8. ЗАГУБИ НА МОЌНОСТ И ЕНЕРГИЈА ВО ЕЛЕКТРИЧНИТЕ МРЕЖИ

Во современите ЕЕС загубите на електрична енергија достигаат 10–15% од вредноста на вкупната произведена електрична енергија. Големината на овие загуби битно влијае врз вкупните годишни експлоатациони трошоци, а со тоа и на цената на испорачаната електрична енергија.

8.1. ЗАГУБИ НА МОЌНОСТ ВО ЕЛЕМЕНТИТЕ НА МРЕЖАТА

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:

$$\Delta P_V = 3 \cdot R \cdot I^2 = R \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \quad . \tag{8.1}$$

Кај трансформаторите загубите на активната моќност ΔP_T ќе се состојат од два дела: константен дел (ΔP_{Fe}), кој не зависи од оптоварувањето, и варијабилен дел (ΔP_{Cu}), кој зависи од моќноста S низ трансформаторот, односно:

$$\Delta P_T = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot (S/S_\mathrm{n})^2 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 . \tag{8.2}$$

Во последната равенка е воведен т.н. *коефициент на оптоварување* на трансформаторот $\alpha = S/S_\mathrm{n}$, кој, како што знаеме, претставува однос помеѓу моќноста на оптоварување S и номиналната моќност на трансформаторот S_n. Во равенката (8.2) со ΔP_{Cun} се означени загубите во бакар при номиналното оптоварување.

8.2. ЗАГУБИ НА ЕНЕРГИЈА ВО ЕЛЕМЕНТИТЕ НА МРЕЖАТА

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:

$$\Delta W = \Delta P \cdot T \, . \tag{8.3}$$

Меѓутоа, ако моќностите на оптоварување P, Q и S се временски променливи, тогаш изгубената активна енергија ΔW во посматраниот период T ќе биде:

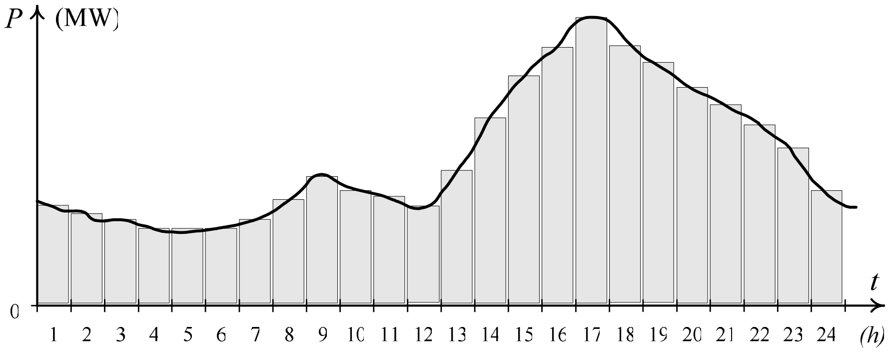
$$\Delta W = \int_o^T \Delta P(t) \cdot dt \quad . \tag{8.4}$$

Според тоа, загубите на активна енергија кај водовите ќе бидат:

$$\Delta W_V = \int_0^T \Delta P_V(t)\cdot dt = \int_0^T 3\cdot R\cdot I^2(t)\cdot dt = R\cdot\int_0^T \frac{S^2(t)}{U^2(t)}\cdot dt \ , \tag{8.5}$$

додека кај трансформаторите, ќе имаме:

$$\Delta W_T = \int_0^T (\Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun}\cdot\frac{S^2(t)}{S_\mathrm{n}^2})\cdot dt = \Delta P_{Fe}\cdot T + \Delta P_{Cun}\cdot\int_0^T \frac{S^2(t)}{S_\mathrm{n}^2}\cdot dt \ . \tag{8.6}$$



Слика 8.1. Дневен дијаграм на активното оптоварување и негова апроксимација со скалеста крива

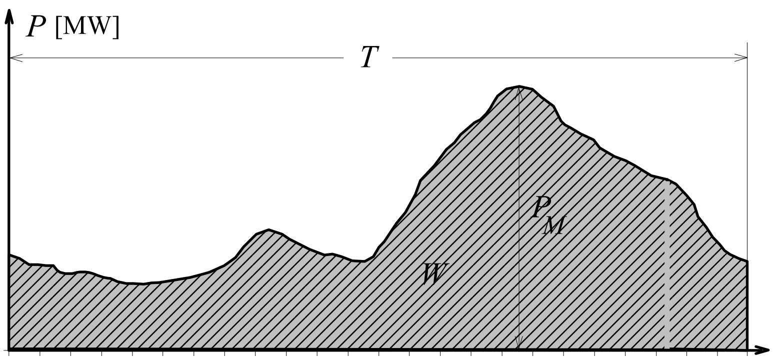
Временски променливите оптоварувања $P(t)$ и $Q(t)$ или пак $S(t)$ честопати се прикажуваат со помош на график, кој може да се апроксимира со скалеста крива со n временски интервали (слика 8.1). Во тој случај загубите на активна енергија ΔW ќе изнесуваат:

$$\Delta W_V = R\cdot\sum_{i=1}^{n}\frac{P_i^2+Q_i^2}{U_i^2}\cdot\Delta t_i = R\cdot\sum_{i=1}^{n}\frac{S_i^2}{U_i^2}\cdot\Delta t_i \ , \tag{8.7}$$

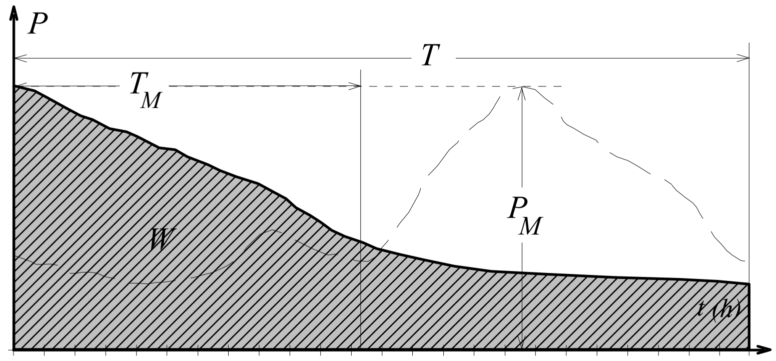
$$\Delta W_T = \Delta P_{Fe}\cdot T + \Delta P_{Cun}\cdot\sum_{i=1}^{n}\frac{S_i^2}{S_\mathrm{n}^2}\cdot\Delta t_i \ . \tag{8.8}$$

Бидејќи вредностите на напонот U_i во поедините временски интервали Δt_i не можеме однапред да ги предвидиме, најчесто се усвојува:

$$U_i \approx U_\mathrm{n}\ ;\ \ (i = 1,\ n)\ . \tag{8.9}$$



а) Дневен дијаграм на активното оптоварување *P=P(t)*



б) Подреден дневен дијаграм на активното оптоварување

Слика 8.2. Кон појаснувањето на поимот „време на максимална моќност“

На сликата 8.2 се прикажани дневниот дијаграм и подредениот дневен дијаграм на оптоварувањето на некој елемент од мрежата. Шрафираната површина на сликите 8.2а и 8.2б е пропорционална на вкупната активна енергија $W = \int P(t) \cdot \mathrm{d}t$ што се пренесува шпреку елементот и му му се испорачува на потрошувачот во периодот T (T=24 h).

$$W = \int_0^T P(t) \cdot dt \,, \tag{8.10}$$

Преземената енергија можеме да ја изразиме и преку т.н. „*употребно време*” или „*време на максимална моќност*” T_M кое што е дефинирано со изразот (8.11). Според тоа, T_M претставува време за кое истото количество електрична енергија W ќе му се предаде на потрошувачот ако тој работи со константна моќност, еднаква на неговата максимална моќност P_M :

Понатаму, од самата дефиниција за времето T_M следи:

$$T_M = \frac{W}{P_M} = \int_0^T \frac{P(t)}{P_M} \cdot dt \,, \tag{8.11}$$

или приближно:

$$T_M \approx \sum_{i=1}^{n} \frac{P_i}{P_M} \cdot \Delta t_i \ . \tag{8.12}$$

Со оглед на релацијата (8.9) загубите на активна енергија во вод, согласно (8.5), ќе бидат:

$$\begin{aligned} \Delta W_V &= R \cdot \int_0^T \frac{S^2(t)}{U^2(t)} \cdot dt \approx \frac{R}{U_n^2} \cdot \int_0^T S^2(t) \cdot dt, \text{ или} \\ \Delta W_V &= \frac{R}{U_n^2} \cdot S_M^2 \cdot \int_0^T \frac{S^2(t)}{S_M^2} \cdot dt. \end{aligned} \tag{8.13}$$

Загубите на активна моќност ΔP_M во режимот на максимално оптоварување, кога пренесуваната привидна моќност ја има својата максимална вредност S_M изнесуваат:

$$\Delta P_M = 3 \cdot R \cdot I_M^2 = R \cdot \frac{S_M^2}{U_M^2} \approx R \cdot \frac{S_M^2}{U_n^2} \ , \tag{8.14}$$

Затоа за изразот (8.13) можеме да пишуваме:

$$\Delta W_V = \Delta P_M \cdot \tau \tag{8.15}$$

каде што е:

$$\tau = \int_0^T \frac{S^2(t)}{S_M^2} \cdot dt \ \approx \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{S_i}{S_M} \right)^2 \cdot \Delta t_i \ . \tag{8.16}$$

Големината τ се нарекува *време на максимални загуби* или, скратено, *време на загуби.* Таа претставува време за кое загубите на активната енергија што ќе се остварат во елементот при пренесувањето на максималната привидна моќност S_M ќе бидат еднакви на загубите што се остваруваат при пренесувањето на променливата моќност на оптоварувањето (потрошувачот) во текот на посматраниот период T .

Времињата T_M и τ се однесуваат на еден ист дијаграм на оптоварување, па затоа помеѓу нив постои некаква врска. Таа врска приближно може да се опише со следната емпириска релација:

$$\tau = \left(0{,}124 + \frac{T_M}{10.000} \right)^2 \cdot 8760 \ , \tag{8.17}$$

и се однесува на годишните дијаграми на оптоварување на потрошувачите ($T = 1$ год $= 8760$ h).

Во стручната литература се среќаваат и други емириски изрази за проценка на времето на загуби τ врз основа на познатото употребно време T_M односно познатиот *фактор на товарот m*, дефиниран со следната релација

$$m = \frac{T_M}{T} = \frac{P_{ср}}{P_M} ; \tag{8.17а}$$

каде што $P_{ср}$ е средна моќност на потрошувачот)

Кај нас доста често се користат следните изрази за пресметка на времето на загуби τ:

$$\tau = (0{,}17 \cdot m + 0{,}83 \cdot m^2) \cdot T \ ; \tag{8.17б}$$

$$\tau = (0{,}3 \cdot m + 0{,}7 \cdot m^2) \cdot T \ ; \tag{8.17в}$$

$$\tau = (0{,}124 + 0{,}8760 \cdot m)^2 \cdot T \ ; \tag{8.17г}$$

Последната релација практично произлегува од релацијата (8.17) но овозможува и работа со дневни дијаграми на оптоварување.

Времето на максимална моќност T_M се определува од дневниот дијаграм на оптоварување на потрошувачот. Различни типови потрошувачи имаат различни дијаграми на оптоварување, па според тоа и различни времиња T_M и τ. За непостоечките потрошувачи (потрошувачи кои што ќе се појават во мрежата во иднина), како и за потрошувачите за кои не е познат дијаграмот на оптоварување, времето T_M се зема (отчитува) од разни прирачници. За таа цел може да се користи и табелата 8.1.

Табела 8.1. Зависност на времето на максимална моќност од типот на потрошувачот

Група на потрошувачи	T_M $\frac{\text{час}}{\text{год.}}$
Дистрибутивни мрежи за низок напон	1200 – 2800
Дистрибутивни мрежи за среден напон (до 35 kV)	2000 – 3500
Високонапонски преносни мрежи (до 110 kV)	3000 – 4500
Високонапонски преносни мрежи (над 110 kV)	4000 – 4500
Комунално–битов товар во градовите и селата	2000 – 3000
Индустрија – општо:	
Работа во една смена	1500 – 2000
Работа во две смени	3000 – 4500
Работа во три смени	5000 – 7000
Непрекинато производство	8000
Металургиска индустрија	6500
Хемиска индустрија	5800
Рударска индустрија	5000
Машинска индустрија	4400
Индустрија на хартија	5500
Прехранбена индустрија	5000
Графичка индустрија	3000
Текстилна индустрија	4500
Дрвно–преработувачка индустрија	2500
Индустрија за производство на ел. апарати	5000

Според тоа, загубите на активната енергија ΔW_V во електроенергетските водови за периодот T ќе бидат дадени со изразот (8.15). Кај трансформаторите, пак, кај кои имаме уште и загуби што не зависат од оптоварувањето, вкупните загуби на активната енергија ги пресметуваме со релациите:

$$\Delta W_T = \int_0^T \Delta P(t)\cdot dt = \int_0^T \left[\Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun}\cdot\frac{S^2(t)}{S_n^2}\right]\cdot dt \quad \text{, или}$$

$$\Delta W_T = \Delta P_{Fe}\cdot T + \Delta P_{Cun}\cdot\int_0^T \frac{S^2(t)}{S_n^2}\cdot dt = \Delta P_{Fe}\cdot T + \Delta P_{Cun}\cdot\frac{S_M^2}{S_n^2}\cdot\int_0^T \frac{S^2(t)}{S_M^2}\cdot dt \quad (8.18)$$

Со оглед на (8.16), се добива:

$$\Delta W_T = \Delta P_{Fe}\cdot T + \Delta P_{Cun}\cdot\frac{S_M^2}{S_n^2}\cdot\tau \ . \quad (8.19)$$

Вкупните загуби на моќност во една мрежа, во даден режим на работа, претставуваат збир од загубите на моќност во сите нејзини елементи.

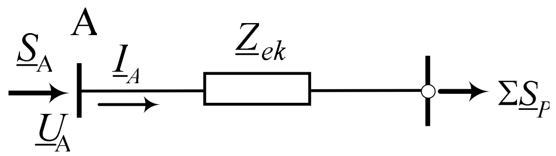
Вкупните загуби на активна и реактивна енергија во една мрежа, во даден период, претставуваат збир од загубите на активна и реактивна енергија во сите нејзини елементи, остварени во истиот тој период.

8.3. МЕТОД НА ЕКВИВАЛЕНТНА ОТПОРНОСТ

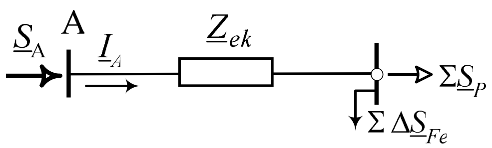
Кога во една мрежа или, пак, во дел од некоја мрежа не е неопходно да ја познаваме деталната состојба со која се опишани напонските и струјните прилики туку ни е доволно да ги знаеме (односно процениме) само загубите на моќност или енергија во неа, тогаш заради зголемување на брзината на пресметување 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, неопходно е 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 помош на „методот на еквивалентна отпорност“ (или методот на еквивалентна 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. $\Delta\underline{S} = \Delta\underline{S}_{ek}$.



а) Модел на мрежа составена само од водови



б) Модел кога мрежата содржи и трансформатори

Слика 8.3 Еквивалентни модели на дистрибутивната мрежа:
а) мрежа составена само од водови; б) мрежа што содржи и трансформатори

Се покажува дека една СН мрежа составена само од водови може да се еквивалентира само со една единствена импеданција, како што е тоа прикажано на сликата 8.3а. Кога мрежата содржи и трансформатори тогаш покрај импеданцијата $\underline{Z}_{ek}$ еквивалентот на мрежата ќе содржи и еден дополнителен фиктивен потрошувач со којшто се опфаќаат и загубите на моќност во трансформаторите што не зависат од оптоварувањето (загуби во железо), како на сликата 8.3.б.

Методот на еквивалентирање на мрежата често се користи за пресметување на загубите на моќност и енергија во разгранетите СН дистрибутивни мрежи кај кои е можно делови од дистрибутивната мрежа (нпр. цели изводи) да се прикажат компактирано без тоа да се одрази врз точноста на пресметките во останатиот дел од мрежата.

Ќе посматраме една дистрибутивна мрежа составена од n_g елементи (гранки). Со $Z(i)=R(i)+jX(i)$; $(i = 1, n_g)$ ќе ги означиме импеданциите на редните гранки од одделните елементи во дистрибутивната мрежа. Доколку во мрежата постојат и трансформатори, тогаш со $S_{\mathrm{nT}}(k)$, $u_k(k)$, $\Delta P_{Cun}(k)$, $\Delta P_{Fe}(k)$ и $\Delta Q_{Fe}(k)$ ќе ги означиме номиналните параметри на k–тиот трансформатор.

Понатаму со $\underline{I}_\Sigma(i)$); $(i = 1, n_g)$ ќе ја означиме струјата низ i–тата гранка од мрежата. Во тој случај ако со I_A ја означиме струјата во напојната точка А, тогаш ќе биде:

$$\underline{I}_\mathrm{A} = \underline{I}_\Sigma(1)\ ,$$

каде што со $\underline{I}_\Sigma(1)$ е означена струјата во главната (напојна) делница.

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 водот ќе биде:

$$\Delta\underline{S}(i) = 3\cdot\underline{Z}(i)\cdot I_\Sigma(i)^2 = 3\cdot\underline{Z}(i)\cdot k_i^2\cdot I_\mathrm{A}^2.$$

Во последната релација со $\underline{k}_i$ е означен односот на струјата низ i–тата делница и струјата низ главната (напојна) делница, т.е.

$$\underline{k}_i = \frac{\underline{I}_\Sigma(i)}{\underline{I}_\mathrm{A}}. \tag{8.20}$$

Бидејќи напоните во мрежата малку се разликуваат од номионалниот напон и се блиски меѓусебе по големина, односот на струите (8.20) може, приближно, да се напише и на следниот начин:

$$\underline{k}_i = \frac{\underline{I}_\Sigma(i)}{\underline{I}_\mathrm{A}} = \frac{\underline{I}_\Sigma(i)}{\underline{I}_\mathrm{A}}\cdot\frac{\sqrt{3}\cdot U_\mathrm{n}}{\sqrt{3}\cdot U_\mathrm{n}} \approx \frac{\underline{S}_\Sigma^*(i)}{\underline{S}_\mathrm{A}^*};\ \Rightarrow\quad k_i^2 \approx \frac{S_\Sigma^2(i)}{S_\mathrm{A}^2}. \tag{8.21}$$

Во последната релација со $\underline{S}_\mathrm{A}$ 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 коеициентот $\underline{k}_i = \underline{S}_\Sigma(i)/S_\mathrm{A}$ 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 $\Delta\underline{S}_{Cu}$). Загубите во мрежата коишто не зависат од оптоварувањето се всушност сумарните загуби во железото на енергетските трансформатори, т.е. $\Delta\underline{S}_{\text{const.}} = \Sigma\Delta\underline{S}_{Fe}$. На тој начин за загубите во мрежата $\Delta\underline{S}$ можеме да пишуваме:

$$\Delta\underline{S} = \Delta\underline{S}_{\text{var}} + \Delta\underline{S}_{\text{const.}} = \Delta\underline{S}_{\text{var}} + \Sigma\,\Delta\underline{S}_{Fe}.$$

Варијабилните загуби $\Delta\underline{S}_{\text{var}}$ ќе се добијат со сумирање на загубите на моќност во сите редни гранки од мрежата, т.е.

$$\Delta\underline{S}_{\text{var}} = \sum_{i=1}^{n_g}\Delta\underline{S}(i) = \sum_{i=1}^{n_g} 3\cdot Z(i)\cdot I_{\Sigma}^2(i);$$

$$\Delta\underline{S}_{\text{var}} = 3\cdot I_{\text{A}}^2\cdot\sum_{i=1}^{n_g} Z(i)\cdot\frac{I_{\Sigma}^2(i)}{I_{\text{A}}^2} = 3\cdot I_A^2\cdot\sum_{i=1}^{n_g} k_i^2\cdot Z(i).$$

Ако ја воведеме ознаката:

$$\underline{Z}_{ek} = \sum_{i=1}^{n_g} k_i^2\cdot\underline{Z}(i)\,, \tag{8.22}$$

тогаш за варијабилните загуби можеме да пишуваме:

$$\Delta\underline{S}_{\text{var}} = 3\cdot\underline{Z}_{ek}\cdot I_A^2.$$

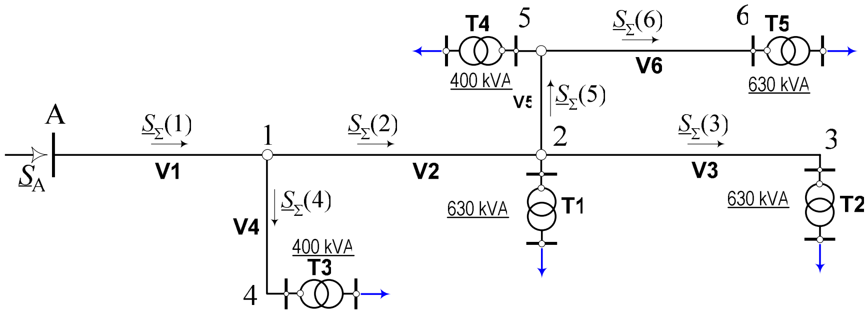
Знаејќи ја еквивалентната импеданција на мрежата Z_{ek}, вкупните загуби во мрежата можеме да ги пресметаме на едноставен начин:

$$\Delta\underline{S} = \Delta\underline{S}_{\text{var}} + \Delta\underline{S}_{\text{const.}} = 3\cdot\underline{Z}_{ek}\cdot I_A^2 + \Sigma\,\Delta\underline{S}_{Fe}.$$

Значи еквивалентната импеданција на мрежата $\underline{Z}_{ek}$ се добива на едноставен начин со помош на релацијата (8.22). Притоа најголема тешкотија во нејзиното определување е пресметувањето на коефицинтите на учество k_i. Но кај радијалните мрежи, какви што се најчесто СН и НН дистрибутивни мрежи, овие коефициенти се определуваат сосема едноставно со просто сумирање на моќностите на потрошуачите што се напојуваат преку поедините делници од мрежата.

Од изразот (8.22) се заклучува дека еквивалентната импеданција на мрежата $\underline{Z}_{ek}$ не зависи само од параметрите на мрежата туку зависи и од просторната и временска распределба на товарот во неа. Бидејќи, во општ случај, распределбата на товарот во една мрежа не е константна туку, зависно од режимот на работа, во разни моменти на посматрање на мрежата таа е различна, произлегува дека и еквивалентната импеданција на мрежата $\underline{Z}_{ek}$ е во различни моменти на посматрање различна. Во низа случаи (кои за среќа се доста чести во практиката) таа распределба е константна или приближно константна.

Нас најчесто нè интересираат загубите на моќност во мрежата за режимот на максимално оптоварување бидејќи преку пресметаните загуби во тој режим се проценуваат и загубите на енергија во мрежата. Затоа режимот на максималното оптоварување обично се усвојува како карактеристичен за којшто се вршат пресметки на коефициентите на учество k_i и на вредноста на екивалентната импеданција на мрежата $\underline{Z}_{ek}$.



Слика 8.4. Среднонапонска дистрибутивна мрежа со 5 ТС СН/НН

Кога не постојат прецизни податоци за потрошувачката врз основа на кои би била извршена деталната пресметка на состојбата во мрежата за даден режим на работа, се прибегнува кон поедноставување на пресметковната процедура и се воведуваат некои претпоставки. Една таква, многу често воведувана и сосема логична, претпоставка, е на пример, усвојување на константни коефициенти на учество преку целиот ден.

Како пример за ова нека ни послужи СН мрежа од слика 8.4 за која не постојат прецизни податоци за моќностите на потрошувачите во неа. Имено ако се усвои претпоставката дека моќноста на секој потрошувач изнесува ист процент од номиналната моќност на трансформаторот СН/НН преку којшто тој се напојува со електрична енергија, тогаш учеството на моќноста на секој потрошувач од мрежата во сумарната моќност $\underline{S}_{\mathrm{A}}$ ќе биде константно преку целиот ден. Во тој случај ќе важи:

$$\underline{k}_i = \frac{\underline{S}_\Sigma(i)}{\underline{S}_{\mathrm{A}}} \approx \frac{\sum\limits_{j\in\omega_i} S_{\mathrm{nT}}(j)}{\sum S_{\mathrm{nT}}} = \mathrm{const.} \quad (i = 1, n_g). \tag{8.23}$$

Во релацијата (8.23) со $\Sigma\, S_{\mathrm{nT}}$ е означена сумарната инсталирана моќност на сите трансформатори во мрежата. Понатаму со $S_{\mathrm{nT}}(j)$ е означена номиналната моќност на j–тиот трансформатор а со ω_i е означено множеството од потрошувачи (трансформатори) коишто се напојуваат преку i–тата делница од мрежата.

Применувајќи ја релацијата (8.23) на мрежата од сликата 8.4, за коефициентите на учество на одделните водови во мрежата ќе имаме:

$$\sum S_{\mathrm{nT}} = 630 + 630 + 400 + 400 + 630 = 2660 \text{ kVA},$$

$$k_1 = \frac{2660}{2660} = 1{,}000; \quad k_2 = \frac{2260}{2660} = 0{,}850; \quad k_3 = \frac{630}{2660} = 0{,}237;$$

$$k_4 = \frac{400}{2660} = 0{,}150; \quad k_5 = \frac{1030}{2660} = 0{,}387; \quad k_6 = \frac{630}{2660} = 0{,}237.$$

Во тој случај, со претпоставката за константни коефицвиенти на учество k_i преку целиот ден, за пресметувањето на загубите на моќност/енергија во дистрибутивната мрежа доволно ќе биде да се познаваат само параметрите на елементите од мрежата и струјата (моќноста) во напојната делница бидејќи еквивалентна импеданција $\underline{Z}_{ek}$

$= (R_{ek} + jX_{ek})$ нема да зависи од режимот на работа на мрежата и ќе се пресметува на едноставен начин, со помош на релацијата (8.24):

$$\underline{Z}_{ek} = \sum_{i=1}^{n_g} k_i^2 \cdot \underline{Z}(i) = \sum_{i=1}^{n_g} \left[R(i) + jX(i) \right] \cdot \left[\frac{\sum_{j \in \omega_i} S_{\mathrm{nT}}(j)}{\sum S_{\mathrm{nT}}} \right]^2 . \tag{8.24}$$

8.3. ПРИМЕРИ

Пример 8.1. Група потрошувачи со вкупна моќност $\underline{S} = (1000 + \mathrm{j}500)$ 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:

$U_{1\mathrm{n}}/U_{2\mathrm{n}}$ = 10/0,4 kV/kV; S_n =1000 kVA; ΔP_{Cun} = 13,7 kW; ΔP_{Fe} = 2,7 kW; $u_k\%$ = 6% ; i_o=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 $S_{(1)} = S/n$. Во тој случај загубата на активна моќност $\Delta P_{(1)}$ во еден од трансформаторите ќе изнесува:

$$\Delta P_{(1)} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot [\frac{S_{(1)}}{S_\mathrm{n}}]^2 = \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n^2} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot (\frac{S}{S_\mathrm{n}})^2 ,$$

додека вкупните загуби на активна моќност во групата од n трансформатори ќе биде n пати поголема, или:

$$\Delta P_{(n)} = n \cdot \Delta P_{(1)} = n \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \left(\frac{S}{S_\mathrm{n}} \right)^2 \quad \text{или}$$

$$\Delta P_{(n)} = n \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 ; \qquad \alpha = \frac{S}{S_\mathrm{n}}.$$

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: $\dfrac{d(\Delta P)}{dn} = 0$,

т.е.: $\Delta P_{Fe} - \Delta P_{Cun} \cdot \dfrac{\alpha^2}{n^2} = 0$,

од каде што 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 ќе имаме:

$$n = \frac{S}{S_{\mathrm{n}}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{Cun}}{\Delta P_{Fe}}} = \frac{1118}{1000} \cdot \sqrt{\frac{13,5}{2,7}} = 2,5 \ ,$$

што значи дека оптималниот број на трансформатори во групата n_o со кој што се постигнува загубите да бидат минимални, ќе биде $n_o = 2$ или $n_o = 3$. Во случајот кога е $n = 2$ добиваме:

$$\Delta P_{(2)} = 2 \cdot \Delta P_{Fe} + (1/2) \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 ;$$

$$\Delta P_{(2)} = 2 \cdot 2,7 + (1/2) \cdot 13,7 \cdot 1,118^2 = 12,95 \ \mathrm{kW},$$

додека во случајот кога имаме $n = 3$ трансформатори во групата, вкупните загуби ќе бидат:

$$\Delta P_{(3)} = 3 \cdot \Delta P_{Fe} + (1/3) \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 ;$$

$$\Delta P_{(3)} = 3 \cdot 2,7 + (1/3) \cdot 13,7 \cdot 1,118^2 = 13,13 \ \mathrm{kW} .$$

Одовде произлегува дека за дадениот режим на работа групата ќе треба да работи со два трансформатора, т.е. $n_o = 2$.

□ □ □

Пример 8.2. 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:

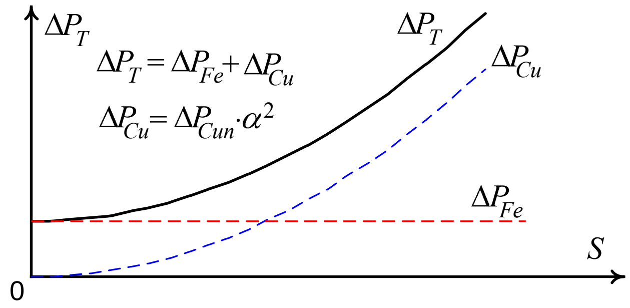
35/10 kV/kV; 10 MVA; ΔP_{Cun}= 96 kW; ΔP_{Fe} = 30 kW;

u_k% = 8% ; i_o =1,2%.

Решение:

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 (4.59), доколку е познат коефициентот на оптоварување на трансформаторот $\alpha = S/S_{\mathrm{n}}$, загубата на моќност $\Delta P_{(1)}$ во случајот кога се работи за само еден трансформатор, ќе биде:

$$\Delta P_{(1)} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu} = \Delta P_{(1)} = \Delta P_{Fe} + \alpha^2 \cdot \Delta P_{Cun}\ .$$



Слика П.8.2.1. Зависност на загубите $\Delta P_{(1)}$ во еден трансформатор од степенот на неговото оптоварување

Во општ случај, кога бројот на трансформаторите во групата n е произволен, вкупните загуби на активна моќност во трансформацијата, согласно изнесеното во примерот 8.1, ќе бидат:

$$\Delta P_{(n)} = n \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \left(\frac{S}{S_{\mathrm{n}}} \right)^2 = n \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2;\ \alpha = \left(\frac{S}{S_{\mathrm{n}}} \right)$$

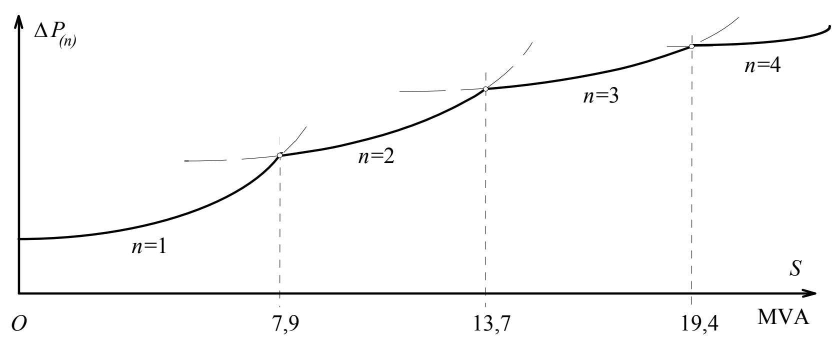
.

При работа на вкупно n+1 трансформатори во групата, вкупните загуби ќе бидат:

$$\Delta P_{(n+1)} = (n+1) \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n+1} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \left(\frac{S}{S_{\mathrm{n}}}\right)^2$$

$$\Delta P_{(n+1)} = (n+1) \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n+1} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2.$$

Од последните две равенки можеме да ја определиме привидната моќност на групата $S_{(n)}$ 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 вкупно n, на работа со вкупно n+1 трансформатори во групата, кога товарот расте, односно од вкупно n+1, на вкупно n трансформатори, кога тој се намалува. Графичкиот начин на определувањето на граничната привидна моќност е прикажан на сликата П.8.3.2.



Слика П.8.2.2. Зависност на загубите $\Delta P_{(n)}$ во група од n идентични, паралелно сврзани трансформатори, од сумарната привидна моќност на потрошувачот S.

Во согласност со кажаното, ќе имаме:

$$n \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot (\frac{S_{(n)}}{S_{\mathrm{n}}})^2 = (n+1) \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n+1} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot (\frac{S_{(n)}}{S_{\mathrm{n}}})^2 .$$

Од последната релација се добива бараната моќност $S = S_{(n)}$:

$$S_{(n)} = S_n \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{Fe}}{\Delta P_{Cun}} \cdot n \cdot (n+1)} \ .$$

Притоа е:

$$\frac{\Delta P_{Fe}}{\Delta P_{Cun}} = \frac{30}{96} = 0,313 \ .$$

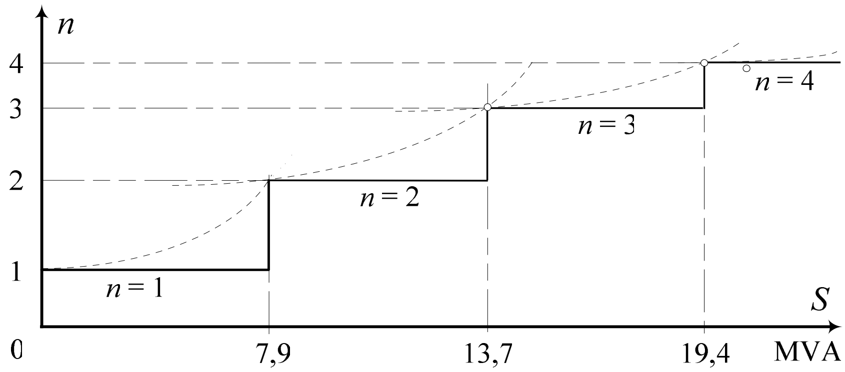
На тој начин ги добиваме следните гранични вредности на товарот:

$$S_{(1)} = 10 \cdot \sqrt{1 \cdot 2 \cdot 0,313} = 7,9 \ \mathrm{MVA} \, ;$$

$$S_{(2)} = 10 \cdot \sqrt{2 \cdot 3 \cdot 0,313} = 13,7 \ \mathrm{MVA} \, ;$$

$$S_{(3)} = 10 \cdot \sqrt{3 \cdot 4 \cdot 0,313} = 19,4 \ \mathrm{MVA} \, .$$

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. П.8.2.3.



Слика П.8.2.3. Зависност на потребниот број на трансформатори во групата *n* од оптоварувањето *S*

□ □ □

Пример 8.3. На сликата П.8.3.1 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 $\cos\varphi = 0,8 = \text{const.}$ и со познат подреден годишен дијаграм на оптоварување, прикажан со следната табела:

Табела П.8.3.1. Податоци за годишниот дијаграм на оптоварување

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 $\underline{\Delta S} = \Delta P + j\Delta Q$ 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:

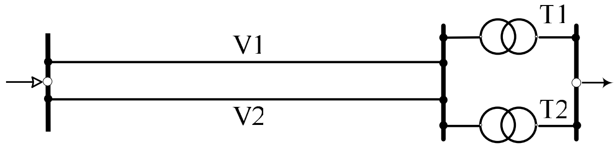
Вод V1: $\underline{z} = (0{,}28 + j0{,}43)\ \Omega/\text{km}$; $l = 15$ km.

Водот V2 е идентичен со водот V1, т.е. V2≡V1.

Трансформатор T1:

7.500 kVA ; 35/10,5 kV/kV; $\Delta P_{Cun} = 75$ kW; $\Delta P_{Fe} = 24$ kW; $u_k\% = 7{,}5\%$; $i_o\% = 3{,}5\%$

Трансформатор T2: (T2≡T1).



Слика П.8.3.1. Шематски приказ на анализираниот преносен систем

Р е ш е н и е:

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 $\quad S'_M = S_M/2 = 6{,}25$ MVA .

Понатаму, за сумарните загуби во преносниот систем $\underline{\Delta S_\Sigma}$ 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:

$$\underline{\Delta S_V} = \frac{S^2}{U_n^2}\cdot(R_V + jX_V)\ ;$$

$$\underline{\Delta S_V} = \frac{6{,}25^2}{35^2}\cdot(0{,}28 + j0{,}43)\cdot 15 = (0{,}134 + j0{,}206)\ \text{MVA},$$

$$\Delta P_{T\cdot} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun}\cdot\alpha^2 = 24 + 25\cdot(6{,}25/7{,}5)^2 = 76{,}1\ \ \text{kW},$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{Fe} + X_T \cdot \frac{S^2}{U_n^2} = (\frac{i_o\%}{100} + \frac{u_k\%}{100} \cdot \alpha^2) \cdot S_n ,$$

$$\Delta Q_T = (\frac{3,5}{100} + \frac{7,5}{100} \cdot \frac{6,25^2}{7,5^2}) \cdot 7500 = 653 \text{ kvar} ,$$

$$\underline{\Delta S}_T = \Delta P_T + \Delta Q_T = (0,076 + 0,653) \text{ MVA} .$$

Значи, вкупните загуби во системот, во режимот на максималното оптоварување, ќе изнесуваат:

$$\underline{\Delta S}_\Sigma = 2 \cdot (0,134 + j0,206) + 2 \cdot (0,076 + j0,653)$$

$$\underline{\Delta S}_\Sigma = (0,420 + j0,718) \text{ MVA} .$$

Годишните загуби на активна енергија ΔW_Σ во разгледуваниот пренесен систем ќе бидат:

$$\Delta W_\Sigma = 2 \cdot \Delta W_V + 2 \cdot \Delta W_T$$

$$\Delta W_\Sigma = 2 \cdot \frac{S^2}{U_n^2} \cdot R \cdot \tau + 2 \cdot (\Delta P_{Fe} \cdot T + \Delta P_{Cun} \cdot \frac{S^2}{S_n^2} \cdot \tau),$$

$$\tau = \sum_{i=1}^{3} \frac{S_i^2}{S_M^2} \cdot \Delta t_i = \sum_{i=1}^{3} (\frac{P_i / \cos\varphi_i)}{P_M / \cos\varphi_M})^2 \cdot \Delta t_i ,$$

$$\tau = \frac{12,5^2 \cdot 2000 + 6,25^2 \cdot 2000 + 2,5^2 \cdot 4760}{12,5^2} = 2650 \ h ,$$

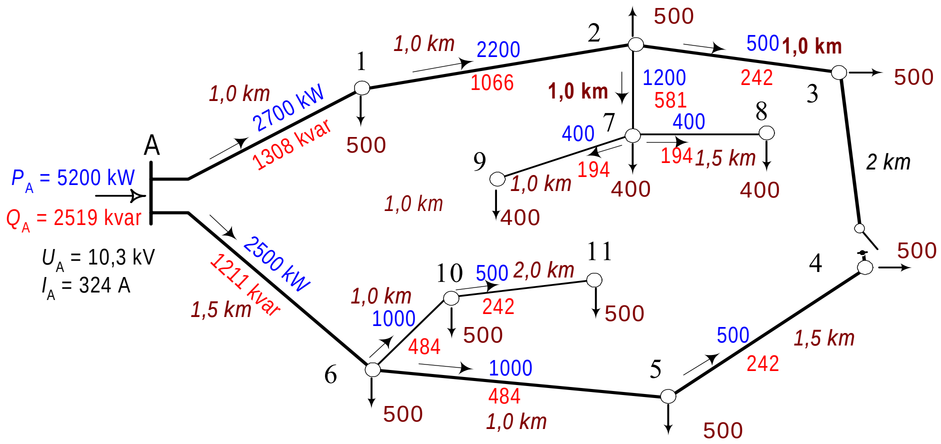
$$\Delta W_V = \frac{6,25^2}{35^2} \cdot 4,2 \cdot 2650 = 355 \text{ MWh} ;$$

$$\Delta W_T = 0,024 \cdot 8760 + 0,075 \cdot (\frac{6,25}{7,5})^2 \cdot 2650 = 348 \text{ MWh} ,$$

$$\Delta W_\Sigma = 2 \cdot 355 + 2 \cdot 348 = 1406 \text{ MWh/годишно}.$$

□ □ □

Пример 8.4.



Слика П.8.4.1. Распределба на моќностите во анализираната кабелска мрежа

Да се пресмета еквивалентната импеданција Z_{ek} на мрежата од примерот 5.4. Во пресметките да се користат резултатите за пресметаните текови на моќност во мрежата (слика П.8.4.1). Сите водови во мрежата се кабли од типот XHE 49 A 3×1×150, 6/10 kV со ист пресек и исти подолжни параметри $\underline{z}$= (0,208+j0,092) Ω/km.

Решение:

Сумарната моќност на потрошувачите, според сликата П.8.4.1, изнесува:

$$\underline{S}_\mathrm{A} = (5200 + j2519) = 5778 \cdot e^{j25,9^\circ} \text{ kVA}.$$

Модулот на струјата $\underline{I}_\mathrm{A}$ што мрежата ја влече од системот изнесува:

$$I_\mathrm{A} = \frac{S_\mathrm{A}}{\sqrt{3} \cdot U_\mathrm{A}} = \frac{5778}{\sqrt{3} \cdot 10} = 324 \text{ A}.$$

Сега, врз основа на тековите на моќности добиени во примерот 5.4 и врз основа на изразите (8.20) и (8.21) најнапред ќе ги пресметаме коефициентите $\underline{k}_i$ а потоа, со помош на (8.22) и соодветните производи $\left|\underline{k}_i\right|^2 \cdot \underline{Z}_i$ за секоја редна гранка од мрежата. Така, на пример, за првите две гранки од мрежата ќе добиеме:

$$\underline{k}_1 = \frac{\underline{S}_\Sigma(1)}{\underline{S}_\mathrm{A}} = \frac{2700 + j1308}{5200 + j2519} = 0,51924 \cdot e^{j0^\circ}; \quad \left|\underline{k}_1^2\right| = 0,27;$$

$$\left|\underline{k}_1^2\right| \cdot \underline{Z}_1 = \left|\underline{k}_1^2\right| \cdot \underline{z} \cdot l_1 = 0,27 \cdot (0,208 + j0,092) \cdot 1 = 61,32 \cdot e^{j23,9^\circ} \text{ m}\Omega;$$

$$\underline{k}_2 = \frac{\underline{S}_\Sigma(2)}{\underline{S}_\mathrm{A}} = \frac{2200 + j1066}{5200 + j2519} = 0,42301 \cdot e^{j0,006^\circ}; \quad \left|\underline{k}_2^2\right| = 0,179;$$

$$\left|\underline{k}_2^2\right| \cdot \underline{Z}_2 = \left|\underline{k}_2^2\right| \cdot \underline{z} \cdot l_2 = 0,179 \cdot (0,208 + j0,092) \cdot 1 = 40,71 \cdot e^{j23,9^\circ} \text{ m}\Omega;$$

итн.

На тој начин ја добиваме табелата П.8.4.1), во која, покрај тековите на моќности се прикажани и коефициентите $\underline{k}_i$ $k_i^2 \cdot \underline{Z}_i$.

Еквивалентната импеданција на мрежата се добива со помош на изразот (8.22):

$$\underline{Z}_{ek} = \sum_{i=1}^{n_g} k_i^2 \cdot \underline{Z}(i) = (203,6 + j90,1) \text{ m}\Omega = 222,4 \cdot e^{j66^\circ} \text{ m}\Omega.$$

Сега можеме да ги пресметаме (приближно) и загубите на моќност во мрежата за прикажаниот режим:

$$\Delta P_\Sigma = 3 \cdot R_{ek} \cdot I_\mathrm{A}^2 = 3 \cdot 0,2036 \cdot 334^2 = 64074 \text{ W} \equiv 64,1 \text{ kW}.$$

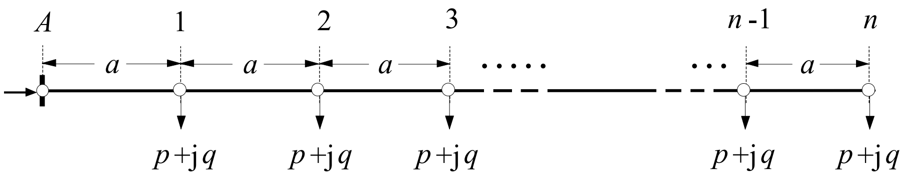
За споредба, за истиот тој режим во примерот 5.4 се пресметани загуби на активна моќќност во износ:

$$\Delta P_\Sigma = 65,85 \text{ kW}.$$

Табела П.8.4.1. Текови на моќности, загуби на напон и напони во мрежата

ред. број	Делница	Долж. l (km)	$P_{\Sigma i}$ (kW)	$Q_{\Sigma i}$ (kvar)	$\lvert \underline{k}_i^2 \rvert$	$\underline{Z}_i$ (Ω)	$\underline{Z}_i \cdot k_i^2$ (mΩ)
1	A – 1	1,0	2700	1308	0,270	0,208+j0,092	56,1+j24,8
2	1 – 2	1,0	2200	1066	0,179	0,208+j0,092	37,2+j16,5
3	2 – 3	1,0	500	242	0,009	0,208+j0,092	1,9+j0,9
4	2 – 7	1,0	1200	581	0,053	0,208+j0,092	11,1+j4,9
6	7 – 8	1,5	400	194	0,006	0,312+j0,138	1,8+j0,8
7	7 – 9	1,0	400	194	0,006	0,208+j0,092	1,2+j0,5
8	A – 6	1,5	2500	1211	0,231	0,312+j0,138	72,1+j31,9
9	6 – 5	1,0	1000	484	0,037	0,208+j0,092	7,7+j3,4
10	5 – 4	1,5	500	242	0,009	0,312+j0,138	2,9+j1,3
11	6 – 10	1,0	1000	484	0,037	0,208+j0,092	7,7+j3,4
12	10 - 11	2,0	500	242	0,009	0,416+j0,184	3,8+j1,7

Пример 8.5. Да се изведе изразот за еквивалентна импеданција за случајот на магистрален вод (мрежа) со позната должина l и редна импеданција $\underline{Z} = \underline{z}\cdot l = (R+jX)$, со вкупно n еднакви, рамномерно распределени потрошувачи (слика П.8.5.1), анализиран во задачата 2.18 од Збирката задачи.



Сл. П.8.5.1. Идеализиран модел на рамномерно оптоварен магистрален вод

Решение:

Вкупната моќност на потрошувачите што се напојуваат од овој вод изнесува:

$$\underline{S} = (P + jQ) + n\cdot\underline{s} = n\cdot(p + jq);\quad P = n\cdot p;\quad Q = n\cdot q.$$

Ако со $\underline{S}_{\Sigma}(k) \equiv \underline{S}_{\Sigma k} = (P_{\Sigma k}+jQ_{\Sigma k})$, како и досега, го означиме моќноста низ делницата k од мрежата, тогаш, во согласност со сликата П.6.5.1, ќе имаме:

$$P_{\Sigma n} = p;\quad Q_{\Sigma n} = q;$$

$$P_{\Sigma n-1} = 2\cdot p;\ Q_{\Sigma n-1} = 2\cdot q;$$

. . . . . .

$$P_{\Sigma k} = (n+1-k)\cdot p;\quad Q_{\Sigma k} = (n+1-k)\cdot q$$

. . . . . .
$P_{\Sigma 1} = n{\cdot}p$; $Q_{\Sigma 1} = n{\cdot}q$.

Сега, врз основа на овие текови на моќности и врз основа на изразите (8.20) и (8.21) најнапред ќе ги пресметаме коефициентите $\underline{k}_i$ а потоа, со помош на (8.22) и соодветните производи $|\underline{k}_i|^2 \cdot \underline{Z}_i$ за секоја редна гранка од мрежата.

$$\underline{k}_1 = \frac{\underline{S}_{\Sigma 1}}{\underline{S}} = \frac{n \cdot \underline{s}}{n \cdot \underline{s}} = 1; \quad \underline{k}_2 = \frac{\underline{S}_{\Sigma 1}}{\underline{S}} = \frac{(n-1) \cdot \underline{s}}{n \cdot \underline{s}} = \frac{n-1}{n};$$

$$\underline{k}_k = \frac{\underline{S}_{\Sigma k}}{\underline{S}} = \frac{(n+1-k) \cdot \underline{s}}{n \cdot \underline{s}} = \frac{n+1-k}{n}; \quad \ldots \quad \underline{k}_n = \frac{1}{n}.$$

Понатаму, тргнувајќи од самата дефиниција за еквиваентаната импеданција на една мрежа добиваме:

$$\underline{Z}_{ek} = \sum_{k=1}^{n} \underline{Z}_k \cdot \left[\underline{k}_k^2 \right] = \frac{\underline{Z}}{n} \cdot \left[\left(\frac{n}{n}\right)^2 + \left(\frac{n-1}{n}\right)^2 + \ldots + \left(\frac{2}{n}\right)^2 + \left(\frac{1}{n}\right)^2 \right];$$

$$\underline{Z}_{ek} = \frac{\underline{Z}}{n} \cdot \left[\frac{1^2 + 2^2 + \ldots + n^2}{n^2} \right] = \frac{\underline{Z}}{n} \cdot \frac{n \cdot (n+1) \cdot (2n+1)}{6n^2} = \underline{Z} \cdot \frac{(n+1) \cdot (2n+1)}{6n^2}.$$

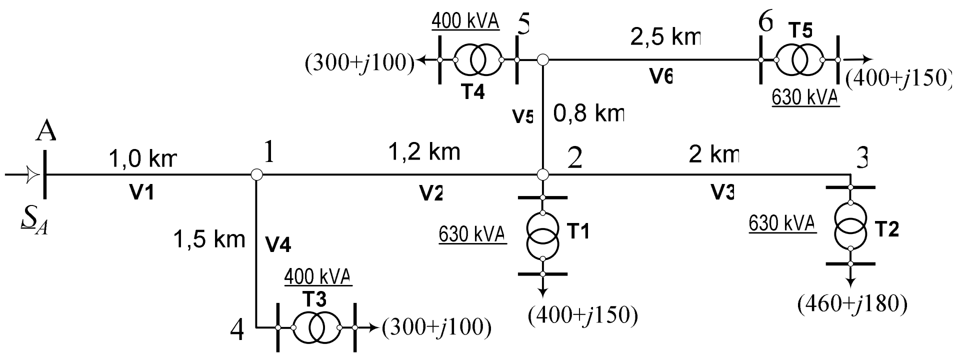
Лесно можеме да се убедиме дека загубите на активна моќност ΔP во водот, пресметани со помош на неговата, на овој начин добиена, еквивалентна импеданција ќе бидат:

$$\Delta P = \frac{(n+1) \cdot (2n+1)}{6n^2} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \cdot R = \frac{(n+1) \cdot (2n+1)}{6n^2} \cdot \Delta P_{\text{конц}},$$

а тоа е истиот оној резултат што се доби за загубите на активна моќност во задачата 2.18.

Кога бројот на потрошувачи n коишто се напојуваат од магистралниот вод тежи кон бесконечност, еквивалентата импеданција на водот $\underline{Z}_{ek}$ ќе тежи кон вредноста $\underline{Z}_{ek} \rightarrow (1/3){\cdot}\underline{Z}$.

Пример 8.6. Се посматра еден извод од 10 kV надземна мрежа од кој што се напојуваат пет ТС СН/НН (слика П.8.6.1). Магистралниот дел од изводот А–1–2–3 е изведен со спроводници Al/Č 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/Č 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 максималното оптоварување, изразени во (kVA), се прикажани на сликата. Напонот во напојната точка А изнесува U_{A} = 10,3 kV. За енергетските трансформатори се познати следните податоци:



Слика П.8.6.1. Шема на разгледуваниот 10 kV извод од посматраната надземна мрежа.

Да се пресмета еквивалентната отпорност на мрежата и да се нацрта соодветната еквивалентна заменска шема.

	S_n (kVA)	U_{1n}/U_{2n} (kV/kV)	u_k% (%)	i_0% (%)	ΔP_{Cun} (kW)	ΔP_{Fe} (kW)	ΔQ_{Fe} kvar)
1	630	10/0,4	4	1,8	6,5	1,30	11,34
2	400	10/0,4	4	2,0	4,6	0,93	8,0

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:

$$R_T = \Delta P_{Cun}\cdot\frac{U_n^2}{S_n^2}\,;\quad Z_T=\frac{u_k\%}{100}\cdot\frac{U_n^2}{S_n};\quad X_T=\sqrt{Z_T^2-R_T^2}\,;$$

$$\underline{Z}_T = (R_T + jX_T).$$

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.:

$$\underline{S}_A = (400+j150)+(460+j180)+(300+j100)+(300+j100)+(400+j150)$$

$$\underline{S}_A = (1860+j680)\text{ kVA}.$$

Табела П.8.6.1. 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

Според тоа, коефициентот $\underline{k}_5$ за 5–тата делница ќе биде:

$$\underline{k}_5 = \frac{\underline{S}_{\Sigma}(5)}{\underline{S}_A} = \frac{(700 + j250)}{(1860 + j680)} = (0,375 - j0,003);$$

$$\left|\underline{k}_5\right|^2 = (0,375^2 + 0,003^2) = 0,141.$$

Пресметаните вредности $\underline{Z}_V$ и $\underline{Z}_T$ за редните импеданции на одделните водови и трансформатори од мрежата се прикажани во табелата П.8.6.1. Во истата табела се сместени и вредностите на пресметаните коефициенти $\underline{k}_i$ за секоја од гранките од мрежата, пресметани на претходно опишаниот начин.

Сумарните загуби во железо, т.е. „константните загуби" се добиваат со сумирање на загубите во железо во сите енергетски трансформатори. , т.е.:

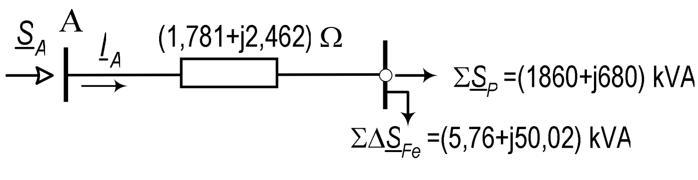
$$\Sigma\,\Delta\underline{S}_{Fe} = 2\cdot(0,93 + j8,00) + 3\cdot(1,3 + j11,34) = (5,76 + j50,02)\ \text{kVA}.$$

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 П.8.6.1:

$$R_{ek} = \sum_{i=1}^{11} |\,k_i\,|^2 \cdot R(i) = 1,781\ \Omega; \quad X_{ek} = \sum_{i=1}^{11} |\,k_i\,|^2 \cdot X(i) = 2,462\ \Omega;$$

$$Z_{ek} = (1,781 + j2,462)\ \Omega.$$

Според тоа целата мрежа од сликата П.8.6.1 може да се претстави со еквивалентото коло прикажано сликата П.8.6.2.



Слика П.8.6.2 Еквивалентен модел на дистрибутивната мрежа од сл. П.8.6.1

Вкупните загуби на моќност во мрежата $\Delta\underline{S}$ ќе се добијат на следниот начин:

$$\underline{S}_{ek} = \Sigma\,\underline{S}_P + \Sigma\,\Delta\underline{S}_{Fe} =$$
$$= (1860 + j680) + (5,76 + j50,02) = (1865,76 + j730,02)\ \text{kVA};$$

$$\Delta\underline{S} = Z_{ek} \cdot \frac{|\underline{S}_{ek}|^2}{U_n^2} = (1,781 + j2,462) \cdot \frac{1865,76^2 + 730,02^2}{10^2};$$

$$\Delta\underline{S} = (71,5 + j98,8)\ \text{kVA}.$$

Според тоа моќноста $\underline{S}_A$ што мрежата ја влече од напојната точка ќе биде:

$$\underline{S}_A = \underline{S}_{ek} + \Delta\underline{S} = (1937,26 + j828,82) = 2082,6 \cdot e^{j22^\circ}\ \text{kVA};$$

$$I_A = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_A} = 120,24\ \text{A}.$$

□ □ □