \Delta U_{3-6} = 433,5 + 39,8 = 473,3\ \text{V} < 500\ \text{V}.$$

Ако усвоиме дека напонот во напојната точка изнедува UA = 10,3 kV тогаш точните прес¬метки на напонските прилики во мрежата димен¬¬зионирана на прика¬жаниот начин ги даваат вредностите за напоните во јазлите и струите низ гранките од мрежата коишто се прикажани на сликата 3.3.



Слика 3.3. Распределба на моќности и напони во мрежата

Резултатите прикажани на сликата 3.3 покажуваат дека усвоените пресеци задоволуваат како во поглед на загубата на напон (исполнет е напонскиот критериум бидејќи загубата на напон во мрежата е точно 5%), така и во поглед на дозволените струјни оптоварувања на каблите (исполнет е и термичкиот критериум бидејќи струите/моќностите во гранките од мрежата се помали од дозволените според табелата 3.1).

■ ■ ■

Задача 4. Димензионирањето на мрежата од задачата 3 да се изврши со помош на софтверската алатка „LFZ.xls“.

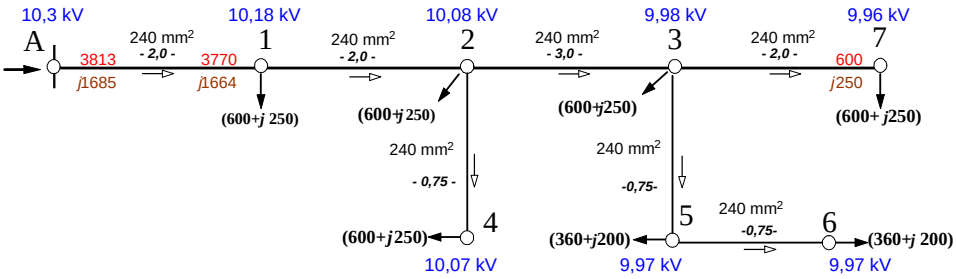
Решение:

Димензионирањето на мрежите со помош на компјутерски програми е многу полесно бидејќи пресметките не се прават рачно а освен тоа можностите за правење грешка се помали. Но притоа треба да се следи следната логика.

1) Избор и димензионирање на магистралана на мрежата

За да ја определиме магистралата на мрежата и нејзиниот пресек ќе постапиме на следниот начин. Се тргнува, на пример, од најголемиот стандарден пресек што ни стои на располагање за изведба на мрежата (во случајов пресекот 240 mm²) и привремено на сите делници им го доделуваме тој пресек. За напонот во напојната точка „A“ усвојуваме некоја логична вредност, на пример $U_A = 1,03 \cdot U_n = 10,3$ kV и со така избраните пресеци вршиме Load Flow анализа на мрежата со која што ги добиваме моќностите во гранките од мрежата,

напоните во јазлите и загубите на напон до секој нејзин јазел. Како резултат од таквата анализа ја добиваме следната состојба, прикажана на сликата 4.1.

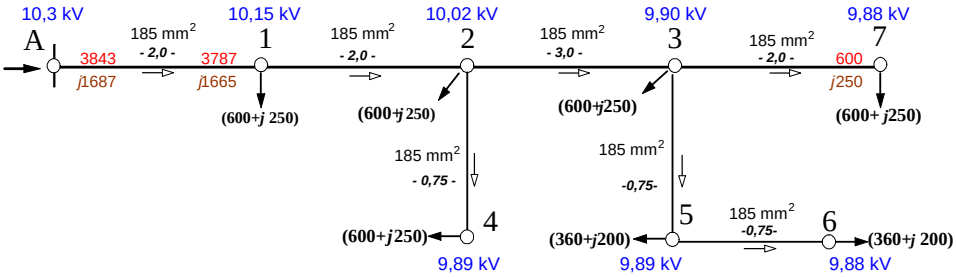


Слика 4.1. Моќности и напони во мрежата кога сите делници имаат ист пресек (240 mm²)

Заклучуваме дека напоните во сите јазли се поголеми од дозволената вредност U_{doz} = $U_A - \Delta U_{doz}$ = 10,3 – 0,5 = 9,8 kV. Исто така заклучуваме дека загубата на напон е најголема во точката 7 и изнесува:

$\Delta U_7 = U_A - \Delta U_{doz}$ = 10,3 – 9,88 = 0,412 kV.

Сега вршиме намалување на пресекот кај сите делници за еден степен подолу и усвојуваме насекаде A = 185 mm^2. За новите пресеци се добива следната состојба во мрежата (слика 4.2).



Слика 4.2. Моќности и напони во мрежата кога сите делници имаат ист пресек (185 mm²)

Ваквата постапка на постепено намалување на пресеците ќе ја повторуваме се додека не се дојде до состојба кога условот за загубата на напон во мрежата $\Delta U \leq \Delta U_{doz}$ нема да биде задоволен. Тогаш се враќаме на претходниот, поголем, пресек за сите делници во мрежата и со тоа ја завршивме првата етапа од пресметките со која што ја определивме магистралата на мрежата и нејзиниот пресек. Во конкретниот случај се добива дека прссекот на магистралата А–1–2–3–7 изнесува 185 mm^2.

Во натамошниот дел од постапката се врши димензионирање на отцепите во мрежата и тоа за секој засебно – најнапред на отцепот 2–4 а потоа и на отцепот 3–5–6, на наполно ист начин како и досега.

2) Димензионирање на отцепот 2 – 4

Најнапред на делницата 2–4 и доделуваме пресек помал за еден степен, т.е. A_{2-4} = 150 mm^2 и вршиме Load Flow анализа. Заклучуваме дека напонот во јазел 4 во тој случај изнесува U_4 = 10,050 kV $\geq$ U_{doz} = 9,8 kV. Затоа одиме понатаму со намалувањето на пресекот и таа постапка се повторува доволен број пати. На тој начин се доаѓа до најмалиот пресек за кој што се постигнува задоволување на условот загубата на напон до јазелот бр 4 да биде најмногу 5%, односно напонот во крајната точка од отцепот да биде $U_4 \geq U_{doz}$ = 9,8 kV. Тоа е пресекот A_4 = 16 mm^2. за кој напонот во јзелот 4 ќе биде U_4 = 9,87 kV.

3) Димензионирање на отцепот 3 – 5 – 6

Наполно е иста постапката за димензионирање на отцепот 3–5–6. Се почнува од стандардниот пресек 150 mm^2 и со неговото постепено намалување се стигнува до најмалиот пресек на водовите 3–5 и 5–6 од овој отцеп од 70 mm^2 за кој што се постигнува задоволување на условот $U_6 \geq 9{,}8$ kV.

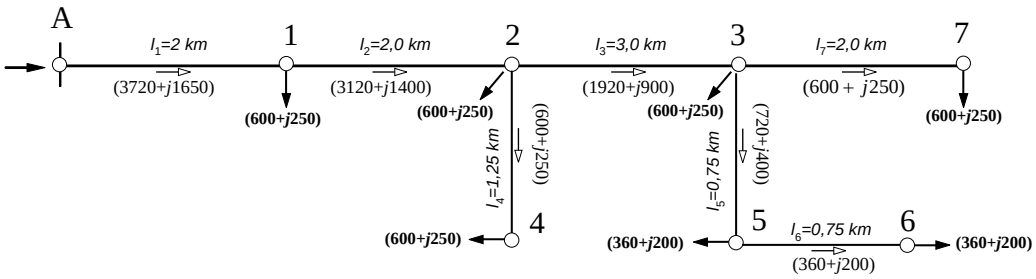
Резултатите за напониите и тековите на моќности во мрежата за вака одбраните пресеци се наполно исти со оние прикажани на сликата 3.3 во претходната задача.

■ ■ ■

Задача 5. Да се изврши избор на пресеците на мрежата од сликата 5.1 така што магистралниот дел од мрежата да се димензионира според критериумот на константна густина на струјата додека останатите нејзини делови (отцепите) да се димензионираат според критериумот на константен пресек. Повторно да се користат само пресеците што се дадени во табелата 5.1. Дозволената загуба на напон изнесува ΔU_{doz} = 5%. Во пресметките да секористи компјутерската програма „LFZ.xls“.

Решение:

Во претходната задача беше определена магистралата на мрежата, која што беше дефинирана со множеството гранки $\omega_7 = \{1, 2, 3, 7\}$ како и приближните текови на моќности во мрежата (слика 5.1).



Слика 5.1. Распределба на моќности во мрежата

Најнапред за магистралниот дел од мрежата ($i \in \omega_7 = \{1, 2, 3, 7\}$) ќе ги пресметаме следните суми:

$$\sum_{i \in \omega_7} Q_{\Sigma i} \cdot l_i = 2 \cdot 1{,}65 + 2{,}0 \cdot 1{,}4 + 3{,}0 \cdot 1{,}15 + 2 \cdot 0{,}25 = 10050 \text{ kvar}\times\text{km};$$

$$\sum_{i \in \omega_7} l_i \cdot \cos\varphi_{\Sigma i} = 2 \cdot 0{,}914 + 2{,}0 \cdot 0{,}912 + 3{,}0 \cdot 0{,}910 + 2 \cdot 0{,}923 = 8{,}23 \text{ km}$$

Потоа ќе ги пресметаме загубите на напон:

$$\Delta U_r = \frac{x}{U_\text{n}} \cdot \sum_{i \in \omega_7} Q_{\Sigma i} \cdot l_i = \frac{0{,}09}{10} \cdot 10050 = 85{,}4 \text{ V},$$

$$\Delta U_{a.doz} = \Delta U_{doz} - \Delta U_r = 500 - 85{,}4 = 414{,}6 \text{ V}.$$

Сега можеме да ги избереме пресеците на делниците што му припаѓаат на магистралниот дел од мрежата според критериумот на константна густина на струјата, како и во

примерот 2. За таа цел, со помош на релацијата (7.20) од учебникот [1], ќе ја пресметаме густината на струјата J_{const} во поедините делници од мрежата за која се постигнува $\Delta U = \Delta U_{doz}$.

$$J_{\text{const}} = \frac{\kappa \cdot \Delta U_{a.doz}}{\sqrt{3} \cdot \sum\limits_{i \in \omega_7} l_i \cdot \cos\varphi_{\Sigma i}} = \frac{32 \cdot 0,4146}{\sqrt{3} \cdot 8,23} = 0,931 \ \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}.$$

Потребните пресеци на делниците ќе бидат:

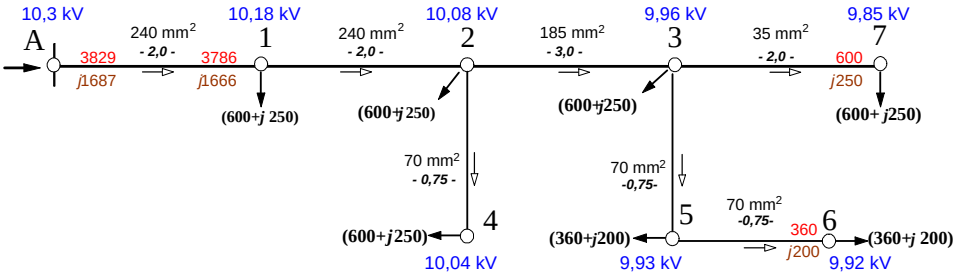
$$A_1 = \frac{I_{\Sigma 1}}{J_{\text{const}}} = \frac{S_{\Sigma 1}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{n}} \cdot J_{\text{const}}} = 252 \text{ mm}^2. \text{ Усвојуваме } A_1 = 240 \text{ mm}^2,$$

$$A_2 = \frac{I_{\Sigma 2}}{J_{\text{const}}} = \frac{S_{\Sigma 2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{n}} \cdot J_{\text{const}}} = 212 \text{ mm}^2. \text{ Усвојуваме } A_2 = 240 \text{ mm}^2,$$

$$A_3 = \frac{I_{\Sigma 3}}{J_{\text{const}}} = \frac{S_{\Sigma 3}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{n}} \cdot J_{\text{const}}} = 172 \text{ mm}^2. \text{ Усвојуваме } A_3 = 185 \text{ mm}^2,$$

$$A_7 = \frac{I_{\Sigma 7}}{J_{\text{const}}} = \frac{S_{\Sigma 7}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{n}} \cdot J_{\text{const}}} = 40,3 \text{ mm}^2. \text{ Усвојуваме } A_7 = 35 \text{ mm}^2.$$

За преостанатите делници од мрежата (отцепите) привремено ќе усвоиме произволен пресек, нпр. $A_4 = A_5 = A_6 = 70$ mm^2. Сега, за вака заокружените пресметки, со помош на програмата ги пресметуваме напоните во мрежата и притоа ги добиваме следните резултати (сл. 5.2).



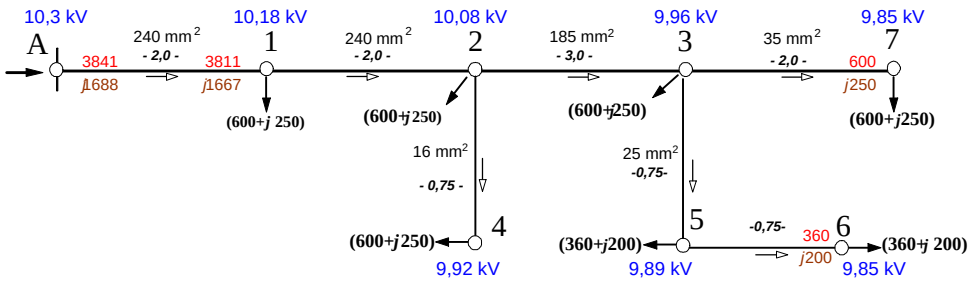
Слика 5.2. Распределба на моќности и напони во мрежата

Од добиените резултати за напонските прилики заклучуваме дека напонот во крајниот јазел 7, $U_7 = 9,85$ kV $> U_{doz} = U_{\text{A}} - \Delta U_{doz} = 10,3 - 0,5 = 9,8$ kV што значи дека избраните пресеци за магистралниот дел од мрежата според критериумот на константна густина на струјата се прифатливи. Исто така се добива дека напоните во преостанатите крајни јазли од мрежата 4 и 6 се поголеми од вредноста U_{doz}. Тоа значи дека пресекот A_4 на првиот отцеп како и пресеците $A_5 = A_6$ на делниците од вториот отцеп може да се намалуваат. Понатаму, со метод на проба се добиваат најмалите пресеци A_4, A_5 и A_6 за кои се постигнува условот $U_i \geq U_{doz}$; (i = 1, 7).

Доколку постапиме на тој начин, за пресеците на преостанатите делници од мрежата ќе ги добиеме следните вредности:

$A_4 = 16$ mm^2; $A_5 = 25$ mm^2; $A_6 = 25$ mm^2.

Распределбата на напони во мрежата за тој случај се прикажани на сликата 5.3.



Слика 5.3. Распределба на моќности и напони во мрежата за конечната состојба со избраните пресеци

■ ■ ■

IX. ЗАГУБИ НА МОЌНОСТ И ЕНЕРГИЈА ВО ЕЛЕКТРИЧНИТЕ МРЕЖИ

9.1. ОПШТО ЗА ЗАГУБИТЕ НА МОЌНОСТ И ЕНЕРГИЈА ВО ЕЛЕКТРИЧНИТЕ МРЕЖИ

а) Загуба на активна моќност

Загубата на активна моќност ΔP во елемент од електроенергетската мрежа зависи од неговиот активен отпор R и од струјата I, односно од пренесуваната активна P и реактивна моќност Q. За трифазните водови загубата ΔP_V ќе биде:

$$\Delta P_V = 3 \cdot R \cdot I^2 = R \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \approx R \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U_{\mathrm{n}}^2}. \tag{1}$$

Кај трансформаторите загубите на активната моќност ΔP_T ќе се состојат од два дела: константен дел (загубите во железо ΔP_{Fe}), кој не зависи од оптоварувањето, и варијабилен дел (загуби во барак ΔP_{Cu}), кој зависи од моќноста S низ трансформаторот, односно:

$$\Delta P_T = \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \Delta P_{Cun} \cdot (S/S_n)^2 = \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \alpha^2 \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}} . \tag{2}$$

каде што $\alpha = S / S_{\mathrm{n}} = \sqrt{P^2 + Q^2} / S_{\mathrm{n}}$ е т.н. „коефициент на оптоварување“ на трансформаторот, додека ΔP_{Cun} се загубите во бакар при номиналното оптоварување.

б) Загуба на активна енергија

Доколку моќностите на оптоварување P, Q, односно привидната моќност S, се во посматраниот временски период T константни, тогаш изгубената активна енергија ΔW во соодветниот елемент од мрежата за посматраниот временски период ќе се добие како производ:

$$\Delta W = \Delta P \cdot T . \tag{3}$$

Меѓутоа, ако моќностите на оптоварување P, Q и S се временски променливи, тогаш изгубената активна енергија ΔW во посматраниот период T ќе биде:

$$\Delta W = \int_0^T \Delta P(t) \cdot dt . \tag{4}$$

Според тоа, загубите на активна енергија кај водовите ќе бидат:

$$\Delta W_V = \int_0^T \Delta P_V(t) \cdot dt = \int_0^T 3 \cdot R \cdot I^2(t) \cdot dt = R \cdot \int_0^T \frac{S^2(t)}{U^2(t)} \cdot dt \ , \tag{5}$$

додека кај трансформаторите, ќе имаме:

$$\Delta W_T = \int_0^T (\Delta P_{\mathrm{Fe}} + \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \frac{S^2(t)}{S_{\mathrm{n}}^2}) \cdot dt = \Delta P_{\mathrm{Fe}} \cdot T + \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \int_0^T \frac{S^2(t)}{S_{\mathrm{n}}^2} \cdot dt . \tag{6}$$

Временски променливите оптоварувања $P(t)$ и $Q(t)$ или пак $S(t)$ честопати се прикажуваат со помош на график, кој може да се апроксимира со скалеста крива, со вкупно n интервали. Во тој случај загубите на активна енергија ΔW ќе изнесуваат:

$$\Delta W_V = R \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \cdot \Delta t_i = R \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{S_i^2}{U_i^2} \cdot \Delta t_i \ , \tag{7}$$

$$\Delta W_T = \Delta P_{\mathrm{Fe}} \cdot T + \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{S_i^2}{S_{\mathrm{n}}^2} \cdot \Delta t_i \ . \tag{8}$$

Понатаму, од самата дефиниција за времето T_M следи:

$$T_M = \frac{W}{P_M} = \int_0^T \frac{P(t)}{P_M} \cdot dt \, , \tag{9}$$

или приближно:

$$T_M \approx \sum_{i=1}^{n} \frac{P_i}{P_M} \cdot \Delta t_i \ . \tag{10}$$

Со оглед на релацијата (7) загубите на активна енергија во вод, согласно (5), ќе бидат:

$$\Delta W_V = R \cdot \int_0^T \frac{S^2(t)}{U^2(t)} \cdot dt \approx \frac{R}{U_{\mathrm{n}}^2} \cdot S_M^2 \cdot \int_0^T \frac{S^2(t)}{S_M^2} \cdot dt \ . \tag{11}$$

Бидејќи загубите на активна моќност ΔP_M во режимот на максимално оптоварување, кога пренесуваната привидна моќност ја има својата максимална вредност S_M изнесуваат:

$$\Delta P_M = 3 \cdot R \cdot I_M^2 = R \cdot \frac{S_M^2}{U_M^2} \approx R \cdot \frac{S_M^2}{U_{\mathrm{n}}^2} \ , \tag{12}$$

па на тој начин за загубите на енергија во водот добиваме:

$$\Delta W_V = \Delta P_M \cdot \tau \tag{13}$$

каде што е загубите се пресметуваат преку т.н. „*време на загуби*“ τ :

$$\tau = \int_0^T \frac{S^2(t)}{S_M^2} \cdot dt \approx \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{S_i}{S_M} \right)^2 \cdot \Delta t_i \ . \tag{14}$$

Времињата T_M и τ се однесуваат на еден ист дијаграм на оптоварување, па затоа помеѓу нив постои некаква врска. Кога се работи за годишен дијаграм на оптоварување на потрошувачот ($T = 8760$ h) таа врска приближно може да се опише со следната емпириска релација:

$$\tau = (0{,}124 + \frac{T_M}{10.000})^2 \cdot 8760 \ , \tag{15}$$

и се однесува на годишните дијаграми на оптоварување на потрошувачите ($T = 1$ год $= 8760$ h).

За проценка на времето на загуби τ врз основа на познатото употребно време T_M односно познатиот *фактор на товарот m*, се користат и други емпирски релации:

$$\tau = (0{,}17 \cdot m + 0{,}83 \cdot m^2) \cdot T \, ; \tag{16}$$

$$\tau = (0{,}3 \cdot m + 0{,}7 \cdot m^2) \cdot T \, ; \tag{17}$$

$$\tau = (0{,}124 + 0{,}8760 \cdot m)^2 \cdot T \, ; \tag{18}$$

Факторот на товарот (или како што го нарекуваат уште и фактор на пополнетост на дијаграмот) се добива како однос на просечната, т.е. средната (P_{cp}) и максималната (P_M) моќност на потрошувачот, со помош на следната релација:

$$m = \frac{P_{\text{ср}}}{P_M} \quad \text{или} \quad m = \frac{T}{T_M}. \tag{19}$$

в) Пресметка на загубите со помош на методот на еквивалентна отпорност

Кога во една мрежа или, пак, во дел од некоја мрежа не е неопходно да ја познаваме деталната состојба со која се опишани напонските и струјните прилики туку ни е доволно да ги знаеме само загубите на моќност односно енергија во неа, тогаш заради зголемување на брзината на пресметување и намалување на обемот на работата е згодно тој дел од мрежата да се замени со некаков негов еквивалент кој ќе има едноставна и компактна форма. Се разбира дека во тој случај, за да биде еквивалентирањето успешно, ќе биде неопходно загубите на моќност $\Delta\underline{S}_{ek}$ во еквивалентната мрежа да бидат исти со вистинските загуби $\Delta\underline{S}$ во реалната мрежа, т.е.:

$$\Delta\underline{S} = \Delta\underline{S}_{ek} = (\Delta P_{ek} + j\Delta Q_{ek}).$$

Со методот на еквивалентна отпорност (импеданција) е можно цела една мрежа, или пак дел од една постојна мрежа, заедно со нејзините потрошувачи, да се еквивалентира (замени) со друга, многу поедноставна мрежа. Притоа, како што беше нагласено, еквивалентот треба да биде таков што ќе овозможи загубите на моќност $\Delta\underline{S}_{ek}$ во еквивалентната мрежа да бидат исти со вистинските загуби $\Delta\underline{S}$ во реалната мрежа, т.е. $\Delta\underline{S} = \Delta\underline{S}_{ek}$.

Една СН мрежа составена само од водови може да се еквивалентира само со една единствена импеданција, како што е тоа прикажано на сликата 9.1 а. Кога мрежата содржи и трансформатори тогаш покрај импеданцијата $\underline{Z}_{ek}$ еквивалентот на мрежата ќе содржи и еден фиктивен потрошувач со којшто се опфаќаат и загубите на моќност во трансформаторите коишто не зависат од оптоварувањето (загуби во железо), како на сликата 9.1 б.

а) Модел на мрежа составена само од водови

б) Модел кога мрежата содржи и трансформатори

Слика 9.1 Еквивалентни модели на дистрибутивната мрежа:

Ако низ i–тиот елемент од мрежата со импеданција $Z(i) = R(i)+jX(i)$ тече струја $I_\Sigma(i)$, тогаш загубата на моќност $\Delta\underline{S}(i)$ во ќе биде:

$$\Delta\underline{S}(i) = 3\cdot\underline{Z}(i)\cdot I_\Sigma^2(i) = 3\cdot\underline{Z}(i)\cdot k_i^2\cdot I_A^2.$$

Во последната релација со $\underline{k}_i$ е означен односот на струјата низ i–тата делница и струјата низ главната (напојна) делница, т.е.

$$\underline{k}_i = \frac{\underline{I}_\Sigma(i)}{\underline{I}_A}. \tag{20}$$

Бидејќи напоните во мрежата малку се разликуваат од номиналниот напон и се блиски меѓусебе по големина, односот на струите (20) може, приближно, да се напише и на следниот начин:

$$\underline{k}_i = \frac{\underline{I}_\Sigma(i)}{\underline{I}_A} = \frac{\underline{I}_\Sigma(i)}{\underline{I}_A}\cdot\frac{\sqrt{3}\cdot U_n}{\sqrt{3}\cdot U_n} \approx \frac{\underline{S}_\Sigma^*(i)}{\underline{S}_A^*}; \;\Rightarrow\; k_i^2 \approx \frac{S_\Sigma^2(i)}{S_A^2}. \tag{21}$$

Во последната релација со $\underline{S}_A$ е означена сумарната моќност на мрежата т.е. моќноста во напојната делница додека со $\underline{S}_\Sigma(i)$ е означена моќноста што тече низ i–тата делница од

мрежата. Кога е мрежата со радијална структура, без контури, тогаш моќноста $\underline{S}_{\Sigma}(i)$ е приближно еднаква на сумата на моќностите на сите потрошувачи што се напојуваат преку посматраната, i–та, делница. Од тука произлегува дека коефициентот $\underline{k}_i = \underline{S}_{\Sigma}(i)/S_{\mathrm{A}}$ може да се нарече и „коефициент на учество“ на потрошувачите се напојуваат преку посматраната, i–та, делница во вкупната моќност на мрежата $\underline{S}_{\mathrm{A}}$ што тече низ главната делница.

Вкупните загуби во мрежата $\Delta\underline{S}$ можеме ги поделиме на загуби коишто зависат од товарот (варијабилни загуби) $\Delta\underline{S}_{\mathrm{var}}$ и на загуби коишто не зависат од товарот (константни загуби) $\Delta\underline{S}_{\mathrm{const.}}$. Варијабилните загуби се остваруваат во водовите $\Delta\underline{S}_V$ и во редните гранки од енергетските трансформатори (т.н. загуби во бакар $\Delta\underline{S}_{\mathrm{Cu}}$). Загубите во мрежата коишто не зависат од оптоварувањето се всушност сумарните загуби во железото на енергетските трансформатори, т.е. $\Delta\underline{S}_{\mathrm{const.}} = \Sigma\, \Delta\underline{S}_{Fe}$. На тој начин за загубите во мрежата $\Delta\underline{S}$ можеме да пишуваме:

$$\Delta\underline{S} = \Delta\underline{S}_{\mathrm{var}} + \Delta\underline{S}_{\mathrm{const.}} = \Delta\underline{S}_{\mathrm{var}} + \Sigma\,\Delta\underline{S}_{Fe}.$$

Варијабилните загуби $\Delta\underline{S}_{\mathrm{var}}$ ќе се добијат со сумирање на загубите на моќност во сите редни гранки од мрежата, т.е.

$$\Delta\underline{S}_{\mathrm{var}} = \sum_{i=1}^{n_g} \Delta\underline{S}(i) = \sum_{i=1}^{n_g} 3\cdot Z(i)\cdot I_{\Sigma}^2(i);$$

$$\Delta\underline{S}_{\mathrm{var}} = 3\cdot I_{\mathrm{A}}^2 \cdot \sum_{i=1}^{n_g} 3\cdot Z(i)\cdot \frac{I_{\Sigma}^2(i)}{I_{\mathrm{A}}^2} = 3\cdot I_{\mathrm{A}}^2 \cdot \sum_{i=1}^{n_g} k_i^2 \cdot Z(i).$$

Ако ја воведеме ознаката:

$$\underline{Z}_{ek} = \sum_{i=1}^{n_g} k_i^2 \cdot \underline{Z}(i), \tag{22}$$

тогаш за варијабилните загуби можеме да пишуваме:

$$\Delta\underline{S}_{\mathrm{var}} = 3\cdot \underline{Z}_{ek} \cdot I_A^2.$$

Знаејќи ја еквивалентната импеданција на мрежата Z_{ek}, вкупните загуби во мрежата можеме да ги пресметаме на едноставен начин:

$$\Delta\underline{S} = \Delta\underline{S}_{\mathrm{var}} + \Delta\underline{S}_{\mathrm{const.}} = 3\cdot \underline{Z}_{ek} \cdot I_{\mathrm{A}}^2 + \Sigma\,\Delta\underline{S}_{\mathrm{Fe}}.$$

9.2. ЗАДАЧИ

Задача 1. Според методологијата за пресметување на состојбите во дистрибутивните мрежи, усвоена во [19], основните типови потрошувачи се поделени во 8 категории (табела 1.1).

Табела 1.1. Шаблони за типските категории потрошувачи според [19].

t,	01,	02,	03,	04,	05,	06,	07,	08,	09,	10,	11,	12,	13,	14,	15,	16,	17,	18,	19,	20,	21,	22,	23,	24
D,	25,	22,	20,	17,	18,	18,	19,	33,	39,	66,	74,	100,	90,	78,	33,	36,	35,	42,	60,	80,	70,	42,	29,	29
K,	20,	20,	22,	27,	22,	19,	23,	80,	80,	45,	90,	100,	100,	95,	89,	67,	34,	75,	100,	83,	43,	15,	13,	11
I,	67,	60,	55,	50,	53,	58,	67,	80,	93,	100,	93,	82,	82,	92,	100,	95,	90,	88,	84,	81,	80,	83,	85,	77
S,	16,	16,	16,	16,	25,	23,	23,	34,	62,	88,	98,	100,	70,	53,	57,	57,	50,	60,	56,	51,	34,	34,	23,	23
Z,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	20,	55,	88,	100,	90,	73,	60,	80,	83,	87,	91,	73,	57,	45,	0,	0,	0
G,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	44,	88,	100,	80,	73,	60,	80,	83,	87,	62,	40,	0,	0,	0,	0,	0,	0
O,	100,	50,	50,	50,	50,	50,	50,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100
C,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100

Легенда: t = време (h); D = домакинства; K=комерција; I = индустрија; S = селски домакинства; Z = занаетско-услужни дејности; G = градежништво; O-осветление; C = константен товар

Податоците облиците на дневните дијаграми на активната моќност на овие типски потрошувачи, изразени во % од врвното оптоварување, се дадени во табелата 1.1.

Понатаму секој потрошувач во дистрибутивната мрежа може да се претстави како некаква комбинација од поголем број елементарни потрошувачи кои припаѓаат на една или или на повеќе категории.

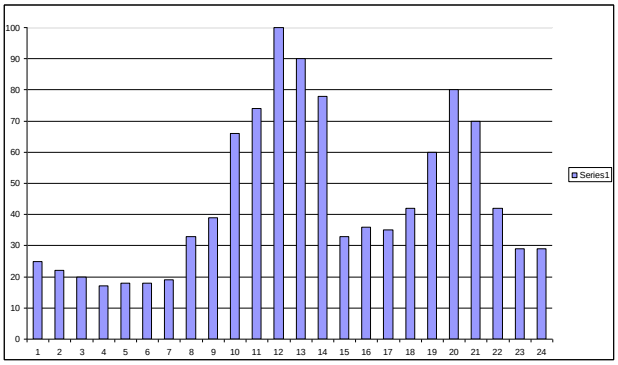
Да се пресметаат основните карактеристики на секој од наведените типови потрошувачи: W, T_M, τ, $P_{ср.}$, m и θ. (T_M = 24 h = 1 ден).

Решение

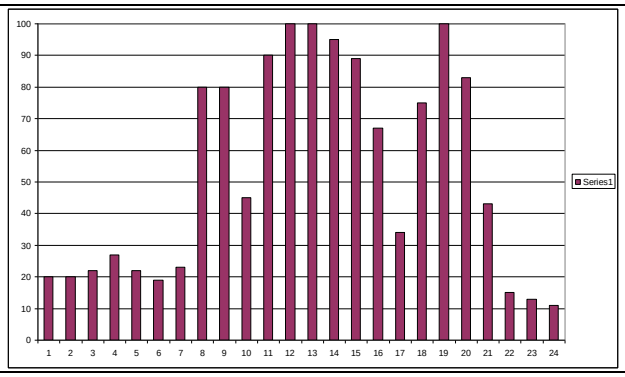
Бидејќи дневните дијаграми на потрошувачите се дадени во нормализирана форма, изразени во проценти од врвното оптоварување, ќе работиме со единечна врвна моќност P_M = 1 kW. Во тој случај, со помош на изразите (1)÷(16), за секој од наведените дневни дијаграми ќе ги добиеме следните карактеристики, прикажани во табелата 1.2. Обликот на дневите дијарграми, изразени во %, се прикажани на сликите 1.1 …… 1.6.

Табела 1.2. К-ки на типските дневни дијаграми на одделните категории потрошувачи за P_M = 1 kW

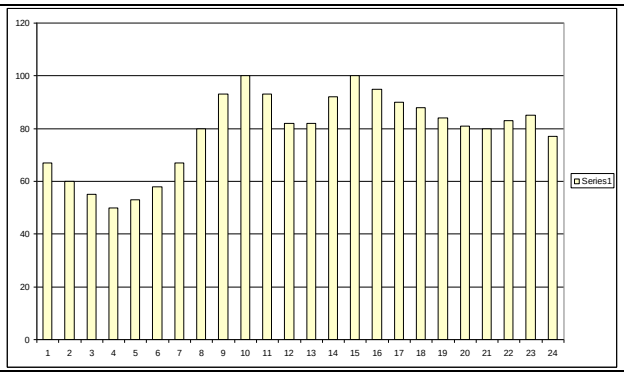
Категорија	Кратенка	W (kWh)	$P_{ср.}$ (kW)	T_M (h)	τ (h)	$m=T_M/24$	$\theta=\tau/24$
Домаќинства	D	10.750	0.44792	10.750	6.315	0.44792	0.26314
Комерција	K	12.730	0.53042	12.730	9.378	0.53042	0.39075
Индустрија	I	18.950	0.78958	18.950	15.482	0.78958	0.64506
Селски домаќинства	S	10.850	0.45208	10.850	6.447	0.45208	0.26862
Занаетчиство	Z	10.020	0.41750	10.020	7.794	0.41750	0.32475
Градежништво	G	7.970	0.33208	7.970	6.131	0.33208	0.25546
Осветление	O	11.000	0.45833	11.000	9.500	0.45833	0.39583
Константен товар	C	24.000	1.00000	24.000	24.000	1.00000	1.00000



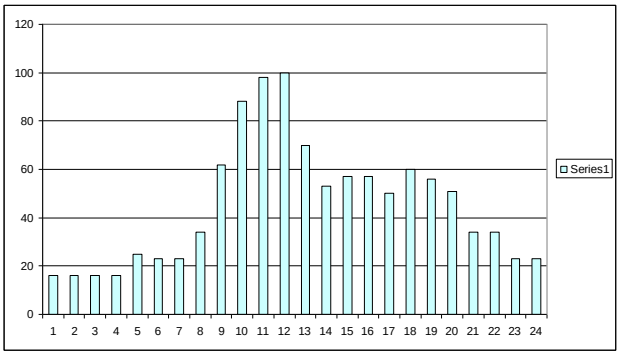
Слика 1.1. Домаќинства (D)



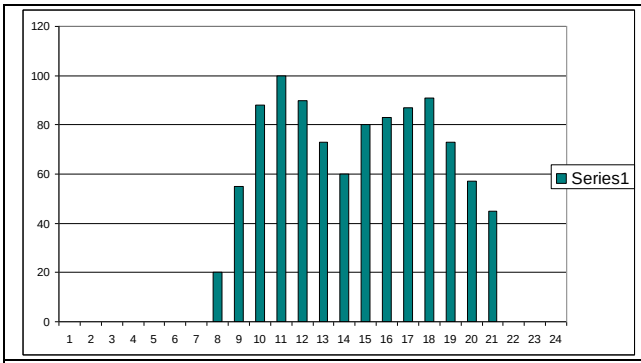
Слика 1.2. Комерција (K)



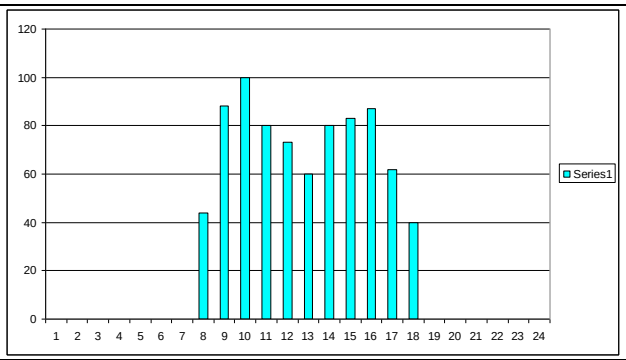
Слика 1.3. Индустрија (I)



Слика 1.4. Селски домаќинства (S)



Слика 1.5. Занаетчиство (Z)



Слика 1.6. Градежништво (G)

■ ■ ■

Задача 2. Нисконапонски кабел од типот PP 00 4×150 0,6/1 kV; $\underline{z}$ = (0,124+j0,06) Ω/km) со должина l=125 m напојува на својот крај група потрошувачи од категоријата „домаќинство“. Просечната дневна потрошувачка на електрична енергија на групата изнесува W_d=1935 kWh/дневно. Факторот на моќност е практично преку целиот ден константен и изнесува cosφ = 0,95. Потребно е:

а) да се пресмета просечното врвно оптоварување на кабелот P_M;

б) да се нацрта дневниот дијаграм на активното оптоварување;

в) да се пресметаат загубите на активна моќност во кабелот во режимот на максималното оптоварување ΔP_M;

г) да се пресметаат дневните загуби на активна енергија во кабелот ΔW_d.

Решение

а) Пресметување на врвното оптоваруавње P_M

Во задачата 1 беа пресметани фактор на товар m и факторот на загуби θ на типскиот потрошувач од категоријата „домаќинство“: m = 0,44792 и θ = 0,26314. Знаејќи го факторот на товар m и преземената дневна енергија W_d, ќе го добиеме средното $P_{\text{ср}}$ и врвното оптоварување на потрошувачот P_M:

$$P_M = \frac{W_d}{24 \cdot m} = \frac{1935}{24 \cdot 0,44792} = 180 \text{ kW};$$

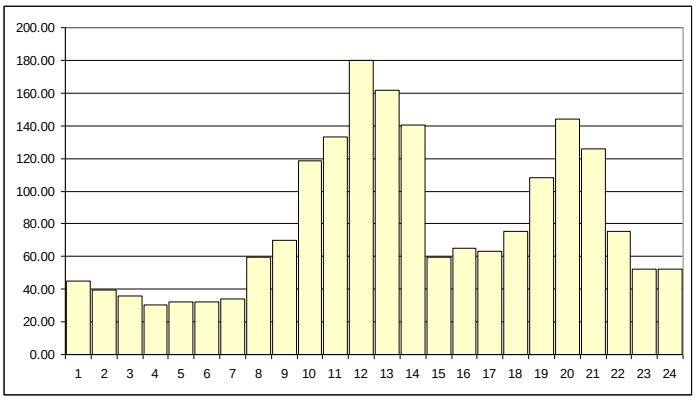
$$P_{\text{ср}} = m \cdot P_M = 0,44792 \cdot 360 = 80,63 \text{ kW}.$$

б) Дневен дијаграм на активното оптоварување

Дневниот дијаграм на активното оптоварување ќе го добиеме на едноставен начин, со помош на следниот израз:

$$P_i = \frac{p_i}{100} \cdot P_M; \; i = 1, 2, \; \ldots, 24. \tag{2.1}$$

Во изразот (2.1) со p_i е означена вредноста што се отчитува од втората редица (категорија „домаќинства“ – D) на табелала 1.1 од задача 1, којашто соодветствува на i–тиот временски интервал. На тој начин се добива следната слика за дневниот дијаграм на активното оптоварување на потрошувачот:



Слика 2.1. Дневен дијаграм на активна моќност на потрошувачот

в) Пресметка на загубите на активна моќност ΔP_M во режимот на максимално оптоварување

Загубите на активна моќност во кабелот во режимот на максимално оптоварување ќе бидат:

$$\Delta P_M = \frac{P_M^2 + Q_M^2}{U_n^2} \cdot r \cdot l = \frac{S_M^2}{U_n^2} \cdot r \cdot l = \frac{P_M^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi_M} \cdot r \cdot l \ ;$$

$$\Delta P_M = \frac{180^2}{0,4^2 \cdot 0,95^2} \cdot 0,125 \cdot 0,124 = 3478 \text{ W} \approx 3,478 \text{ kW}.$$

г) Пресметка на дневните загуби на активна енергија ΔW_d

Најнапред ќе го пресметаме "времето на загуби" на потрошувачот τ преку т.н. „фактор на загуби“ θ:

$$\tau = \theta \cdot T = 0,26314 \cdot 24 = 6,315 \text{ h/дневно}.$$

Загубите на енергија во кабелот во текот на еден ден ќе бидат:

$$\Delta W_d = \Delta P_M \cdot \tau = 3,478 \cdot 6,315 = 21,964 \text{ kWh/дневно}.$$

што изнесува (21,964/1935)·100 = 1,13% од испорачаната на електрична енергија.

■ ■ ■

Задача 3. Нисконапонска (НН) трансформаторска станица (ТС) напојува три извода. На првиот извод, преку кабел со параметри $\underline{z}_1$ = (0,206+j0,06) Ω/km, l_1 = 250 m, е приклучена станбена зграда која напојува потрошувачи од категоријата „домаќинство“. Зградата е приклучена на крајот од изводот и нејзината просечна дневна потрошувачка изнесува W_{d1} = 1020 kWh/ден; cosφ_1 =0,95. Вториот извод е надземен, со спроводници Al/Fe 50/8 [$\underline{z}_2$ = (0,64+j0,35) Ω/km; l_2=150 m]. Вкупната просечна дневна потрошувачка на вториот извод изнесува W_{d2} = 1180 kWh/дневно; cosφ_2 = 0,95. Може да се смета дека е потрошувачите од овој извод се исто така од категоријата „домаќинство“ и тие се рамномерно распределени по неговата должина.

Третиот извод, чијашто должина е само десетина метри, напојува индустриски потрошувач. Просечната дневна потрошувачка на индустрискиот потошувач изнесува W_{d3}=3790 kWh/ ден; cosφ_3 = 0,80. Облиците на дневните дијаграми $P(t)$ на одделните изводи се земаат од табелата 1.1. Потребно е:

а) Да се пресмета (процени) дневниот дијаграм на активна моќност на трансформаторот $P_T(t)$;

б) Да се пресмета дневниот дијаграм на привидна моќност на трансформаторот $S_T(t)$;

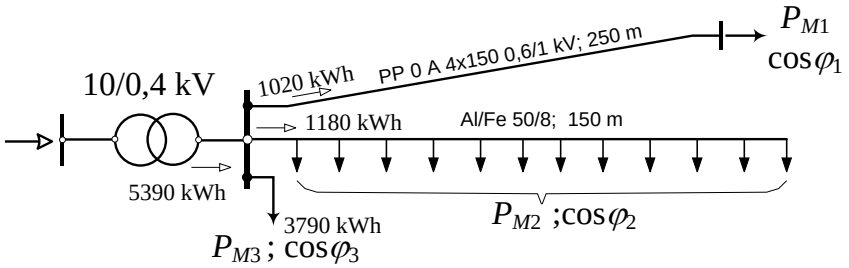
в) Да се пресметаат загубите на активна енергија ΔW_a1 и ΔW_a2 во првиот и вториот извод;

г) Да се пресметаат загубите на моќност $\Delta P_{M.T}$ во трансформаторот во режимот на максималното оптоварување и дневните загуби ΔW_{aT} на активна енергија во трансформаторот T;

д) Да се пресметаат вкупните загуби на активна моќност и енергија ΔP_Σ и ΔW_Σ во мрежата.

Податоци за трансформаторот во ТС СН/НН:

S_n = 630 kVA; U_{1n}/U_{2n} = 10/0,4 kV; u_k%=4%; i_0% = 1,8%; ΔP_{Cun} = 6,5 kW; ΔP_{Fe} = 1,3 kW.



Слика 3.1

Решение

Најнапред, тргнувајќи од познатите фактори на товарот m и θ, познатите употребни времиња T_M и познатите преземени дневни енергии W_d , на начин како што тоа беше направено во претходната задача 2, ќе ги пресметаме врвните оптоварувања на потрошувачите од сите три извода. На тој начин ќе добиеме:

<u>1 извод</u>:

W_{d1} = 1020 kWh/ден; m_1=0,448; θ_1=0,263; $\cos\varphi_1$ = 0,95; P_{M1} = 94,9 kW; Q_{M1} = 31.2 kvar;

<u>2 извод</u>:

W_{d2} = 1180 kWh/ден; m_2=0,448; θ_2=0,263; $\cos\varphi_2$ = 0,95; P_{M2} = 109,8 kW; Q_{M2} = 36.1 kvar;

<u>3 извод</u>:

W_{d3} = 3790 kWh/ден; m_3=0,790; θ_3=0,645; $\cos\varphi_3$ = 0,80; P_{M3} = 200 kW; Q_{M3} = 150 kvar.

Загубите на моќност и енергија во првиот и вториот извод ќе бидат:

$$\Delta P_{M1} = \frac{P_{M1}^2}{U_n^2 \cdot \cos^2\varphi_1} \cdot r_1 \cdot l_1 = \frac{94,9^2}{0,4^2 \cdot 0,95^2} \cdot 0,206 \cdot 0,25 = 3,212 \text{ kW};$$

$$\Delta W_{a1} = \Delta P_{M1} \cdot \tau_1 = 3,212 \cdot 6,315 = 20,3 \text{ kWh/дневно};$$

$$\Delta P_{M2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{M2}^2}{U_n^2 \cdot \cos^2\varphi_2} \cdot r_2 \cdot l_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{109,8^2}{0,4^2 \cdot 0,95^2} \cdot 0,64 \cdot 0,15 = 2,672 \text{ kW};$$

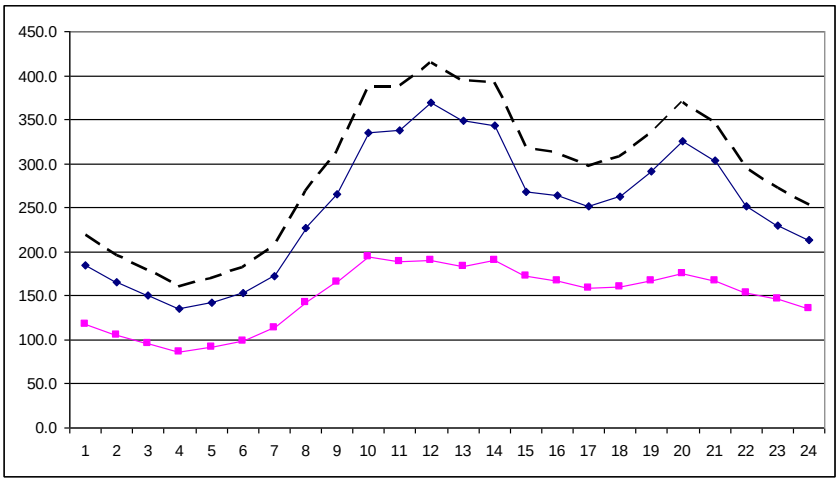
$$\Delta W_{a2} = \Delta P_{M2} \cdot \tau_2 = 2,672 \cdot 6,315 = 16,9 \text{ kWh/дневно}.$$

а) Пресметка на дневните дијаграми на активнотои реактивно оптоварување

Вредностите на саатните моќности $P_1(t)$; t = 1, 24 на првиот потрошувач ќе ги добиеме со помош на релацијата (2.1) и податоците од табелата 1.1 за формата на дневниот дијаграм на типскиот потрошувач од категоријата „домаќинство“. Наполно исто се постапува и при определувањето дијаграмот $P_2(t)$. Со занемарување на загубите во изводите, дневниот дијаграм на активната и реактивната моќност на трансформаторот ќе ги добиеме со едноставно сумирање на потрошувачката во првиот и вториот извод. На тој начин, сумирајки $\underline{S}_T(t) = \underline{S}_1(t) + \underline{S}_2(t)$)+ $\underline{S}_3(t)$ за секој саат во текот на денот ги добиваме добиваме дијаграмите $P_T(t)$, $Q_T(t)$ и $\underline{S}_T(i)$. Добиените резултати се прикажани во табелата 3.1 и на сликата 3.2.

Табела 3.1. Дневни дијаграми на оптоварување *P*(*t*) и *Q*(*t*) (kW, kvar)на елементите од мрежата

t (h)	$P_1(t)$	$Q_1(t)$	$P_2(t)$	$Q_2(t)$	$P_3(t)$	$Q_3(t)$	$P_T(t)$	$Q_T(t)$	$S_T(t)$
1	23.7	7.8	27.4	9.0	134.0	100.5	**185.2**	**117.3**	**219.2**
2	20.9	6.9	24.1	7.9	120.0	90.0	**165.0**	**104.8**	**195.5**
3	19.0	6.2	22.0	7.2	110.0	82.5	**150.9**	**96.0**	**178.8**
4	16.1	5.3	18.7	6.1	100.0	75.0	**134.8**	**86.4**	**160.1**
5	17.1	5.6	19.8	6.5	106.0	79.5	**142.8**	**91.6**	**169.7**
6	17.1	5.6	19.8	6.5	116.0	87.0	**152.8**	**99.1**	**182.2**
7	18.0	5.9	20.9	6.9	134.0	100.5	**172.9**	**113.3**	**206.7**
8	31.3	10.3	36.2	11.9	160.0	120.0	**227.5**	**142.2**	**268.3**
9	37.0	12.2	42.8	14.1	186.0	139.5	**265.8**	**165.7**	**313.2**
10	62.6	20.6	72.4	23.8	200.0	150.0	**335.1**	**194.4**	**387.4**
11	70.2	23.1	81.2	26.7	186.0	139.5	**337.4**	**189.3**	**386.9**
12	94.9	31.2	109.8	36.1	164.0	123.0	**368.7**	**190.3**	**414.9**
13	85.4	28.1	98.8	32.5	164.0	123.0	**348.2**	**183.5**	**393.6**
14	74.0	24.3	85.6	28.1	184.0	138.0	**343.6**	**190.5**	**392.9**
15	31.3	10.3	36.2	11.9	200.0	150.0	**267.5**	**172.2**	**318.2**
16	34.2	11.2	39.5	13.0	190.0	142.5	**263.7**	**166.7**	**312.0**
17	33.2	10.9	38.4	12.6	180.0	135.0	**251.6**	**158.5**	**297.4**
18	39.9	13.1	46.1	15.2	176.0	132.0	**262.0**	**160.3**	**307.1**
19	56.9	18.7	65.9	21.6	168.0	126.0	**290.8**	**166.4**	**335.0**
20	75.9	24.9	87.8	28.9	162.0	121.5	**325.7**	**175.3**	**369.9**
21	66.4	21.8	76.8	25.3	160.0	120.0	**303.3**	**167.1**	**346.2**
22	39.9	13.1	46.1	15.2	166.0	124.5	**252.0**	**152.8**	**294.6**
23	27.5	9.0	31.8	10.5	170.0	127.5	**229.3**	**147.0**	**272.4**
24	27.5	9.0	31.8	10.5	154.0	115.5	**213.3**	**135.0**	**252.5**



Слика 3.2. Дневни дијаграми на моќност на трансформаторската станица: *S(t)* – горна крива; *P*(*t*) – средна крива; *Q(t)* – долна крива

Забележуваме дека врвното оптоварување на трансформаторот $P_{M.T}$, коешто се остварува во $i = 12$ часот и изнесува 368,7 kW, е помало од збирот $\Sigma P_{Mi} = P_{M1} + P_{M2} + P_{M3}$ = 94,9+109,8 +200 = 404,7 kW на врвните оптоварања од сите три изводи. Односот помеѓу сумарното врвно оптоварување $P_{M.T}$ и збирот ΣP_{Mi} на моќностите на потрошувачите во посматраниот режим на максимално оптоварување се нарекува коефициент на едновременост на врвното оптоварување на трансформаторската станица:

$$k_e = \frac{P_{M.T}}{\Sigma P_{Mi}} = \frac{368,7}{404,7} = 0,911.$$

Овој коефициент е секогаш $k_e \leq 1$ и тоа се должи на фактот што обично дијаграмите на оптоварување на одделните потрошувачи во една мрежа се „фазно изместени“ така што не доаѓа до совпаѓање на моментите на настанување на нивните врвни оптоварувања. Кај ТС СН/НН овој коефициент обично се движи во границите $0,90 \leq k_e \leq 0,95$ [19].

Со помош на податоците од табелата 3.1 можеме да го пресметаме времето на загуби τ на оптоварувањето на трансформаторот:

$$S_M = S(t)_{(t=12)} = 414,9 \text{ kVA}.$$

$$\tau = \sum_{i=1}^{24} \frac{S_i^2}{S_M^2} \cdot \Delta t_i = \frac{219,2^2}{414,9^2} \cdot 1 + \frac{195,5^2}{414,9^2} \cdot 1 + \ldots + \frac{252,5^2}{414,9^2} \cdot 1 = 12,637 \text{ h}.$$

Конечно ќе ги пресметаме загубите на активна моќност ΔP_Σ во режимот на максималното оптоварување, кое се постигнува во t=12 h, дневните загуби ΔW_{aT} на активна енергија во трансформаторот како и вкупните дневни загуби на енергија $\Delta W_{a\Sigma}$:

$$\Delta P_T = \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{Cun}} \cdot \left(S_M / S_{\text{n}}\right)^2;$$

$$\Delta P_T = 1,3 + 6,5 \cdot (414,9/630)^2 = 1,3 + 2,82 = 4,12 \text{ kW};$$

$$\Delta W_{aT} = \Delta P_{\text{Fe}} \cdot T + \Delta P_{\text{Cun}} \cdot \left(S_M / S_{\text{n}}\right)^2 \cdot \tau =$$

$$= 1,3 \cdot 24 + 6,5 \cdot (414,9/630)^2 \cdot 12,637;$$

$$\Delta W_{aT} = 31,2 + 35,63 = 66,83 \text{ kWh}.$$

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_T = 3,212 + 2,672 + 4,12 = 10 \text{ kW};$$

$$\Delta W_\Sigma = \Delta W_{a1} + \Delta W_{a2} + \Delta W_{aT} = 20,3 + 16,9 + 66,83 = 104,03 \text{ kWh/дневно},$$

или во проценти:

$$\Delta W_\Sigma = 1,74\%.$$

■ ■ ■

Задача 4. Група потрошувачи со вкупна моќност $\underline{S}$ = (1000 + j500) kVA се напојува од една трансформаторска станица 10/0,4 kV/kV. Трансформацијата на електричната енергија се врши со три идентични, паралелно врзани, трансформатори при што нивниот број во групата n може да се менува. Да се определи бројот на трансформаторите во погонот n_O = ? така што загубите на активна моќност ΔP_T во трансформацијата ќе бидат минимални.

Податоци за секој трансформатор: 10/0,4 kV/kV; 1000 kVA;
ΔP_{Cun}= 13,5 kW; ΔP_{Fe} = 2,7 kW; u_k% = 6%; i_0 = 2%.

Решение

Ако со S ја означиме привидната моќност на потрошувачите:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{1000^2 + 500^2} = 1118 \text{ kVA},,$$

тогаш низ секој трансформатор во групата ќе тече иста моќност $S' = S/n$. Во тој случај загубите на активна моќност $\Delta P_{(1)}$ во еден од трансформаторите ќе изнесуваат:

$$\Delta P_{(1)} = \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{Cun}} \cdot \left[\frac{S'}{S_{\text{n}}}\right]^2 = \Delta P_{\text{Fe}} + \frac{1}{n^2} \cdot \Delta P_{\text{Cun}} \cdot \left[\frac{S}{S_{\text{n}}}\right]^2 ,$$

додека вкупните загуби на активна моќност во групата од n трансформатори ќе биде n пати поголема, или:

$$\Delta P_{(n)} = n \cdot \Delta P_{(1)} = n \cdot \Delta P_{\text{Fe}} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{\text{Cun}} \cdot \left[\frac{S}{S_{\text{n}}}\right]^2 = n \cdot \Delta P_{\text{Fe}} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{\text{Cun}} \cdot \alpha^2; \qquad (\alpha = \frac{S}{S_{\text{n}}}).$$

Од последната равенка гледаме дека за даден товар S загубите на активната моќност во трансформацијата зависат само од бројот на трансформаторите во погон n. Оптималниот број на трансформатори во групата n_O за кој загубите $\Delta P = \Delta P_{(n)}$ се минимални, ќе го добиеме од условот:

$$\frac{d(\Delta P)}{dn} = 0. \quad \text{или:} \quad \Delta P_{Fe} - \Delta P_{Cun} \cdot \frac{\alpha^2}{n^2} = 0..$$

Од последниот израз се добива:

$$n = \alpha \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{Cun}}{\Delta P_{Fe}}} = \frac{S}{S_n} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{Cun}}{\Delta P_{Fe}}}.$$

Во конкретниот случај за оптималното решение n_O ќе добиеме:

$$n_{\text{O}} = \frac{S}{S_n} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{Cun}}{\Delta P_{Fe}}} = \frac{1118}{1000} \cdot \sqrt{\frac{13,5}{2,7}} = 2,5,$$

Бидејќи n е цел број тоа ќе значи дека оптималниот број на трансформатори во групата n_O со којшто се постига загубите да бидат минимални ќе биде $n_O = 2$ или $n_O = 3$. Во случајот кога е $n_O = 2$ добиваме:

$$\Delta P_{(2)} = 2 \cdot \Delta P_{Fe} + (1/2) \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 = 2 \cdot 2,7 + (1/2) \cdot 13,7 \cdot 1,118^2 = 12,95 \text{ kW},$$

додека во случајот кога имаме $n_O = 3$ трансформатори во групата, вкупните загуби ќе бидат:

$$\Delta P_{(3)} = 3 \cdot \Delta P_{Fe} + (1/3) \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 = 3 \cdot 2,7 + (1/3) \cdot 13,7 \cdot 1,118^2 = 13,13 \text{ kW}.$$

Одовде произлегува дека за дадениот режим на работа групата ќе треба да работи со два трансформатора, т.е. $n_O = 2$.

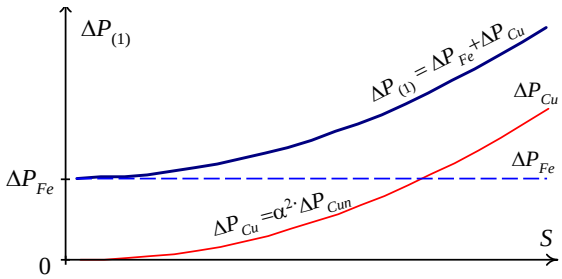
■ ■ ■

Задача 5. Во една дистрибутивна градска трансформаторска станица 35/10 kV/kV се инсталирани 4 идентични, паралелно врзани трансформатори. Бројот n на трансформаторите во групата може да се менува. Бидејќи дневниот дијаграм на оптоварувањето на трафостаницата е изразито нерамномерен, со цел да се зголеми економичноста на погонот во смисла на намалување на загубите на моќност и енергија во трансформацијата, бројот на единиците во погонот n ќе треба да се менува сообразно со сумарното оптоварување на трафостаницата.

Да се утврди економичниот програм на вклучување (исклучување) на трансформаторските единици во групата во сообразност со нејзиното оптоварување така што ќе се постигнат најмали загуби на активна моќност и енергија.

Податоци за секој трансформатор: S_n = 35/10 kV/kV ; 10 MVA ; ΔP_{Cun}= 96 kW ; ΔP_{Fe} = 30 kW; u_k% = 8% ; i_0 =1,2%.

Решение



Слика 5.1. Зависност на загубите $\Delta P_{(1)}$ во еден трансформатор од степенот на неговото оптоварување

Загубите на моќност во енергетските трансформатори се состојат од константен дел (загуби во железото ΔP_{Fe}) и варијабилен дел (џулови загуби во бакарот ΔP_{Cu}). Според изразот (2), доколку е познат коефициентот на оптоварување на трансформаторот $\alpha = S/S_n$, загубата на моќност $\Delta P_{(1)}$ во случајот кога се работи за само еден трансформатор, ќе биде:

$$\Delta P_{(1)} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot (S / S_n)^2 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 .$$

Зависноста на загубите $\Delta P(1)$ од привидната моќност на товарот S е графички прикажана на сликата 5.1.

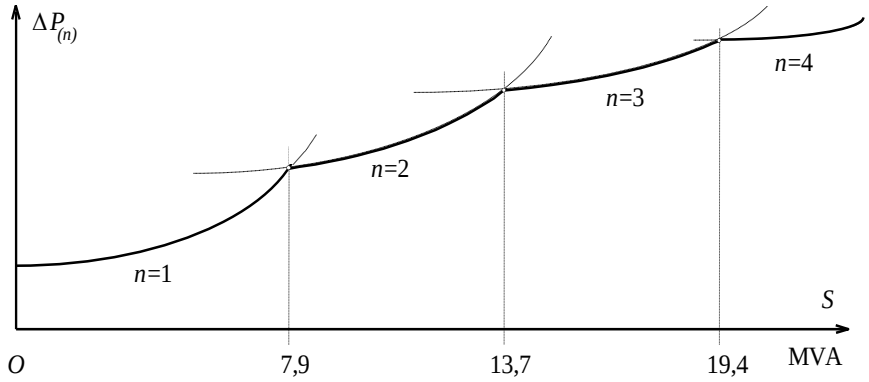
Во општ случај, кога бројот на трансформаторите во групата n е произволен, вкупните загуби на активна моќност во трансформацијата, согласно изнесеното во примерот 2, ќе бидат:

$$\Delta P_{(n)} = n \cdot \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot (\frac{S}{S_{\mathrm{n}}})^2 = n \cdot \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \alpha^2 ; (\alpha = \frac{S}{S_{\mathrm{n}}}).$$

При работа на вкупно n+1 трансформатори во групата, вкупните загуби ќе бидат:

$$\Delta P_{(n+1)} = (n+1) \cdot \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \frac{1}{n+1} \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot (\frac{S}{S_{\mathrm{n}}})^2 = (n+1) \cdot \Delta P_{\mathrm{Fe}} + \frac{1}{n+1} \cdot \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \alpha^2$$

Од последните две равенки можеме да ја определиме привидната моќност на групата $S_{n \to n+1}$ за која се постигнува условот $\Delta P_{(n)} = \Delta P_{(n+1)}$. Оваа моќност ќе биде наедно и граничната привидна моќност на товарот при која ќе треба да се премине од работа со n, на работа со вкупно n+1 трансформатори во групата, кога товарот расте, односно да се премине од работа со вкупно n+1 на вкупно n трансформатори, кога тој се намалува. Графичкиот начин на определувањето на граничната привидна моќност е прикажан на сликата 5.2.



Слика 5.2. Зависност на загубите $\Delta P_{(n)}$ во група од *n* идентични, паралелно врзани трансформатори од сумарната привидна моќност на потрошувачот *S*.

Во согласност со кажаното, ќе имаме:

$$n \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot (\frac{S_{n \to n+1}}{S_n})^2 = (n+1) \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n+1} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot (\frac{S_{n \to n+1}}{S_n})^2 .$$

Од последната релација се добива бараната моќност $S = S_{n \to n+1}$:

$$S_{n \to n+1} = S_{\mathrm{n}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{\mathrm{Fe}}}{\Delta P_{\mathrm{Cun}}} \cdot n \cdot (n+1)} .$$

Притоа е:

$$\frac{\Delta P_{\mathrm{Fe}}}{\Delta P_{\mathrm{Cun}}} = \frac{30}{96} = 0,3125 .$$

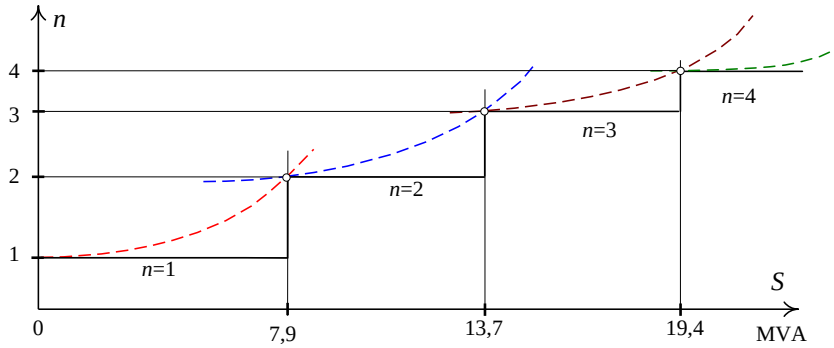
На тој начин ги добиваме следните гранични вредности на товарот:

$$S_{1 \to 2} = 10 \cdot \sqrt{1 \cdot 2 \cdot 0,3125} = 7,9 \mathrm{MVA};$$

$$S_{2 \to 3} = 10 \cdot \sqrt{2 \cdot 3 \cdot 0,3125} = 13,7 \mathrm{MVA};$$

$$S_{3 \to 4} = 10 \cdot \sqrt{3 \cdot 4 \cdot 0,3125} = 19,4 \mathrm{MVA}.$$

Зависноста на потребниот број трансформатори во групата *n* од привидната моќност на потрошувачите на трафостаницата S, т.е. „оптималниот возен ред“ на групата трансформатори, е прикажан на сл. 5.3.



Слика 5.3. Зависност на потребниот број *n* на трансформатори во групата од оптоварувањето *S*

■ ■ ■

Задача 6. На сликата 6.1 е прикажан 35 kV преносен систем, составен од два идентични 35 kV далекуводи и два идентични трансформатори 35/10 kV/kV, кои работат во паралела. Системот напојува потрошувач (или поточно речено група потрошувачи) кој работи со константен фактор на моќност cosφ = 0,8 = const. и со познат подреден годишен дијаграм на оптоварување, прикажан со следната табела:

Табела 6.1. Податоци за годишниот дијаграм на оптоварување на потрошувачот

Период (h)	0 – 2000	2000 – 4000	4000 – 8760
P (MW)	10	5	2
Q (Mvar)	7,5	3,75	1,5
S (Mvar)	12,5	6,25	2,5

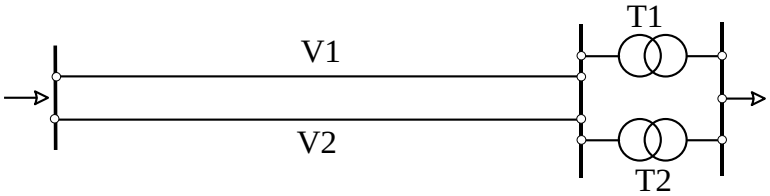
Да се определат загубите на привидната моќност $\Delta\underline{S} = \Delta P + j\Delta Q$ во режимот на максималното оптоварување како и вкупните годишни загуби на активна енергија ΔW во системот. Задачата да се реши приближно, така што зголемувањето на оптоварувањето на водовите поради загубите во трансформацијата ќе се занемари, а ќе се занемари и капацитивноста на водовите.

Податоци за параметрите на елементите во системот:

Вод V1: $\underline{z}$ = (0,28 + j0,43) Ω/km; l = 15 km. (Водот V2 е идентичен со водот V1, т.е. V2 ≡ V1).

Трансформатор T1: 7.500 kVA ; 35/10,5 kV/kV ; ΔP_{Cun} = 75 kW; ΔP_{Fe} = 24 kW ;
u_k% = 7,5% ; i_0% = 3,5%

Трансформатор T2: (T2≡T1).



Слика 6.7.1. Шематски приказ на анализираниот преносен систем

Решение

Вкупните загуби на моќност во системот ќе бидат збир од загубите во сите негови елементи. Според тоа за режимот на максималното оптоварување ќе имаме:

S_M = 12,5 MVA $S'_M = S_M / 2$ = 6,25 MVA .

Понатаму, за сумарнитse загуби во преносниот систем $\Delta\underline{S}_\Sigma$ ќе биде:

$$\underline{\Delta S}_\Sigma = 2\cdot\underline{\Delta S}_V + 2\cdot\underline{\Delta S}_T = 2\cdot(\Delta P_V + \Delta P_T) + j2\cdot(\Delta Q_V + \Delta Q_T)\,.$$

Бидејќи низ секој елемент ќе тече привидна моќност $S = S'_M$, ќе имаме:

$$\underline{\Delta S}_V = \frac{S^2}{U_n^2}\cdot(R_V + jX_V);$$

$$\underline{\Delta S}_V = \frac{6,25^2}{35^2}\cdot(0,28 + j0,43)\cdot 15 = (0,134 + j0,206)\,\text{MVA},$$

$$\Delta P_T = \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{Cun}} \cdot \alpha^2 = 24 + 25 \cdot (6,25/7,5)^2 = 76,1\,\text{kW},$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{\text{Fe}} + X_T \cdot \frac{S^2}{U_{\text{n}}^2} = (\frac{i_o\%}{100} + \frac{u_k\%}{100} \cdot \alpha^2) \cdot S_{\text{n}},$$

$$\Delta Q_T = \left[\frac{3,5}{100} + \frac{7,5}{100} \cdot \frac{6,25^2}{7,5^2}\right] \cdot 7500 = 653\,\text{kvar},$$

$$\Delta \underline{S}_T = \Delta P_T + j\Delta Q_T = (0,076 + j0,653)\ \text{MVA},$$

Значи вкупните загуби на моќност во системот во режимот на максималното оптоварување ќе изнесуваат:

$$\Delta \underline{S}_\Sigma = 2 \cdot (0,134 + j0,206) + 2 \cdot (0,076 + j0,653) = (0,420 + j0,718)\ \text{MVA}.$$

Годишните загуби на активна енергија ΔW_Σ во разгледуваниот преносен систем ќе бидат:

$$\Delta W_\Sigma = 2 \cdot \Delta W_V + 2 \cdot \Delta W_T = 2 \cdot \frac{S^2}{U_{\text{n}}^2} \cdot R \cdot \tau + 2 \cdot (\Delta P_{\text{Fe}} \cdot T + \Delta P_{\text{Cun}} \cdot \frac{S^2}{S_{\text{n}}^2} \cdot \tau),$$

$$\tau = \sum_{i=1}^{3} \frac{S_i^2}{S_M^2} \cdot \Delta t_i = \sum_{i=1}^{3} (\frac{P_i / \cos\varphi_i)}{P_M / \cos\varphi_M})^2 \cdot \Delta t_i,$$

$$\tau = \frac{12,5^2 \cdot 2000 + 6,25^2 \cdot 2000 + 2,5^2 \cdot 4760}{12,5^2} = 2650\ \text{h},$$

$$\Delta W_V = \frac{6,25^2}{35^2} \cdot 4,2 \cdot 2650 = 355\,\text{MWh};$$

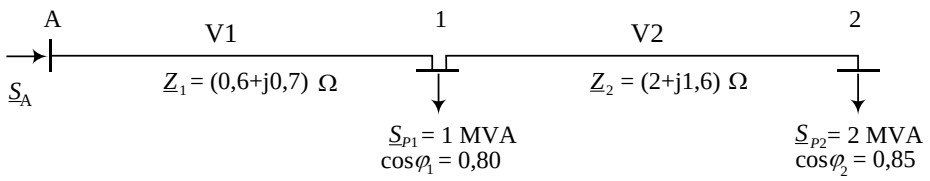
$$\Delta W_T = 0,024 \cdot 8760 + 0,075 \cdot (\frac{6,25}{7,5})^2 \cdot 2650 = 348\,\text{MWh},$$

$$\Delta W_\Sigma = 2 \cdot 355 + 2 \cdot 348 = 1406\,\text{MWh/godi}\ \{\ \text{no}.$$

■ ■ ■

Задача 7. На сликата 7.1 е прикажана 10 kV надземна мрежа. Познат е напонот при потрошувачот приклучен во точката 2, $\underline{U}_2$ = 10/$\underline{0}^o$ kV. Напонот во напојната точка А изнесува, U_A= 10,77 kV, а загубата на моќност во мрежата $\Delta\underline{S}$ = (0,132+j0,125) MVA. Да се пресмета еквивалентната отпорност (импеданција) на мрежата.

Напомена. Напонските прилики, тековите на моќности како и вкупните загуби $\Delta\underline{S}$ во мрежата се пресметани во задачата 2.13?.



Слика 7.1. 10 kV надземна мрежа анализирана во задачата 2.13

Решение:

Лесно се покажува дека моќностите на потрошувачите $\underline{S}_{P1}$ и $\underline{S}_{P2}$ изнесуваат:

$$\underline{S}_{P1} = (0,8 + j0,6)\,\text{MVA};\quad \underline{S}_{P2} = (1,7 + j1,053)\,\text{MVA};\quad \Sigma\underline{S}_{P} = \underline{S}_{P1} + \underline{S}_{P2} = (2,5 + j1,653)\ \text{MVA}.$$

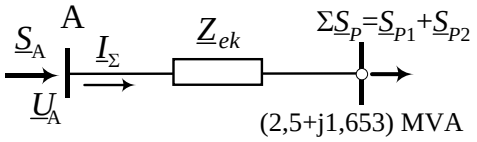
Бидејќи загубите во мрежата изнесуваат $\Delta\underline{S}$ = (0,132+j0,125) MVA, за моќноста $\underline{S}_A$ во напојната точка и за струјата I_Σ во главната делница се добива:

$$\underline{S}_{A} = \Sigma\underline{S}_{P} + \Delta\underline{S} = (2,632 + j1,778) = 3,176 \cdot e^{j34^{o}}\ \text{MVA};$$

$$I_{\Sigma} = I_{A} = S_{A}/(\sqrt{3}\cdot U_{A}) = 3,176/(1,732\cdot 10,77);$$

$$I_{\Sigma} = 0,17027\ \text{kA} \equiv 170,27\ \text{A}.$$

Според методот на „еквивалентна отпорност“, секоја мрежа може да се претстави со едно просто електрично коло во коешто загубите на моќност ќе бидат еднакви со оние што се остваруваат во вистинската мрежа. Во конкретниот случај анализираната мрежа може да се претстави на наједоставен начин со една единствена редна импедација, како што е тоа прикажано на сликата 7.2. Доколку во мрежата имаше и трансформатори тогаш во еквивалентот на мрежата ќе имаше и еквивалентен трансформатор.



Слика 7.2. Надземна мрежа од сликата 7.1 прикажана со нејзиниот еквивалент добиен според методот на еквивалентна опторност

Тргнувајќи од потребниот услов загубите $\Delta\underline{S}$ во реалната мрежа и во нејзиниот еквивалент да бидат еднакви, се добиваат параметрите на екивалентната имеданција $\underline{Z}_{ek}$:

$$\Delta\underline{S} = 3\cdot\underline{Z}_{ek}\cdot I_{\Sigma}^{2} \;\Rightarrow\; \underline{Z}_{ek} = \frac{\Delta\underline{S}}{3I_{\Sigma}^{2}} = \frac{(132 + j125)\cdot 10^{3}}{3\cdot 170,27^{2}};$$

$$\Delta\underline{S} = (1,49044 + j1,41236)\ \Omega.$$

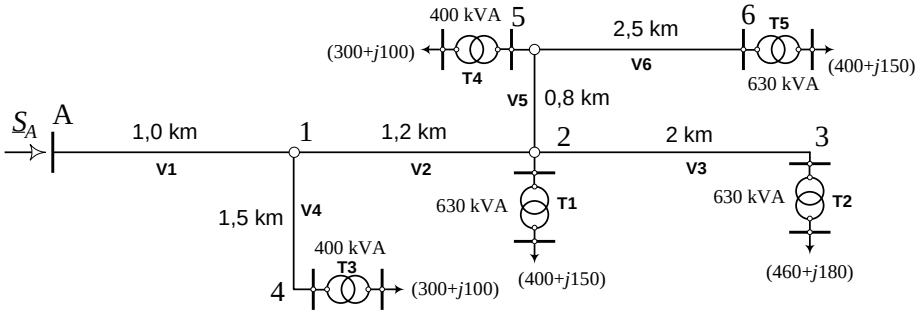
Според тоа за напојната мрежа преку која се напојува разгледуваната СН мрежа е сосема сеедно дали во напојната точка „А“ е приклучена вистинската мрежа од сликата 7.1 или пак нејзиниот еквивалент од сликата 7.2.

■ ■ ■

Задача 8. Се посматра еден извод од 10 kV надземна мрежа од кој што се напојуваат пет ТС СН/НН (слика 8.1). Магистралниот дел од изводот А–1–2–3 е изведен со спроводници Al/^ 70/12 mm^2, [$\underline{z}_1$=(0,46+j0,35) Ω/km] додека отцепите 1–4, 2–5 и 5–6 со спроводници Al/^ 35/6 mm^2 [$\underline{z}_2$=(0,64+j0,38) Ω/km]. Должините на поедините делници од мрежата, изразени во (km), како и моќностите на поедините потрошувачи во режимот на максимално оптоварување, изразени во (kVA), се прикажани на сликата. Напонот во напојната точка А изнесува, U_A = 10,3 kV = const. За енергетските трансформатори се познати следните податоци:

	S_n	U_{1n}/U_{2n}	u_k%	i_0%	ΔP_{Cun}	ΔP_{Fe}	ΔQ_{Fe}
1	630 kVA	10/0,4 kV/kV	4%	1,8%	6,5 kW	1,30 kW	11,34 kvar
2	400 kVA	10/0,4 kV/kV	4%	2,0%	4,6 kW	0,93 kW	8,0 kvar

Да се пресмета еквивалентната отпорност на мрежата и да се нацрта соодветната еквивалентна заменска шема. Со помош на неа да се пресметаат загубите $\Delta\underline{S}$ во мрежата.



Слика 8.1. Шема на разгледуваниот 10 kV извод од посматраната надземна мрежа.

Решение:

Најнапред ќе ги пресметаме параметрите $\underline{Z}=(R+jX)$ на редните гранки од поедините елементи на мрежата. За водовите тие се пресметуваат со следните релации:

$\underline{Z}_V = (R_V + jX_V) = \underline{z}\cdot l,$

додека за трансформаторите важат следните општи релации:

$$R_T = \Delta P_{\text{Cun}} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2}; \quad Z_T = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}; \quad X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2};$$

$$\underline{Z}_T = (R_T + jX_T).$$

Коефициентите на учество $\underline{k}_i$ се добиваат приближно, како однос помеѓу моќноста $\underline{S}_\Sigma(i)$ што тече низ посматраната гранка i и сумарната моќност $\underline{S}_A = \underline{S}_\Sigma(1)$ на главната делница А−1. Така, на пример, за петтиот елемент на мрежата, водот V5, моќноста $\underline{S}_\Sigma(5)$ ќе добие со собирање на моќностите на потрошувачите на трансформаторите Т4 и Т5 бидејќи само тие се напојуваат преку таа делница. Значи $\underline{S}_\Sigma(5) = (300+j100) + (400+j150) = (700+j250)$ kVA.

Приближните вредности на моќностите низ поедините елементи од мрежата можат да се добијат како и во случајот со 5−тата делница, со примена на I Кирхофов закон за моќности. Сумарната моќност на главната делница $\underline{S}_A$ ќе ја добиеме со просто сумирање на моќностите на сите потрошувачи, т.е.:

$$\underline{S}_A = (400 + j150) + (460 + j180) + (300 + j100) + (300 + j100) + (400 + j150);$$
$$\underline{S}_A = (1860 + j680) \text{ kVA}.$$

Според тоа, коефициентот $\underline{k}_5$ за 5−тата делница ќе биде:

$$\underline{k}_5 = \frac{\underline{S}_\Sigma(5)}{\underline{S}_A} = \frac{(700 + j250)}{(1860 + j680)} = (0,375 - j0,003);$$

$$|\underline{k}_5|^2 = (0,375^2 + 0,003^2) = 0,141.$$

Пресметаните вредности $\underline{Z}_V$ и $\underline{Z}_T$ за редните импеданции на одделните водови и трансформатори од мрежата се прикажани во табелата 8.1. Во истата табела се сместени и вредностите на пресметаните коефициенти $\underline{k}_i$ за секоја од гранките од мрежата, пресметани на претходно опишаниот начин.

Табела 8.1. Резултати од пресметките на импеданциите $\underline{Z}(i)$ и коефииентите на распределба $\underline{k}_i$

i	елем.	$R(i)$	$X(i)$	$P_\Sigma(i)$	$Q_\Sigma(i)$	$\mathrm{Re}\{\underline{k}_i\}$	$\mathrm{Im}\{\underline{k}_i\}$	$\lvert\underline{k}_i\rvert$	$\lvert\underline{k}_i\rvert^2$	$\lvert\underline{k}_i\rvert^2\cdot R(i)$	$\lvert\underline{k}_i\rvert^2\cdot X(i)$
/	тип	Ω	Ω	kW	kvar	/	/	/	/	Ω	Ω
1	V1	0.460	0.350	1860	680	1.000	0.000	1.000	1.000	0.460	0.350
2	V2	0.552	0.420	1560	580	0.840	0.005	0.840	0.706	0.390	0.297
3	V3	0.920	0.700	1160	430	0.625	0.003	0.625	0.390	0.359	0.273
4	V4	0.960	0.570	300	100	0.160	-0.005	0.160	0.025	0.024	0.015
5	V5	0.512	0.304	700	250	0.375	-0.003	0.375	0.141	0.072	0.043
6	V6	1.600	0.950	400	150	0.216	0.002	0.216	0.047	0.074	0.044
7	T1	1.638	6.134	400	150	0.216	0.002	0.216	0.047	0.076	0.285
8	T2	1.638	6.134	460	180	0.249	0.006	0.249	0.062	0.102	0.382
9	T3	2.875	9.578	300	100	0.160	-0.005	0.160	0.025	0.073	0.244
10	T4	2.875	9.578	300	100	0.160	-0.005	0.160	0.025	0.073	0.244
11	T5	1.638	6.134	400	150	0.216	0.002	0.216	0.047	0.076	0.285

Сумарните загуби во железо, т.е. „константните загуби“ се добиваат со сумирање на загубите во железо во сите енергетски трансформатори. , т.е.:

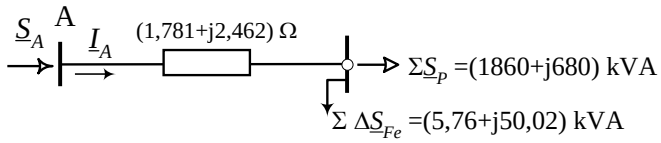
$$\Sigma\Delta\underline{S}_{\mathrm{Fe}} = 2\cdot(0{,}93 + j8{,}00) + 3\cdot(1{,}3 + j11{,}34) = (5{,}76 + j50{,}02)\ \mathrm{kVA}.$$

Параметрите $\underline{Z}_{ek} = (R_{ek} + jX_{ek})$ на редната гранка на „еквивалентната мрежа“ ќе се добие со сумирање на последните две колони од табелата 8.1:

$$R_{ek} = \sum_{i=1}^{11} |k_i|^2 \cdot R(i) = 1{,}781\ \Omega; \quad X_{ek} = \sum_{i=1}^{11} |k_i|^2 \cdot X(i) = 2{,}462\ \Omega;$$

$$Z_{ek} = (1{,}781 + j2{,}462)\ \Omega.$$

Според тоа целата мрежа од сликата 8.1 може да се претстави со еквивалентото коло прикажано сликата 8.2.



Слика 8.2 Еквивалентен модел на дистрибутивната мрежа од слика 8.1

Вкупните загуби на моќност во мрежата $\Delta\underline{S}$ ќе се добијат на следниот начин:

$$\underline{S}_{ek} = \Sigma\underline{S}_P + \Sigma\Delta\underline{S}_{Fe} = (1860 + j680) + (5{,}76 + j50{,}02);$$
$$\underline{S}_{ek} = (1865{,}76 + j730{,}02)\ \mathrm{kVA}.$$

$$\Delta\underline{S} = Z_{ek}\cdot\frac{|\underline{S}_{ek}|^2}{U_n^2} = (1{,}781 + j2{,}462)\cdot\frac{1865{,}76^2 + 730{,}02^2}{10^2};$$

$$\Delta\underline{S} = (71{,}5 + j98{,}8)\ \mathrm{kVA}.$$

Според тоа моќноста $\underline{S}_{\mathrm{A}}$ што мрењжата ја влече од напојната точка ќе биде:

$$\underline{S}_{\mathrm{A}} = \underline{S}_{ek} + \Delta\underline{S} = (1937{,}26 + j828{,}82) = 2082{,}6\cdot e^{j22^\circ}\ \mathrm{kVA};$$

$$I_{\mathrm{A}} = 120{,}24\ \mathrm{A}.$$

■ ■ ■

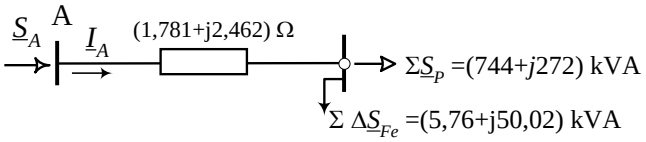
Задача 9. Колкави ќе бидат загубите на моќност во мрежата од претходната задача во режимот на минималното оптоварување ако се знае дека е моќностите на потрошувачите во тој режим се за 2,5 пати помали отколку истите во режимот на максималното оптоварување.

Решение:

Бидејќи просторната распределба на товарот во мрежата во режимот на минималното оптоварување ќе биде иста и за режимот на минималното оптоварување, коефициентите на учество $\underline{k}_i$, па според тоа и параметрите $\underline{Z}_{ek} = (R_{ek}+jX_{ek})$ на еквивалентниот модел на мрежата ќе останат исти како и во претходниот режим. Единствената разлика во моделот ќе биде моќноста $\Sigma\underline{S}_P$ на потрошувачката, која сега ќе биде:

$$\Sigma\underline{S}_{\mathrm{P}} = (1860 + j680)/2,5 = (744 + j272)\ \mathrm{kVA}.$$

Според тоа, во режимот на минималното оптоварување ќе се користи следната еквивалентна шема на мрежата:



Слика 9.1 Еквивалентен модел на дистрибутивната мрежа од слика 8.1 за режимот на минално оптоварување

Вкупните загуби на моќност во мрежата $\Delta\underline{S}$ сега ќе се бидат помали:

$$\underline{S}_{ek} = \Sigma\underline{S}_{\mathrm{P}} + \Sigma\Delta\underline{S}_{\mathrm{Fe}} = (744 + j272) + (5,76 + j50,02);$$
$$\underline{S}_{ek} = (749,76 + j322,02)\ \mathrm{kVA},$$

$$\Delta\underline{S} = Z_{ek} \cdot \frac{|\underline{S}_{ek}|^2}{U_{\mathrm{n}}^2} = (1,781 + j2,462) \cdot \frac{749,76^2 + 322,02^2}{10^2};$$

$$\Delta\underline{S} = (11,44 + j15,81)\ \mathrm{kVA}.$$

Според тоа моќноста $\underline{S}_A$ што мрежата ја влече од напојната точка ќе биде:

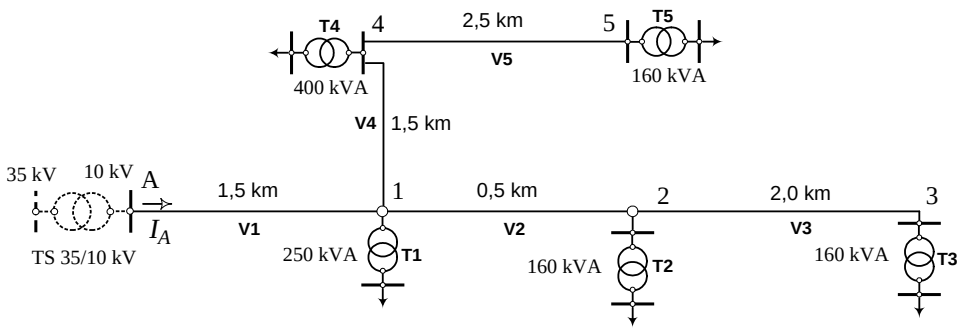
$$\underline{S}_A = \underline{S}_{ek} + \Delta\underline{S} = (761,2 + j337,83) = 832,8 \cdot e^{j23,9^\circ}\ \mathrm{kVA};$$

$$I_{\mathrm{A}} = 48,08\ \mathrm{A}.$$

■ ■ ■

Задача 10. На сликата 10.1 е прикажан извод од една 10 kV надземна мрежа, напојувана од регионална трансформаторска станица TS 35/10 kV/kV. Сите водови во мрежата се со ист пресек Al/^ 50/8 mm^2 и со исти подолжни параметри $\underline{z} = (r+jx) = (0,64+j0,38)\ \Omega/\mathrm{km}$. Со максиграф е отчитана максималната вредност на струјата што мрежата ја презема од напојна точка $I_{\mathrm{A}} = 60$ A. Покрај тоа со броило се отчитани вредностите на годишните преземени активна и реактивна енергија од мрежата: W_a = 3.455,4 MWh и W_r = 1.135,8 Mvarh. Сите потрошувачи во мрежата се од ист тип – селски домаќинства и имаат приближно ист облик на дневниот дијаграм на оптоварувањето. Исто така може да се смета дека факторот на моќност на потрошувачите $\cos\varphi$ малку се менува во текот на денот и дека е практично константен.

Да се пресметаат загубите на активна моќност во режимот на максималното оптоварување ΔP_M како и годишните загуби на активна електрична енергија ΔW.



Слика 10.1. 10 kV извод од посматраната надземна дистрибутивната мрежа

Решение:

Бидејќи просторната распределба на товарот во мрежата не е позната ќе ја усвоиме претпоставката дека таа е константна преку целиот ден и дека учеството на моќноста на секој потрошувач од мрежата во сумарната моќност $\underline{S}_A$ е пропорционално на инсталираната моќност на трансформаторот преку којшто тој се напојува. Во тој случај вредностите на коефициентите на учество k_i за поедините гранки од мрежата се пресметуваат сосема едноставно, преку номиналните моќности на одделните трансформатори СН/НН во мрежата, што овозможува едноставно пресметување на параметрите $\underline{Z}_{ek}=(R_{ek}+jX_{ek})$ на еквивалентната импеданција на мрежата.

За илустрација, ќе го пресметаме коефициентот на учество k_4 на гранката бр. 4 (водот V4). Вкупната инсталирана моќност на сите енергетски трансформатори СН/НН во мрежата изнесува:

$$\Sigma S_{\mathrm{nT}} = \sum_{j\in\omega_1} S_{\mathrm{nT}}(j) = S_{\mathrm{nT1}} + S_{\mathrm{nT2}} + S_{\mathrm{nT3}} + S_{\mathrm{nT4}} + S_{\mathrm{nT5}}$$

$$\Sigma S_{\mathrm{nT}} = 250+160+160+400+160 = 1130 \text{ kVA}.$$

Множеството трансформатори СН/НН што се напојува преку оваа гранка е $\omega_4 = \{\mathrm{T4}, \mathrm{T5}\}$, а збирот на нивната инсталирана моќност изнесува:

$$\sum_{j\in\omega_4} S_{\mathrm{nT}}(j) = S_{nT4} + S_{nT5} = 400+160 = 560 \text{ kVA}.$$

Според тоа, во согласност со релацијата (6.3.4).

$$\underline{k}_i = \frac{\underline{S}_\Sigma(i)}{\underline{S}_\mathrm{A}} = \frac{\sum_{j\in\omega_i} S_{\mathrm{nT}}(j)}{\sum S_{\mathrm{nT}}} = \text{const.} \quad (i = 1, n_g).$$

За коефициентот на учество k_4 на водот V_4 ќе имаме:

$$k_4 = \frac{\sum_{j\in\omega_4} S_{\mathrm{nT}}(j)}{\sum S_{\mathrm{nT}}} = \frac{400+160}{250+160+160+400+160} = \frac{560 \text{ kVA}}{1130 \text{ kVA}} = 0,496.$$

На сличен начин се постапува и при определувањето на коефициентите k_i за останатите гранки од мрежата. Резултатите од пресметките се прикажани во табелата 10.1. Податоците за номиналните параметри на енергетските трансформатори, потребни за пресметување на импеданцијата на редната гранка $\underline{Z}_T$, се преземени од табелата П.18 од Прилогот 2.

Табела 10.1. Резултати од пресметките на импеданциите $\underline{Z}(i)$ и коефииентите на распределба $\underline{k}_i$

i	елем.	$R(i)$	$X(i)$	$\sum_{\omega_j} S_{\text{пт}}(j)$	k_i	k_i^2	$\lvert\underline{k}_i\rvert^2 \cdot R(i)$	$\lvert\underline{k}_i\rvert^2 \cdot X(i)$
/	тип	Ω	Ω	kVA	/	/	Ω	Ω
1	V1	0.960	0.570	1130	1.000	1.000	0.960	0.570
2	V2	0.320	0.190	320	0.283	0.080	0.026	0.015
3	V3	1.280	0.760	160	0.142	0.020	0.026	0.015
4	V4	0.960	0.570	560	0.496	0.246	0.236	0.140
5	V5	1.600	0.950	160	0.142	0.020	0.032	0.019
6	T1	5.200	15.131	250	0.221	0.049	0.255	0.741
7	T2	9.180	23.254	160	0.142	0.020	0.184	0.466
8	T3	9.180	23.254	160	0.142	0.020	0.184	0.466
9	T4	2.875	9.578	400	0.354	0.125	0.360	1.200
10	T5	9.180	23.254	160	0.142	0.020	0.184	0.466

Сумарните загуби во железо, т.е. „константните загуби“ се добиваат со сумирање на загубите во железо во сите енергетски трансформатори. , т.е.:

$$\Sigma \Delta \underline{S}_{\text{Fe}} = 3 \cdot (0,46 + j3,20) + (0,65 + j5,00) + (0,93 + j8,00);$$

$$\Sigma \Delta \underline{S}_{\text{Fe}} = (2,96 + j22,60) \text{ kVA}.$$

Параметрите $\underline{Z}_{ek} = (R_{ek} + jX_{ek})$ на редната гранка на „еквивалентната мрежа“ ќе се добијат со сумирање на последните две колони од табелата 10.1:

$$R_{ek} = \sum_{i=1}^{10} |k_i|^2 \cdot R(i) = 2,446\ \Omega; \quad X_{ek} = \sum_{i=1}^{10} |k_i|^2 \cdot X(i) = 4,099\ \Omega;$$

$$Z_{ek} = (2,446 + j4,099)\ \Omega.$$

Просечниот фактор на моќност cos φ на товарот ќе го добиеме приближно преку податокот за преземените активна и реактивна енергија W_a и W_r:

$$\text{tg}\,\varphi = \frac{W_r}{W_a} = \frac{1135,8 \cdot 10^3}{3455,4 \cdot 10^3} = 0,3287 \Rightarrow \cos\varphi = 0,95; \quad \sin\varphi = 0,31225.$$

Според тоа, врвната привидна моќност $\underline{S}_M = (P_M + jQ_M)$ во режимот на максимално оптоварување ќе биде:

$$P_M = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{\text{A}} \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 60 \cdot 0,95 = 987,3 \text{ kW};$$

$$Q_M = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{\text{A}} \cdot \sin\varphi = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 60 \cdot 0,31225 = 324,5 \text{ kvar};$$

$$S_M = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{\text{A}} = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 60 = 1039,23 \text{ kVA}.$$

Сега можеме да ги пресметаме (процениме) факторот на товар m, употребното време T_M како и времето на загуби τ:

$$T_M = \frac{W_a}{P_M} = \frac{3455,4 \cdot 10^3}{987,3} = 3500 \text{ h};$$

$$m = \frac{T_M}{T} = \frac{3500}{8760} = 0,4;$$

$$\theta = \frac{\tau}{T} = 0{,}17 \cdot m + 0{,}83 \cdot m^2 = 0{,}17 \cdot 0{,}4 + 0{,}83 \cdot 0{,}4^2 = 0{,}2;$$

$$\tau = \theta \cdot T = 0{,}2 \cdot 8760 = 1752 \text{ h}.$$

Сумарните загуби на активна моќност во мрежата ΔP_Σ се состојат од џулови загуби во редните гранки од елементите $\Sigma\ \Delta P_J = 3 \cdot R_{ek} \cdot I_A^2$ и од загуби во железото на енергетските трансформатори $\Sigma \Delta P_{Fe}$. За режимот на максималното оптоварување струјата во главната делница изнесува $I_A = 60$ A, па според тоа ќе имаме:

$$\Delta P_M = \Sigma \Delta P_J + \Sigma \Delta P_{Fe} = 3 \cdot R_{ek} \cdot I_A^2 + \Sigma \Delta P_{Fe};$$

$$\Delta P_M = 3 \cdot 2.446 \cdot 60^2 + 2.960 = 26.417 + 2.960 = 29.377 \text{ W} \text{ или}$$

$$\Delta P_M = \Sigma \Delta P_J + \Sigma \Delta P_{Fe} = 26{,}417 + 2{,}960 = 29{,}377 \text{ kW}. \quad (2{,}98\ \%).$$

Сумарните загуби на активна енергија ΔW_a во мрежата ќе бидат:

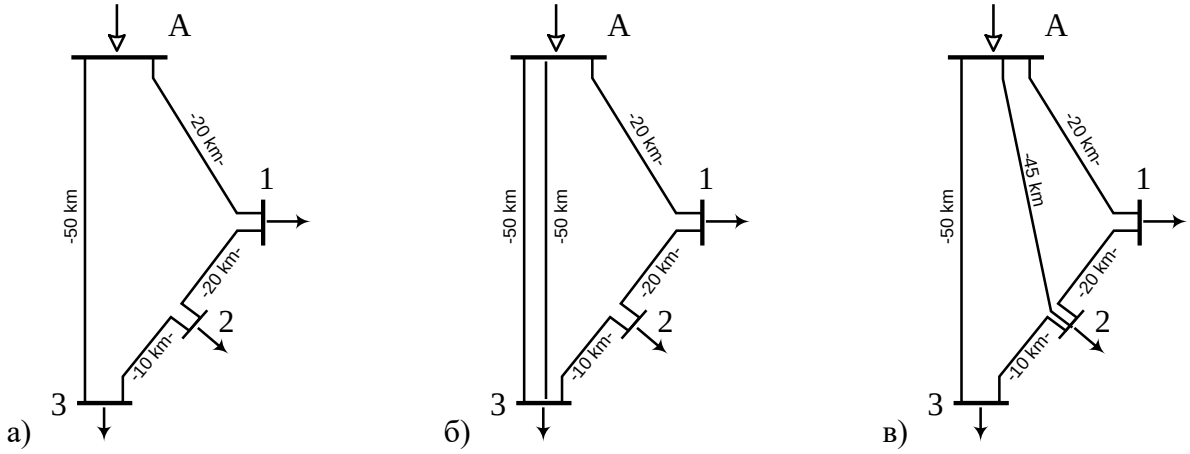
$$\Delta W_a = \Sigma \Delta P_J \cdot \tau + \Sigma \Delta P_{Fe} \cdot T;$$

$$\Delta W_a = 26{,}417 \cdot 1755{,}7 + 2{,}96 \cdot 8760 = 46.380{,}3 + 25.929{,}6;$$

$$\Delta W_a = 72.310 \text{ kWh} \quad (2{,}09\%).$$

■ ■ ■

Задача 11. На сликата 11.1.а е прикажана 110 kV надземна мрежа, изведена со спроводници од типот Al/^ 240/40 mm^2. Сите водови имаат исти подолжни параметри $\underline{z} = (r+jx)$= (0,13+j0,40) Ω/km. Должините на водовите се прикажани на самата слика, додека потрошувачите од мрежата во режимот на максималното оптоварување ги имаат следните моќности: $\underline{S}_1$ = (40+j20) MVA; $\underline{S}_2$ = (30+j15) MVA; $\underline{S}_3$ = (70+j35) MVA. Потрошувачите во мрежата се од ист тип и имаат ист дневен, односно годишен, дијаграм на моќност, со употребно време T_M = 4500 h/год. (τ = 2886 h/год.)



Слика 11.1. 110 kV хомогена надземна јамкаста мрежа пред и после појавувањето

Да се пресметааат годишните загуби на електрична енергија во мрежата за следните три случаи:

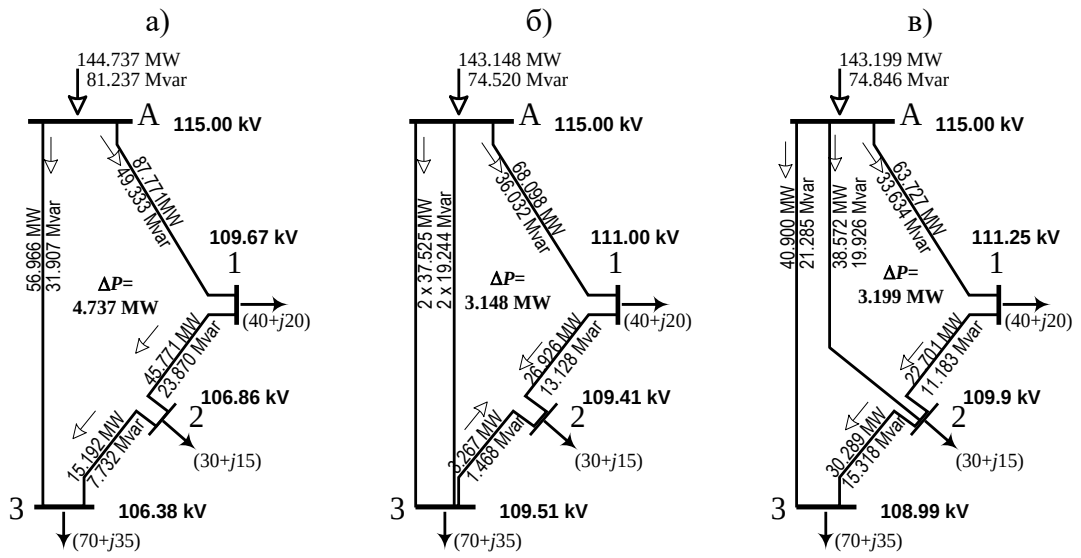
а) за постојната состојба, според шемата од сликата 11.1а;

б) доколку се изгради вод помеѓу собирниците А и 3 (слика 11.1б) со должина l = 50 km и со подолжни параметри како и останатите водови;

в) доколку се изгради вод помеѓу собирниците А и 2 (слика 11.1в) со должина l = 45 km и со подолжни параметри како и останатите водови.

Решение:

Годишните загуби на електрична енергија ΔW ќе ги пресметаме преку загубите на моќност во режимот на врвното оптоварување ΔP_M и преку времето на загуби τ : $\Delta W = \Delta P_M \cdot \tau$. Загубите на моќност ΔP_M , пак, ќе ги добиеме со решавање на тековите на моќности во мрежата во максималниот режим. Бидејќи е мрежата хомогена и престенеста, со една контура во случајот а), односно сложено–затворена со две контури во случајот б), решавањето на тековите на моќности во неа можеме да го вршиме, на пример, со методот на контурни струи, применувајќи го истовремено и методот на раздвојување.



Слика 11.2. Текови на моќности во мрежата за секоја нејзина конфигурација

Како резултат од пресметките на секоја од мрежите од сликата 11.1, се добива следната распределба, прикажана на сликата 11.2. Во пресметките е претпоставено дека напонот во напојната точка изнесува U_A = 115 kV. Резултатите се добиени со компјутерска програма. Резултатите од пресметките за моќностите и напоните се прикажани и во табелата 11.1.

Табела 11.1. Моќности (MVA) и напони (kV) во мрежата за разни конфигурации

а) Постојна состојба на мрежата според сликата 6.12.а. (ΔP_a=4,737 MW)							
Гранка	*P'* (MW)	*Q'* (Mvar)	*P''* (MW)	*Q''* (Mvar)	*S* (%)	*U*	kV
A – 1	87.771	49.330	85.771	43.870	78.6	U_A	115.000
1 – 2	45.771	23.870	45.192	22.732	42.4	U_1	109.672
2 – 3	15.192	7.732	15.158	7.942	14.4	U_2	106.857
A – 3	56.966	31.907	54.842	27.058	51.5	U_3	106.378
б) Состојба на мрежата со нов вод А–3, според сликата 6.12.б. ($\Delta P_б$=3,148 MW)							
A – 1	68.098	36.032	66.926	33.128	60.2	U_A	115.000
1 – 2	26.926	13.128	26.734	13.208	24.4	U_1	110.998
2 – 3	-3.266	-1.793	-3.267	-1.468	3.0	U_2	109.408

A − 3	37.525	19.244	36.634	18.234	33.4	U_3	109.507
A − 3	37.525	19.244	36.634	18.234	33.4		

в) Состојба на мрежата со нов вод А−2, според сликата 6.12.в. ($\Delta P_в$=3,199 MW)							
A − 1	63.727	33.634	62.701	31.183	56.3	U_A	115.000
1 − 2	22.701	11.183	22.565	11.436	20.6	U_1	111.254
2 − 3	30.289	15.318	30.164	15.264	27.8	U_2	109.904
A − 3	40.900	21.285	39.836	19.736	36.5	U_3	108.986
A − 2	38.572	19.926	37.724	18.881	34.4		

Според тоа, годишните загуби на електрична енергија за секоја од разгледуваните конфигурации на мрежата ќе бидат:

$$\Delta W_a = \Delta P_a \cdot \tau = 4,737 \cdot 2,886 = 13.671,34 \text{ MWh/год};$$

$$\Delta W_б = \Delta P_б \cdot \tau = 3,148 \cdot 2,886 = 9.085,857 \text{ MWh/год};$$

$$\Delta W_в = \Delta P_в \cdot \tau = 3,379 \cdot 2,886 = 9.751,542 \text{ MWh/год}.$$

■ ■ ■

X ТЕХНИЧКО-ЕКОНОМСКИ АНАЛИЗИ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИТЕ МРЕЖИ

Задача 1. Индустриски потрошувач треба да се напојува со електрична енергија преку еден 110 kV далекувод со должина l = 50 km. Дневниот дијаграм на промената на оптоварувањето на потрошувачот е даден во следната табела:

Табела 1.1. Податоци за дневниот дијаграм на оптоварување

Временски период (h)	0 – 6	6 – 22	22 – 24
Однос P/P_M	0,2	1,0	0,2

Потрошувачот работи цело време со константен фактор на моќност $\cos\varphi$ = 0,8 = const. Максималната моќност на потрошувачот P_M од година во година се менува (расте), и тоа на следниот начин:

P_M (0) = P_M (1) = 30 MW ;

P_M (2) = 40 MW ;

P_M (3) = 50 MW;

P_M (4) = P_M (5) = · · · · · · = P_M (20) = 60 MW.

Споменатиот вод треба да биде изведен со спроводници Al/Č 240/40 mm^2 ($R_1 = r_1 \cdot l$ = 6,15 Ω) и неговата цена ќе биде $K_1 = 500 \cdot 10^6$ парични единици (п.е.).

Да се пресметаат тековните трошоци во работењето по години и да се пресмета сумата на вкупните актуализирани трошоци за изградбата и експлоатацијата на преносниот вод за првите n = 20 години од работењето на потрошувачот.

Актуализацијата да се врши со стапка p_a% = 10%. Стапките на амортизација и одржување на преносниот вод изнесуваат α_a % = 3,3% и α_p % = 1,5%, респективно.

Цената на изгубениот киловатчас изнесува $c_{\Delta W}$ = 10 п.е.

Да се испита дали во истите услови напојувањето преку двосистемски вод (2×3×Al/Č 150/25 mm^2) изведен со спроводници од типот Al/Č 150/25 mm^2 и чија цена е за 30% повисока од претходната, ќе претставува економски поповолно решение. Активната отпорност (по фаза) на двосистемскиот вод изнесува $R_2 = r_2 \cdot l$ = 5 Ω.

Решение:

Тековните трошоци f , во општ случај, можеме да ги поделиме на два дела: константен дел k (трошоци за амортизација и одржување на далекуводот) и дел што е зависен од оптоварувањето (променлив дел) Δ и кој ги опфаќа трошоците заради загубената електрична енергија во преносот:

$f = k + \Delta(i)$; $i = 1, 2, . . . , n$.

Ќе ја посматраме варијантата кога напојувањето на потрошувачот се врши со надземен вод со спроводници од типот Al/Č 240/40 mm^2. Оваа варијанта ќе ја означиме со бројот 1, а понатаму сите трошоци сврзани со неа ќе го добијат индексот „1“.

Константниот дел од трошоците е за сите години ист и изнесува:

$k = k_1 = (a_a + a_p) \cdot K_1$

$k = (3{,}3/100 + 1{,}5/100) \cdot 500 \cdot 10^6 = 24 \cdot 10^6$ п.е./год.

Променливиот дел од трошоците во случајов ќе расте од година во година во текот на првите четири години од разгледуваниот период, Потоа, во натамошниот период, бидејќи оптоварувањето ќе биде константно, и овој дел од трошоците нема да се менува.

Ќе ја посматраме најнапред првата година од работењето ($t = 1$), кога врвното оптоварување на потрошувачот ќе изнесува $P_M = P_{M1} = 30$ MW. Дневните загуби на електрична енергија во преносниот вод ΔW_{d1} во овој случај ќе бидат:

$$\Delta W_{d1} = \sum \Delta P_i \cdot \Delta t_i = \sum \frac{R_1 \cdot P_i^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot \Delta t_i \ ,$$

или:

$$\Delta W_{d1} = \frac{6{,}15 \cdot 6^2}{110^2 \cdot 0{,}8^2} \cdot 6 + \frac{6{,}15 \cdot 30^2}{110^2 \cdot 0{,}8^2} \cdot 16 + \frac{6{,}15 \cdot 6^2}{110^2 \cdot 0{,}8^2} \cdot 2;$$

$$\Delta W_{d1} = 11{,}665 \text{ MWh/den.}$$

додека соодветните годишни загуби на електрична енергија во текот на првата година ќе изнесуваат:

$\Delta W_1 = 365 \cdot \Delta W_{d1} = 4.257{,}6$ MWh.

Нивната вредност, како трошок, ќе изнесува:

$\Delta_1 (1) = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_1 (1) = 10 \cdot 4.257 \cdot 10^3 = 42{,}76 \cdot 10^6$ п.е.

Според тоа, тековните трошоци $f_1(1)$ остварени во текот на првата година од работењето ќе бидат:

$f_1(1) = k_1 + \Delta_1(1) = 24 \cdot 10^6 + 42{,}576 \cdot 10^6 = 66{,}576 \cdot 10^6$ п.е.

На сличен начин се определуваат и тековните трошоци за преостанатите години од разгледуваниот период. Резултатите од пресметките се прикажани во табелата 1.2. Притоа во табелата се внесени тековните трошоци во работењето за споменатите две варијанти на напојувањето на потрошувачот: 1) напојување со едносистемски далекувод, со спроводници Al/Č 240/40 mm² и 2) напојување со двосистемски далекувод, со спроводници Al/Č 150/25 mm²

Табела 1.2. Приказ на хронолошкиот редослед на остварувањето на трошоците

		3xAl/Č 240/40 mm²			2x3xAl/Č 150/40 mm²		
год.	P_{Mi} (MW)	ΔW_i (MWh)	Δ_i $\times 10^6$ п.е.	f_i $\times 10^6$ п.е.	ΔW_i (MWh)	Δ_i $\times 10^6$ п.е.	f_i $\times 10^6$ п.е.
1	30	4257,6	42,576	66,576	3641,4	36,414	67,614
2	40	7569,1	75,691	99,691	6153,7	61,537	92,737
3	50	11826,7	118,267	162,267	9615,2	96,152	127,352
4	60	17030,4	170,304	194,030	13845,9	138,459	169,659
. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .
20	60	17030,4	170,304	194,030	13845,9	138,459	169,659

Сумата на актуализираните трошоци Σ_1 за првиот случај ќе изнесува:

$$\Sigma_1 = K_1 + \sum_{i=1}^{n} \frac{f_1(i)}{q^i} = 10^6 \cdot (500 + \frac{66,576}{q} + \frac{99,691}{q^2} + \ldots\ldots + \frac{194,030}{q^{20}})$$

$$\Sigma_1 = 2145 \cdot 10^6 \text{ p.e.}$$

Слично на тоа, за втората можност на напојувањето (со двосистемски вод) добиваме:

$$\Sigma_2 = K_2 + \sum_{i=1}^{n} \frac{f_2(i)}{q^i} = 10^6 \cdot (650 + \frac{67,614}{q} + \frac{92,737}{q^2} + \ldots\ldots + \frac{169,659}{q^{20}})$$

$$\Sigma_2 = 2264 \cdot 10^6 \text{ p.e.}$$

■ ■ ■

Задача 2. Индустриски потрошувач се наоѓа на 50 km од најблиската распределителна точка и треба да се напојува со електрична енергија на ниво 110 kV. Потрошувачот ги има следните карактеристики: P_M = 40 MW ; $\cos\varphi$ = 0,8 ; T_M = 4500 h. За напојување на потрошувачот можни се две варијанти:

1) изградба на 110 kV далекувод со спроводници Al/Č 240/40 mm^2, чија единечна цена изнесува $k_1 = 1 \cdot 10^6$ ден./km;
2) изградба на 110 kV далекувод со спроводници Al/Č 150/25 mm^2, чија единечна цена изнесува $k_2 = 0,8 \cdot 10^6$ ден./km.

Обата далекуводи се со челично_решеткасти столбови и стапките за нивната амортизација и одржување изнесуваат $\alpha_{a\%} = 3\%$ и $\alpha_{p\%} = 2,5\%$, додека цената на изгубениот kWh изнесува $c_{\Delta W}$ = 1 ден./kWh. Со помош на методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди која од овие две варијанти е економски поповолна.

Решение:

1) Варијанта со спров. Al/Č 240/40 mm^2 (r_1 = 0,129 Ω/km; x_1 = 0,39 Ω/km; k_1 =1·10^6 ден/km).

Инвестициите трошоци K_1 во оваа варијанта ќе бидат: $K_1 = k_1 \cdot l = 50 \cdot 10^6$ ден.

Годишните трошоци за амортизација и одржување на далекуводот ќе бидат:

$K_a + K_p = (\alpha_a + \alpha_p) \cdot K_1 = (0,03 + 0,025) \cdot 50 \cdot 10^6 = 2,75 \cdot 10^6$ ден./годишно.

Загубите на активната моќност во режимот на максимално оптоварување ќе изнесуваат:

$$\Delta P_{M1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_M^2 \approx \frac{R_1 \cdot P_M^2}{U_n^2 \cdot \cos^2\varphi} = (0,129 \cdot 50) \cdot \frac{40^2}{110^2 \cdot 0,8^2} = 1,333 \text{MW}.$$

Времето на загуби τ може приближно да се процени преку познатата вредност на времето на максимална моќност T_M, со помош на следната формула:

$\tau = (0,124 + T_M/10.000)^2 \cdot 8760 = (0,124 + 0,45)^2 \cdot 8760 = 2886$ часови годишно.

Годишните загуби на активната енергија ќе бидат:

$\Delta W_1 = \Delta P_{M1} \cdot \tau = 1,333 \cdot 2886 = 3847$ MWh/год.

($\Delta W_1 = 3,847 \cdot 10^6$ kWh/год.).

а соодветните трошоци за изгубената електрична енергија во преносот ќе изнесуваат:

$\Delta_1 = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_1 = 1 \cdot 3{,}847 \cdot 10^6 = 3{,}847 \cdot 10^6$ ден./год.

Според тоа, вкупните тековни годишни трошоци на оваа варијанта изнесуваат:

$f_1 = K_a + K_p + \Delta_1 = 2{,}75 \cdot 10^6 + 3{,}847 \cdot 10^6 = 6{,}597 \cdot 10^6$ ден./год.

Пресметковните годишни трошоци за оваа варијанта ќе бидат:

$T_1 = p_n \cdot K_1 + f_1 = 0{,}1 \cdot 50 \cdot 10^6 + 6{,}597 \cdot 10^6 = 11{,}597 \cdot 10^6$ ден./год.

2) Варијанта со спров. Al/Č 150/25 mm² (r_2 = 0,21 Ω/km; x_2 = 0,40 Ω/km ; k_2 =0,8·10⁶ ден/km).

Инвестиционите трошоци K_2 во оваа варијанта ќе бидат: $K_2 = k_2 \cdot l = 40 \cdot 10^6$ ден.

Годишните трошоци за амортизација и одржување на далекуводот ќе бидат:

$K_a + K_p = (\alpha_a + \alpha_p) \cdot K_2$

$K_a + K_p = (0{,}03 + 0{,}025) \cdot 40 \cdot 10^6 = 2{,}20 \cdot 10^6$ ден./годишно.

Загубите на активната моќност во режимот на максимално оптоварување ќе изнесуваат:

$$\Delta P_{M2} = 3 \cdot R_2 \cdot I_M^2 \approx R_2 \cdot \frac{P_M^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi};$$

$$\Delta P_{M2} = (0{,}21 \cdot 50) \cdot \frac{40^2}{110^2 \cdot 0{,}8^2} = 2{,}17\,\text{MW}.$$

Годишните загуби на активната енергија ќе бидат:

$\Delta W_2 = \Delta P_{M2} \cdot \tau = 2{,}17 \cdot 2886 = 6263$ MWh/год.

($\Delta W_2 = 6{,}263 \cdot 10^6$ kWh/год.),

а соодветните трошоци Δ_2 за изгубената електрична енергија во преносот ќе изнесуваат:

$\Delta_2 = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_2 = 1 \cdot 6{,}263 \cdot 10^6 = 6{,}263 \cdot 10^6$ ден./год.

Според тоа, вкупните тековни годишни трошоци на оваа варијанта изнесуваат:

$f_2 = K_a + K_p + \Delta_2 = 2{,}20 \cdot 10 + 6{,}263 \cdot 10^6 = 8{,}463 \cdot 10^6$ ден./год.

Пресметковните годишни трошоци за оваа варијанта ќе бидат:

$T_2 = p_n \cdot K_2 + f_2 = 0{,}1 \cdot 40 \cdot 10^6 + 8{,}463 \cdot 10^6 = 12{,}463 \cdot 10^6$ ден./год.

Во следната табела се прикажани техничките и економските показатели за обете разгледувани варијатни.

Табела 7.2.1. Технички и економски показатели на разгледуваните варијанти

	Технички показатели		Економски показатели (трошоци во 10^6 денари годишно					
Варијанти	**ΔU** (%)	**ΔP** (MW)	***K***	K_a	K_p	**Δ**	***f***	***T***
1) Al/Č 240/40 mm²	6,97	1,333	50	1,50	1,25	3,847	6,597	11,597
2) Al/Č 150/25 mm²	8,38	2,170	40	1,20	1,00	6,263	8,463	12,463

Од прикажаната табела заклучуваме дека првата варијанта се карактеризира со поголеми инвестициони вложувања, но затоа таа има значително помали тековни трошоци кои ќе се јавуваат во текот на експлоатацијата на преносниот вод. Поради тоа и пресметковните годишни трошоци T за оваа варијанта се за околу 7% помали во однос на пресметковните годишни трошоци кај втората варијанта, па според тоа првата варијанта ќе биде, од економски аспект, поповолна во однос на втората. Таа исто така е поповолна и од технички аспект бидејќи обезбедува помали загуби на напон и помали загуби на моќност.

■ ■ ■

Задача 3. Трошоците по километар должина V за изградба на преносните водови зависат како од номиналниот напон U_n така и од пресекот A на спроводниците. За надземните водови со спроводници од комбинираното јаже `Al/^` со однос на пресеците $\varepsilon = 6{:}1$ овие трошоци можат приближно да се опишат со следната релација:

$V = (v_1 + v_2 \cdot U_n + v_3 \cdot A) = (140 + 3{,}9 \cdot U_n + 1{,}5 \cdot A) \cdot 10^3$ п.е./km.

Цената на произведениот, па според тоа и цената за изгубениот киловатчас во пренесувањето на електричната енергија $c_{\Delta W}$, од своја страна, зависи од режимот на работата на изворите на електрична енергија, т.е. од нивното време на искористување (т.е. време на максимална моќност) T_M. Споменатата зависност е прикажана табеларно во табелата 7.3.1.

Табела 3.1. Табеларен приказ на зависноста на цената на електричната енергија $c_{\Delta W}$ од употребното време T_M

T_M (h)	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500
$c_{\Delta W}$ (п.е./kWh)	1,68	1,38	1,11	0,96	0,84	0,75	0,69	0,60	0,53

Вкупните трошоци, сврзани со изградбата и експлоатацијата на надземните водови, зависат како од вложените инвестиции K така и од тековните трошоци f што се јавуваат во текот на нивната работа, вклучувајќи ја тука и вкупната изгубена електрична енергија ΔW во преносот.

Ако *економска густина на струјата* j_e ја наречеме онаа густина на струјата за која пресметковните годишни трошоци T за пренесување на електричната енергија се најмали, тогаш е потребно нејзината вредност да се определи за разни вредности на времето на искористување на изворите T_M. Зависноста $j_e = \mathrm{f}(T_M)$ да се прикаже табеларно.

Решение:

Пресметковните годишни трошоци T се составени од два члена: 1. тековните трошоци f, и 2. членот $p_n \cdot K$ кој ги репрезентира, т.е. уважува инвестиционите вложувања K. Според тоа, ќе имаме:

$$K = V \cdot l = (v_1 + v_2 \cdot U_\mathrm{n} + v_3 \cdot A) \cdot l \,,$$

$$f = K_a + K_p + \Delta = (\alpha_a + \alpha_p) \cdot K + \Delta = p_\mathrm{s} \cdot K + \Delta \,,$$

$$\Delta = c_{\Delta W} \cdot \Delta W = c_{\Delta W} \cdot (\Delta P_M \cdot \tau) = c_{\Delta W} \cdot 3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \tau \,.$$

Бидејќи е:

$$R = r \cdot l = \frac{1000}{\sigma \cdot A} \cdot l \ , \ \text{dobi vame:}$$

$$\Delta = \frac{3 \cdot c_{\Delta W} \cdot \tau \cdot 10^3}{\sigma} \cdot \frac{I^2}{A} \cdot l = \xi \cdot \frac{I^2}{A} \cdot l \ .$$

Според тоа, пресметковните годишни трошоци T сврзани со изградбата и погонот (експлоатацијата) на надземните преносни водови ќе бидат:

$$T = p_s \cdot K + f = (p_n + p_s) \cdot K + \Delta \ ,$$

или:

$$T = (p_n + p_s) \cdot V \cdot l + \xi \cdot \frac{I^2}{A} \cdot l = [(p_n + p_s) \cdot V + \xi \cdot \frac{I^2}{A}] \cdot l \ ,$$

т.е. тие зависат од пресекот A . Понатаму имаме:

$$\frac{dT}{dA} \equiv [(p_n + p_s) \cdot \frac{dV}{dA} - \xi \cdot \frac{I^2}{A^2}] \cdot l = 0.$$

Бидејќи е:

$$\frac{dV}{dA} = v_3 \quad \text{i} \quad \frac{I}{A} = j_e \ , \ \text{sl eduva:}$$

$$(p_n + p_s) \cdot v_3 - \xi \cdot j_e^2 = 0. \ ,$$

од каде се добива:

$$j_e = \sqrt{\frac{v_3 \cdot (p_n + p_s)}{\xi}} = \sqrt{\frac{v_3 \cdot (p_n + p_s) \cdot \sigma}{3 \cdot 10^3 \cdot c_{\Delta W} \cdot \tau}} \ .$$

Ако во последниот израз ги замениме бројните вредности на поедините величини, усвојувајќи притоа $p_n = 0{,}1$ и $p_s = 0{,}055$ ($p_s\% = 5{,}5\%$) и изразувајќи ја цената на изгубениот киловатчас $c_{\Delta W}$ во единици (п.е./MWh), економската густина на струјата j_e ќе ја добиеме во (kA/mm^2). Притоа времето на загуби τ го пресметуваме (проценуваме) приближно, со помош на следната емпириска релација:

$$\tau = (0{,}124 + T_M/10.000)^2 \cdot 8760 \ .$$

На тој начин за разни вредности на употребното време T_M ги определуваме соодветните вредности на економската густина на струјата j_e. Пресметаните резултати се прикажани во табелата 3.2.

Табела 3.2. Табеларен приказ на зависноста на економската густина на струјата j_e од употребното време T_M

T_M (h)	**2500**	**3000**	**3500**	**4000**	**4500**	**5000**	**5500**	**6000**	**6500**
τ (h)	1225	1575	1968	2405	2886	3411	3980	4591	5248
$c_{\Delta W} \cdot \tau$	2058	2173	2184	2308	2424	2558	2746	2754	2781
j_e (A/mm^2)	1,10	1,07	1,065	1,036	1,01	0,97	0,95	0,94	0,935

Како што може да се забележи, во изразот за економската густина на струјата не фигурира ниту номиналниот напон на далекуводот ниту пак неговата должина. Тоа значи дека економската густина на струјата кај надземните водови не зависи ниту од напонот на водот ниту од неговата должина, туку е иста за сите надземни водови кои се изведени со спроводници од ист материјал. Истиот заклучок наполно важи и за енергетските кабли.

■ ■ ■

Задача 4. 10 kV далекувод со должина $l = 3{,}2$ km и со спроводници Al/^ 50/8 mm² ($r = 0{,}625\ \Omega$/km; $x = 0{,}40\ \Omega$/km) напојува потрошувач за кој е познато: $P_M = 1{,}6$ MW; $\cos\varphi = 0{,}75$; $T_M = 5000$ h ($\tau = 3410$ h). За да се поправат напонските прилики и да се намалат загубите на моќност и енергија во преносот, се предвидува инсталирање на кондензаторска батерија (КБ) кај самиот потрошувач. Ваквиот зафат ќе доведе до појава на дополнителни инвестициони вложувања за набавка на кондензаторската батерија, но од друга страна со тоа ќе се намалат загубите на електрична енергија во преносот и, веројатно, со тоа ќе се намалат тековните трошоци во погонот f.

Инвестиционите трошоци K_B за инсталирањето на кондензаторската батерија, коишто линеарно зависат од инсталираната моќност на батеријата Q_B, можат да се опишат со следната релација:

$K_B = (a + b \cdot Q_B) = (150 + 500 \cdot Q_B) \cdot 10^3$ п.е.

при што моќноста на батеријата Q_B се изразува во мегавари (Mvar).

Да се определи оптималната вредност на инсталираната моќност Q_B на батеријата за која пресметковните годишни трошоци ќе бидат најмали. Потоа, за така определената вредност на моќноста на батеријата, да се определи вкупната количина на активна енергија што ќе се заштедува секоја година за сметка на намалувањето на загубите во преносот поради поправката на факторот на моќност $\cos\varphi$. Колкаво ќе биде намалувањето ΔT на пресметковните годишни трошоци по инсталирањето на кондензаторската батерија ?

Цената на електричната енергија загубена во преносот изнесува $c_{\Delta W} = 1{,}5$ п.е./kWh = 1000 п.е./MWh. Нормативниот коефициент на ефективност на инвестициите изнесува $p_n = 0{,}1$, додека годишните стапки на амортизација и одржување на кондензаторската батерија изнесуваат $\alpha_a\% = 7{,}5\%$ и $\alpha_p\% = 2{,}5\%$.

Решение:

Ќе ги посматраме двете можни варијанти:

1) работа на далекуводот без инсталирање на кондензаторска батерија (т.е. постојна состојба);
2) работа на далекуводот со инсталирана кондензаторска батерија кај потрошувачот.

Во првиот случај (1) годишните загуби на електрична енергија во преносот ќе бидат:

$$\Delta W_1 = \frac{P_M^2}{U_n^2 \cdot \cos^2\varphi_1} \cdot R \cdot \tau = \frac{1{,}6^2}{10^2 \cdot 0{,}75^2} \cdot 2 \cdot 3410 = 310{,}4\ \frac{\text{MWh}}{\text{god.}},$$

а соодветните трошоци Δ_1 ќе бидат:

$\Delta_1 = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_1 = 1{,}5 \cdot 310{,}4 \cdot 10^3 = 465{,}6 \cdot 10^3$ п.е./годишно.

Во вториот случај (2) годишните загуби на електрична енергија ќе се намалат на вредноста:

$$\Delta W_2 = \frac{P_M^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi_2} \cdot R \cdot \tau,$$

којашто засега не ни е позната. Меѓутоа, инсталирањето на кондензаторската батерија ќе доведе, наедно, и до зголемување на тековните трошоци f за вредноста:

$$p_n \cdot K_B + (\alpha_a + \alpha_p) \cdot K_B = p_\Sigma \cdot K_B ,$$

што се однесува на инвестицијата K_B (соодветно превреднувана во тековен трошок) и на идните трошоци за амортизација и одржување на кондензаторската батерија.

Ако со T_1 и T_2 ги означиме пресметковните годишни трошоци на првата односно втората варијанта, тогаш нивната разлика ΔT, т.е. годишните заштеди поради инсталирањето на кондензаторската батерија, ќе бидат:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = (\Delta_1 - \Delta_2) - p_\Sigma \cdot K_B ,$$

$$\Delta_1 - \Delta_2 = \frac{c_{\Delta W} \cdot P_M^2 \cdot R \cdot \tau}{U_n^2} \cdot \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - \frac{1}{\cos^2 \varphi_2}\right);$$

$$\Delta_1 - \Delta_2 = \frac{c_{\Delta W} \cdot P_M^2 \cdot R \cdot \tau}{U_n^2} \cdot (\mathrm{tg}^2 \varphi_1 - \mathrm{tg}^2 \varphi_2) .$$

Имајќи ги предвид изразите:

$$\mathrm{tg}\,\varphi_1 = \frac{Q_M}{P_M} \;;\; \mathrm{tg}\,\varphi_2 = \frac{Q_M - Q_B}{P_M} \text{, добиваме:}$$

$$\Delta_1 - \Delta_2 = \frac{c_{\Delta W} \cdot P_M^2 \cdot R \cdot \tau}{U_n^2} \cdot \left[\frac{Q_M^2}{P_M^2} - \frac{(Q_M - Q_B)^2}{P_M^2}\right]$$

$$\Delta_1 - \Delta_2 = \frac{c_{\Delta W} \cdot R \cdot \tau}{U_n^2} \cdot (Q_B \cdot (2Q_M - Q_B) .$$

Значи, годишните заштеди во енергија, како и паричните заштеди врз таа основа се директно зависни од инсталираната моќност на кондензаторската батерија Q_B. Понатаму, разликата ΔT во пресметковните годишни трошоци ќе биде:

$$\Delta T = \Delta_1 - \Delta_2 - p_\Sigma \cdot K_B = \Delta_1 - \Delta_2 - p_\Sigma \cdot (a + b \cdot Q_B) ,$$

или:

$$\Delta T = \frac{c_{\Delta W} \cdot R \cdot \tau}{U_n^2} \cdot (Q_B \cdot (2Q_M - Q_B) - p_\Sigma \cdot (a + b \cdot Q_B) .$$

Значи, и вкупните годишни заштеди можат да се изразат како функција од моќноста на батеријата Q_B. Понатаму, оптималната вредност на моќноста Q_B за која се постигнуваат најголеми заштеди ќе ја добиеме од условот:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}Q_B}(\Delta T) = \frac{2c_{\Delta W} \cdot R \cdot \tau}{U_n^2} \cdot (Q_M - Q_B) - p_\Sigma \cdot b \equiv 0 ,$$

од каде што понатаму следува:

$$Q_B = Q_M - \frac{b \cdot p_\Sigma \cdot U_n^2}{2 \cdot c_{\Delta W} \cdot R \cdot \tau} .$$

Последниот израз ја дава оптималната вредност на инсталираната моќност на кондензаторската батерија. Имајќи предвид дека реактивната моќност Q_M на потрошувачот во режимот на максимално оптоварување изнесува $Q_M = P_M \cdot \mathrm{tg}\varphi_1 = 1{,}6 \cdot 0{,}882 = 1{,}411$ Mvar, за оптималната вредност на моќноста на батеријата ќе добиеме:

$$Q_B = 1{,}411 - \frac{500 \cdot 10^3 \cdot (0{,}1 + 0{,}075 + 0{,}025) \cdot 10^2}{2 \cdot 1{,}5 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 3410} = 0{,}922 \text{ Mvar}.$$

Значи, после компензацијата ќе имаме нов фактор на моќност $\cos\varphi_2$:

$$\mathrm{tg}\,\varphi_2 = \frac{Q_M - Q_B}{P_M} = \frac{0{,}489}{1{,}6} = 0{,}306; \quad \cos\varphi_2 = 0{,}956.$$

а годишните загуби на активната енергија ќе се намалат и сега тие ќе изнесуваат:

$$\Delta W_2 = \frac{P_M^2}{U_\mathrm{n}^2 \cdot \cos^2\varphi_2} \cdot R \cdot \tau = \frac{1{,}6^2}{10^2 \cdot 0{,}909^2} \cdot 2 \cdot 3410 = 190{,}9 \ \frac{\text{MWh}}{\text{god.}},$$

односно ќе имаме годишни заштеди во активна енергија во износ:

$\Delta W_1 - \Delta W_2 = 310{,}4 - 190{,}9 = 119{,}5$ MWh/год.,

што изнесува околу 2,2% од вкупната пренесена електрична енергија во текот на една година.

Вредноста на овој износ, изразен во парични единици (п.е.), годишно ќе биде:

$\Delta_1 - \Delta_2 = c_{\Delta W} \cdot (\Delta W_1 - \Delta W_2) = 1{,}5 \cdot 119.500 = 179.250$ п.е./год.

Цената на кондензаторската батерија со оптимална инсталирана моќност ќе биде:

$K_B = (150 + 500 \cdot 0{,}922) \cdot 10^3 = 611.000$ п.е.

Според тоа, инсталирањето на кондензаторската батерија со својата оптимална вредност, освен веќе споменатите ефекти, ќе доведе до намалување на пресметковните годишни трошоци за вредноста:

$\Delta T = (\Delta_1 - \Delta_2) - p_\Sigma \cdot K_B = 179.250 - 0{,}2 \cdot 611.000 = 57.050$ п.е./год.

Бидејќи заштедите од компензацијата ΔT се позитивни, произлегува дека инсталирањето на кондензаторската батерија со спомената моќност од 922 kvar е не само технички туку и економски сосема оправдана.

■ ■ ■

Задача 5. 110 kV далекувод со спроводници Al/^ 240/40 mm² (r = 0,129 Ω/km; x = 0,40 Ω/km) и со должина l = 50 km треба да напојува еден индустриски потрошувач со следните карактеристики: P_M = 40 MW ; $\cos\varphi$ = 0,8 = const ; T_M = 4500 h (τ = 2886 h). Ако стапките на амортизација и одржување изнесуваат α_a% = 3% и α_p% = 2,5%, а единечната цена на далекуводот е $V = 1 \cdot 10^6$ п.е./km и притоа цената на изгубениот киловатчас изнесува $c_{\Delta W}$ = 1 п.е./kWh = 10^3 п.е. /kWh, да се определи сумата на актуализираните трошоци, сврзани со изградбата и експлоатацијата на далекуводот, за период од n = 20 години, и тоа за следните два случаја:

а) моќноста на потрошувачот со текот на времето не се менува;

б) моќноста на потрошувачот P_M расте од година во година со тренд на пораст од 4,5% годишно (односно расте со фактор на пораст x = 1,045).

Актуализацијата на трошоците да се врши со стапка p_a % = 8%.

Решение:

Кај ваквите анализи е вообичаено за основна временска единица да се усвои периодот од една година, т.е. единица за време да биде 1 година. Притоа, со t = 0 ќе го означиме моментот кога е завршена изградбата на објектот и почетокот на неговата работа, а тоа ќе биде наедно и почетокот на посматраниот период од n = 20 години. Со индексот i (i = 1, 2, 3,к , n) ќе го означуваме крајот на првата, втората итн. година. Освен тоа, заради упростување, ќе сметаме дека тековните трошоци f_i, кои фактички се остваруваат распределено, во текот на целата $i-$та година, се остваруваат концентрирано на крајот од посматраната година.

а) *Моќноста на потрошувачот не се менува* ($P_M = P_0$ = 40 MW)

Во овој случај, согласно напред реченото, во $t = 0$ ќе се појават инвестиционите трошоци $K = V\cdot l$ за изградба на далекуводот, а потоа, во секоја наредна година од работата, ќе се остваруваат исти тековни трошоци, т.е. $f_1 = f_2 = \cdots = f_n = f$ = const. Притоа имаме:

$K = V\cdot l = 1\cdot 10^6\cdot 50 = 50\cdot 10^6$ п.е.

$k = p_s\cdot K = (\alpha_a + \alpha_p)\cdot K = 0{,}055\cdot 50\cdot 10^6 = 2{,}75\cdot 10^6$ п.е./год.

$f = K_a + K_p + \Delta = p_s\cdot K + \Delta$ = const.

$\Delta P_M = R\cdot(P_M/U_n/\cos\varphi)^2 = 6{,}45\cdot(40/110/0{,}8)^2 = 1{,}333$ MW .

$\Delta = c_{\Delta W}\cdot\Delta W = c_{\Delta W}\cdot(\Delta P_M\cdot\tau)$;

$\Delta = 1\cdot 10^3\cdot 1{,}333\cdot 2886 = 3{,}846\cdot 10^6$ п.е./год.

$f = 2{,}75\cdot 10^6 + 3{,}846\cdot 10^6 = 6{,}596\cdot 10^6$ п.е./год. = const.

Сумата на актуализираните трошоци Σ_a за посматраниот период од n = 20 години во овој случај ќе биде:

$$\Sigma_a = \frac{K}{q^0} + \frac{f_1}{q^1} + \frac{f_2}{q^2} + \ldots\ldots + \frac{f_n}{q^n} = K + \sum_{i=1}^{n}\frac{f_i}{q^i}\ ,\quad \text{т.е.}$$

$$\Sigma_a = K + f\cdot\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{q^i} = K + f\cdot\Gamma(n)\ ,$$

каде што е:

$$\Gamma(n) = \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{q^i} = \frac{q^n - 1}{q^n\cdot(q-1)}\ .$$

Понатаму имаме:

$$\Gamma(20) = \frac{1{,}08^{20} - 1}{1{,}08^{20}\cdot(1{,}08 - 1)} = 9{,}818\ ;$$

$$\Sigma_a = 50\cdot 10^6 + 9{,}818\cdot 6{,}596\cdot 10^6 = 114{,}76\cdot 10^6 \text{ p.e./god.}$$

б) Моќноста на потрошувачот расте со трендна пораст од 4,5% годишно

Во овој случај максималната моќност на потрошувачот P_M не е константна, туку од година во година ќе расте континуирано, по следниот закон:

$P_M(t) = P_0 \cdot x^t \quad (t = 1, 2, \ldots, n)$,

т.е:

$P_M(t) = 40 \cdot 1{,}045^t \quad (t = 1, 2, \ldots, n)$.

За поедноставно пресметување ќе сметаме дека во текот на првата година максималната моќност на потрошувачот не се зголемува континуирано, туку е константна, еднаква на вредноста $P_M(1) = P_M(0) \cdot x^1 = P_0 \cdot x^1$. Слично, во текот на втората година ќе сметаме дека моќноста на потрошувачот е константна, еднаква на вредноста $P_M(2) = P_0 \cdot x^2$, итн., како што е тоа прикажано со искршената линија на дијаграмот од слика 7.4.

Јасно е дека во овој случај загубите на електрична енергија ΔW од година во година ќе растат и тоа по следниот закон:

$$\Delta W_0 = \frac{P_0^2}{U_n^2 \cdot \cos^2\varphi} \cdot R \cdot \tau \; ;$$

$$\Delta W_1 = \frac{P_M^2(1)}{U_n^2 \cdot \cos^2\varphi} \cdot R \cdot \tau = \Delta W_0 \cdot x^2 \; ;$$

$$\Delta W_2 = \frac{P_M^2(2)}{U_n^2 \cdot \cos^2\varphi} \cdot R \cdot \tau = \Delta W_0 \cdot x^4 \; ;$$

- -

$$\Delta W_i = \frac{P_M^2(i)}{U_n^2 \cdot \cos^2\varphi} \cdot R \cdot \tau = \Delta W_0 \cdot x^{2i} \; ; \; i = 1, 2, \ldots, n.$$

Во овој случај сумата на актуализираните трошоци за периодот од n години ќе биде:

$\Delta_i = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_i = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_0 \cdot x^{2i} = \Delta_0 \cdot x^{2i}$; $\quad i = 1, 2, \ldots, n$.

$$\Sigma_b = K + \sum_{i=1}^{n} \frac{p_s \cdot K}{q^i} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta_0 \cdot x^{2i}}{q^i};$$

или:

$$\Sigma_b = K + p_s \cdot K \cdot \Gamma(n) + \Delta_0 \cdot \Gamma(x, n) \; ,$$

каде што е:

$$\Gamma(x, n) = \sum_{i=1}^{n} \frac{x^{2i}}{q^i} = \frac{(q/x^2)^n - 1}{(q/x^2)^n \cdot [(q/x^2) - 1]} = \frac{0{,}989^{20} - 1}{0{,}989^{20} \cdot (0{,}989 - 1)} = 22{,}51 \; .$$

Понатаму имаме:

$$\Delta_0 = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_0 = c_{\Delta W} \cdot \Delta P_0 \cdot \tau$$

$$\Delta_0 = c_{\Delta W} \cdot \frac{P_0^2}{U_n^2 \cdot \cos^2\varphi} \cdot R \cdot \tau = 3{,}846 \cdot 10^6 \text{ p.e./god} \; ,$$

$$\Sigma_b = 50 \cdot 10^6 + 0,055 \cdot 50 \cdot 10^6 + 3,846 \cdot 10^6 \cdot 22,51$$

$$\Sigma_b = (50 + 27 + 86,573) \cdot 10^6 = 163,573 \cdot 10^6 \text{ p.e.}$$

■ ■ ■

Задача 6. Потрошувач со карактеристики како во претходната задача треба да се напојува преку еден 110 kV далекувод со должина l = 50 km. Притоа се можни следните три варијанти на напојувањето:

а) напојување со обичен едносистемски 110 kV далекувод, со спроводници Al/Č 240/40 mm^2 (r_a = 0,129 Ω/km; x_a = 0,39 Ω/km) чија единечна цена изнесува $V_a = 1 \cdot 10^6$ п.е.;

б) напојување со еден двосистемски 110 kV далекувод , со спроводници Al/Č 150/25 mm^2 ($r_б$ = 0,105 Ω/km ; $x_б$ = 0,30 Ω/km) чија единечна цена изнесува $V_б = 1,28 \cdot 10^6$ п.е.;

в) напојување со еден двосистемски 110 kV далекувод , со спроводници Al/Č 240/40 mm^2 ($r_в$ = 0,0065 Ω/km ; $x_в$ = 0,30 Ω/km) чија единечна цена изнесува $V_в = 1,6 \cdot 10^6$ п.е.

Со помош на методот на минимални вкупни актуализирани трошоци да се утврди која од трите споменати варијанти е економски најповолна.

Трошоците да се посматраат за период од n = 20 години, а актуализацијата да се врши со стапка на актуализација p_a % = 8%.

Годишните стапки на амортизација α_a% и одржување α_p% на далекуводот изнесуваат 3,0% и 2,5% респективно. Значи, вкупната годишна стапка p_s % = α_a% + α_p% = 5,5%. Просечната цена на загубениот киловатчас изнесува: $c_{\Delta W}$ = 1 п.е./kWh.

Р е ш е н и е:

Сумата од вкупните актуализирани трошоци што се остваруваат при изградбата и експлоатацијата на еден далекувод за период од n години изнесува (види задача бр. 5):

$\Sigma = K + p_s \cdot K \cdot \Gamma(n) + \Delta_0 \cdot \Gamma(x,n)$, или:

$\Sigma = K \cdot [1 + p_s \cdot \Gamma(n)] + c_{\Delta W} \cdot \Delta W_0 \cdot \Gamma(x,n)$.

При n = 20 години и тренд на пораст x = 1,045, со зададената стапка на актуализација p_a % = 8%, добиваме (види задача бр. 5):

$\Gamma(n) = 9,818$;

$\Gamma(x,n) = 22,512$;

$1 + p_s \cdot \Gamma(n) = 1 + 0,055 \cdot 9,818 = 1,54$.

а) Напојување преку едносистемски далекувод со спроводници Al/Č 240/40 mm^2 .

Во овој случај ќе имаме:

$V_a = 1 \cdot 10^6$ п.е./km;

$K_a = V_a \cdot l = 50 \cdot 10^6$ п.е;

$R_a = r_a \cdot l = 0,129 \cdot 50 = 6,45$ Ω.

$$\Delta W_0 = \frac{P_0^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot R_a \cdot \tau \; ;$$

$$\Delta W_0 = \frac{40^2}{110^2 \cdot 0,8^2} \cdot 6,45 \cdot 2886 = 3,846 \cdot 10^6 \text{ kWh},$$

$$\Sigma_a = 1,54 \cdot 50 \cdot 10^6 + 1 \cdot 3,846 \cdot 10^6 \cdot 22,512 = (77 + 86,58) \cdot 10^6 = 163,58 \cdot 10^6 \text{ p.e.}$$

б Напојување преку двосистемски вод со спроводници Al/Č 150/25 mm².

На наполно ист начин се пресметува сумата на актуализираните трошоци и за оваа варијанта, а подоцна и за варијантата „в“. Резултатите од овие пресметки се прикажани во табелата 6.1. Трошоците во табелата се изразени во милиони парични единици , т.е. 10^6 п.е.

Од пресметаното произлегува дека првата варијанта ветува најмали вкупни актуализирани трошоци, па според тоа таа би требало да се усвои како економски најповолна. Меѓутоа, од резултатите произлегува дека третата варијанта е поскапа во однос на првата за само 1,78%.

Табела 6.1. Економски карактеристики на споредуваните варијанти

Варијанта	K	$p_\Sigma \cdot K \cdot \Gamma(n)$	ΔW_0 (MWh)	$\Delta_0 \cdot \Gamma(x,n)$	Σ
а	50	27,00	384,6	86,58	163,58
б	60	34,56	313,0	70,46	169,00
в	80	43,20	192,3	43,29	166,49

Толку мала разлика не може да и’ обезбеди несомнена предност на првата варијанта, со оглед на тоа што ваквите анализи претставуваат само приближни, т.е. груби проценки на економските показатели на разгледуваните варијанти. Освен тоа, третата варијанта има изразито поповолни технички карактеристики како во поглед на преносната способност и доверливоста во напојувањето така и во поглед на загубите на напон и моќност во преносот, што се одразува врз квалитетот на испорачаната електрична енергија и што е особено изразено во подоцнежната фаза на работењето кога оптоварувањето ќе ја достигне својата конечна вредност од $1,045^{20} \cdot 40 = 96,5$ MW (што при $\cos\varphi = 0,8$ дава 121 MVA, а тоа е веќе на самата термичка граница на преносната моќ на водот).

Затоа, во ваквите случаи, кога економските споредувања на варијантите не даваат неспорно предимство на некоја од нив, последниот збор ќе го даде споредувањето на техничките карактеристики на секоја од варијантите (и кои во применетиот модел не се економски вреднувани). Во конкретниов случај е јасно дека, гледано од технички аспект, третата варијанта има изразито предимство во однос на првата, па според тоа најправилно би било неа да ја прогласиме за најповолна.

■ ■ ■

Задача 7♣. Претходната задача да се реши со нова стапка на актуализација p_a % = 10%.

Решение:

$\Gamma(n) = 8,514$ і $\Gamma(x,n) = 18,545$;

$\Sigma_a = 144,72 \cdot 10^6$ p.e.; $\Sigma_б = 151,99 \cdot 10^6$ p.e.; $\Sigma_в = 153,10 \cdot 10^6$ p.e.

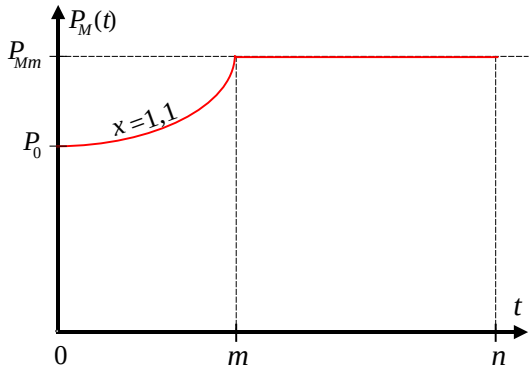
■ ■ ■

Задача 8. Потрошувач со карактеристики P_0 = 30 MW, $\cos\varphi$ = 0,8; T_M = 4500 h; (τ = 2886 h) треба да се напојува со електрична енергија преку еден 110 kV далекувод, долг l = 40 km. Во првите m = 5 години од работењето моќноста на потрошувачот ќе расте по експоненцијален закон со просечен тренд на пораст од 10% годишно (x = 1,1). После петтата година максималната моќност на потрошувачот се задржува на вредноста $P_{Mm} = P_0 \cdot x^m$ = 48,32 MW и понатаму нема да се менува, како што е тоа прикажано на сликата 7.8.1.

При изборот на пресекот на спроводниците се разгледуваат две варијанти:

a) Al/Č 150/25 mm^2; r = 0,20 Ω/km ; x = 0,41 Ω/km; $V_a = 1{,}2\cdot10^6$ п.е. ;

b) Al/Č 240/40 mm^2 ; (r = 0,123 Ω/km ; x = 0,40 Ω/km; $V_б = 1{,}5\cdot10^6$ п.е.



Слика 8.1. Пораст на врвното оптоварување на потрошувачот

Со помош на методот на вкупни актуализирани трошоци да се утврди која од двете разгледувани варијанти е економски поповолна. Притоа да се посматра период на работа од n = 20 години.

Бројни вредности:

– стапка на актуализација p_a % = 10% ,

– стапка на амортизација+одржување p_s % =α_a%+α_p% = 5% ,

– цена на изгубената електрична енергија $c_{\Delta W}$ = 1,5 п.е./kWh.

Решени е:

Во овој случај и во двете варијанти ќе имаме:

$\Gamma(m) = \Gamma(5) = 3{,}791$; $\Gamma(n) = \Gamma(20) = 8{,}514$; $\Gamma(n-m) = \Gamma(15) = 7{,}606$; $\Gamma(x,m) = 6{,}716$;

$\Gamma(x, n) = 63{,}003$; x^m = 1,1,611.

Посматраниот период од n = 20 години ќе го поделиме на два дела: $(0-m)$ и $(m-n)$. Значи, првиот дел ги опфаќа првите m = 5 години, а вториот преостанатите m+1, m+2, .. итн., години. Во првиот временски интервал $(0-m)$, кога врвната моќност на потрошувачот расте од година во година со константен тренд на пораст x, тековните трошоци ќе се состојат од константен дел $k = p_\Sigma \cdot K$ и променлив (варијабилен) дел $\Delta_i = \Delta_0 \cdot x^{2i}$ (видете ја задачата бр. 5).

Според тоа, вкупните тековни трошоци f_i во i–тата година ($i \le m$) ќе бидат:

$f_i = k + \Delta_i = k + \Delta_0 \cdot x^{2i}$.

Во последните изрази со K е означена цената на чинење на далекуводот, а со Δ_0 се означени трошоците заради загубената електрична енергија во "нултата" година, во која оптоварувањето е еднакво на P_0, т.е:

$$\Delta_0 = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_0 = c_{\Delta W} \cdot \frac{P_0^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot R \cdot \tau \ .$$

Во вториот временски интервал ($i > m$) тековните трошоци се константни, т.е:

$f_i = f_m = k + \Delta_m = k + \Delta_0 \cdot x^{2m} = \text{const.} \quad (\ i = m+1,\ m+2,\ .\ .\ .\ .\ ,\ n).$

Согласно со напред реченото, сумата на вкупните актуализирани трошоци што ќе се остварат во текот на целиот разгледуван период од n години ќе биде:

$$\Sigma = K + \sum_{i=1}^{m} \frac{f_i}{q^i} + \sum_{i=m+1}^{n} \frac{f_m}{q^i} = K + \sum_{i=1}^{m} \frac{k + \Delta_0 \cdot x^{2i}}{q^i} + \sum_{i=m+1}^{n} \frac{f_m}{q^i} \ ,$$

$\Sigma = K + k \cdot \Gamma(m) + \Delta_0 \cdot \Gamma(x,m) + f_m \cdot [\Gamma(n) - \Gamma(m)]$, или:

$\Sigma = K + k \cdot \Gamma(n) + \Delta_0 \cdot \left\{ \Gamma(x,m) + x^{2m} \cdot [\Gamma(n) - \Gamma(m)] \right\}$, или

$\Sigma = c \cdot K + d \cdot \Delta_0;$

каде што е:

$c = 1 + p_s \cdot \Gamma(n) = 1 + 0,05 \cdot 8,514 = 1,426$;

$d = \Gamma(x,m) + x^{2m} \cdot [\Gamma(n) - \Gamma(m)];$

$d = 6,716 + 2,594 \cdot [8,514 - 3,791] = 18,965$.

Сега можеме да ги добиеме вкупните трошоци за секоја од двете разгледувани варијанти.

а) Варијанта со спроводници Al/Č 150/25 mm^2 ;

$K_a = 48 \cdot 10^6$ п.е. ; $\quad R_a = 0,2 \cdot 40 = 8\ \Omega;$

$\Delta P_0 = R_a \cdot (P_0/U_n/\cos\varphi)^2 = 8 \cdot (30/110/0,8)^2 = 0,93$ MW ;

$\Delta W_0 = \Delta P_0 \cdot \tau = 0,93 \cdot 2886 = 2683$ MWh ;

$\Delta_0 = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_0 = 1,5 \cdot 2,683 \cdot 10^6 = 4,025 \cdot 10^6$ п.е. ;

$\Sigma_a = c \cdot K_a + d \cdot \Delta_0; \quad \Sigma_a = 1,426 \cdot 48 \cdot 10^6 + 18,965 \cdot 4,025 \cdot 10^6 = 144,8 \cdot 10^6$ р.е.

б) Варијанта со спроводници Al/Č 240/40 mm^2 ;

$K_b = 60 \cdot 10^6$ п.е.;

$R_б = 0,123 \cdot 40 = 4,92\ \Omega.$

$\Delta P_0 = R_б \cdot (P_0/U_n/\cos\varphi)^2 = 4,92 \cdot (30/110/0,8)^2 = 0,572$ MW;

$\Delta W_0 = \Delta P_0 \cdot \tau = 0,572 \cdot 2886 = 1651$ MWh ;

$\Delta_0 = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_0 = 1,5 \cdot 1,651 \cdot 10^6 = 2,476 \cdot 10^6$ п.е. ;

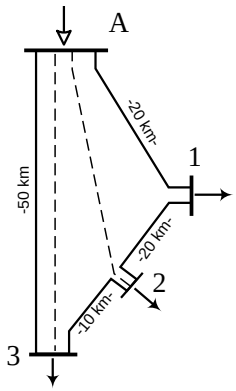
$\Sigma_b = c \cdot K_b + d \cdot \Delta_0 = 1,426 \cdot 60 \cdot 10^6 + 18,965 \cdot 2,476 \cdot 10^6; \quad \Sigma_b = 132,5 \cdot 10^6$ р.е.

■ ■ ■

Задача 9♣. На сликата е прикажана 110 kV надземна мрежа, изведена со спроводници од типот Al/^ 240/40 m^2. Сите водови имаат исти подолжни параметри $\underline{z} = (r+jx) = (0{,}13+j0{,}40)$ Ω/km. Должините на водовите се прикажани на самата слика, додека потрошувачите ги имаат следните моќности: $\underline{S}_1 = (40+j20)$ MVA; $\underline{S}_2 = (30+j15)$ MVA; $\underline{S}_3 = (70+j35)$ MVA. Сите потрошувачи се од ист тип и имаат ист дневен, односно годишен, дијаграм на моќност, со употребно време T_M = 4500 h/год. и време на загуби τ = 2886 h/год.

Заради намалување на загубите на моќност и енергија во мрежата се предвидува изградба на уште еден вод со исти карактеристики како и останатите. Се разгледуваат две варијанти:

1) изградба на вод помеѓу собирниците А и 3, паралелно со постојниот вод А–3, со должина l_1 = 50 km;
2) изградба на вод што ќе ги сврзува директно собирниците А и 2 со должина l_2 = 45 km.



Со помош на методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди која од двете разгледувани варијанти е економски поповолна. Цената на 1 km 110 kV надземен вод изнесува k =150.000 п.е./km.

Останати економски показатели: цена на изгубената електрична енергија $c_{\Delta W}$ = 0.1 п.е./kWh; годишни стапки на амортизација и одржување на надземните водови α_a = 3% α_p = 1%; коефициент на ефективност на инвестициите p_n = 0,1 (10%).

***Напомена*:** Прикажаната мрежа е хомогена и може да се решава со помош на методот на раздвојување. Фактот што сите потрошувачи имаат ист фактор на моќност cos φ исто така ја олеснува пресметката на тековите на моќности.

Решение:

Во задачата бр. 11 од делот IX е анализиран случајот на појачување на прикажаната мрежа и ефектите што се постигнуваат во поглед на намалувањето на загубите на моќност и енергија со изградбата на нов вод. Таму беше покажано дека во постојната конфигурација на мрежата, без појачување, загубите на моќност изнесуваа ΔP = 4,737 MW, додека годишните загуби на електрична енергија изнесуваа $\Delta W = 13{,}671\cdot10^6$ kWh/год. Исто така беше покажано дека изградбата на водот А–3, со должина l_1 = 50 km, ќе доведе до намалување на загубите на моќност и енергија на вредностите ΔP_1 = 3,148 MW и $\Delta W_1 = 9{,}086\cdot10^6$ kWh/год. – респективно, додека изградбата на водот А–2, со должина l_2 = 45 km, ќе доведе до намалување на загубите на моќност и енергија на вредност ΔP_2 = 3,199 MW и $\Delta W_2 = 9{,}233\cdot10^6$ kWh/год. – респективно.

Ќе ги споредуваме варијантите 1 и 2. Кај првата варијанта потребните инвестиции изнесуваат $K_1 = k\cdot l_1 = 150\cdot10^6\cdot50 = 7500\cdot10^6$ п.е. Вкупните трошоци Т1 за оваа варијанта ќе бидат:

$$T_1 = p_n\cdot K_1 + (\alpha_a+\alpha_p)\cdot K_1 + c_{\Delta W}\cdot\Delta W_1 = 0{,}14\cdot7500\cdot10^6 + 0{,}1\cdot9{,}086\cdot10^6 = 1958{,}586\cdot10^6 \text{ п.е.}$$

Слично, за втората варијанта (изградба на водот А–2, долг l_2 = 45 km), ќе добиеме:

$$T_2 = p_n\cdot K_2 + (\alpha_a+\alpha_p)\cdot K_2 + c_{\Delta W}\cdot\Delta W_2 = 0{,}14\cdot6750\cdot10^6 + 0{,}1\cdot9{,}233\cdot10^6 = 1868{,}262\cdot10^6 \text{ п.е.}$$

Значи, варијантата бр. 2 (изградба на вод А-2, долг l_1=45 km) е економски поповолна.

■ ■ ■

Задача 10. За мрежата од претходната задача е донесена одлука да се изврши нејзино појачување со изградба на водот А–2, чија цена изнесува $K = 6{,}75\cdot10^6$ п.е. Да се утврди оптималното време на инвестирање m_0 за коешто ќе се постигне сумата на вкупните актуализирани трошоци за изградбата и одржувањето на водот како и трошоците за изгубената електрична енергија во мрежата во наредните $n = 30$ години да бидат најмали. Познато е дека потрошувачката на електрична енергија, а со тоа и моќноста на потрошувачите, од година во година ќе растат со тренд на пораст од 5% годишно ($x = 1{,}05$).

Останати податоци: цена на изгубената електрична енергија $c_{\Delta W} = 0.1$ п.е./kWh; употребно време $T_M = 4500$ h/год. и време на загуби $\tau = 2886$ h/год; годишни стапки на амортизација и одржување на надземните водови $\alpha_a = 3\%$ $\alpha_p = 2\%$; стапка на актуализација $p_a = 8\%$; $q = 1{,}08$.

Решение:

Според поставеното во задачата моќноста на потрошувачите во мрежата ќе расте од година во година со стапка x=1,05, по законот $P_M(t) = P_M(0)\cdot x^t = 140\cdot1{,}05^t$. Во согласност со тоа ќе растат и загубите на моќност и енергија во мрежата но со стапка x^2, по законот: $\Delta W(t)=\Delta W(0)\cdot x^{2t}$.

Нека посматраме општ случај кога предвидената инвестиција K (изградба на далноводот) ќе се реализира после m години. Во согласност со тоа предвидениот период на посматрање од $n = 30$ години ќе го поделиме на два дела: прв дел, а тоа е периодот до изградбата на далноводот и втор дел, периодот после неговата изградба, т.е.:

1. прв период, до изградбата на далноводот ($0 \le t \le m$) (т.е. постојна состојба) и
2. втор период, по неговата изградба ($t > m$, т.е. состојба со новиот вод).

Состојбата во мрежата до неговата изградба ќе ја означиме со индекс 1, а после тоа со индекс 2. Во првата состојба (постојна состојба во мрежата) загубите ќе растат по законот: $\Delta W_1(t) = \Delta W_1(0)\cdot x^{2t}$; ($t > m$) каде што со $\Delta W_1(0)$ се означени годишните загуби на електрична енергија во мрежата за „нулатата година“, кога врвното оптоварување е $P_M = P_M(0)$ =140 MW.

Според пресметаното во претходната задача, тие изнесуваат:

$$\Delta W_1(0) = \Delta W_a = \Delta P_a \cdot \tau = 4{,}737\cdot 2{,}886 = 13.671{,}34 \text{ MWh/год.}$$

$$\Delta W_1(0) \approx 13{,}671\cdot10^6 \text{ kWh/год.}$$

Овие загуби чинат:

$$\Delta_1(0) = c_{\Delta W}\cdot\Delta W_1(0) = 0{,}1\cdot13{,}671\cdot10^6 = 1{,}3671\cdot10^6 \text{ п.е.}$$

Расудувајќи слично, за законот на промена на годишните загуби на електрична енергија за состојбата по изградбата на далноводот ($t > m$) ќе добиеме:

$$\Delta W_2(t) = \Delta W_2(0)\cdot x^{2t};\ t = m+1, m+2, \ldots, n;$$

каде што со $\Delta W_2(0)$ се означени годишните загуби на електрична енергија во мрежата за втората состојба и за ниво на оптоварување на мрежата од "нулатата година", кога врвното оптоварување е $P_M = P_M(0) = 140$ MW. Притоа, според резултатите од задачата бр. 9, имаме:

$$\Delta W_2(0) = \Delta W_в = \Delta P_в \cdot \tau = 3{,}379\cdot 2{,}886 = 9.751{,}542 \text{ MWh/год.};$$

$$\Delta W_2(0) \approx 9{,}751\cdot106 \text{ kWh/год.}$$

Ако трошоците за амортизација и одржување на мрежата, како заеднички за обете варијанти, ги испуштиме од анализите, тогаш за првиот период (состојба 1) ќе имаме само трошоци заради изгубена електрична енергија, т.е:

$$f_1(i) = 0 + \Delta_1(i) = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_1(i) = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_1(0) \cdot x^{2i};$$
$$f_1(i) = \Delta_1(0) \cdot x^{2i};\ i = 1,\ m.$$

$\Delta_1(0) = 0{,}1 \cdot 13.671 = 1{,}3671 \cdot 10^6$ п.е.

Сумата Σ_{I} на актуализираните трошоци за овој период ќе биде:

$$\Sigma_{\mathrm{I}} = \sum_{i=1}^{m} \frac{f_1(i)}{q^i} = \sum_{i=1}^{m} \Delta_1(0) \cdot \frac{x^{2i}}{q^i} = \Delta_1(0) \cdot \Gamma(x, m).$$

По истекот на m–тата година доаѓа до реализација на инвестицијата K и започнува вториот период. Сега, во секоја од наредните години $i = m+1,\ m+2,\ \ldots\ n-1,\ n$, годишните трошоци $f_2(i)$ ќе се состојат од константен дел k_2, којшто се однесува на амортизацијата и одржувањето на далноводот и варијабилен дел $\Delta_2(i)$ којшто се должи на трошоците заради изгубената електрична енергија. Притоа важи:

$$f_2(i) = k_2 + \Delta_2(i) = k_2 + \Delta_2(0) \cdot x^{2i}; \quad i = m+1, \ldots, n;$$

$$k_2 = (\alpha_p + \alpha_a) \cdot K = \alpha_s \cdot K = 0{,}05 \cdot 6{,}75 \cdot 10^6 = 0{,}3375 \cdot 10^6 \text{ п.е.};$$

$$\Delta_2(0) = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_2(0) = 0{,}1 \cdot 9{,}751 \cdot 10^6 = 0{,}9751 \cdot 10^6 \text{ п.е.};$$

Сумата Σ_{II} на актуализираните трошоци за овој период ќе биде:

$$\Sigma_{\mathrm{II}} = \sum_{i=m+1}^{n} \frac{f_2(i)}{q^i} = \sum_{i=m+1}^{n} \frac{k_2 + \Delta_2(0) \cdot x^{2i}}{q^i};$$

$$\Sigma_{\mathrm{II}} = k_2 \cdot \left[\Gamma(n) - \Gamma(m)\right] + \Delta_2(0) \cdot \left[\Gamma(x, n) - \Gamma(x, m)\right].$$

И конечно, вкупната сума $\mathbf{\Sigma}$ на актуализираните трошоци за целиот период од $n = 30$ години ќе биде:

$$\mathbf{\Sigma} = \Sigma_{\mathrm{I}} + \frac{K}{q^m} + \Sigma_{\mathrm{II}};$$

$$\mathbf{\Sigma} = \Delta_1(0) \cdot \Gamma(x, m) + \frac{K}{q^m} + k_2 \cdot \left[\Gamma(n) - \Gamma(m)\right] + \Delta_2(0) \cdot \left[\Gamma(x, n) - \Gamma(x, m)\right].$$

Гледаме дека сумата $\mathbf{\Sigma}$ на актуализираните трошоци зависи, меѓу другото, од моментот на инвестирање, т.е. зависи од годината m кога е изграден далноводот. Земајќи предвид дека е:

$$\Gamma(n) = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{q^i} = \frac{q^n - 1}{q^n \cdot (q-1)} = 11.2578; \quad \Gamma(m) = \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{q^i} = \frac{q^m - 1}{q^m \cdot (q-1)};$$

$$\Gamma(x, n) = \sum_{i=1}^{n} \frac{x^{2i}}{q^i} = \frac{(q/x^2)^n - 1}{(q/x^2)^n \cdot [(q/x^2) - 1]} = 41.9581;$$

$$\Gamma(x, m) = \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{q^i} = \frac{(q/x^2)^m - 1}{(q/x^2)^m \cdot [(q/x^2) - 1]};$$

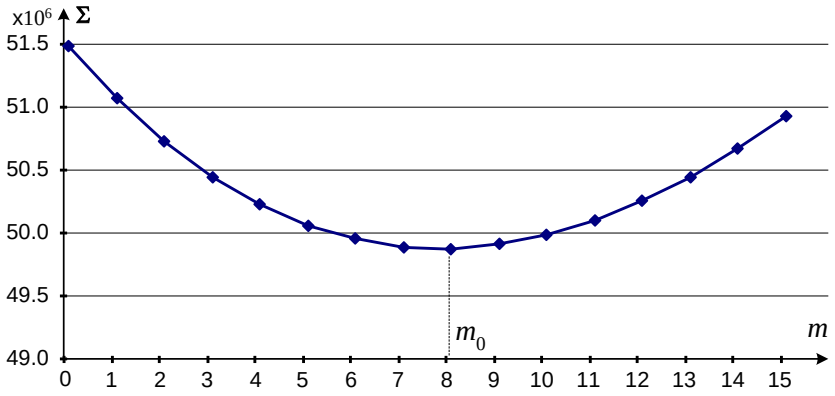
и заменувајќи ги вредностите:

$\Delta_1(0) = 1{,}3671 \cdot 10^6$ п.е; $\quad k_2 = 0{,}3375 \cdot 10^6$ п.е и $\quad \Delta_2(0) = 0{,}97511 \cdot 10^6$ п.е;

во изразот за сумата **Σ**, ќе ја добиеме зависноста **Σ**(*m*). Таа е прикажана во табелата 10.1. Истата зависност е прикажана и графички, на дијаграмот од сликата 10.1.

Табела 10.1. Вк. актуализирани трошоци Σ во зависност од годината на градба на новиот вод *m*

m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Σ	51.480	51.067	50.723	50.443	50.223	50.060	49.950	49.891	49.879	49.911	49.986	50.101



Слика 10.1. Зависност на вкупните актуализирани трошоци од годината на градба на новиот вод Σ(*m*)

Од пресметките се заклучува дека, посматрано од економски аспект, најповолно е ако предвидениот далновод помеѓу собирниците А и 2 се изгради после $m_0 = 8$ години сметано од почетокот на посматрањето на процесот. Сепак треба да се истакне дека овој оптимум не е воопшто изразен и дека разликата во вкупните актуализирани трошоци помеѓу оптималното решение и најнеповолниот случај (изградба веднаш на почеткот, во $m = 0$) е само 3,2%.

■ ■ ■

Задача 11♣. Индустриски потрошувач треба да се напојува со електрична енергија преку 10 kV кабелска мрежа. (U_n = 10 kV). Врвната моќност на потрошувачот од година во година расте со константен тренд на пораст од 7 % годишно, по законот: $P_M(t) = P_M(0)\cdot x^t = 2\cdot 1{,}07^t$ (MW). Времето на максимална моќност на потрошувачот изнесува T_M = 5000 h/год. и тоа не се менува, додека факторот на моќност на потрошувачот изнесува cos φ = 0,8 = const. Напојувањето ќе се изведува со кабли од типот IPO 13 A, 3x150, 10 kV со должина l = 2 km, за кои е познато: единечна цена k_1= 60.000 п.е./km; $\underline{z} = (r+jx)$ = (0,2 + j0,08) Ω/km; I_d = 255 A; S_d = 4,17 MVA). Притоа, за напојувањето на потрошувачот се разгледуваат следните две варијанти:

1) поставување на еден кабел на почетокот (t = 0) , а после m = 10 години, поставување на уште еден ист таков кабел, паралелно со првиот;
2) поставување на два кабла во ист ров истовремено, веднаш на самиот почеток (t = 0) при што цената на таквиот двоен кабелски вод ќе изнесува k_2 = 95.000 п.е./km*.

Со помош на методот на вкупни актуализирани трошоци да се утврди која од двете разгледувани варијанти е економски поповолна.

Бројни вредности: стапки на амортизација и одржување на каблите $\alpha_s = \alpha_a + \alpha_p$ = 3+2 = 5%; стапка на актуализација p_a = 8%; цена на изгубената електрична енергија $c_{\Delta W}$ = 0,1 п.е./kWh.

*) Треба да се напомене дека цената на еден кабелски вод се состои од два дела: константен дел, којшто не зависи од пресекот на кабелот (во него спаѓаат трошоците за полагање на кабелот со сите придружни градежни и организациони зафати) и дел којшто зависи од типот и пресекот на кабелот, а тоа се всушност трошоците за набавката и транспортот на самиот кабел.

Решение:

Ќе ги воведеме следните означувања:

$K_1 = k_1 \cdot l = 60.000 \cdot 2 = 120.000$ п.е.;

$R_1 = r_1 \cdot l = 0{,}2 \cdot 2 = 0{,}4\ \Omega$;

$$\Delta P_1(0) = R_1 \cdot \frac{P_M^2(0)}{U_n^2 \cdot \cos^2\varphi} = 0{,}025 \text{ MW};$$

$$\Delta W_1(0) = \Delta P_1(0) \cdot \tau = 85{,}273 \text{ MWh};$$

$$\Delta_1(0) = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_1(0) = 8527{,}3 \text{ п.е.};$$

$$\Delta_2(0) = \Delta_1(0)/2 = 4263{,}75 \text{ п.е.}$$

$q = 1 + p_a = 1{,}08$; $\Gamma(m) = 6{,}71$;

$\Gamma(n) = 9{,}81815$; $\Gamma(x,m) = 13{,}979$; $\Gamma(x,n) = 39{,}035$.

Со $t = 0$ ќе го означиме почетокот на посматрање на работата на потрошувачот. Редоследот на остварување на трошоците сврзани со првата варијанта се следните:

р. бр.	момент или период	Т р о ш о к	О п и с
1	$t = 0$	K_1	Изградба на првиот кабел (инвестиција)
2	$0 < t \le m$	$\alpha_s \cdot K_1 \cdot \Gamma(m) + \Delta_1(0) \cdot \Gamma(x,m)$	Погонски трошоци (амортизација и одржување на кабелот) и трошоци за изгубена електрична енергија во кабелот.
3	$t = m$	K_1/q^m	Изградба (поставување) на вториот кабел (инвестиција)
4	$m < t \le n$	$2\alpha_s \cdot K_1 \cdot [\Gamma(n) - \Gamma(m)]$	Амотизација и одржување на обата кабла.
5	$m < t \le n$	$\frac{1}{2} \cdot \Delta_1(0) \cdot [\Gamma(x,n) - \Gamma(x,m)]$	Трошоци за изгубена ел. енергија во обата кабла.

Според тоа, вкупните актуализирани трошоци сврзани со изградбата и работата на преносниот систем според првата варијанта ќе бидат:

$$\begin{aligned}\Sigma_1 &= K_1 \cdot (1 + 1/q^m) + \alpha_s \cdot K_1 \cdot \Gamma(m) + \\ &+ \Delta_1(0) \cdot \Gamma(x,m) + \alpha_s \cdot K_1 \cdot [\Gamma(n) - \Gamma(m)] + , \\ &+ 0{,}5 \cdot \Delta_1(0) \cdot [\Gamma(x,n) - \Gamma(x,m)].\end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned}\Sigma_1 &= 120.000 \cdot (1 + 1/1{,}08^{10}) + 0{,}05 \cdot 120.000 \cdot 6{,}71008 + \\ &+ 8527{,}3 \cdot 13{,}979 + 2 \cdot 0{,}05 \cdot 120.000 \cdot (9{,}81815 - 6{,}71008) + \\ &+ 0{,}5 \cdot 8527{,}3 \cdot (39{,}035 - 13{,}979) = 479.174 \text{ п.е.}\end{aligned}$$

Размислувајќи на сличен начин, за втората варијанта ќе ги добиеме следните вкупни актуализирани трошоци:

$$\Sigma_2 = K_2 \cdot \left[1 + \alpha_s \cdot \Gamma(n)\right] + \Delta_2(0) \cdot \Gamma(x, n)$$

$$\Sigma_2 = 95.000 \cdot (1 + 0,05 \cdot 9,81815) + 4263,65 \cdot 39,035 = 449.705 \text{ п.е.}$$

Бидејќи е $\Sigma_2 < \Sigma_1$ произлегува заклучокот дека втората варијанта е економски поповолна.

■ ■ ■

XI РЕШАВАЊЕ НА КОМБИНИРАНИ ЗАДАЧИ

11.1. ПРЕСМЕТКА НА РАЗГРАНЕТИ ДИСТРИБУТИВНИ МРЕЖИ

Задача 1. На сликата 1.1 е прикажана нисконапонска (НН) приградска дистрибутивна мрежа со три надземни изводи. Мрежата е напојувана од една столбна трансформаторска станица (СТС) со моќност 250 kVA.Познати се следните податоци за мрежата и конзумот:

– извод бр. 1: Al/^ 70/12 $\underline{z}_1$ = (0,465+j0,31) Ω/km l_1 = 200 m $P_{\Sigma 1}$ = 50 kW;

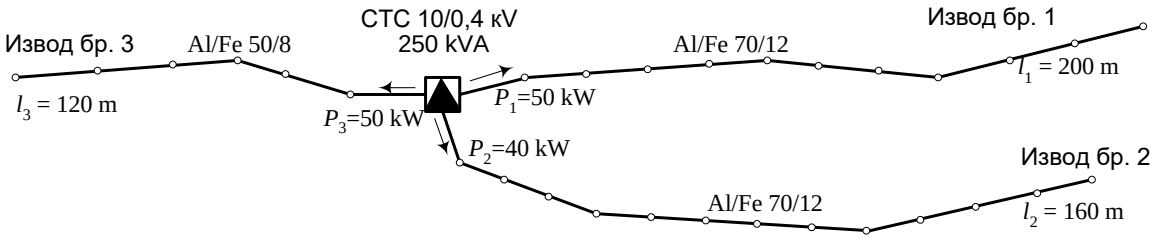
– извод бр. 2: Al/^ 70/12 $\underline{z}_2$ = (0,465+j0,31) Ω/km l_2 = 160 m $P_{\Sigma 2}$ = 40 kW;

– извод бр. 3: Al/^ 50/8 $\underline{z}_3$ = (0,625+j0,32) Ω/km l_3 = 120 m $P_{\Sigma 3}$ = 50 kW.

Сите потрошувачи во мрежата имаат ист фактор на моќност cos φ = 0,95. Може да се смета дека потрошувачите од секој извод се рамномерно распределени по неговата должина. Податоците за параметрите на разните типови водови се дадени во табелата 1.1. Да се процени:

а) загубата на напон и загубата на моќност во секој од изводите;

б) загубата на напон и вкупните загуби на моќност ΔP во мрежата.



Слика 1.1. НН приградска надземна мрежа

Решение:

Задачата ќе ја решиме приближно, третирајќи го товарот на секој извод како континуиран, рамномерно распределен. Во тој случај за загубите на напон и моќност во изводите ќе ги користиме релациите:

$$\Delta U = \frac{1}{2}\cdot\Delta U_{\text{конц}} = \frac{1}{2}\cdot\frac{P_\Sigma\cdot R + Q_\Sigma\cdot X}{U_{\text{n}}} = \frac{1}{2}\frac{P_\Sigma\cdot l_\Sigma}{M'};$$

$$\Delta P = \frac{1}{3}.\Delta P_{\text{конц}} = \frac{1}{3}\cdot\frac{P_\Sigma^2 + Q_\Sigma^2}{U_{\text{n}}^2}\cdot R = \frac{1}{3}\cdot\frac{P_\Sigma^2}{U_{\text{n}}^2\cdot\cos^2\varphi}\cdot R.$$

Во изразот за загуба на напон е воведена константата M' со помош на која е можно на едноставен начин да се пресмета загубата на напон во еден извод врз база на моментот на моќноста на потрошувачот(те). Таа се пресметува со помош на следната релација:

$$M' = \frac{U_{\text{n}}}{r + x\cdot tg\varphi}. \tag{1.1}$$

Кога во формулата за загуба на напон ΔU моќноста P_Σ се задава во kW, должината l_Σ во km а подолжните параметри r и x во Ω/km, тогаш загубата на напон се добива во V.

Со помош на претходната релација (1.1) се пресметани вредностите на константата M' на некои почесто употребувани пресеци во НН дистрибутивни мрежи, за разни вредности на факторот на моќност $\cos\varphi$. Тие се приложни во следната табела.

Табела 1.1. Карактеристики на некои почесто употребувани НН надземни водови и кабли

вод тип	r, Ω/km	x, Ω/km	I_d, A	$I_{d.зима}$, A	S_d, kVA	$S_{d.зима}$, kVA	M' $\cos\varphi$=0,9	M' $\cos\varphi$=0,95	M' $\cos\varphi$=1,0
Al/^ 50/8	0,625	0,325	170	323	118	224	511,2	546,6	640,0
Al/^ 70/12	0,465	0,320	235	447	163	310	650,3	705,6	860,2
Al/^ 95/15	0,346	0,310	290	550	201	381	814,2	899,7	1156
X00-A 4x16	1,875	0,1	81	110	56	76	208,0	209,7	213,3
X00-A 4x35	0,930	0,1	131	203	91	141	408,8	415,4	430,1
X00-A 3x70+54,2	0,465	0,1	198	307	137	213	779,1	803,4	860,2

Легенда: I_d и S_d – трајно дозволена струја и термичка моќност на водот за летни услови; $I_{d.зима}$ и $S_{d.зима}$ – трајно дозволена струја и термичка моќност за зимски услови; M' константа во kW × m / V.

За првиот извод ќе имаме:

$$P_{\Sigma 1} = P_1 = 50 \text{ kW}; \quad L_{\Sigma 1} = l_1 = 200 \text{ m}; \quad \cos\varphi_1 = 0,95; \quad M_1' = 705,6 \text{ kW×m/V};$$

$$\Delta U_1 = \frac{1}{2}\cdot\frac{P_1\cdot l_1}{M_1} = \frac{1}{2}\cdot\frac{50\cdot 200}{705,6} = 7,1 \text{ V } (1,77\%); \quad \Delta P_1 = \frac{1}{3}\cdot\frac{P_1^2\cdot R_1}{U_n^2\cdot\cos^2\varphi} = \frac{50^2\cdot 0,093}{3\cdot 0,4^2\cdot 0,95^2} = 537 \text{ W}$$

На сличен начин постапуваме и за останатите два извода.

Втор извод: $P_{\Sigma 2} = P_2 = 40$ kW; $L_{\Sigma 2} = l_2 = 160$ m; $\cos\varphi_1 = 0,95$; $M_2' = 705,6$ kW×m/V;

$$\Delta U_2 = \frac{1}{2}\cdot\frac{P_2\cdot l_2}{M_2} = \frac{1}{2}\cdot\frac{40\cdot 160}{705,6} = 4,54 \text{ V } (1,13\%); \quad \Delta P_2 = \frac{1}{3}\cdot\frac{P_2^2\cdot R_2}{U_n^2\cdot\cos^2\varphi} = \frac{40^2\cdot 0,0744}{3\cdot 0,4^2\cdot 0,95^2} = 275 \text{ W}.$$

Трет извод: $P_{\Sigma 3} = P_3 = 50$ kW; $L_{\Sigma 3} = l_3 = 120$ m; $\cos\varphi_1 = 0,95$; $M_3' = 546,6$ kW×m/V;

$$\Delta U_3 = \frac{1}{2}\cdot\frac{P_3\cdot l_3}{M_3} = \frac{1}{2}\cdot\frac{50\cdot 120}{546,6} = 5,5 \text{ V } (1,37\%); \quad \Delta P_3 = \frac{1}{3}\cdot\frac{P_3^2\cdot R_3}{U_n^2\cdot\cos^2\varphi} = \frac{50^2\cdot 0,075}{3\cdot 0,4^2\cdot 0,95^2} = 433 \text{ W}.$$

Според тоа, загубата на напон во мрежата ќе биде $\Delta U = \Delta U_1 = 7,1$ V, односно 1,77%, додека вкупната загуба на моќност во мрежата ќе биде:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = 0,537 + 0,275 + 0,433 = 1,245 \text{ kW}.$$

■ ■ ■

Задача 2♣. Колкави е бидат загубите ΔU и ΔP во НН мрежа после 10 години ако потрошувачката во мрежата расте од година во година со стапка на пораст од 3% годишно.

■ ■ ■

Задача 3. Се посматра третиот извод од мрежата прикажана во задачата 1 за состојба во некоја идна година. Во режимот на максималното оптоварување сумарната потрошувачка на изводот изнесува $P_{3.\max} = 80$ kW; $\cos\varphi = 0,95$ и напонот на НН собирници од ТС (т.е. напонот на неговиот почеток) изнесува $U_{A.\max} = 390$ V. Во режимот на минималното оптоварување,

пак, сумарната потрошувачка на изводот изнесува $P_{3.\min}$ = 32 kW; cos φ = 0,95 и напонот на неговиот почеток изнесува $U_{A.\min}$ = 400 V. Да се пресмета во кој интервал ќе варира напонот на крајот од изводот во текот на денот.

Решение:

Во режимот на максимално оптоварување ќе имаме:

$$\Delta U_3 = \Delta U_{3.\max} = \frac{1}{2}\cdot\frac{P_{3.\max}\cdot l_3}{M_3'} = \frac{1}{2}\cdot\frac{80\cdot 120}{546,6} = 9\ \text{V}.$$

Според тоа, напонот на крајот од изводот $U_{3.\max}$ во овој режим ќе биде:

$$U_{3.\max} = U_{A.\max} - \Delta U_{3.\max} = 390 - 9 = 381\ \text{V}.$$

На сличен начин, за режимот со минимално оптоварување се добива:

$$\Delta U_{3.\min} = \frac{1}{2}\cdot\frac{P_{3.\min}\cdot l_3}{M_3'} = \frac{1}{2}\cdot\frac{32\cdot 120}{546,6} = 3,5\ \text{V},$$

$$U_{3.\min} = U_{A.\min} - \Delta U_{3.\min} = 400 - 3,5 = 396,5\ \text{V} \approx 397\ \text{V}.$$

Значи, во текот на денот, напонот на крајот од водот ќе варира во границите:

$381 \le U \le 397$ V.

Заслужува да се спомене дека варијацијата на напонот во другите точки по должината на изводот ќе биде помала. Така, на пример, се покажува (видете ја задачата бр. ?) дека загубата на напон $\Delta U_{l/2}$ во средишната точка од изводот ќе биде:

– за режим со максимално оптоварување:

$$\Delta U_{(l/2).\max} = 0,75\cdot\Delta U_{3.\max} = 6,6\ \text{V} \Rightarrow U_{(l/2).\max} = U_{A.\max} - \Delta U_{(l/2).\max} = 390 - 6,6 = 383,4\ \text{V}$$

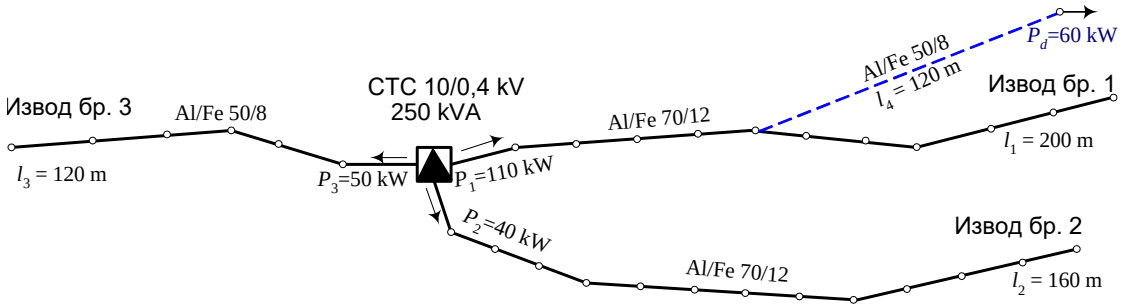
– и за режим со минимално оптоварување:

$$\Delta U_{(l/2).\min} = 0,75\cdot\Delta U_{3.\min} = 2,7\ \text{V} \Rightarrow U_{(l/2).\min} = U_{A.\min} - \Delta U_{(l/2).\min} = 400 - 2,7 = 397,3 \approx 397\ \text{V}.$$

Значи, во точката што се наоѓа на $l/2$ = 60 m од почетокот на изводот, напонот ќе варира во текот на денот во интервалот $383 \le U_{l/2} \le 397$ V.

■ ■ ■

Задача 4. Се посматра мрежата од претходната задача 1. Во населбата се појавува нов потрошувач со моќност P_d = 60 kW, cos φ_d = 0,95 (Q_d=19,7 kvar) кој треба да се приклучи на средината од првиот извод преку надземен отцеп Al/^ 50/8 со должина l_d = 120 m и параметри ($\underline{z}_d = \underline{z}_4$ = (0,625+j0,32) Ω/km) (слика 4.1). Да се пресметаат загубата на напон и загубата на моќност во изводот по приклучувањето на новиот потрошувач.

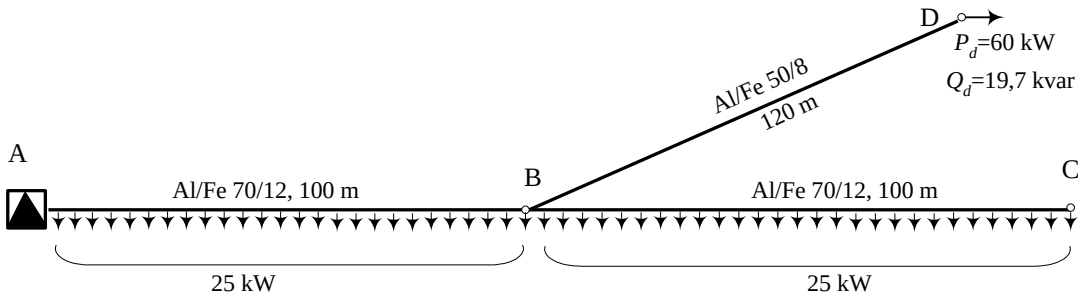


Слика 4.1. Приклучување на нов потрошувач во НН мрежа од задачата бр. 1

Решение:

Во задачата, значи, ќе се анализира само состојбата во засегнатиот извод бр. 1 бидејќи состојбата во останатите изводи нема да се промени.

При решавањето на оваа задача ќе ја примениме постапката изложена во задачата бр. ? од делот ?, т.е. целиот извод бр. 1 ќе го поделиме на три сегмени (секции) како што е тоа прикажано на следната слика.



Слика 4.2. Поделба на изводот бр. 1 на три секции: A–B, B–C и B–D

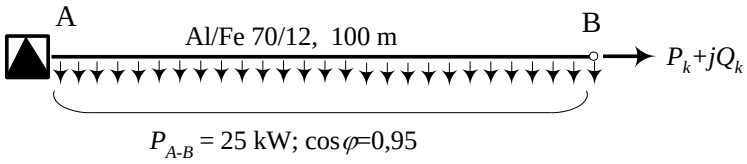
Најнапред ќе ги пресметаме загубите на напон и моќност во секциите B–C и B–D (слика 4.2). За секцијата B–C која е оптоварена со рамномерно распределен товар со вкупна моќност $\underline{S}_{B-C}$=(25+j8,2) kVA се добива:

$$\Delta U_{B-C} = \frac{1}{2}\cdot\frac{P_{B-C}\cdot l_{B-C}}{M_{B-C}} = \frac{1}{2}\cdot\frac{25\cdot 100}{705,6} = 1,77\,\text{V};\ \Delta P_{B-C} = \frac{1}{3}\cdot\frac{P_{B-C}^2\cdot R_{B-C}}{U_n^2\cdot\cos^2\varphi} = \frac{25^2\cdot 0,0465}{3\cdot 0,4^2\cdot 0,95^2} = 0,067\,\text{kW}$$

Бидејќи потрошувачот во секцијата B-D е концентриран на нејзиниот крај, за неа важи:

$$\Delta U_{B-D} = \frac{P_d\cdot l_d}{M_{B-D}} = \frac{60\cdot 120}{546,6} = 13,2\,\text{V};\ \Delta P_{B-D} = \frac{P_{B-D}^2\cdot R_{B-D}}{U_n^2\cdot\cos^2\varphi_{B-D}} = \frac{60^2\cdot 0,625\cdot 0,12}{0,4^2\cdot 0,95^2} = 2,084\,\text{kW}$$

Секцијата A–B ќе ја решиме на тој начин што оптоварувањето од делницата B-C и од потрошувачот $\underline{S}_d = P_d+jQ_d$ ќе ги еквивалентираме со еден единствен концентриран потрошувач со моќност $\underline{S}_k = P_k+jQ_k$, поставен на крајот од оваа секција, како на следната слика:



Слика 4.3 Решавање на секцијата A–B од изводот бр. 1

Во тој случај ќе имаме:

$$P_k = P_{B-D} + P_d = 25+60 = 85 \text{ kW}$$

$$Q_k = Q_{B-D} + Q_d = 8,2+19,7 = 27,9 \text{ kvar}$$

$$\Delta U_{A-B} = \frac{1}{2}\cdot\frac{P_{A-B}\cdot l_{A-B}}{M'} + \frac{P_k\cdot l_{A-B}}{M'} = \frac{25\cdot 100}{2\cdot 705,6}+\frac{85\cdot 100}{705,6} = 1,77+12,05 = 13,82 \text{ V } (3,45\%).$$

Доколку загубите на напон ΔU_{A-B} ги решававме „класично“, ќе го добиевме повторно истиот резултат:

$$\Delta U_{A-B} = \frac{1}{2}\cdot\frac{P_{A-B}\cdot R_{A-B}+Q_{A-B}\cdot X_{A-B}}{U_\text{n}} + \frac{P_k\cdot R_{A-B}+Q_k\cdot X_{A-B}}{U_\text{n}}, \text{ или}$$

$$\Delta U_{A-B} = \frac{1}{2}\cdot\frac{25\cdot 0,0465+8,2\cdot 0,031}{0,4}+\frac{85\cdot 0,0465+27,9\cdot 0,031}{0,4} = 1,77+12,05 = 13,82 \text{ V } (3,45\%).$$

За загубите на моќност во секцијата A–B ќе имаме:

$$\Delta P_{A-B} = \frac{1}{3}\cdot\frac{P_{A-B}^2+Q_{A-B}^2}{U_\text{n}^2}\cdot R_{A-B} + \frac{P_k^2+Q_k^2}{U_\text{n}^2}\cdot R_{A-B} + \frac{P_{A-B}\cdot P_k + Q_{A-B}\cdot Q_k}{U_\text{n}^2}\cdot R_{A-B}$$

$$\Delta P_{A-B} = \frac{1}{3}\cdot\frac{25^2+8,2^2}{0,4^2}\cdot 0,0465+\frac{85^2+27,9^2}{0,4^2}\cdot 0,0465+\frac{25\cdot 85+8,2\cdot 27,9}{0,4^2}\cdot 0,0465$$

$$\Delta P_{A-B} = 0,067 + 2,326 + 0,684 = 3,077 \text{ kW}.$$

Според тоа, по приклучувањето на новиот потрошувач, загубата на напон во првиот извод ќе биде најголема на релацијата A–B–D, и ќе изнесува:

$$\Delta U = \Delta U_{A-B} + \Delta U_{B-D} = 13,82+13,2 = 27 \text{ V } (6,75\%).$$

Загубата на напонот до точката C ΔU_{A-C} во тој случај ќе биде:

$$\Delta U_{A-C} = \Delta U_{A-B} + \Delta U_{B-C} = 13,82+1,77 = 15,59 \text{ V } (3,9\%).$$

Новите загуби на моќност во овој извод ќе бидат:

$$\Delta P = \Delta P_{A-B} + \Delta P_{B-C} + \Delta P_{B-D} = 3,077+0,067+2,084 = 5,268 \text{ kW}$$

што изнесува 4,8% од вкупното оптоварување на овој извод.

■ ■ ■

Задача 5♦. Да се пресмета колкава може да биде моќноста P_d = ? на новиот потрошувач што смее да се приклучи во изводот бр. 1 во мрежата од претходната задача доколку загубата на напон до потрошувачот во точката D не смее да биде поголема od 5%. Колкави ќе бидат напоните U_B и U_C во тој случај, ако е U_A = 400 V.

■ ■ ■

Задача 6. Оптоварувањето на домаќинствата се состои од два дела: дел којшто се должи на електричното греење и дел кој не зависи од начинот на загревањето. За група од *n* домаќин-

ства, во наши услови, врвното оптоварување на целата група $P_{max} = P_{max}(n)$ може да се процени со помош на следната емпириска релација:

$$P_{max} = n \cdot P_{1.инст} \cdot (k_e + \frac{1-k_e}{\sqrt{n}}) + 2,86 \cdot n^{0,88} \cdot (1+\frac{p\%}{100})^{(t-1990)}, \text{ kW}. \quad (6.1)$$

Одделните величини што фигурираат во овој израз го имаат следното значење:

$P_{1.инст}$ – просечна исталирана моќност по домаќинство во уредите за електрично греење со која секое домаќинство учествува во врвното едновремено оптоварување;

k_e – коефициент на едновременост на врвното годишно оптоварување за електрично затоплување на многу голем (теориски бесконечно голем) број домаќинства;

$p\%$ – просечна процентуална годишна стапка на пораст на годишното едновремено оптоварување на останатите електрични уреди во домаќинствата;

t – година за која се пресметува максималното едновремено оптоварување ($t \geq 1990$).

Населбите за кои ни во подалечна перспектива не се согледува можноста за воведување централно греење и во кои доминираат станбени објекти од ист или сличен тип, (нпр. приземни бараки, индивидуални куќи со спратност П, П+1, П+2 и слично), според техничката препорака ТП 14.б на ЗЕПС [2], се означуваат како населби од типот 5. За нив се користат следните вредности за овие параметри:

$P_{1.inst}$ = 3 kW/домаќинство; k_e = 0,55; $p\%$ = 1,5%/годишно,

што значи дека едновремената врвна моќност на групата од n домаќинства за годината t може да се пресмета со помош на изразот:

$$P_{max} = 3n \cdot (0,55 + \frac{0,45}{\sqrt{n}}) + 2,86 \cdot n^{0,88} \cdot 1,015^{(t-1990)} \quad (6.2)$$

На тој начин се доаѓа до следната табела.

Табела 6.1 Максимално оптоварување P_{max} (n) (kW) на станбена населба од типот 5

n	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
2000 г.	104	196	284	369	454	537	619	701	781	862	941	1021
2005 г.	109	204	295	384	472	558	643	728	812	895	977	1059
2010 г.	113	212	308	400	491	581	669	757	844	930	1016	1101

Се посматра НН извод изведен со СКС од типот X00/0-A 3×70+71,5+2×16, 1 kV со вкупна должина l = 200 m. Кабелот напојува 20 индивидуални станбени објекти од типот П+1 со вкупно n = 40 домаќинства кои се практично рамномерно распоредени по неговата должина. Факторот на моќност на конзумот е $\cos\varphi$=0,95. Да се пресмета:

а) Загубата на напон и загубата на моќност за годината t = 2010.

б) Кога оптоварувањето на кабелот I ќе ја достигне неговата зимска дозволена струја $I_{d.зима}$ = 307 A? Колкава ќе биде тогаш загубата на напон во посматраниот извод.

Решение:

Со помош на дадениот израз (6.2) најнапред ќе го пресметаме врвното едновремено оптоварување P_{max} за групата од n = 40 домаќинства за t = 2010 година.

$$P_{\max} = P_{\max}(40) = 40\cdot 3\cdot\left(0,55+\frac{0,45}{\sqrt{40}}\right) + 2,86\cdot 40^{0,88}\cdot 1,015^{(2010-1990)} = 173,5 \text{ kW}.$$

Приближна, но сепак доволно точна, вредност за $P_{\max}$ можеме да добиеме и со помош на табелата 6.1 применувајќи ја постапката на линеарна интерполација:

$$P_{\max} \approx 113 + \frac{212-113}{50-25}\cdot(40-25) = 172,4 \text{ kW} \quad \Rightarrow \quad I_{\max} = \frac{P_{\max}}{\sqrt{3}\cdot U_n\cdot\cos\varphi} = \frac{173,5}{\sqrt{3}\cdot 0,4\cdot 0,95} = 264 \text{ A}$$

Сега можеме да ја пресметаме загубата на напон и загубата на моќност во изводот што ќе се има во 2010 година.

$$\Delta U = \frac{1}{2}\cdot\frac{P_{\max}\cdot l}{M} = \frac{1}{2}\cdot\frac{173,5\cdot 200}{803,4} = 21,6 \text{ V} \ (5,4\%).$$

$$\Delta P = \frac{1}{3}\cdot\frac{P_{\max}^2\cdot r\cdot l}{U_{\text{n}}^2\cdot\cos^2\varphi} = \frac{173,5^2\cdot 0,465\cdot 0,2}{3\cdot 0,4^2\cdot 0,95^2} = 6,462 \text{ kW}.$$

На трајно дозволената зимска струја $I_{d.\text{зима}}$ = 307 A соодветствува привидна моќност $S_{d.\text{зима}} = \sqrt{3}U_n\cdot I_{d.\text{зима}}$ = 213 kVA односно активна моќност $P_{d.\text{зима}} = S_{d.\text{зима}}\cdot\cos\varphi$ = 202 kW. Годината t во која ќе се реализира оваа моќност ќе ја добиеме со решавање на равенката:

$$202 = 3\cdot 40\cdot(0,55+\frac{0,45}{\sqrt{40}}) + 2,86\cdot 40^{0,88}\cdot 1,015^{(t-1990)}$$

во која единствена непозната е бараната година t. Со логаритмирање се добива бараното решение: t = 2027 год. Загубата на напон во граничната година ќе биде:

$$\Delta U_{t=2027} = \frac{P_{dZ}\cdot l}{2M} = \frac{202\cdot 200}{2\cdot 803,4} = 25 \text{ V} \quad (6,25\%).$$

■ ■ ■

Задача 7. Колкав е максималниот можен број домаќинства n што може да се приклучи на изводот разгледуван во претходната задача за годината t = 2010 со кој струјното оптоварување на изводот нема да ја надмине својата зимска термичка дозволена граница.

Решение:

Од табелата 1.1 отчитуваме дека зимската термички дозволена граница за самоносивиот кабел (СКС) тип X00/0-A 3x70+54,2 изнесува $S_{d.\text{зима}}$ = 213 kVA. На оваа привидна моќност и соодветствува активна моќност $P_{dZ} = S_{d.\text{зима}}\cdot\cos\varphi$ = 202 kW. Од табелата 6.1 (задача 6) се гледа дека на оваа вредност соодветствува број на домаќинствата кој се движи во интервалот 25 < n < 50 домаќинства. Користеќи ја оваа табела, со примена на постапката за линеарна интерполација се добива:

$$n = 25 + \frac{50-25}{212-113}\cdot(202-113) = 47,5 \quad \Rightarrow \quad n = 47 \text{ домаќинства}.$$

Значи, во t = 2010 година на овој извод не смеат да бидат приклучени повеќе од 47 домаќинства доколку сакаме тој да не биде термички преоптоварен.

■ ■ ■

Задача 8. Да се пресмета граничната должина l_{gran} на НН надземен фидер, изведен со спроводници Al/^ 70/12 ($\underline{z}$=(0,465+j0,32) Ω/km; $M'_{0,95}$ = 701,5 kW×m/V. Фидерот (изводот) треба да напојува група од n=40 домаќинства во градска станбена населба од типот 5. Станбените објекти се приближно рамномерно распоредени по должината на изводот и може да се третираат како контуиран, рамномерно распределен, товар. Факторот на моќност на товарот изнесува cosφ=0,95. Дозволената загуба на напон во изводот изнесува ΔU_{doz} = 20 V (5%). Пресметките да се направат за перспективната t = 2010 година. Врвното оптоварување на групата да се пресмета со помош на формулата (6.2) од задачата 6.

Решение:

Помеѓу загубата на напон ΔU и „моментот на товарот“, т.е. производот $P\times l$ на вод со континуиран товар постои следната релација:

$$\Delta U = \frac{P \cdot l}{2 \cdot M'} \tag{8.1}$$

Од оваа релација следи:

$$P \cdot l = 2M' \cdot \Delta U \ . \tag{8.2}$$

Бидејќи бројот на домаќинствата е познат и изнесува n = 40, можеме да го пресметаме едновременото врвно оптоварување $P_{\max}$. Во тој случај единствена непозната е должината l со која се постигнува зададената загуба на напон ΔU. Според тоа имаме:

$$l_{gran} = \frac{2M' \cdot \Delta U_{doz}}{P_{\max}} . \tag{8.3}$$

Во конкретниот случај:

$$n = 40; \ \ P_{\max} = 3 \cdot 40 \cdot \left[0,55 + \frac{0,45}{\sqrt{40}} \right] + 2,86 \cdot 40^{0,88} \cdot 1,015^{20} = 173,5 \text{ kW} . \tag{8.4}$$

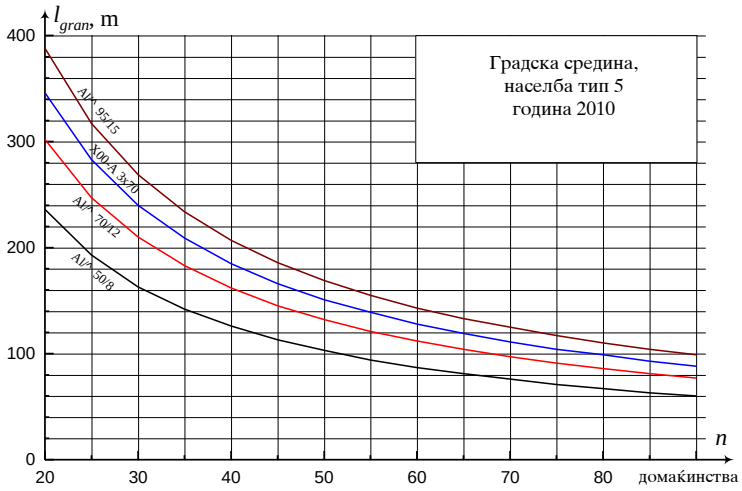
$$l_{gran} = \frac{2 \cdot 701,5 \cdot 20}{173,5} = 162 \text{ m.} \tag{8.5}$$

Применувајќи ја оваа постапка повеќе пати, за разни вредности на бројот на домаќинства n, можеме да ја добиеме зависноста l_{gran} = f(n) во табеларна и во графичка форма. Ваква табела и дијаграми се изработени за четирите стандардни пресеци на НН надземни водови коишто се користат за изведба на НН изводи. Тие се прикажани во табелата 8.1 и на сл. 8.1.

Со познатата зависност $l_{gran}(n)$ можат да се решаваат и обратно поставените задачи – за извод со познати карактеристики и позната должина l да се пресмета максималниот број домаќинства што смее да се приклучи на него а сè уште да биде задоволен напонскиот критериум $\Delta U \leq \Delta U_{doz}$.

Табела 8.1. Гранични должини (m) во зависност од бројот на приклучените домаќинства *n*.

Бр. на дом. n	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
$P_{\max}$, (kW)	50	72	93	113	134	154	174	193	212	232	251	270	289	308	326	345	363
Al/^ 50/8	437	305	236	193	163	142	126	113	103	94	87	81	76	71	67	63	60
Al/^ 70/12	561	391	302	247	210	183	162	145	132	121	112	104	97	91	86	81	77
Al/^ 95/15	720	502	388	317	269	234	207	186	169	155	143	133	125	117	110	104	99
X00-A 3x70	643	448	346	283	240	209	185	166	151	139	128	119	111	104	99	93	88



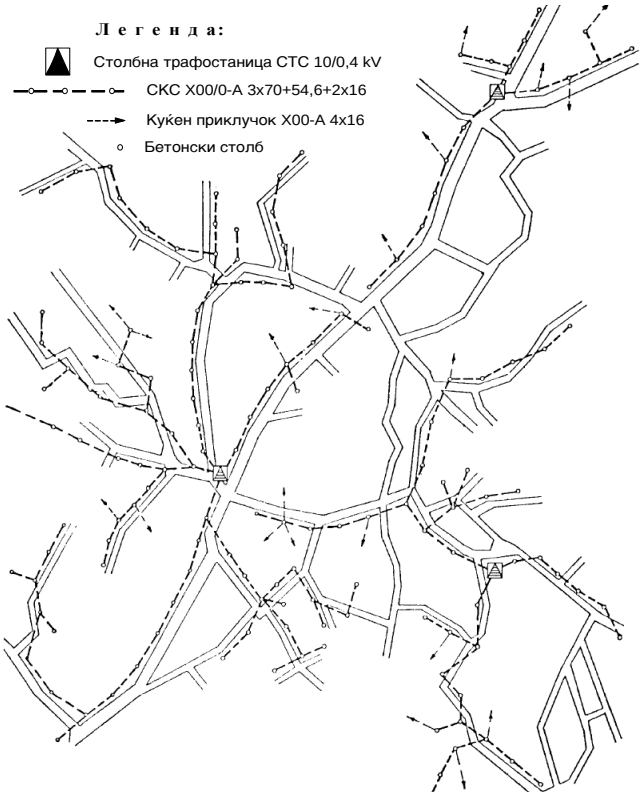
Слика 8.1. Графички приказ на табелата 8.1

■ ■ ■

Задача 9. Пресметките од претходната задача да се повторат за случајот кога се работи за домаќинства во неурбанизирани селски (рурални) средини, со мала линиска густина на станбените објекти (средини од типот 7[1]*, според ТП 14.б на ЗЕПС [20]). Врвната едновремена моќност на групата од *n* домаќинства од овој тип, според техничката препорака ТП 14б на ЗЕП може да се пресмета со помош на следната емпириска релација:

$$P_{\max} = P_{1.\text{инст}} \cdot n \cdot \left(k_e + \frac{1-k_e}{\sqrt{n}} \right) + 2{,}86 \cdot n^{0{,}88}\ \text{kW}; \qquad P_{1.\text{инст}} = 0{,}75\ \text{kW}; \quad k_e = 0{,}55 \tag{9.1}$$

[1] *) ***Забелешка.*** За овие населби е карактеристично тоа што нивните улици се без вистински раскрсници, со неправилен облик и распоред и со слаба пополнетост со објекти. Станбените објекти се главно стихиски и неплански градени, претежно со спратност П, П+1 и П+2. Греењето кај некои домаќинства е на струја, но притоа не се загреваат сите простории. Поголемиот дел од овие домаќинства применува друг начин на загревање на просториите (дрва, јаглен, масло за домаќинства и сл.). Потрошувачката на електрична енергија кај овој вид домаќинства стагнира, т.е. не расте со текот на времето.



Слика 9.1. Нисокнапонска надземна мрежа во рурално подрачје

Табела 9.1. Решение за граничните должини (m) на изводот во зависност од бројот на приклучените домаќинства *n* од типот 7 (неурбанизирани, рурални средини) за $\Delta U \leq 5\%$.

домаќинства *n*	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
P_{max}, (kW)	50	61	71	82	92	112	132	152	171	190	209	228	246	265	283	301	319	337	355
Al/^ 50/8	440	361	307	267	237	194	165	144	128	115	105	96	89	83	77	73	69	65	62
Al/^ 70/12	565	463	394	343	305	250	212	185	164	147	134	123	114	106	99	93	88	83	79
Al/^ 95/15	724	594	505	440	391	320	272	237	210	189	172	158	146	136	127	120	113	107	101
Х00-А 4х35	334	274	233	203	180	148	126	109	97	87	79	73	67	63	59	55	52	49	47
Х00-А 3х70	647	530	451	393	349	286	243	212	188	169	154	141	130	121	114	107	101	95	91

■ ■ ■

Задача 10. На сликата 10.1 е прикажан еден СН кабелски извод и дел од НН мрежа напојувана од последната ТС 10/0,4 kV/kV. Напонот во напојната точка во режимот на максимално оптоварување се држи на вредноста U_A = 10,3 kV, дедека во режимот на максималното оптоварување напонот на крајот од кабелскиот извод изнесува $U_{5'}$ = 10,21 kV. Трансформаторот Т5 во последната трафостаница СН/НН напојува осум нисконапонски кабелски изводи. Сумарното оптоварување на трансформаторот изнесува 20% од сумарното оптоварување на СН извод, т.е. $\underline{S}_5 = \underline{S}_{\Sigma 1}/5$ = (508+j165) kVA. Најоптоварениот НН извод од оваа ТС презема 1/4 од оптоварувањето на трансформаторот Т5, т.е. $\underline{S}_{\Sigma nn}$=(127+*j*41) kVA (слика 10.1). Може да се смета дека тоа е рамномерно распределено по неговата должина.

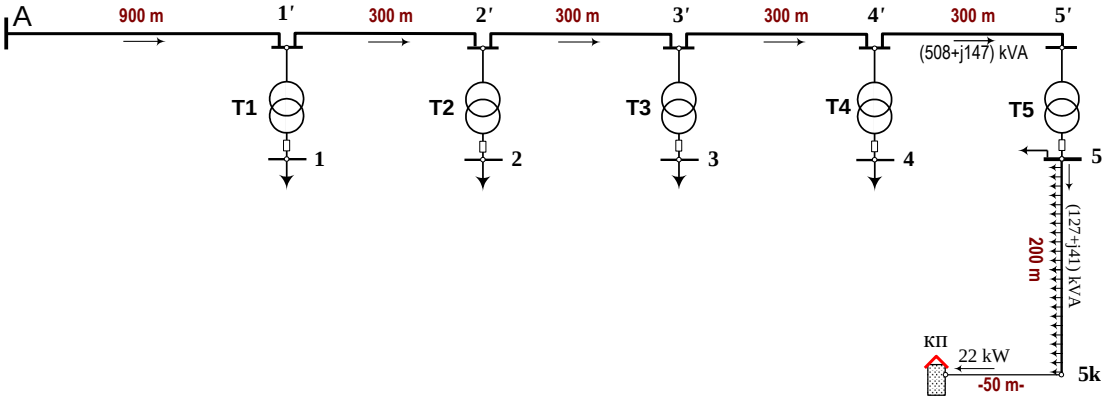
Да се пресмета вредноста на напонот на крајот од НН извод U_{5k}. Колкава е загубата на напон до крајниот потрошувач *kp* на овој извод кој претставува индивидуален станбен објект со 4 домаќинства и кој во режимот на максимално оптоварување презема моќност P_{kp} = 22 kW cosφ=0,95. Колкави ќе бидат овие напони во режимот на минималното оптоварување ако

е познато дека напонот во напојната точка А во овој режим се одржува на вредноста $U_A=U_n$ = 10 kV, а моќностите за тој режим се 3 пати помали од истите за максималниот режим.

Бројни податоци:

T5: 630 kVA; (10+2x2,5%)/0,4 kV/kV; i_0% = 1,8%; u_k%=4%; ΔP_{Fe} = 1300 W; ΔP_{Cun} = 6500 W.

НН напоен кабел: изолација од PVC, тип PP00-A 4x150, 0,6/1 kV, ($\underline{z}_{nn}$ =0,2 + j0,06) Ω/km; $M'_{0.95\text{-nn}}$ = 1820,5 kW×m/V), должина $l_{k\text{-nn}}$ = 200 m. Приклучокот на последниот станбен објект е изведен со СКС кабел тип X00-A 4x16, 0,6/1 kV, долг l_{kp}=50 m. ($\underline{z}_{kp}$ =1,875 + j0,1) Ω/km; $M'_{0.95\text{-kp}}$ = 209,7 kW×m/V).



Слика 10.1. Приказ на СН извод и дел од НН мрежа

Решение:

Параметрите на редната гранка R_T и X_T на трансформаторот T5 ќе бидат:

$$R_T = \Delta P_{\text{Cun}} \frac{U_{\text{n}}^2}{S_{\text{n}}^2} = 6,5 \cdot 10^{-3} \frac{10^2}{0,63^2} = 1,638\ \Omega;\ Z_T = \frac{u_k\%}{100} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{4}{100} \cdot \frac{10^2}{0,63} = 6,349\ \Omega;\ X_T = 6,134\,\Omega$$

Загубата на напон во трансформаторот T5 во овој режим ќе биде:

$$\Delta U_d = \frac{P_T \cdot R_T + Q_T \cdot X_T}{U_{\text{n}}} = \frac{508 \cdot 1,638 + 165 \cdot 6,134}{10} = 184,4\,\text{V};$$

$$\Delta U_q = \frac{P_T \cdot X_T - Q_T \cdot R_T}{U_{\text{n}}} = \frac{508 \cdot 6,134 - 165 \cdot 1,638}{10} = 286,4\,\text{V};$$

$$\Delta U_T = \Delta U_d + \frac{\Delta U^2}{2U_{\text{n}}} = 184,4 + 4,1 = 188,5\ \text{V}\ \ (1,89\%).$$

Според тоа за напонот U_5 (сведена вредност кон СН страна) добиваме:

$$U_5' = U_{5'} - \Delta U_T = 10,21 - 0,189 = 10,021\ \text{kV}.$$

Правата вредност на напонот U5 на напонот на секундарот од трансформаторот T5 изнесува:

$$U_5 = \frac{U_5'}{k_{\text{T5}}} = \frac{10,21}{25} = 400,8\ \text{V};\quad k_{\text{T5}} = \frac{10\ \text{kV}}{0,4\ \text{kV}} = 25.$$

Загубата на напон во НН кабел ќе биде:

$$\Delta U_{\text{НН кабел}} = \frac{P_{\text{НН кабел}} \cdot l_{\text{НН кабел}}}{2M_{\text{НН кабел}}} = \frac{127 \cdot 200}{2 \cdot 1820,5} = 7 \text{ V } (1,75\%).$$

Според тоа напонот U_{5k} на крајот од НН кабел ќе биде:

$$U_{5k} = U_5 - \Delta U_{\text{НН кабел}} = 400,8 - 7 = 393,8 \text{ V}.$$

И конечно, загубата на напон $\Delta U_{\text{кп}}$ во приклучниот НН кабел ќе биде:

$$\Delta U_{\text{кп}} = \frac{P_{\text{кп}} \cdot l_{\text{кп}}}{M_{\text{кп}}} = \frac{22 \cdot 50}{210} = 5,2 \text{ V } (1,31\%) \Rightarrow U_{\text{кп}} = U_{5\text{k}} - \Delta U_{\text{кп}} = 393,8 - 5,2 = 388,6 \text{ V}.$$

Значи процентуалната загуба на напонот во мрежата од напојната точка А до крајниот потрошувач (а тоа е главната НН разводна табла од набљудуваниот станбен објект) ќе биде:

$$\Delta U\% = \Delta U_{\text{СНкабел}} + \Delta U_{T5} + \Delta U_{\text{ННкабел}} + \Delta U_{\text{кп}} = 0,9 + 1,89 + 1,75 + 1,31 = 5,85\%.$$

Naponski priliki vo re`imot na minimalno optovaruvawe

Бидејќи моќностите во овој режим се за 3 пати помали од истите во претходниот, максимален, режим, произлегува дека загубите на напон во сите водови и трансформатори од мрежата сега ќе бидат, исто така, за 3 пати помали. Значи, со оглед на вредноста на напонот $U_A = U_n = 10$ kV во минималниот режим, добиваме:

$$\Delta U_{\text{A-5'}} = \Delta U_{\text{СНкабел}} = \frac{0,09}{3} = 0,03 \text{ kV};$$

$$U_{5'} = U_A - \Delta U_{\text{СНкабел}} = 10,0 - 0,03 = 9,97 \text{ kV}.$$

$$\Delta U_{T5} \approx \frac{188,5}{3} \approx 63 \text{ V} \Rightarrow U_5' = U_{5'} - \Delta U_{T5} = 9,97 - 0,063 = 9,907 \text{ kV};$$

$$U_5 = U_5' / k_{T5} = 9,907 / 25 = 396,3 \text{ V}.$$

$$\Delta U_{\text{ННкабел}} = \frac{7}{3} \approx 2,3 \text{ V} \Rightarrow U_{5\text{k}} = U_5 - \Delta U_{\text{ННкабел}} = 397,3 - 2,3 = 395 \text{ V}.$$

$$\Delta U_{\text{кп}} = \frac{5,24}{3} \approx 1,8 \text{ V} \Rightarrow U_{\text{кп}} = U_{5k} - \Delta U_{\text{кп}} = 394 - 1,8 = 392,2 \text{ V}.$$

Значи напонот $U_{\text{кп}}$ кај крајниот потрошувач ќе варира во текот на денот во интервалот:

$$388,6 \text{ V} \le U_{\text{кп}} \le 392,2 \text{ V}.$$

И покрај тоа што вкупната загуба на напон изнесува 5,85%, сепак варијациите на напонот кај крајниот потрошувач „кп“ се занемарливи (под 1%). Тоа се должи на фактот што регулациониот трансформатор ВН/СН, од кој што се напојува прикажаниот СН фидер, (точка А) врши „усогласена регулација“ на напонот, т.е. во максималниот режим го подига напонот на собирниците А за 3% над номиналниот, додека во минималниот режим го спушта напонот на неговата номална вредност и на тој начин во голема мера ги сузбива колебањата на напонот во сите точки од мрежата.

11.2. ТРАНСФОРМАТОРИ. РЕГУЛАЦИЈА НА НАПОН. ПРЕСМЕТКА НА ЗАГУБИ

Задача 11. Трансформатор за снижување на напонот напојува еден потрошувач. Во режимот на максималното оптоварување потрошувачот зема моќност P_2 = 20 MW при $\cos\varphi_2$ = 0,9, а во режимот на минималното оптоварување тој зема моќност P_2 = 10 MW при $\cos\varphi_2$ = 0,8. Трансформаторот работи со својот номинален преносен однос $k_T = k_{Tn}$ = 110/10,5.

Да се одредат загубите на напон и загубите на моќност во трансформаторот, како и напонот U_2 при потрошувачот, во споменатите два карактеристични режима на работа. Може да се претпостави дека напонот на ВН страна од трансформаторот се одржува на приближно константна вредност U_1 = 110 kV = const, независно од режимот на оптоварување.

Податоци за трансформаторот:

S_n = 25 MVA; U_{1n}/U_{2n} = 110/10,5 kV/kV; u_k% =11% ; ΔP_{Cun} = 130 kW; ΔP_{Fe} = 30 kW; i_o% =1%.

Решение:

Загубата на напон во трансформаторот ΔU можеме (приближно) да ја пресметаме со изразот:

$$\Delta U = U_1 = U_2' \approx \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2U_2'} \approx \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2U_n'} \;;$$

$$\Delta U_d = \frac{P_2 \cdot R_T + Q_2 \cdot X_T}{U_2'} \approx \frac{P_2 \cdot R_T + Q_2 \cdot X_T}{U_n} \text{ или}$$

$$\Delta U_d = \frac{S_2}{U_n} \cdot (R_T \cdot \cos\varphi_2 + X_T \cdot \sin\varphi_2), \text{ и}$$

$$\Delta U_q = \frac{P_2 \cdot X_T - Q_2 \cdot R_T}{U_2'} \approx \frac{P_2 \cdot X_T - Q_2 \cdot R_T}{U_n}; \text{ или}$$

$$\Delta U_q = \frac{S_2}{U_n} \cdot (X_T \cdot \cos\varphi_2 - R_T \cdot \sin\varphi_2).$$

Загубите на активна и реактивна моќност во трансформаторот се пресметуваат со помош на следните формули:

$$\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \left(\frac{S_2}{S_n}\right)^2$$

$$\Delta Q = S_n \cdot \left(\frac{i_o\%}{100} + \frac{u_k\%}{100} \cdot \alpha^2\right) = S_n \cdot \left(\frac{i_o\%}{100} + \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{S_2^2}{S_n^2}\right)$$

Параметрите R_T и X_T на подолжната (редната) гранка од трансформаторот, сведени на високонапонска страна (U_n = 110 kV), ќе бидат:

$$R_T = \Delta P_{Cun} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2} = 0{,}130 \cdot \frac{110^2}{25^2} = 2{,}517\ \Omega;$$

$$Z_T = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{11}{100} \cdot \frac{110^2}{25} = 53{,}24\ \Omega;$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{53,24^2 - 2,517^2} = 53,18\ \Omega;$$
$$\underline{Z}_T = (2,517 + j53,18)\ \Omega.$$

1. Пресметка на приликите во режимот на максималното оптоварување

Во режимот на максимално оптоварување ќе имаме:

$$P_2 = 20\ \text{MW};\quad \cos\varphi_2 = 0,9;\quad \sin\varphi_2 = 0,436;$$
$$S_2 = P_2/\cos\varphi_2 = 22,222\ \text{MVA};\quad \alpha = S_2/S_\text{n} = 0,889$$

$$\Delta U_d = \frac{22,222}{110}\cdot(2,517\cdot 0,9 + 53,18\cdot 0,436) = 5,142\ \text{kV};$$

$$\Delta U_q = \frac{22,222}{110}\cdot(53,18\cdot 0,9 - 2,517\cdot 0,436) = 9,447\ \text{kV};$$

$$\Delta U \approx \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2\cdot U_\text{n}} = 5,142 + \frac{9,447^2}{2\cdot 110} = 5,548\ \text{kV};$$

$$U_2' = U_1 - \Delta U = 110 - 5,548 = 104,452\ \text{kV};$$

$$U_2 = U_2'/k_\text{T} = 104,452\cdot(10,5/110) = 9,97\ \text{kV}.$$

Загубите на моќности во трансформаторот ќе бидат:

$$\Delta P = \Delta P_\text{Fe} + \Delta P_\text{Cun}\cdot\alpha^2 = 0,030 + 0,130\cdot 0,889^2 = 0,133\ \text{MW};$$

$$\Delta Q = S_\text{n}\cdot\left(\frac{i_o\%}{100} + \frac{u_k\%}{100}\cdot\alpha^2\right) = 25\cdot\left(\frac{1}{100} + \frac{11}{100}\cdot 0,889^2\right) = 2,423\,\text{Mvar}.$$

2. Пресметка на приликите во режимот на минималното оптоварување

Во режимот на минимално оптоварување ќе имаме:

$$P_2 = 10\ \text{MW};\quad \cos\varphi_2 = 0,8;\quad \sin\varphi_2 = 0,6;$$

$$S_2 = P_2/\cos\varphi_2 = 12,5\ \text{MVA};\quad \alpha = S_2/S_\text{n} = 0,5$$

На сосема ист начин како во претходниот случај ги одредуваме загубата на напон и загубите на активна и реактивна моќност во трансформаторот и за овој работен режим. Притоа се добиваат следните резултати:

$\Delta U_d = 3,63$ kV; $\Delta U_q = 4,67$ kV; $\Delta U = 3,63 + 4,67^2/(2\cdot 110) = 3,73$ kV;

$U'_2 = U_1 - \Delta U = 106,27$ kV; $U_2 = U'_2/k_T = 10,14$ kV

$\Delta P_T = 0,0625$ MW $= 62,5$ kW ; $\Delta Q_T = 0,9375$ Mvar $= 937,5$ kvar.

*) *Напомена:* Задачата е решена приближно бидејќи подолжната и попречната компонента на падот на напон ΔU_d и ΔU_q се пресметувани со номиналниот напон U_n наместо со вистинскиот напон U'_2 кој не ни е познат. За уточнување на решението ќе биде потребно истата постапка да се повтори доволен број пати при што компонентите ΔU_d и ΔU_q во секоја нова итерација ќе се пресметуваат со уточнетите вредности на напонот U'_2.

■ ■ ■

Задача 12. Трансформаторска станица ТС 110/10 kV/kV напојува индустриски потрошувач со моќност P=30 MW Q=14,53 Mvar ($\cos\varphi$ = 0,9). Во посматраниот режим напонот на високонапонските собирници изнесува U_1 = 113 kV. Трансформацијата на електрична енергија се врши со трансформатор за кој што се познати следните податоци:

40 MVA (110 ± 12x1,25%)/10,5 kV /kV u_k=11% i_0=0,6% ΔP_{Cun} = 211 kW ΔP_{Fe} = 36 kW.

Да се пресмета:

а) загубите на напон и моќност во трансформаторот ΔU_T, ΔP_T и ΔQ_T;

б) со каков преносен однос k_T треба да работи трансформаторот доколку сакаме напонот на неговиот секундар да изнесува $U_2 = U_0$ = 10,5 kV.

Решение:

Најнапред ќе ги пресметаме параметрите R_T и X_T од редната гранка на заменската шема, сведени на високонапонска (ВН) страна.

$$R_T = \Delta P_{\text{Cun}} \frac{U_2^2}{S_{\text{n}}^2} = 0,211 \cdot \frac{110^2}{40^2} = 1,596\ \Omega;$$

$$Z_T = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_2^2}{S_{\text{n}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{110^2}{40} = 33,275\ \Omega; \quad .$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 33,237\ \Omega.$$

а) Пресметка на загубата на напон ΔU_T.

Подолжната и попречната компонента на падот на напон најнапред ќе ги пресметаме приближно, на упростен начин, со апроксимацијата $U_2' = U_{\text{n}}$ = 110 kV. На тој начин ќе добиеме:

$$\Delta U_d \approx \frac{P \cdot R_T + Q \cdot X_T}{U_{\text{n}}} = \frac{30 \cdot 1,596 + 14,53 \cdot 33,237}{110} = 4,826\ \text{kV},$$

$$\Delta U_q \approx \frac{P \cdot X_T - Q \cdot R_T}{U_{\text{n}}} = \frac{30 \cdot 33,237 - 14,53 \cdot 1,596}{110} = 8,854\ \text{kV},$$

$$\Delta U_T \approx \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot U_{\text{n}}} = 4,826 + \frac{8,854^2}{2 \cdot 110} = 5,182\ \text{kV},$$

$$U_2' = U_1 - \Delta U_T = 113 - 5,182 = 107,82\ \text{kV}.$$

Се разбира дека оваа вредност на напонот U'_2 не е егзактна. Нејзино уточнување ќе направиме ако истата постапка повеќекратно ја повториме, но сега со уточнетите вредности за напонот U_2'. После само две вакви итерации се достига точната вредност на напонот:

U_2' =107,71 kV.

Од овој пример гледаме дека претходно добиеното приближно решение добиено со упростената постапка е сосема блиску до својата точна вредност. Тоа укажува на фактот дека приближниот начин на пресметување на загубата на напон во трансформаторите дава резултати со прифатлива точност.

а) Пресметка на загубите на моќност.

Загубите ΔP_T и ΔQ_T во трансформацијата ќе ги пресметаме со помош на следните релации:

$$\Delta P_T = \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{Cun}} \cdot \alpha^2; \quad \Delta Q_T = \left(\frac{i_0\%}{100} + \frac{u_k\%}{100} \cdot \alpha^2 \right) \cdot S_{\text{n}}; \quad \alpha = \frac{S}{S_{\text{n}}}$$

На тој начин се добива:

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{30}{0,9} = 33,333 \text{ MVA}; \quad \alpha = \frac{33,333}{40} = 0,833$$

$$\Delta P_T = 36 + 211 \cdot 0,833^2 = 182,53 \text{ kW};$$

$$\Delta Q_T = (\frac{0,6}{100} + \frac{11}{100} \cdot 0,833^2) \cdot 40 = 3,296 \text{ Mvar} = 3296 \text{ kvar}.$$

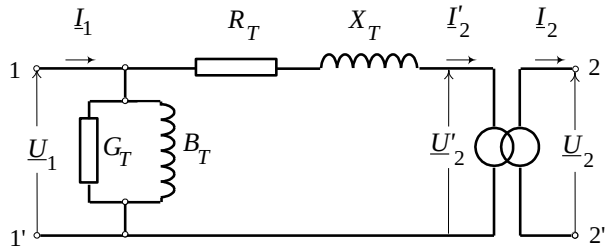
б) Пресметка на потребниот коефициент на трансформација.

Коефициентот на трансформација k_{T} претставува однос W_1/W_2 на бројот на навивки на примарната и секундарната намотка. Тој го дефинира правилото на сведување на одделните електрични величини, т.е. претставува однос на напоните U_2' и U_2, односно струите I'_2 и I_2 (слика 12.1), при што важи:

$$\frac{U_2'}{U_2} = k_{\text{T}}; \quad \frac{I_2}{I_2'} = k_{\text{T}}.$$

Од номиналните податоци за трансформаторот се гледа дека примарната намотка на трансформаторот има можност за промена на бројот на навивки W_1, додека секундарната намотка има фиксен број на навивки $W_2 = W_{2\text{n}}$. Притоа можеме да пишуваме:

$$W_1 = W_{1\text{n}} \cdot \left(1 + \frac{\alpha\%}{100}\right); \quad W_2 = W_{2\text{n}}.$$



Слика 12.1. Заменска шема на двонамотниот трансформатор

Значи, преносниот однос k_{T} може да се напише на следниот начин:

$$k_{\text{Tn}} = \frac{W_{1\text{n}}}{W_{2\text{n}}} = \frac{110}{10,5} = 10,4762,$$

$$k_{\text{T}} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{W_{1\text{n}} \cdot (1 + \alpha\%/100)}{W_{2\text{n}}} = k_{\text{Tn}} \cdot (1 + \frac{\alpha\%}{100}).$$

Напонот на секоундарната страна од трансформаторот ќе биде:

$$U_2 = \frac{U_2'}{k_{\text{T}}} = \frac{U_2'}{k_{\text{Tn}}} \cdot \frac{1}{1 + \alpha\%/100}.$$

Од погоре изложеното произлегува дека напонот U_2 што ќе владее на секундарна страна зависи од вредноста на напонот U_2' (т.е. од напонските прилики на ВН страна и од загубите на напон во трансформаторот) но и од преносниот однос на трансформаторот k_{T}.

Значи големината на напонот U_2 посредно зависи од позицијата на регулационата преклопка m% во примарната намотка. За да се постигне вредноста $U_2 = U_0 = 10{,}5$ kV во конкретните услови, преносниот однос на трансформаторот ќе треба да има вредност:

$$k_{\mathrm{T}} = k_{\mathrm{T0}} = \frac{U_2'}{U_0} = \frac{107{,}71}{10{,}5} = 10{,}2581.$$

Од релацијата;

$$k_{T0} = k_{Tn} \cdot \left(1 + \frac{\alpha_0\%}{100}\right)$$

следи:

$$\alpha_0\% = (\frac{k_{\mathrm{T0}}}{k_{\mathrm{Tn}}} - 1) \cdot 100 = (\frac{10{,}2581}{10{,}4762} - 1) \cdot 100 = -2{,}08\%.$$

Позицијата на преклопката $\alpha\%$ на регулациониот трансформатор претставува дискретна променлива која може да има некоја од следните вредности: 0; ±1,25%; ±2,50%; ±3,75% .... ±13,75% и ±15% . Од тука произлегува дека од сите расположливи вредности за m% најблиску до саканата вредност α_0% ќе биде позицијата $\alpha\% = -2{,}5\%$. За таа вредност на α%, коефициентот на трансформација на трансформаторот ќе биде:

$$k_{\mathrm{T}} = k_{\mathrm{Tn}} \cdot \left(1 + \frac{\alpha\%}{100}\right) = 10{,}4762 \cdot \left(1 + \frac{-2{,}5}{100}\right) = 10{,}2143.$$

Во тој случај напонот на секундарната страна ќе биде:

$$U_2 = \frac{U_2'}{k_{\mathrm{T}}} = \frac{107{,}71}{10{,}2143} = 10{,}53 \text{ kV}.$$

■ ■ ■

Задача 13. Во трансформаторската станица од претходниот пример се инсталира уште еден трансформатор – идентичен на претходниот, кој треба да работи во паралела со него. Колкави ќе бидат загубата на напон и загубите на моќност во трансформацијата ΔU_T, ΔP_T и ΔQ_T во тој случај.

Решение:

Во случајот кога се $n = 2$ трансформатора со идентични карактеристики работат во паралела, моќноста на потрошувачот ќе се подели помеѓу нив подеднакво, по половина на секој трансформатор. Во тој случај, постапувајќи на ист начин како и во претходната задача, ќе имаме:

$$\Delta U_d \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{P \cdot R_T + Q \cdot X_T}{U_{\mathrm{n}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{30 \cdot 1{,}596 + 14{,}53 \cdot 33{,}237}{110} = 2{,}413 \text{ kV},$$

$$\Delta U_q \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{P \cdot X_T - Q \cdot R_T}{U_{\mathrm{n}}} = \frac{30 \cdot 33{,}237 - 14{,}53 \cdot 1{,}596}{2 \cdot 110} = 4{,}427 \text{ kV},$$

$$\Delta U_T \approx \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot U_{\mathrm{n}}} = 2{,}413 + \frac{4{,}427^2}{2 \cdot 110} = 2{,}68 \text{ kV} \Rightarrow U_2' = U_1 - \Delta U_T = 113 - 2{,}68 = 110{,}32 \text{ kV}.$$

Загубите на активна и реактивна моќност во овој случај ќе бидат:

$$\Delta P_T = n\cdot\Delta P_{\text{Fe}} + \frac{1}{n}\Delta P_{\text{Cun}}\cdot\alpha^2;\ \Delta Q_T = \left(n\cdot\frac{i_0\%}{100} + \frac{1}{n}\frac{u_k\%}{100}\cdot\alpha^2\right)\cdot S_{\text{n}};\ \ \alpha = \frac{S}{S_{\text{n}}} = \frac{33,333}{40} = 0,833$$

$$\Delta P_T = 2\cdot 36 + 0,5\cdot 211\cdot 0,833^2 = 145,3 \text{ kW}$$

$$\Delta Q_T = \left(\frac{2\cdot 0,6}{100} + \frac{0,5\cdot 11}{100}\cdot 0,833^2\right)\cdot 40 = 2,008 \text{ Mvar} = 2008 \text{ kvar.}$$

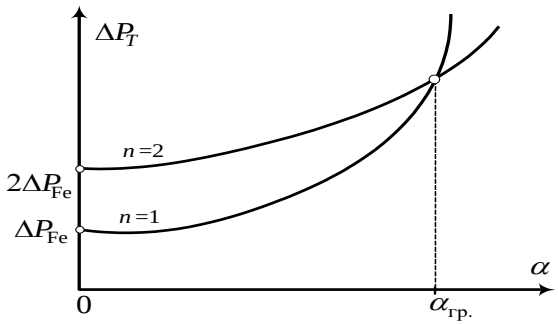
■ ■ ■

Задача 14. Да се пресмета граничната привидна моќност $S_{\text{гр}}$ на потрошувачот за која што загубите на активна моќност во трансформацијата за случајот кога работи n = 1 трансформатор $\Delta P_T(1)$ и загубите $\Delta P_T(2)$ во групата од n = 2 трансформатора, разгледувани во претходниот пример, ќе биде иста.

Решение:

Од изразот за загуби во група од n идентични трансформатори се гледа дека загубите $\Delta P_T(n)$ зависат како од коефициентот на оптоварување α, така и од бројот на трансформатори во групата n.

На сликата 14.1 е прикажана графички таа зависност за случајот n = 1 и n = 2 трансформатора во групата. Граничната моќност $S_{\text{гр}}$, значи, се добива во пресекот на овие криви. Оттука следуваат односите:



Слика 14.1.

$$\Delta P_T(n) = n\cdot\Delta P_{\text{Fe}} + \frac{1}{n}\Delta P_{\text{Cun}}\cdot\alpha^2 = \Delta P(n,\alpha)$$

$$\Delta P_T(1) = \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{Cun}}\cdot\alpha^2;\qquad \Delta P_T(2) = 2\cdot\Delta P_{\text{Fe}} + 0,5\cdot\Delta P_{\text{Cun}}\cdot\alpha^2$$

$$\Delta P_T(1) = \Delta P_T(2) \Rightarrow \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{Cun}}\cdot\alpha_{\text{гр}}^2 = 2\cdot\Delta P_{\text{Fe}} + 0,5\cdot\Delta P_{\text{Cun}}\cdot\alpha_{\text{гр}}^2$$

$$\Rightarrow \alpha_{\text{гр}} = \sqrt{\frac{2\cdot\Delta P_{\text{Fe}}}{\Delta P_{\text{Cun}}}} = \sqrt{\frac{2\cdot 36}{211}} = 0,584.$$

Граничната привидна моќност S_{gr} во тој случај ќе биде:

$$S_{\text{гр}} = \alpha_{\text{гр}}\cdot S_{\text{n}} = 0,584\cdot 40 = 23,37 \text{ MVA.}$$

Според тоа за моќности на потрошувачот $S < S_{\text{гр}}$ помали ќе бидат активните загуби во трансформацијата ако работи само едниот трансформатор, додека за $S > S_{\text{гр}}$ е подобро да бидат вклучени обата трансформатора.

■ ■ ■

Задача 15. На сликата 15.1 е прикажана еднополната шема на една трафостаница ТС 110/10 kV/kV со два идентични трансформатора (видете ја задачата ?):

Да се пресметаат загубите во трансформацијата за следните два случаја:

а) прекинувачот ПП е исклучен;

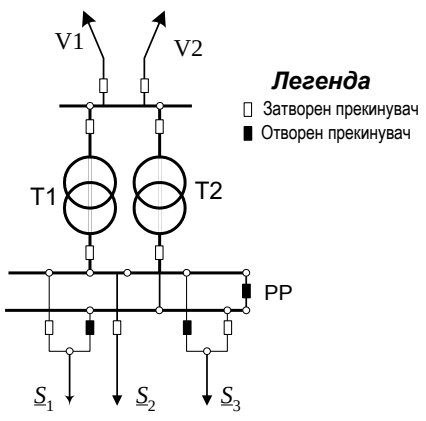
б) прекинувачот ПП е вклучен.

Бројни вредности:

T1: 40 MVA; (110±12x1,25%)/10,5 kV/kV; u_k=11%

i_0=0,6% ; ΔP_{Cun} = 211 kW; ΔP_{Fe} = 36 kW; T2≡T1

$\underline{S}_1$ = (20+j9,69) MVA; $\underline{S}_2$ = (10+j4,84) MVA; $\underline{S}_3 = \underline{S}_1$



Слика 15.1

Решение:

Од сликата 15.1 произлегува дека кога прекинувачот ПП е исклучен, СН собирници се секционирани (раздвоени) така што на првиот трансформатор Т1 ќе бидат приклучени потрошувачите $\underline{S}_1$ и $\underline{S}_2$ додека потрошувачот $\underline{S}_3$ ќе биде приклучен на трансформаторот Т2, т.е.

$$\underline{S}_{T1} = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 = (30 + j14,53) = 33,333\angle 25,84° \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{T2} = \underline{S}_3 = (20 + j9,69) = 22,222\angle 25,84° \text{ MVA}.$$

а) Прекинувачот ПП е отворен. Трансформаторите работат одвоено

Во овој случај коефициентите на оптоварување на трансформаторите α_1 и α_2 и соодветните загуби на активна моќност ќе бидат:

$$\alpha_1 = \frac{S_{T1}}{S_n} = \frac{33,333}{40} = 0,833; \quad \Delta P_{T1} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \alpha_1^2 = 36 + 211 \cdot 0,833^2 = 182,53 \text{ kW};$$

$$\alpha_2 = \frac{S_{T2}}{S_n} = \frac{22,222}{40} = 0,556; \quad \Delta P_{T2} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \alpha_2^2 = 36 + 211 \cdot 0,566^2 = 101,12 \text{ kW}.$$

$$\Delta P_{T\Sigma} = \Delta P_{T1} + \Delta P_{T2} = 182,53 + 101,12 = 283,65 \text{ kW}.$$

б) Прекинувачот ПП е затворен. Трансформаторите работат во паралела

Во овој случај сумарното оптоварување $\underline{S}_\Sigma = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3$ ќе се подели подеднакво на обата трансформатора бидејќи тие имаат идентични карактеристики:

$$\underline{S}_\Sigma = (30 + j14,53) + (20 + j9,69) = (50 + j24,22) \text{ MVA} = 55,556\angle 25,84° \text{ MVA}.$$

$$\alpha = \frac{S_\Sigma}{S_n} = \frac{55,556}{40} = 1,389; \quad \Delta P_T = 2 \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{2} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 = 2 \cdot 36 + 0,5 \cdot 211 \cdot 1,389^2 = 275,6 \text{ kW}.$$

Лесно може да се докаже дека, во општ случај, загубите на моќност во група од n идентични трансформатори ќе биде најмала кога сумарното оптоварување $\underline{S}_\Sigma$ ќе се подели рамномерно по секој од нив што значи дека, од тој аспект, тие треба да работат во паралела. Но и покрај ова, во погонот најчесто трансформаторите работат одвоено на секундарната страна заради намалување на струите на куса врска.

■ ■ ■

Задача 16. Трансформатор за снижување на напонот напојува индустриски потрошувач со променлив товар. Во режимот на максималното оптоварување моќноста на потрошувачот изнесува P_{max} = 520 kW, Q_{max} = 170,9 kvar ($\cos\varphi_{max}$ = 0,95), а напонот на примарната страна изнесува $U_{1.max}$ = 9,8 kV. Во режимот на минималното оптоварување, пак, ја имаме следната ситуација: P_{min} =200 kW, Q_{min} =96,9 kvar ($\cos\varphi_{min}$ =0,9) и $U_{1.min}$= 10,2 kV. Потребно е:

а) Да се пресмета интервалот во кој што ќе варира напонот на секундарот во текот на денот. Колкава е просечната (средната) вредност на напонот на секундарната страна $U_{2.sr}$. Трансформаторот работи со својот номинален преносен однос $k_T = k_{Tn}$ = 10/0,4 = 25.

б) Да се избере најсоодветен регулационен отцеп m% на примарната намотка од трансформаторот така што просечната вредност на напонот на секундарот $U_{2.sr}$ да биде што е можно поблиску до вредноста $U_{2.0}$ = 0,4 kV ≡ 400 V.

Податоци за трансформаторот:

630 kVA; (10+2×2,5%)/0,4 kV/kV; i_0% =1,8%; u_k%=4%; ΔP_{Fe} = 1300 W; ΔP_{Cun} = 6500 W.

Решение:

а) *Пресметка на величините* $U_{2.max}$, $U_{2.min}$ и $U_{2.sr}$.

Параметрите R_T и X_T од редната гранка на трансформаторот, сведени на 10 kV страна, ќе бидат:

R_T = 1,638 Ω ; X_T = 6,134 Ω.

Компонентите ΔU_d и ΔU_q на падот на напон, како и загубата на напон во трансформаторот во режимот на максималното оптоварување $\Delta U_{T.max}$ ќе бидат:

$$\Delta U_d = \frac{P_{max}R_T + Q_{max}X_T}{U_n} = \frac{520\cdot 1,638 + 170,9\cdot 6,134}{10} = 190\,\text{V};$$

$$\Delta U_q = \frac{P_{max}X_T - Q_{max}R_T}{U_n} = \frac{520\cdot 6,134 - 170,9\cdot 1,638}{10} = 347\,\text{V};$$

$$\Delta U_{T.max} = \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2U_n} = 190 + \frac{347^2}{220} = 196\ \text{V};$$

$$U'_{2.max} = U_{1.max} - \Delta U_{T.max} = 9,8 - 0,196 = 9,604\,\text{kV}.$$

Според тоа напонот на секундарот $U_{2.max}$ во режимот на максималното оптоварување ќе биде:

$$U_{2.max} = U'_{2.max} / k_T = 9,604\cdot 0,4/10 = 384,2\ \text{V}.$$

Постапувајќи на сличен начин ја добиваме состојбата во минималниот режим. Резултатите од пресметките се прикажани во следната табела.

Табела 1. Напонски прилики во максималниот и минималниот режим

	P	Q	U_1	ΔU_d	ΔU_q	ΔU_T	U'_2	U_2
р е ж и м	kW	kvar	kV	V	V	V	kV	V
максимален	520	170,9	9,8	190	347	196	9,604	384,2

минимален	200	96,9	10,2	92,2	106,8	92,8	10,108	404,4

Значи напонот на секундарот ќе варира во текот на денот во интервалот:

384,2 V $\leq U_2 \leq$ 404,4 V,

околу својата средна вредност: $U_{2.\text{sr}} = \dfrac{U_{2.\min} + U_{2.\max}}{2} = 394,3$ V.

б) Избор на преносен однос на трансформаторот.

Режимите на максималното и минималното оптоварување траат релативно кусо време и поголем дел од денот трансформаторот работи со некое друго оптоварување коешто е помеѓу минималното и максималното. Затоа за потрошувачите е најпогодно ако регулационата преклопка од примарната намотка ја поставиме во таква позиција што ќе биде исполнет условот $U_{2.\text{sr}} = U_{2.0}$, т.е. напонот на секундарната страна да варира околу бараната (пожелуваната) вредност $U_{2.0}$. Во тој случај напонот U_2 и понатаму ќе варира во текот на денот но отстапувањата на напонот во режимите на максимално и минимално оптоварување од бараната вредност $U_{2.0}$ ќе бидат еднакви. Покрај ова потрошувачите ќе работат најдолго време со напон близок до оној што сме сакале да го постигнеме. Затоа коефициентот на трансформација k_T и позицијата на преклопката m% ги бираме тргнувајќи од условот напонот кај потрошувачите во режимот на средното оптоварување да биде еднаков на бараниот $U_{2.0}$.

Од претходните пресметки произлезе заклучокот дека сведениот напон U'_2 не зависи од коефициентот на трансформација k_T туку зависи од напонот на примарната страна U_1 и од оптоварувањето на трансформаторот. Неговата средна (просечна) вредност ќе биде:

$U'_{2.\text{cp}} = (U'_{2.\max} + U'_{2.\min})/2 = (9,604 + 10,108)/2 = 9,856$ kV.

За да се постигне условот $U_{2.\text{cp}} = U_{20} = 0,4$ kV коефициентот на трансформација на трансформаторот треба да биде: (видете ја задачата ?)

$k_\text{T} = k_{\text{T}0} = U'_{2.\text{cp}}/U_{20} = 9,856/0,4 = 22,64$.

За остварување на овој преносен однос ќе биде потребно позицијата на преклопката да изнесува:

$$\alpha_0\% = \left(\frac{k_{\text{T}0}}{k_{\text{T}n}} - 1\right)\cdot 100 = \left(\frac{24,64}{25} - 1\right)\cdot 100 = -1,44\%..$$

Бидејќи трансформаторот има само 5 отцепи (еден основен, кој соодветствува на номиналниот преносен однос и 4 регулациони отцепи), променливата m% во случајов може да прими само 5 дискретни вредности, и тоа: –5%, –2,5%, 0, +2,5% и +5%. Од сите нив, најблиска до бараната m_0% е вредноста m% = –2,5%. За така избраната вредност на m%, трансформаторот ќе има коефициент на трансформација:

$$k_\text{T} = k_{\text{T}n}\cdot\left(1 + \frac{\alpha\%}{100}\right) = \frac{10}{0,4}\cdot\left(1 + \frac{-2,5}{100}\right) = \frac{9,75}{0,4} = 24,375.$$

Во тој случај вредностите на напонот U_2 во двата карактеристични режима ќе бидат:

$$U_{2.\max} = \frac{U'_{2.\max}}{k_\text{T}} = \frac{9,604}{24,375} = 394 \text{ V}; \quad U_{2.\min} = \frac{U'_{2.\min}}{k_\text{T}} = \frac{10,108}{24,375} = 415 \text{ V}.$$

Значи, напонот на секундарот ќе варира во текот на денот во интервалот:

394 V $\leq U_2 \leq$ 415 V,

околу својата средна вредност : $U_{2.\text{cp}} = (394 + 415)/2 = 404,5$ V.

■ ■ ■