

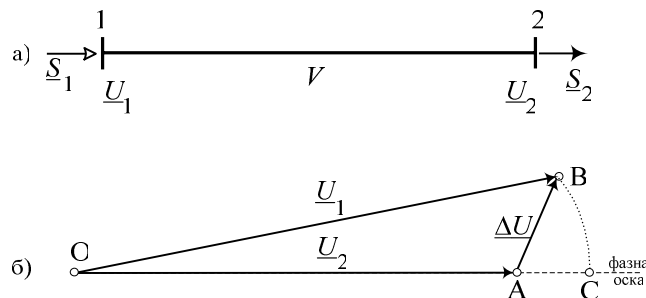
5. ПРЕСМЕТУВАЊЕ НА РАДИЈАЛНИ ЕЛЕКТРИЧНИ МРЕЖИ

Отворени (*радијални*) електрични мрежи се мрежи без ниту една контура. Поради тоа тие се решаваат многу поедноставно отколку што се решаваат сложено-затворените мрежи. Затоа анализите ќе ги започнеме со наједноставниот случај на мрежа составена од само два јазла и еден елемент – вод. Потоа ќе го прикажеме начинот на определување на напоните, струите и моќностите на еден енергетски трансформатор и на крајот проблемот ќе го пропириме и на случајот кога мрежата е отворена, со произволна конфигурација и произволен број елементи.

5.1. ПРЕСМЕТКА НА ЗАГУБА НА НАПОН НА ВОД

Ќе посматраме симетричен трифазен вод, оптоварен на крајот исто така со симетрично трифазно оптоварување (сл. 5.1 а). Во вакви услови, фазните напони и фазните струи низ водот ќе образуваат трифазен симетричен систем на напони односно струи, респективно.

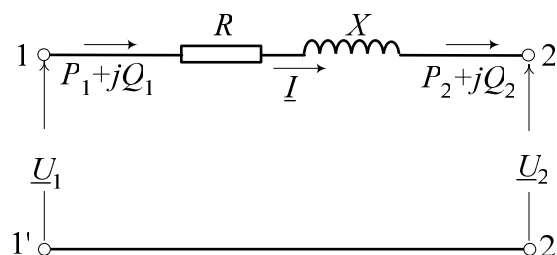
Ако напонот на почетокот од водот го означиме со \underline{U}_1 , а напонот на крајот со \underline{U}_2 , тогаш, разликата на комплексните напони $\underline{U}_1 - \underline{U}_2$ се нарекува *пад на напон* во водот. На сликата 5.1 б падот на напон во водот е означен со векторот АВ.



Слика 5.1. Векторски дијаграм на напоните

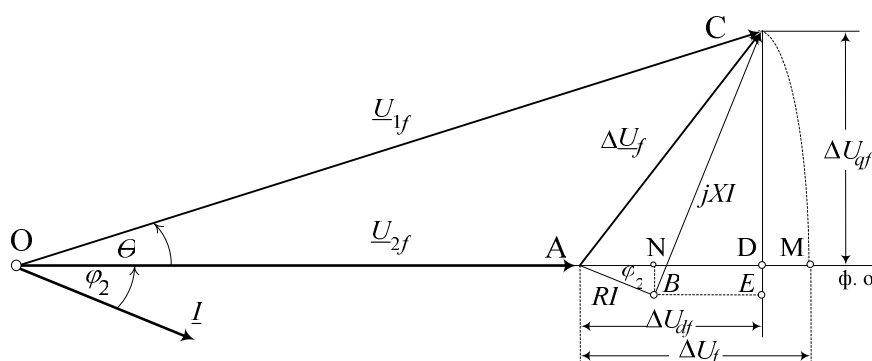
Алгебарската разлика $\Delta U = U_1 - U_2$ на ефективните вредности на напоните на почетокот на водот и на неговиот крај се нарекува *загуба на напонот* во водот. На сликата 5.1 б загубата на напонот е означена со отсечката \overline{AC} . Претходните две дефиниции важат како за фазните така и за меѓуфазните (линиските) напони.

Како поедноставен, ќе го посматраме најнапред случајот на надземен вод за среден напон ($U_n \leq 35 \text{ kV}$). Заменската шема на водот е дадена на сликата 5.2. Ефективната вредност на фазниот напон на почетокот од водот ќе ја означиме со U_{1f} , а на крајот од водот со U_{2f} . Низ водот нека тече струјата I која заостанува зад напонот U_{2f} за агол φ_2 . Комплексната трифазна моќност на почетокот од водот ќе ја означиме со $\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1$, а на крајот со $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$.



Слика 5.2. Заменска шема на разгледуваниот вод

Ќе претпоставиме дека се познати приликите на крајот од водот \underline{U}_{2f} , I , φ_2 и дека треба да се определи напонот \underline{U}_{1f} и аголот θ меѓу векторите на фазните напони \underline{U}_{1f} и \underline{U}_{2f} (сл. 5.3). За разгледуваниот случај ќе го нацртаме фазорскиот (векторскиот) дијаграм на фазните напони и струи, при што векторот \underline{U}_{2f} ќе го поставиме на фазната оска.



Слика 5.3. Фазорски дијаграм на фазните напони и струи на водот од сликата 5.1 а

Околу точката О ќе опишеме кружница со радиус ОС и пресекот на оваа кружница со позитивниот дел од фазната оска ќе го означиме со М. Падот на напон во посматраниот вод $\underline{\Delta U}_f = \underline{Z} \cdot \underline{I}$ е претставен на сликата 5.3 со векторот АС, додека загубата на напон во водот е претставена со отсечката \overline{AM} .

Компонентата на фазниот пад на напон во правец на векторот \underline{U}_{2f} се нарекува *подолжна компонента* на падот на фазниот напон и се означува со ΔU_{df} . На сликата 5.3 оваа компонента е претставена со отсечката \overline{AD} . Бидејќи е:

$$\overline{AD} = \overline{AN} + \overline{ND} = \overline{AN} + \overline{BE},$$

можеме да пишуваме:

$$\Delta U_{df} = R \cdot I \cdot \cos \varphi_2 + X \cdot I \cdot \sin \varphi_2. \quad (5.1)$$

Компонентата на падот на фазниот напон во правец нормален на векторот \underline{U}_{2f} се нарекува *напречна компонента* на падот на фазниот напон и се означува со ΔU_{qf} . На сликата 5.3 оваа компонента е претставена со отсечката \overline{CD} .

Бидејќи е $\overline{CD} = \overline{CE} - \overline{DE} = \overline{CE} - \overline{BN}$, следува:

$$\Delta U_{qf} = X \cdot I \cdot \cos \varphi_2 - R \cdot I \cdot \sin \varphi_2. \quad (5.2)$$

Сега, фазниот напон на почетокот од водот може да се изрази на следниот начин:

$$\underline{U}_{1f} = \underline{U}_{2f} + \Delta \underline{U}_{df} + j \cdot \Delta \underline{U}_{qf}. \quad (5.3)$$

Ако последната равенка ја помножиме одлево и оддесно со $\sqrt{3}$, за меѓуфазниот (линискиот) напон на почетокот на водот добиваме:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta \underline{U}_d + j \cdot \Delta \underline{U}_q, \quad (5.4)$$

каде што \underline{U}_2 е меѓуфазниот напон на крајот од водот, а ΔU_d и ΔU_q се подолжна и напречна компонента на падот на (меѓуфазен) напон, соодветно.

Врз основа на последната релација, за ефективната вредност на напонот на почетокот од водот добиваме:

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_d)^2 + \Delta U_q^2}, \quad (5.5)$$

т.е:

$$U_1 = (U_2 + \Delta U_d) \cdot \sqrt{1 + \frac{\Delta U_q^2}{(U_2 + \Delta U_d)^2}}. \quad (5.6)$$

Во пракса е редовно $U_2 + \Delta U_d \gg \Delta U_q$ што овозможува изразот во средната заграда да се замени, според биномната формула, само со првите два члена од неговиот развој. На тој начин добиваме:

$$U_1 \approx U_2 + \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot (U_2 + \Delta U_d)}, \quad (5.7)$$

од каде што може да се пресмета загубата на напон во водот:

$$\Delta U = U_1 - U_2 \approx \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot (U_2 + \Delta U_d)}. \quad (5.8)$$

Кај реалните водови, напречната компонента на падот на напон ретко ја надминува вредноста од **5%** од номиналниот напон на водот, т.е.

$$\Delta U_q < 0,05 \cdot U_n.$$

Во тој случај може да се пишува:

$$\frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot (U_2 + \Delta U_d)} \approx \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot U_n} < \frac{(0,05 \cdot U_n)^2}{2 \cdot U_n} = 0,00125 \cdot U_n.$$

Од овде произлегува дека **разликата** меѓу загубата на напон во водот ΔU и подолжната компонента на падот на напон ΔU_d е **многу мала** и, по правило, не е поголема од **0,1 – 0,2%** од номиналниот напон U_n , т.е.

$$\Delta U \approx \Delta U_d.$$

Затоа во дистрибутивните мрежи, па дури и во 110 kV мрежи, обично се зема дека загубата на напон во водовите е еднаква на подолжната компонента од падот на напон, т.е:

$$\Delta U \approx \Delta U_d = \sqrt{3} \cdot R \cdot I \cdot \cos \varphi_2 + \sqrt{3} \cdot X \cdot I \cdot \sin \varphi_2.$$

Имајќи ги предвид релациите:

$$S_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I \quad \text{и} \quad S_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I ,$$

понатаму можеме да пишуваме:

$$\Delta U \approx \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} , \quad (5.9 \text{ а})$$

односно:

$$\Delta U \approx \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1} . \quad (5.9 \text{ б})$$

Според тоа, приближните релации помеѓу ефективните вредности на напоните на почетокот и крајот од водот ќе бидат:

$$U_1 \approx U_2 + \frac{P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X}{U_2} , \quad (5.10 \text{ а})$$

и

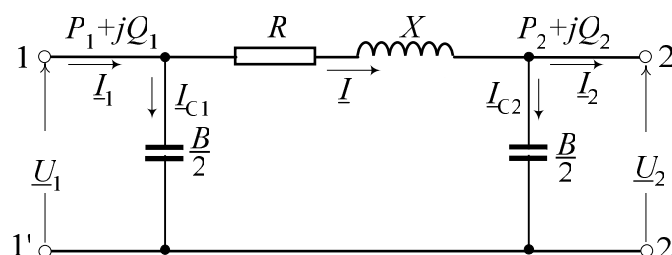
$$U_2 \approx U_1 - \frac{P_1 \cdot R + Q_1 \cdot X}{U_1} . \quad (5.10 \text{ б})$$

Од овие формули се гледа дека **загубата на напон** во водот **главно зависи од неговото оптоварување**. Со порастот на оптоварувањето на водот расте загубата на напон во него, и обратно. Оттука произлегува заклучокот дека во режимот на најголеми оптоварувања загубата на напон во водовите ќе биде поголема отколку во режимот на минимални оптоварувања.

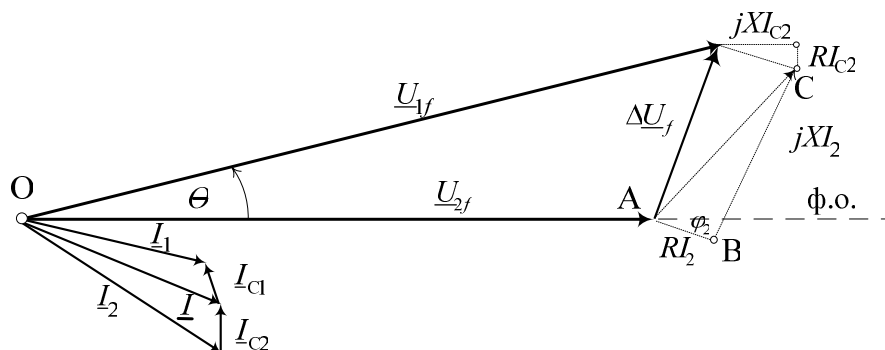
На загубата на напонот во водот влијае и факторот на моќноста на товарот **$\cos \varphi$** . При дадена активна моќност P_2 со зголемувањето на нејзиниот фактор на моќност $\cos \varphi_2$ се намалува бараната реактивна моќност на оптоварувањето Q_2 , што повлекува снижување на загубата на напон во водот.

Во досега разгледуваниот пример не беше земено предвид **влијанието на капацитивноста на водот** врз вредностите на напоните на неговите краеве. Меѓутоа, кај високонапонските водови ($U_n \geq 110 \text{ kV}$) капацитивноста на водовите **не смее да се занемарува**, па затоа, во наредниот дел, ќе го анализираме и тој случај.

Ќе посматраме сега високонапонски вод со номинален напон 110 kV. На сликата 5.4 е прикажана неговата заменска шема, додека на сликата 5.5 а е прикажан неговиот фазорски (векторски) дијаграм.



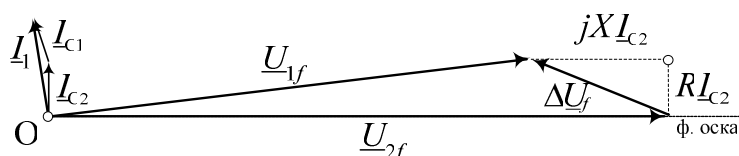
Слика 5.4. Пи–заменска шема на водот



Слика 5.5 а. Векторски дијаграм на напоните и струите за водот од сликата 5.4

Од споредбата на дијаграмите од сликите 5.3 и 5.5 а станува очигледно дека присуството на капацитивните струи I_{c1} и I_{c2} , генерирани од напречните (капацитивни) гранки на водот, ја намалува подолжната компонента на падот на напон ΔU_d , а ја зголемува напречната компонента на падот на напон ΔU_q и со тоа врши намалување на загубата на напон во водот.

Да го анализираме сега влијанието на капацитивноста врз работата на еден неоптоварен вод (т.е. вод кој работи во режим на празен од). Дијаграмот за овој случај е прикажан на сликата 5.5 б. Од овој дијаграм се гледа дека кога водот е неоптоварен, напонот на неговиот крај е поголем од напонот на неговиот почеток, т.е. $U_{2f} > U_{1f}$, односно $U_2 > U_1$.



Слика 5.5 б. Векторски дијаграм на вод во празен од

Колкаво ќе биде **покачувањето на напонот** на крајот од водот **ќе зависи од неговата должина**. Значително покачување на напонот на крајот на водот ќе имаме кај долгите високонапонски преносни водови со номинален напон над 220 kV или кај високонапонските кабли ($U_n \geq 110$ kV).

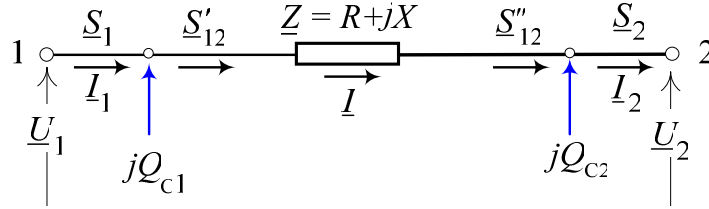
Така, на пример, ако надземниот вод е долг **250 km**, тогаш покачувањето на напонот ќе изнесува околу **3,5%**, но веќе при должина од **500 km** покачувањето на напонот на крајот од водот ќе изнесува над **15%** од номиналниот напон, што е сосема неприфатливо.

5.2. ПРЕСМЕТУВАЊЕ НА ЗАГУБАТА НА МОЌНОСТ ВО ВОД

Нека е водот претставен со заменската шема од сл. 5.4. Комплексната моќност на крајот од редната импеданција ќе биде еднаква на моќноста на оптоварувањето $P_2 + jQ_2$, намалена за моќноста

jQ_{C2} што ја генерира напречната гранка (половината на капацитивноста на водот), приклучена на крајот од водот. Притоа е:

$$Q_{C2} = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_{C2} = U_2^2 \cdot \frac{B}{2} \approx U_n^2 \cdot \frac{B}{2} . \quad (5.11)$$



Слика 5.6

Привидната моќност на крајот од редната гранка \underline{S}_{12}'' (види сл. 5.6) може да се изрази и преку струјата \underline{I} низ импеданцијата \underline{Z} и напонот \underline{U}_2 на крајот од водот, т.е:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{12}'' &= P_2 + j(Q_2 - Q_{C2}); \\ \underline{S}_{12}'' &= \sqrt{P_2^2 + (Q_2 - Q_{C2})^2} = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I \end{aligned} \quad (5.12)$$

од каде што следува:

$$I^2 = \frac{(\underline{S}_{12}'')^2}{3 \cdot U_2^2} = \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{C2})^2}{3 \cdot U_2^2} . \quad (5.13)$$

Загубите на активна и реактивна моќност во редната гранка $\underline{Z} = (R + jX)$ ќе бидат:

$$\begin{aligned} \Delta P_Z &= 3R \cdot I^2 = \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{C2})^2}{U_2^2} \cdot R ; \\ \Delta Q_Z &= 3X \cdot I^2 = \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{C2})^2}{U_2^2} \cdot X . \end{aligned} \quad (5.14)$$

Комплексната моќност \underline{S}_{12}' на почетокот од редната гранка (сл. 5.6) ќе биде:

$$\underline{S}_{12}' = \underline{S}_{12}'' + (\Delta P_Z + j\Delta Q_Z) . \quad (5.15)$$

Ако со Q_{C1} ја означиме моќноста што ја генерира левата напречна гранка приклучена на почетокот од водот (т.е. половината од капацитивноста на водот), тогаш за комплексната моќност \underline{S}_1 на почетокот од водот (сл. 5.6) ќе добиеме:

$$Q_{C1} = \frac{B}{2} \cdot U_1^2 \approx \frac{B}{2} \cdot U_n^2 ; \quad (5.16)$$

$$\underline{S}_1 = (P_1 + jQ_1) = \underline{S}_{12}' - jQ_{C1} = (\underline{S}_{12}'' + \Delta P_Z + j\Delta Q_Z) - jQ_{C1} ,$$

т.е:

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_{12} + \Delta P_Z + j\Delta Q_Z - jQ_{C1} - jQ_{C2} , \quad (5.17)$$

од каде што следува:

$$P_1 = P_2 + \Delta P_Z , \text{ т.е.}$$

$$P_1 = P_2 + \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{C2})^2}{U_2^2} \cdot R \quad (5.18)$$

и

$$Q_1 = Q_2 + \Delta Q_Z - (Q_{C1} + Q_{C2})$$

или

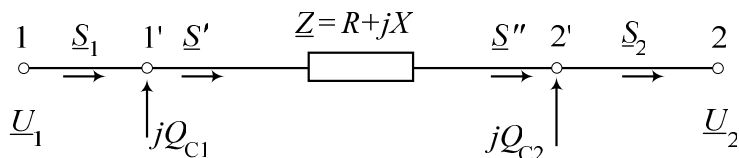
$$Q_1 \approx Q_2 + \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{C2})^2}{U_2^2} \cdot X - B \cdot U_n^2. \quad (5.19)$$

— ■ —

Пример 5.1. 110 kV надземен вод со должина $l = 50$ km и познати параметри $R = r \cdot l = 6,45 \, \Omega$; $X = x \cdot l = 19,95 \, \Omega$ и $B = b \cdot l = 142 \, \mu S$ (види пример 4.1 од Збирката) на својот крај „2“ напојува потрошувач со моќност $\underline{S}_2 = (P_2 + jQ_2) = (40 + j18) \text{ MVA}$ при напон $U_2 = 110 \text{ kV}$. Да се пресметаат приликите на неговиот почеток P_1 , Q_1 и U_1 . Пресметките да се направат без занемарување на погонската капацитивност на водот.

Решение:

Задачата ќе ја решиме со примена на методот на биланс на моќности (сл. П.5.1.1).



Слика П.5.1.1. Решавање на водот со помош на методот на биланс на моќности

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

$$Q_{C2} = (B/2) \cdot U_2^2 = 71 \cdot 10^{-6} \cdot 110^2 \cdot 10^6 = 0,86 \text{ Mvar};$$

$$(Q_2 - Q_{C2}) = 17,14 \text{ Mvar}.$$

Од билансот на моќностите (I Кирхофов закон за моќности) за јазелот „2“ добиваме:

$$\underline{S}'' = (P'' + jQ'') = \underline{S}_2 - jQ_{C2} = (40 + j17,14) \text{ MVA}.$$

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

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

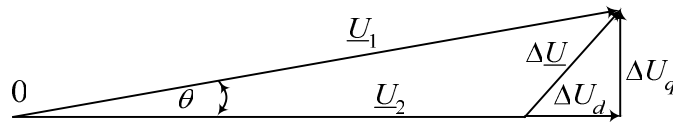
$$\Delta \underline{S}_Z = \frac{40^2 + 17,14^2}{110^2} \cdot (6,45 + j19,95).$$

$$\Delta P_z = 1,000 \text{ MW}; \quad \Delta Q_z = 3,130 \text{ Mvar}.$$

Подолжната компонента на падот на напон ќе биде:

$$\Delta U_d = \frac{P_2'' \cdot R + Q_2'' \cdot X}{U_2} = \frac{40 \cdot 6,45 + 17,14 \cdot 19,95}{110} = 5,454 \text{ kV};$$

$$\Delta U_q = \frac{P_2'' \cdot X - Q_2'' \cdot R}{U_2} = \frac{40 \cdot 19,95 - 17,14 \cdot 6,45}{110} = 6,249 \text{ kV}.$$



Слика П.5.1.2. Фазорски дијаграм на напоните на водот

Од триаголникот на фазорите на напони (слика П.5.1.2) добиваме:

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_d)^2 + \Delta U_q^2} = \sqrt{(110 + 5,454)^2 + 6,249^2} = 115,623 \text{ kV}.$$

Аголот на изместување θ помеѓу фазорите на напоните \underline{U}_1 и \underline{U}_2 ќе биде (сл. П.5.1.2)

$$\theta = \arctg \frac{\Delta U_q}{U_2 + \Delta U_d} = \arctg \frac{6,249}{110 + 5,454} = 3,1^\circ.$$

Реактивната моќност Q_{C1} што ја генерира капацитивната гранка на почетокот од водот ќе биде:

$$Q_{C1} = \frac{B}{2} \cdot U_1^2 = 71 \cdot 10^{-6} \cdot 115,623^2 = 0,949 \text{ Mvar}.$$

Вкупните загуби на моќност $\Delta \underline{S} = \Delta P + j\Delta Q$ во водот ќе бидат:

$$\Delta P = \Delta P_z = 1 \text{ MW}; \quad \Delta Q = \Delta Q_z - (Q_{C1} + Q_{C2}) = 1,314 \text{ Mvar}.$$

Моќноста $\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1$ што изворот му ја предава на водот на неговиот почеток ќе биде:

$$P_1 = P_2 + \Delta P = 41 \text{ MW}; \quad Q_1 = Q_2 + \Delta Q = 19,314 \text{ Mvar}.$$

Значи, решението на задачата гласи:

$$U_1 = 115,623 \text{ kV}; \quad P_1 = 41 \text{ MW}; \quad Q_1 = 19,314 \text{ Mvar};$$

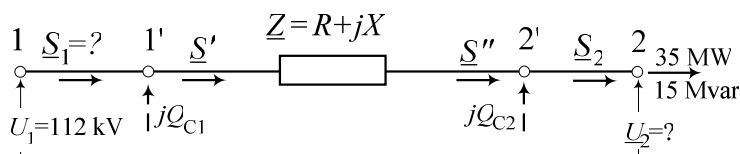
$$\underline{S}_1 = (41 + j19,314) \text{ MVA}.$$

□ □ □

Пример 5.2. Се посматра повторно истиот 110 kV надземен вод од примерот 5.1 но во друг режим. Познат е напонот на почетокот $U_1 = 112 \text{ kV}$ како и моќноста на потрошувачот на крајот од водот $\underline{S}_2 = (P_2 + jQ_2) = (35 + j15) \text{ MVA}$. да се пресмета напонот кај потрошувачот U_2 како и моќноста на неговиот почеток $\underline{S}_1 = (P_1 + jQ_1)$.

Решение:

Задачата ќе ја решиме со примена на методот на биланс на моќности.



Слика П.5.2.1. Решавање на водот со помош на методот на биланс на моќности

Во овој случај задачата не можеме да ја решиме со истата постапка, директно, како во примерот 5.1 бидејќи величините што треба да ги пресметаме зависат од непознатата U_2 . Затоа овде ќе примениме итеративна постапка. Во секоја итерација процедурата на решавање ќе биде иста како и досега и ќе се базира на претпоставена вредност на непознатиот напон U_2 . Ќе започнеме со претпоставката $U_2 = U_n$ зашто знаеме дека напоните во една мрежа не можат многу да се разликуваат од својата номинална вредност. На тој начин добиваме:

Почетно решение за непознатата: $U_2 = U_n = 110 \text{ kV}$.

1) Прва итерација:

$$Q_{C2} = (B/2) \cdot U_2^2 = 71 \cdot 10^{-6} \cdot 110^2 \cdot 10^6 = 0,86 \text{ Mvar};$$

$$(Q_2 - Q_{C2}) = 14,14 \text{ Mvar}.$$

$$\underline{S}'' = \underline{S}_2 - jQ_{C2} = (35 + j14,14) \text{ MVA}.$$

$$\Delta U_d = \frac{P_2'' \cdot R + Q_2'' \cdot X}{U_2} = \frac{35 \cdot 6,45 + 14,14 \cdot 19,95}{110} = 4,627 \text{ kV};$$

$$\Delta U_q = \frac{P_2'' \cdot X - Q_2'' \cdot R}{U_2} = \frac{35 \cdot 19,95 - 14,14 \cdot 6,45}{110} = 5,519 \text{ kV}.$$

Од фазорскиот дијаграм (сл. П.5.1.2) следи релацијата:

$$U_2 + \Delta U_d = \sqrt{U_1^2 - \Delta U_q^2} \Rightarrow U_2 = \sqrt{U_1^2 - \Delta U_q^2} - \Delta U_d;$$

$$U_2 = \sqrt{112^2 - 5,519^2} - 4,627 = 107,247 \text{ kV}.$$

2) Втора итерација:

Со новодобиената вредност $U_2 = 107,247 \text{ kV}$ влегуваме во втората итерација во која што ги добиваме следните резултати:

$$\Delta U_d = 4,743 \text{ kV}; \Delta U_q = 5,658 \text{ kV}; U_2 = 107,114 \text{ kV}$$

3) Натамошен тек на итеративниот процес

После само уште две итерации се добива решение кое што може да се третира за „доволно точно“. Низата од решенија во итеративниот процес изгледа вака:

- 1) итерација: $\Delta U_d = 4,617 \text{ kV}$; $\Delta U_q = 5,519 \text{ kV}$; $U_2 = 107,247 \text{ kV}$
- 2) итерација: $\Delta U_d = 4,743 \text{ kV}$; $\Delta U_q = 5,658 \text{ kV}$; $U_2 = 107,114 \text{ kV}$
- 3) итерација: $\Delta U_d = 4,750 \text{ kV}$; $\Delta U_q = 5,664 \text{ kV}$; $U_2 = 107,107 \text{ kV}$
- 4) итерација: $\Delta U_d = 4,750 \text{ kV}$; $\Delta U_q = 5,664 \text{ kV}$; $U_2 = 107,107 \text{ kV}$

итн.

Значи, за конечно ќе го прогласиме решението добиено во четвртата итерација:

Со така добиената вредност за напонот U_2 ги пресметуваме и загубите на моќност во преносот $\Delta \underline{S} = \Delta P + j\Delta Q$, со истата постапка како и во примерот 5.1. На тој начин се добива:

$$U_2 = 107,107 \text{ kV};$$

$$P_1 = 35,8 \text{ MW};$$

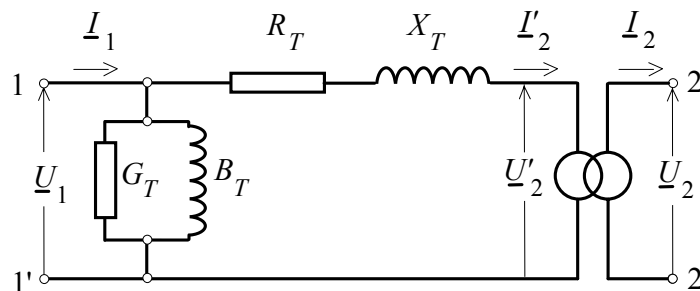
$$Q_1 = 15,78 \text{ Mvar};$$

$$\underline{S}_1 = (35,8 + j15,78) \text{ MVA}.$$



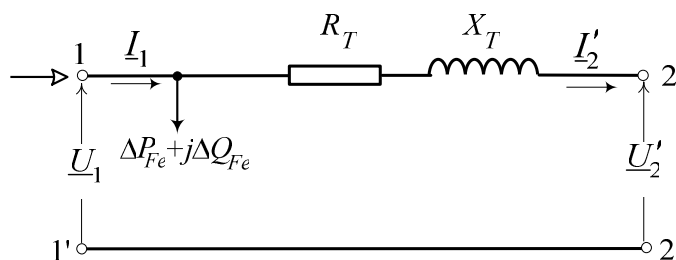
5.3. ЗАГУБА НА НАПОН И ЗАГУБА НА МОЌНОСТ ВО ТРАНСФОРМАТОРИ

Двонамотните трансформатори всушност треба да се претставуваат со заменска шема како на сликата 5.7. Во неа, покрај параметрите на трансформаторот што од порано ги знаеме, е присутен и еден идеален трансформатор со познат преносен однос k_T . Со помош на него вршиме сведување на напонот \underline{U}_2 и струјата \underline{I}_2 .



Слика 5.7. Идеален трансформатор во заменската шема на енергетски трансформатор

Меѓутоа при пресметувањата на ЕЕС, од практични причини, идеалниот трансформатор не го прикажуваме во соодветните заменски шемии, но неговото присуство сепак го уважуваме, т.е. вршиме сведување на сите електрични величини на едно исто напонско ниво. Поради тоа, наместо со шемата од слика 5.7, вообичаено е трансформаторите да се претставуваат со шемата од слика 5.8.



Слика 5.8. Вообичен приказ на шема на трансформатор

Покрај испуштањето на идеалниот трансформатор, во шемата од слика 5.8 е извршено уште едно упростување. Имено, со оваа шема не е опфатена зависноста на загубите во гранката на магнетизирање од напонот (а која всушност претставува сложена функција од погонскиот напон), туку тие се претставени како константни.

Ако привидната моќност \underline{S}_2 и факторот на моќност $\cos \varphi_2$ на секундарната страна од трансформаторот се познати, тогаш загубата на напонот во трансформаторот ќе се определи по постапка која е аналогна на онаа што ја применуваме и кај водовите. Најнапред се пресметува подолжната компонента на падот на напон ΔU_d , а потоа и напречната ΔU_q :

$$\Delta U_d = \sqrt{3} \cdot I_2' \cdot (R_T \cdot \cos \varphi_2 + X_T \cdot \sin \varphi_2) = \frac{S_2}{U_2'} \cdot (R_T \cdot \cos \varphi_2 + X_T \cdot \sin \varphi_2), \quad (5.44)$$

$$\Delta U_q = \sqrt{3} \cdot I_2' \cdot (X_T \cdot \cos \varphi_2 - R_T \cdot \sin \varphi_2) = \frac{S_2}{U_2'} \cdot (X_T \cdot \cos \varphi_2 - R_T \cdot \sin \varphi_2). \quad (5.45)$$

Бидејќи напонот U_2' најчесто не ни е познат, а по правило тој малку се разликува од својата номинална вредност, претходните изрази приближно ќе бидат:

$$\begin{aligned} \Delta U_d &= \frac{S_2}{U_n} \cdot (R_T \cdot \cos \varphi_2 + X_T \cdot \sin \varphi_2); \\ \Delta U_q &= \frac{S_2}{U_n} \cdot (X_T \cdot \cos \varphi_2 - R_T \cdot \sin \varphi_2). \end{aligned} \quad (5.46)$$

а за загубата на напон и овде ќе важи приближната релација:

$$\Delta U \approx \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2U_n}. \quad (5.47)$$

Вообичаено е загубата на напонот да се изразува во проценти од номиналниот напон и во тој случај таа се нарекува **процентуална загуба на напонот**. Неа ја пресметуваме од релациите:

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100,$$

односно:

$$\Delta U\% = \Delta U_d\% + \frac{(\Delta U_q\%)^2}{200}. \quad (5.48)$$

Ако се земе дека е:

$$u_k \% = \sqrt{(u_{ka} \%)^2 + (u_{k\sigma} \%)^2};$$

$$R_T = \frac{u_{ka} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}; \quad (5.49)$$

$$X_T = \frac{u_{k\sigma} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n},$$

можеме да пишуваме:

$$\Delta U_d = \frac{S_2}{U_n} \cdot \left(\frac{u_{ka} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \cos \varphi_2 + \frac{u_{k\sigma} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \sin \varphi_2 \right), \quad (5.50)$$

$$\Delta U_q = \frac{S_2}{U_n} \cdot \left(\frac{u_{k\sigma} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \cos \varphi_2 - \frac{u_{ka} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \sin \varphi_2 \right), \quad (5.51)$$

односно:

$$\Delta U_d \% = \frac{S_2}{S_n} \cdot (u_{ka} \% \cdot \cos \varphi_2 + u_{k\sigma} \% \cdot \sin \varphi_2), \quad (5.52)$$

$$\Delta U_q \% = \frac{S_2}{S_n} \cdot (u_{k\sigma} \% \cdot \cos \varphi_2 - u_{ka} \% \cdot \sin \varphi_2). \quad (5.53)$$

Оптоварувањето на еден трансформатор честопати се изразува преку односот $\alpha = S_2/S_n$, кој се нарекува **коэффициент на оптоварување** на трансформаторот. Со неговото воведување, последните формули ќе имаат облик:

$$\Delta U_d \% = \alpha \cdot (u_{ka} \% \cdot \cos \varphi_2 + u_{k\sigma} \% \cdot \sin \varphi_2), \quad (5.54)$$

$$\Delta U_q \% = \alpha \cdot (u_{k\sigma} \% \cdot \cos \varphi_2 - u_{ka} \% \cdot \sin \varphi_2). \quad (5.55)$$

Загубите на активната и реактивната моќност во трансформаторот ќе бидат:

$$\Delta P_T = \Delta P_{Fe} + 3 \cdot R_T \cdot (I_2')^2 = \Delta P_{Fe} + \frac{P_2^2 + Q_2^2}{(U_2')^2} \cdot R_T, \quad (5.56)$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{Fe} + 3 \cdot X_T \cdot (I_2')^2 = \Delta Q_{Fe} + \frac{P_2^2 + Q_2^2}{(U_2')^2} \cdot X_T. \quad (5.57)$$

Ако се земе дека е $U_2' \approx U_n$ тогаш, со оглед на следните две релации:

$$\Delta P_k \approx \Delta P_{Cun} = R_T \cdot \frac{S_n^2}{U_n^2} \quad \text{и} \quad Z_T \approx X_T = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n},$$

можеме да пишуваме:

$$\alpha = \frac{S_2}{S_n} \quad (5.58)$$

$$\Delta P_T = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2; \quad \Delta Q_T = \frac{S_n}{100} \cdot [i_o \% + u_k \% \cdot \alpha^2], \quad (5.59)$$

Во случајот кога n идентични, паралелно врзани трансформатори работат оптоварени со вкупен товар $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$, тогаш загубите во празен од на групата ќе бидат n пати поголеми, додека еквивалентните параметри R_T и X_T , а со тоа и загубите во редната гранка на еквивалентниот трансформатор, ќе бидат n пати помали. На тој начин вкупните загуби ќе изнесуваат:

$$\Delta P_T = n \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{Cum} \cdot \alpha^2; \quad \Delta Q_T = \frac{S_n}{100} \cdot [n \cdot i_o \% + \frac{1}{n} \cdot u_k \% \cdot \alpha^2] \quad (5.60)$$

— ■ —

Пример 5.3. За дистрибутивниот трансформатор анализиран во примерот 4.2 да се пресмета загубата на напон и моќност за следниот режим: напон на примарната страна $U_1 = 10,3 \text{ kV}$; $S_2 = S_n = 400 \text{ kVA}$; $\cos \varphi_2 = 0,8$ ($P_2 = 320 \text{ kW}$; $Q_2 = 240 \text{ kvar}$).

Решение:

За овој трансформатор ги знаеме следните податоци (види пример 4.2):

$$S_n = 400 \text{ kVA}; U_n = 10 \text{ kV}; k_T = k_{Tn} = 25;$$

$$u_k \% = 4\%; i_o \% = 2,1\%; \Delta P_{Cum} = 4,6 \text{ kW}; \Delta P_{Fe} = 0,63 \text{ kW}$$

Параметри на Г-заменската шема:

$$\underline{Z}_T = (R_T + jX_T) = (2,875 + j9,58) \Omega;$$

$$\underline{Y}_T = (G_T + jB_T) = (6,3 - j83,76) \mu\text{S}$$

$$\text{Товар: } S_2 = S_n = 400 \text{ kVA}; \cos \varphi_2 = 0,8; \sin \varphi_2 = 0,6.$$

Ќе ги воведеме следните обележувања:

$$Z_n = \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{10^2}{0,4} = 250 \Omega - \text{номинална импеданција на трансформаторот};$$

$$\alpha = \frac{S_2}{S_n} = \frac{400}{400} = 1 - \text{коэффициент на оптоварување на трансформаторот.}$$

1) Пресметка на загубата на напон во трансформацијата

Ќе ги користиме изразите (5.48), (5.54) и (5.55) а пресметка на процентуалната загуба на напон. За таа цел најнапред, со помош на изразите (5.49), ќе ги пресметаме активната и реактивната компонента од напонот на куса врска на трансформаторот, т.е. величините $u_{ka} \%$ и $u_{k\sigma} \%$:

$$R_T = \frac{u_{ka} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \Rightarrow u_{ka} \% = 100 \cdot \frac{R_T}{Z_n} = 100 \cdot \frac{2,875}{250} = 1,15\%;$$

$$X_T = \frac{u_{k\sigma} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \Rightarrow u_{k\sigma} \% = 100 \cdot \frac{X_T}{Z_n} = 100 \cdot \frac{9,58}{250} = 3,83\%.$$

За проверка на резултатот ја користиме релацијата:

$$u_k \% = \sqrt{(u_{ka} \%)^2 + (u_{k\sigma} \%)^2} :$$

$$u_k \% = \sqrt{1,15^2 + 3,83^2} = 4\%.$$

Понатаму, врз основа на изразите (5.52) и (5.53) добиваме

$$\Delta U_d \% = \alpha \cdot (u_{ka} \% \cdot \cos \varphi_2 + u_{k\sigma} \% \cdot \sin \varphi_2);$$

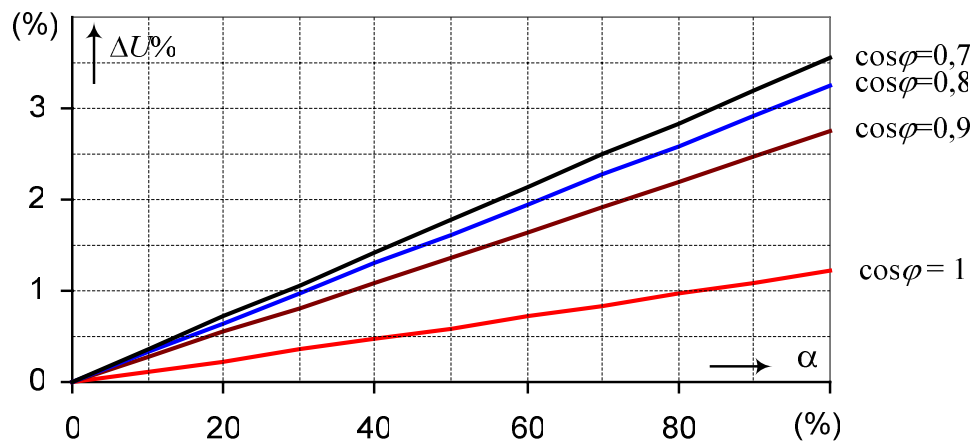
$$\Delta U_d \% = 1 \cdot (1,15 \cdot 0,8 + 3,83 \cdot 0,6) = 3,22\%;$$

$$\Delta U_q \% = \alpha \cdot (u_{k\sigma} \% \cdot \cos \varphi_2 - u_{ka} \% \cdot \sin \varphi_2);$$

$$\Delta U_q \% = 1 \cdot (3,83 \cdot 0,8 - 1,15 \cdot 0,6) = 2,37\%;$$

$$\Delta U \% = \Delta U_d \% + (\Delta U_q \%)^2 / 200 = 3,22^2 + 2,37^2 / 200 = 3,25\%.$$

На сликата П.5.3 е прикажана зависноста $\Delta U \% = f(\alpha \%)$ за разни вредности на $\cos \varphi_2$.



**Слика П.5.3. Загуба на напон во трансформаторот
во зависност од степенот на оптовареност α**

Загубата на моќност во трансформацијата ќе ја пресметаме со помош на изразите (5.59):

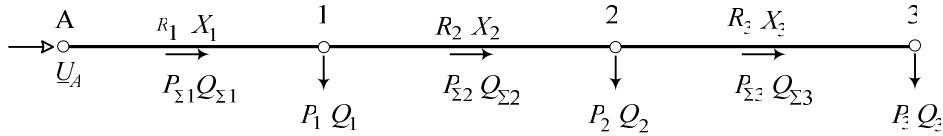
$$\Delta P_T = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 = 0,63 + 4,6 \cdot 1^2 = 5,23 \text{ kW};$$

$$\Delta Q_T = S_n \cdot \frac{(i_o \% + u_k \% \cdot \alpha^2)}{100} = 400 \cdot \frac{(2,1 + 4 \cdot 1^2)}{100} = 24,4 \text{ kvar}.$$

□ □ □

5.4. ПРЕСМЕТКА НА ЗАГУБА НА НАПОН И ЗАГУБА НА МОЌНОСТ ВО РАДИЈАЛНИ МРЕЖИ

5.4.1. Неразгранета мрежа



Слика 5.9. Приказ на магистрален вод

Ќе посматраме најнапред неразгранета мрежа – магистрален вод, кој напојува три потрошувачи. Притоа станува збор за дистрибутивна мрежа каде што должините на водовите се релативно мали, па според тоа, ќе бидат мали и загубите на напон и загубите на моќност во поедините делници (водови) од мрежата. Освен тоа капацитивностите на водовите можат да не се земаат предвид. Нека нумерацијата на гранките од мрежата се совпадне со нумерацијата на нивните крајни јазли. Во тој случај, со примена на I Кирхофов закон за моќности, со занемарување на загубите на моќност во водовите, приближно ќе имаме:

$$P_{\Sigma 3} = P_3, \quad Q_{\Sigma 3} = Q_3; \quad P_{\Sigma 2} = P_2 + P_3, \quad Q_{\Sigma 2} = Q_2 + Q_3; \text{ и}$$

$$P_{\Sigma 1} = P_1 + P_2 + P_3, \quad Q_{\Sigma 1} = Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

односно

$$P_{\Sigma k} = \sum_{i=k}^3 P_i; \quad Q_{\Sigma k} = \sum_{i=k}^3 Q_i. \quad (5.20)$$

Бидејќи фазните разлики меѓу напоните во точките „А“, „1“, „2“ и „3“ се мали, вкупната загуба на напонот од напојната точка „А“ до крајната точка „3“ ќе ја добиеме како алгебарска сума на загубите на напоните на поедините делници: А–1, 1–2 и 2–3, т.е:

$$\Delta U \equiv \Delta U_{A-3} = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-2} + \Delta U_{2-3}, \text{ т.е:} \quad (5.21)$$

$$\Delta U = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot R_1 + Q_{\Sigma 1} \cdot X_1}{U_1} + \frac{P_{\Sigma 2} \cdot R_2 + Q_{\Sigma 2} \cdot X_2}{U_2} + \frac{P_{\Sigma 3} \cdot R_3 + Q_{\Sigma 3} \cdot X_3}{U_3} \quad (5.22)$$

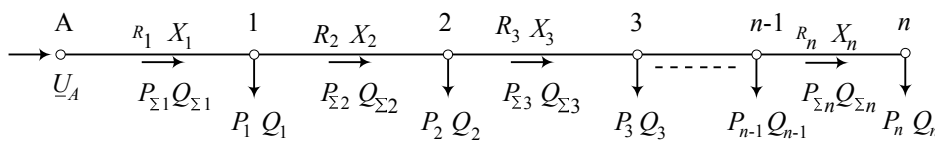
$$\Delta U = \sum_{i=1}^3 \frac{P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_i}. \quad (5.23)$$

Ако вредностите на непознатите напони U_1 , U_2 и U_3 ги апроксимираме со номиналниот напон U_n , тогаш загубата на напон во мрежата ΔU ќе биде:

$$\Delta U \approx \sum_{i=1}^3 \frac{P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_n} = \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{i=1}^3 (P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i). \quad (5.24)$$

Во општ случај, кога магистралниот вод напојува произволен број потрошувачи n (сл. 5.10), загубата на напон во мрежата ќе изнесува:

$$\Delta U \approx \sum_{i=1}^n \frac{P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_n} = \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{i=1}^n (P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i) . \quad (5.25)$$



Слика 5.10. Магистрален вод со произволен број потрошувачи

Загубата на напон на делот од мрежата меѓу напојната точка „А” и произволната точка „k” во мрежата ќе изнесува:

$$\Delta U_{A-k} \approx \sum_{i=1}^k \frac{P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_n} = \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{i=1}^k (P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i) . \quad (5.26)$$

Во посебен случај, кога магистралниот вод (било да е надземен или, пак, кабелски) е со ист пресек по целата своја должина, тогаш е:

$$\Delta U_{A-k} \approx \sum_{i=1}^k \frac{P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_n} = \frac{1}{U_n} \cdot (r \cdot \sum_{i=1}^k P_{\Sigma i} \cdot l_i + x \cdot \sum_{i=1}^k Q_{\Sigma i} \cdot l_i) , \quad (5.27)$$

каде што r и x се активната и реактивната отпорност на водот по единица должина, а l_i е должина (km) на i -тата делница (секција).

Бидејќи е:

$$P_{\Sigma i} = \sum_{j=i}^n P_j = P_i + P_{i+1} + \dots + P_n ,$$

$$Q_{\Sigma i} = \sum_{j=i}^n Q_j = Q_i + Q_{i+1} + \dots + Q_n ,$$

може да се пишува:

$$\sum_{i=1}^n P_{\Sigma i} \cdot R_i = P_{\Sigma 1} \cdot R_1 + P_{\Sigma 2} \cdot R_2 + \dots + P_{\Sigma n} \cdot R_n ,$$

или

$$\sum_{i=1}^n P_{\Sigma i} \cdot R_i = R_1 \cdot \sum_{j=1}^n P_{\Sigma j} + R_2 \cdot \sum_{j=2}^n P_{\Sigma j} + \dots + R_n \cdot P_{\Sigma n} \quad (5.28)$$

или:

$$\sum_{i=1}^n P_{\Sigma i} \cdot R_i = P_1 \cdot R_1 + P_2 \cdot (R_1 + R_2) + \dots + P_n \cdot (R_1 + R_2 + \dots + R_n) , \quad (5.29)$$

т.е.

$$\sum_{i=1}^n P_{\Sigma i} \cdot R_i = \sum_{k=1}^n P_k \cdot R_{A-k} , \quad (5.30)$$

каде што со R_{A-k} е означена вкупната активна отпорност на водот помеѓу точките „А” и „k”. Аналогно се добива:

$$\sum_{i=1}^n Q_{\Sigma i} \cdot X_i = \sum_{k=1}^n Q_k \cdot X_{A-k} , \quad (5.31)$$

каде што со X_{A-k} е означена вкупната индуктивна отпорност на водот помеѓу точките „A” и „k”.

Според тоа, равенката со која што се пресметува загубата на напон во магистрален вод може да се напише на следниот начин:

$$\Delta U = \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{k=1}^n (P_k \cdot R_{A-k} + Q_k \cdot X_{A-k}). \quad (5.32)$$

Во случајот кога водот има **ист напречен пресек** и е од ист тип по целата своја должина, ќе имаме:

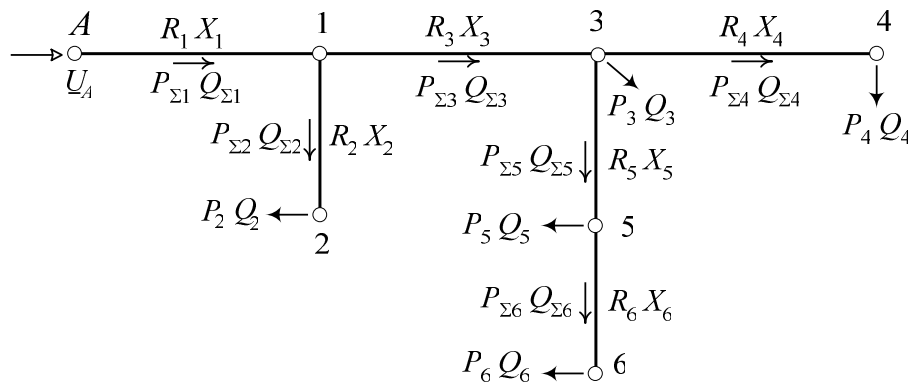
$$R_{A-k} = r \cdot l_{A-k} \text{ и } X_{A-k} = x \cdot l_{A-k}$$

па последната формула го добива обликот:

$$\Delta U = \frac{1}{U_n} \cdot (r \cdot \sum_{k=1}^n P_k \cdot l_{A-k} + x \cdot \sum_{k=1}^n Q_k \cdot l_{A-k}). \quad (5.33)$$

Во последниот случај загубата на напон во магистралниот вод се определува преку вредностите на „моментот“ на оптоварувањето, т.е. преку производите на моќноста и растојанието до точката на напојување.

5.3.2. Разгранета мрежа



Слика 5.11. Пример за разгранета мрежа

Да ја посматраме мрежата прикажана на сликата 5.11. Претпоставуваме дека ни е познат напонот U_A и дека се познати параметрите на сите водови, како и оптоварувањата во сите јазли од мрежата. За нумерацијата на гранките повторно важи истото правило од претходно.

Напонот (или поточно речено ефективната вредност на напонот) во било која точка од мрежата може да се пресмета како разлика на напонот во напојната точка „A” и загубата на напон во сите водови преку кои се врши напојувањето на посматраната точка. На пример, напонот во точката „6” во мрежата од сл. 5.11 може да се пресмета на следниот начин:

$$\begin{aligned} U_6 &= U_A - (\Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-3} + \Delta U_{3-5} + \Delta U_{5-6}); \\ U_6 &= U_A - (\Delta U_1 + \Delta U_3 + \Delta U_5 + \Delta U_6). \end{aligned} \quad (5.34)$$

Моќностите низ делниците од мрежата $P_{\Sigma i}$ и $Q_{\Sigma i}$ (со занемарување на загубите на моќност ΔP и ΔQ), во согласност со сликата 5.11, ќе бидат:

делница A – 1:

$$P_{\Sigma 1} = P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 \quad ; \quad Q_{\Sigma 1} = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad ,$$

делница 1 – 2:

$$P_{\Sigma 2} = P_2 \quad ; \quad Q_{\Sigma 2} = Q_2 \quad ,$$

делница 1 – 3:

$$P_{\Sigma 3} = P_3 + P_4 + P_5 + P_6 \quad ; \quad Q_{\Sigma 3} = Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad ,$$

делница 3 – 4:

$$P_{\Sigma 4} = P_4 \quad ; \quad Q_{\Sigma 4} = Q_4 \quad ,$$

делница 3 – 5:

$$P_{\Sigma 5} = P_5 + P_6 \quad ; \quad Q_{\Sigma 5} = Q_5 + Q_6 \quad ,$$

делница 5 – 6:

$$P_{\Sigma 6} = P_6 \quad ; \quad Q_{\Sigma 6} = Q_6 \quad .$$

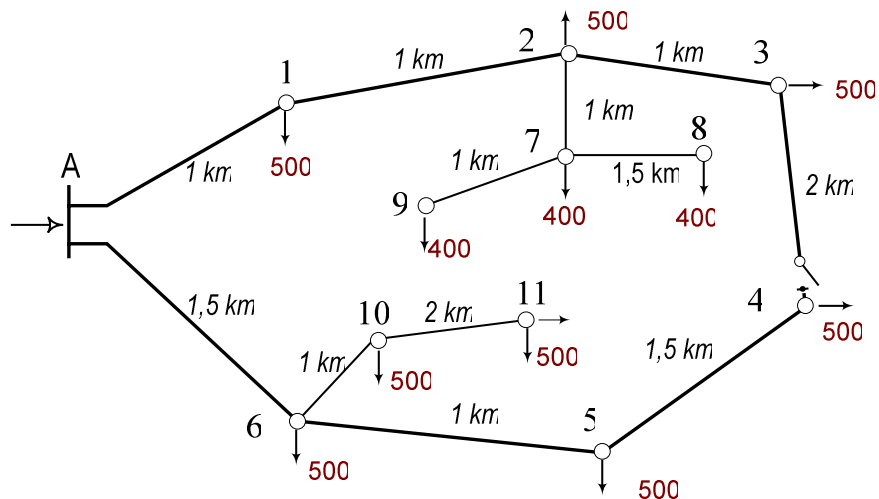
Според тоа, напонот U_6 , на пример, ќе се пресмета на следниот начин:

$$U_6 \approx U_A - \Delta U_1 - \Delta U_3 - \Delta U_5 - \Delta U_6 = U_A - \frac{(P_{\Sigma 1} \cdot R_1 + Q_{\Sigma 1} \cdot X_1)}{U_n} - \frac{(P_{\Sigma 3} \cdot R_3 + Q_{\Sigma 3} \cdot X_3)}{U_n} - \frac{(P_{\Sigma 5} \cdot R_5 + Q_{\Sigma 5} \cdot X_5)}{U_n} - \frac{(P_{\Sigma 6} \cdot R_6 + Q_{\Sigma 6} \cdot X_6)}{U_n} \quad (5.35)$$

Сосема исто се постапува и при пресметувањето на напонот во било која друга точка од мрежата. На тој начин можеме да ја определиме *загубата на напон во мрежата*. Притоа под загуба на напон во мрежата ќе ја подразбираме *разликата на ефективните вредности* на напонот во напојната точка „А“ U_A и напонот на точката од мрежата која има најмал напон.



Пример. 5.4. На сликата П.5.4.1 се прикажани два полупрстена од една 10 kV кабелска градска мрежа (полупрстените се фидери кои заемно се резервираат). Обата фидера напојуваат вкупно $n = 11$ трафостаници ТС 10/0,4 kV со идентични карактеристики. Познати се нивните оптоварувања и тие, изразени во (kW), се прикажани на самата слика. Факторот на моќност на сите потрошувачи е ист и изнесува $\cos \varphi = 0,90$. Напонот во напојниот јазел „А“ изнесува $U_A = 10,3$ kV. Сите секции од мрежата се кабли од типот ХНЕ 49 А 3×1×150, 6/10 kV за коишто е позната подолжната импеданција $\underline{z}_1 = (0,208 + j0,092) \Omega/\text{km}$.



Слика П.5.4.1. 10 kV кабелска мрежа во форма на два полупрстена

Среднонапонските дистрибутивни мрежи работат како радијални (отворени) така што е потребно, со исклучувањето на една од секциите, прстенот да се отвори. Местото на отворање на прстенот се избира така што загубите на активна моќност во мрежата да бидат најмалы. Во случајов, прстенот формиран од двата полупрстена е отворен на тој начин што разделувачот од делницата 3 – 4 при ТС 10/0,4 kV/kV број 4 е исклучен, како што е прикажано на сликата П.5.4.1.

За прикажаниот режим на работа да се пресметаат приближните вредности на моќностите во гранките и напоните во јазлите од мрежата. Во тие приближни пресметки напоните во мрежата да се пресметуваат врз основа на приближните текови на моќности во гранките, добиени со примена на I Кирхофов закон за моќности, не водејќи сметка за загубите на моќност во нив. Потоа, со така пресметаните напони да се пресметаат загубите на активна и реактивна моќност во секоја гранка. Врз основа на овие резултати да се пресметаат загубата на напон ΔU и вкупните загуби на активна моќност ΔP_{Σ} во мрежата за прикажаниот режим на работа.

Така добиените резултати за загубата на напон ΔU и вкупните загуби на активна моќност ΔP_{Σ} во мрежата да се споредат со нивните точни вредности добиени со помош на компјутерска програма и да се оцени големината на грешката што ја внесува приближниот начин на решавање.

Решение:

а) Пресметка на приближните текови на моќности

Врз основа на изложеното во точката 5.3.2 за тековите на моќности во набљудуваната мрежа ќе ја добиеме следната распределба на моќности во мрежата (слика П.5.4.2).

Нека нумерацијата на гранките во мрежата биде усогласена со индексот на нивните крајни јазли. Во тој случај, на пример, за моќноста $\underline{S}_{\Sigma 1} = (P_{\Sigma 1} + jQ_{\Sigma 1})$ во првата гранка од мрежата ќе добиеме:

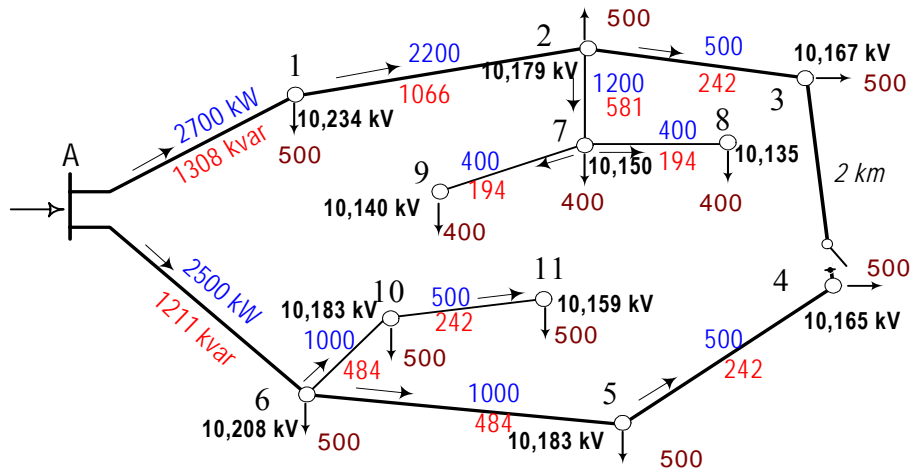
$$P_{\Sigma 1} = P_1 + P_2 + P_3 + P_7 + P_8 + P_9 = 500 + 500 + 500 + 400 + 400 + 400 = 2700 \text{ kW};$$

$$Q_{\Sigma 1} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_7 + Q_8 + Q_9 = 242 + 242 + 242 + 194 + 194 + 194 = 1308 \text{ kvar}.$$

Слично, за втората гранка ќе имаме:

$$P_{\Sigma 2} = P_{\Sigma 1} - P_1 = 2700 - 500 = 2200 \text{ kW}; \quad Q_{\Sigma 2} = Q_{\Sigma 1} - Q_1 = 1308 - 242 = 1066 \text{ kvar},$$

итн.



Слика П.5.4.2. Распределба на моќностите во анализираната 10 kV кабелска мрежа

На сличен начин, со проста примена на I Кирхофов закон, ги добиваме и останатите моќности $P_{\Sigma i}$ $Q_{\Sigma i}$ во гранките од мрежата. Резултатите од таквите пресметки се прикажани на сликата П.5.6.2 и во табелата П.5.6.1.

Откога ги пресметавме моќностите во гранките од мрежата пристапуваме кон определување на напоните во јазлите. Започнуваме од првата гранка за која што е познат напонот во почетниот јазел $U_A = 10,3 \text{ kV}$. Сега со помош на изразот (5.10 б) ќе го пресметаме напонот U_1 во крајниот јазел 1:

$$\Delta U_1 = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot R_1 + Q_{\Sigma 1} \cdot X_1}{U_A} = \frac{2700 \cdot 0,208 + 13078 \cdot 0,092}{10,3} \cdot 1 = 0,066 \text{ kV};$$

$$U_1 = U_A - \Delta U_1 = 10,3 - 0,066 = 10,234 \text{ kV}.$$

Понатаму имаме:

$$\Delta U_2 = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot R_2 + Q_{\Sigma 2} \cdot X_2}{U_1} = \frac{2200 \cdot 0,208 + 1066 \cdot 0,092}{10,234} \cdot 1 = 0,054 \text{ kV};$$

$$U_2 = U_1 - \Delta U_2 = 10,234 - 0,054 = 10,180 \text{ kV}, \text{ итн.}$$

Табела П.5.4.1. Текови на моќности, загуби на напон и напони во мрежата

р. број	Делница	$P_{\Sigma i}$ (kW)	$Q_{\Sigma i}$ (kvar)	ΔU_i (kV)	Напон U_i на крајот (kV)	ΔP_i (kW)	ΔQ_i (kvar)
1	A – 1	2700	1308	0,066	10.234	17,876	7,907
2	1 – 2	2200	1066	0,054	10.179	11,996	5,306
3	2 – 3	500	242	0,012	10.167	0,621	0,275
4	2 – 7	1200	581	0.030	10.150	3,598	1,591
6	7 – 8	400	194	0.015	10.135	0,603	0,267
7	7 – 9	400	194	0.010	10.140	0,401	0,177
8	A – 6	2500	1211	0.092	10.208	23,104	10,219
9	6 – 5	1000	484	0.025	10.183	2,476	1,095
10	5 – 4	500	242	0.019	10.165	0,932	0,412
11	6 – 10	1000	484	0.025	10.183	2,476	1,095
12	10 - 11	500	242	0.025	10.158	1,244	0,550

Слично се пресметуваат и преостанатите напони во јазлите. На тој начин за моќностите $P_{\Sigma i}$ $Q_{\Sigma i}$ во гранките од мрежата и загубите на напон ΔU_i во поедините делници се добиваат следните резултати, прикажани во табелата П.5.4.1. Притоа, загубите на напон во сите делници се пресметувани приближно, на база на приближните релации (5.9) и (5.10):

Загубата на напон во мрежата ΔU претставува разлика на ефективните вредности на напонот во напојната точка U_A и напонот U_{\min} во точката од мрежата со најнизок напон. Во случајов, тоа е точката бр. 8. Според тоа имаме:

$$\Delta U = U_A - U_8 = 10,3 - 10,135 = 0,165 \text{ kV (1,65\%).}$$

Загубите на активна моќност ΔP_{Σ} во мрежата се добиваат со директно собирање на сите загуби во нејзините гранки, т.е:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P_{11} = 17,876 + 11,996 + \dots + 1,244;$$

$$\Delta P_{\Sigma} = 65,33 \text{ kW или 1,26\%.}$$

Пресметаните вредности на напоните во (kV) се прикажани на сликата П.5.6.2.

б) Пресметка на точните текови на моќности

Со помош на компјутерската програма „LFZ.xls“ базирана на методот на јазлови потенцијали, како решение на режиот на работа на мрежата од примерот П5.6, се добиваат следните резултати.

Табела П.5.6.2. Текови на моќности и напони во мрежата – точни вредности

ред.		Почеток		Крај		Напон U_i	ΔP_i	ΔQ_i
број	Делница	$P_{\Sigma i}$ (kW)	$Q_{\Sigma i}$ (kvar)	$P_{\Sigma i}$ (kW)	$Q_{\Sigma i}$ (kvar)	на крајот (kV)	(kW)	(kvar)
1	A – 1	2715	1313	2697	1306	10.233	17,876	7,907
2	1 – 2	2197	1064	2185	1058	10.179	11,996	5,306
3	2 – 3	479	0231	478	231	10.167	0,621	0,275
4	2 – 7	1206	585	1203	583	10.148	3,598	1,591
5	7 – 8	803	389	800	388	10.133	0,603	0,267
6	7 – 9	400	194	400	194	10.139	0,401	0,177
7	A – 6	2552	1234	2529	1224	10.207	23,104	10,219
8	6 – 5	1025	496	1022	495	10.182	2,476	1,095
9	5 – 4	0522	253	522	253	10.163	0,932	0,412
10	6 – 10	1004	486	1001	485	10.182	2,476	1,095
11	10 - 11	501	243	500	242	10.157	1,244	0,550

Загубата на напон во мрежата ΔU во овој случај ќе биде:

$$\Delta U = U_A - U_8 = 10,3 - 10,133 = 0,167 \text{ kV (1,67\%).}$$

Загубите на активна моќност ΔP_{Σ} во мрежата се добиваат со директно собирање на сите загуби во нејзините гранки, т.е:

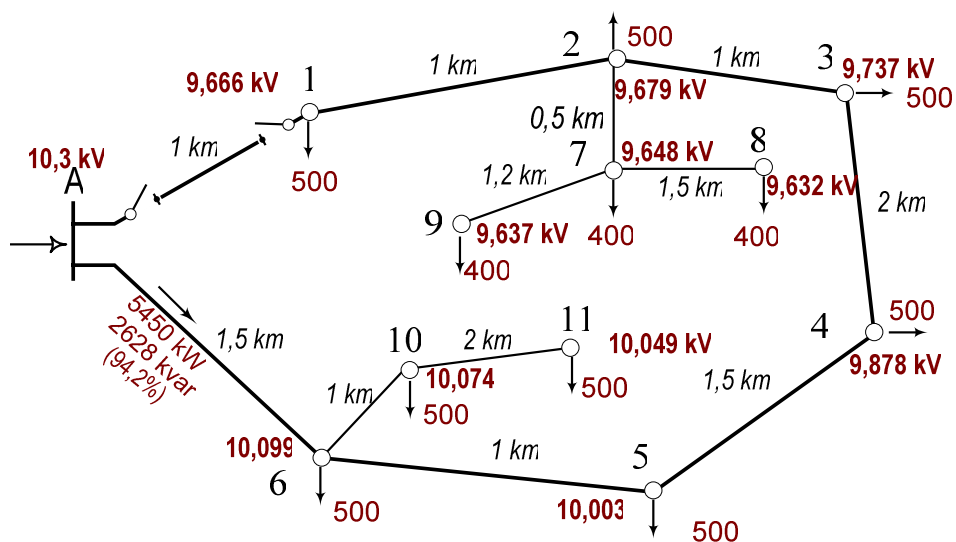
$$\Delta P_{\Sigma} = 65,85 \text{ kW (1,25\%).}$$

Видливо е големото совпаѓање на добиените резултати со приближната и со точната постапка. Тоа само ја потврдува тезата дека приближните методи даваат, за практични цели, резултати со доволно висока точност.

□ □ □

Пример. 5.5. За мрежата од слика П.5.4.1 анализирана во претходниот пример, да се утврди колкави ќе бидат загубите на напон и моќност во мрежата за најнеповолниот режим на работа (режим со најголем дефект, кога е испадната секцијата „А-1“ (слика П.5.5.1). Дали таквиот режим е прифатлив од аспект на загуба на напон во мрежата и од аспект термичко оптоварување на секцијата „А-6“ како најоптоварена. Дозволената загуба на напон во хавариски режими изнесува $\Delta U_{doz} = 10\%$, додека дозволеното струјно оптоварување на кабелот изнесува $I_{AT} = 360 \text{ A}$ (таб. П8).

Решение:



Слика П.5.5.1. 10 kV кабелска мрежа во режим на најтежок дефект со испадната делница „А-1“

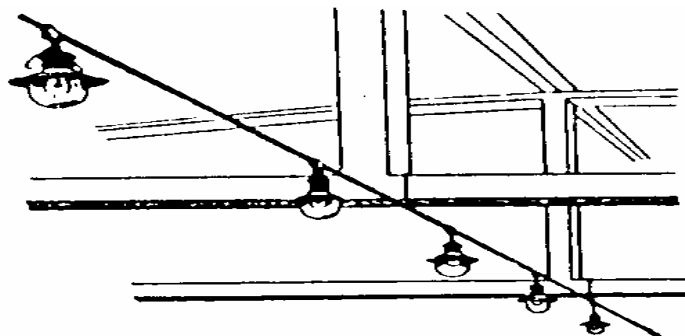
За овој режим на работа на мрежата, со помош на компјутерската програма ги добиваме следните резултати:

- привидна моќност во првата, најоптоварена делница „А-6“:
 $(5,45 + j2,63) \text{ MVA}$;
- струја во најоптоварената делница $I_{A-6} = 339 \text{ A}$ (94,2% од дозволената I_{dT});
- вкупни загуби на моќност во мрежата $\Delta S_{\Sigma} = (\Delta P_{\Sigma} + j\Delta Q_{\Sigma}) = (250 + j110) \text{ kVA}$;
- загуба на напон во мрежата: $\Delta U = U_A - U_8 = 10,3 - 9,632 = 0,668 \text{ kV}$ (6,8%).

Вредностите на напоните за преостанатите јазли во мрежата се прикажани на сликата П.5.7.1



5.3.3. Мрежа со континуирано оптоварување

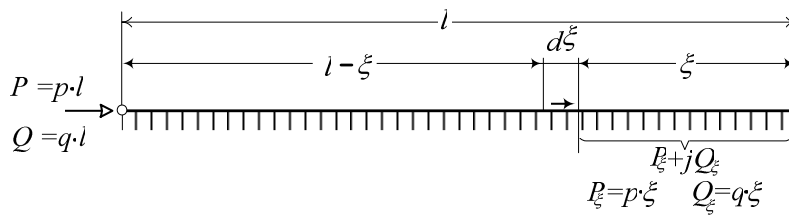


Слика 5.12. Мрежа со континуирано оптоварување

Во некои случаи, на пример при проектирањето на мрежа на надворешно осветление на град, село, фабричка хала и слично, оптоварувањата на водовите се претставуваат рамномерно распределени по нивната должина.

Ако при пресметките би се зела предвид секоја светилка одделно, тогаш пресметувањето би било премногу комплицирано, а надомест за тоа би било малото зголемување на точноста на резултатите.

Нека посматраме вод со должина l и подолжни параметри r и x , рамномерно оптоварен (сл. 5.13) со вкупно активно оптоварување $P = p \cdot l$ и вкупно реактивно оптоварување $Q = q \cdot l$. Притоа, со p и q се означени активото и реактивното оптоварување на водот по единица должина (т.е. линиската густина на товарот, изразена во W/m и var/m).



Слика 5.13. Кон објаснувањето на равенките (5.36) – (5.40)

Загубата на напон во бесконечно мал елемент $d\xi$, што се наоѓа на растојание ξ од крајот на водот (слика 5.13), ќе биде:

$$d(\Delta U) = \frac{P_\xi \cdot r \cdot d\xi}{U_n} + \frac{Q_\xi \cdot x \cdot d\xi}{U_n} = \frac{(p \cdot \xi) \cdot r \cdot d\xi}{U_n} + \frac{(q \cdot \xi) \cdot x \cdot d\xi}{U_n}, \quad (5.36)$$

а вкупната загуба на напон во целиот вод ќе биде:

$$\Delta U = \int_0^l d(\Delta U) = \frac{p \cdot r}{U_n} \cdot \int_0^l \xi \cdot d\xi + \frac{q \cdot x}{U_n} \cdot \int_0^l \xi \cdot d\xi = \frac{p \cdot r \cdot l^2}{2U_n} + \frac{q \cdot x \cdot l^2}{2U_n}. \quad (5.37)$$

Бидејќи е $R = r \cdot l$ и $X = x \cdot l$, равенката (5.37) може да се напише и на следниот начин:

$$\Delta U = \frac{1}{2} \cdot \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n}. \quad (5.38)$$

Претходната формула укажува на тоа дека **загубата на напонот** во водот со рамномерно распределено оптоварување по целата негова должина е за **два пати помала** отколку во случајот кога целото тоа оптоварување би било концентрирано на крајот од водот. Тоа значи дека, кога се пресметува загубата на напон во континуирано оптоварен вод, целиот товар може да се замени со едно концентрирано оптоварување поставено на средината на водот. Притоа концентрираното оптоварување е еднакво на сумарното оптоварување на водот.

Ако водот е составен од повеќе секции со различни оптоварувања по единица должина, тогаш за секоја секција одделно, се определува соодветното концентрирано оптоварување и случајот се решава како и кај мрежите со неколку товари.

Да ги определиме загубите на моќност во континуирано оптоварениот вод. Загубите на активна моќност $d(\Delta P)$ на елементарниот дел dx се:

$$d(\Delta P) = 3 \cdot r \cdot d\xi \cdot I_{\xi}^2 = r \cdot d\xi \cdot \frac{P_{\xi}^2 + Q_{\xi}^2}{U_n^2},$$

или

$$d(\Delta P) = r \cdot d\xi \cdot \frac{p^2 \cdot \xi^2 + q^2 \cdot \xi^2}{U_n^2} = \frac{p^2 + q^2}{U_n^2} \cdot r \cdot \xi^2 \cdot d\xi, \quad (5.39)$$

а во сиот вод:

$$\Delta P = \int_0^l d(\Delta P) = \frac{p^2 + q^2}{U_n^2} \cdot r \cdot \int_0^l \xi^2 \cdot d\xi = \frac{p^2 + q^2}{U_n^2} \cdot r \cdot \frac{l^3}{3}, \quad (5.40)$$

односно:

$$\Delta P = \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \cdot R = \frac{1}{3} \cdot \Delta P_{\text{конц}}. \quad (5.41)$$

Со аналогно расудување, за загубите на реактивната моќност би добиле:

$$\Delta Q = \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \cdot X = \frac{1}{3} \cdot \Delta Q_{\text{конц}}. \quad (5.42)$$

При познат фактор на моќност $\cos \varphi = P/S = P/\sqrt{P^2 + Q^2}$ претходните два изрази можат да се напишат во следниот вид:

$$\Delta P = \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 \cdot R}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi}; \quad \Delta Q = \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 \cdot X}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi}. \quad (5.43)$$

Во (5.41) и (5.42) со $\Delta P_{\text{конц}}$ и $\Delta Q_{\text{конц}}$ се означени загубите на активна и реактивна моќност за случајот која целиот товар е концентриран на краот од водот.

Од формулите (5.41), (5.42) и (5.43) се гледа дека при континуирано распределено оптоварување **загубите** на активната и реактивната моќност во водот **се за три пати помали** во однос на случајот кога целиот товар би бил концентриран на крајот од водот. Тоа значи дека, кога се пресметува загубата на моќност во континуирано оптоварен вод, целиот товар може да се замени со едно концентрирано оптоварување, поставено на 1/3 од почетокот на водот. Притоа концентрираното оптоварување е еднакво на сумарното оптоварување на водот.

— ■ —

Пример. 5.6. На сликата е прикажан надземен извод од една НН дистрибутивна мрежа. Изводот напојува вкупно 22 индивидуални потрошувачи (селски домаќинства). Главната магистрала на мрежата, долга $L = 1065 \text{ m}$, е изведена со спроводници $\text{Al } 35 \text{ mm}^2$ за кои што е позната подолжната импеданција $\underline{z} = (0,90 + j0,35) \Omega/\text{km}$, додека приклучните водови до поедините потрошувачи се изведени со самоносечки кабли (СКС) $4 \times 16 \text{ Al}$ со подолжна импеданија $\underline{z}_1 = (2,0 + j0,10) \Omega/\text{km}$, кои со оглед на своите сосема мали должини може да се испуштат од анализите. Со помош на моделот за вод со континуирано распределен товар да се процени загубата на напон и загубата на моќност во мрежата. Потоа со детални пресметки да се добие уточнетата вредност за овие загуби и да се оцени големината на грешката што ја дава идеализираниот модел на магистралниот вод. Просечната моќност по едно домаќинство во режимот на максималното оптоварување изнесува $P_1 = 2 \text{ kW}$ при фактор на моќност $\cos \varphi = 0,95$ ($Q_1 = P_1 \cdot \tan \varphi = 0,657 \text{ kvar}$).

Решение:

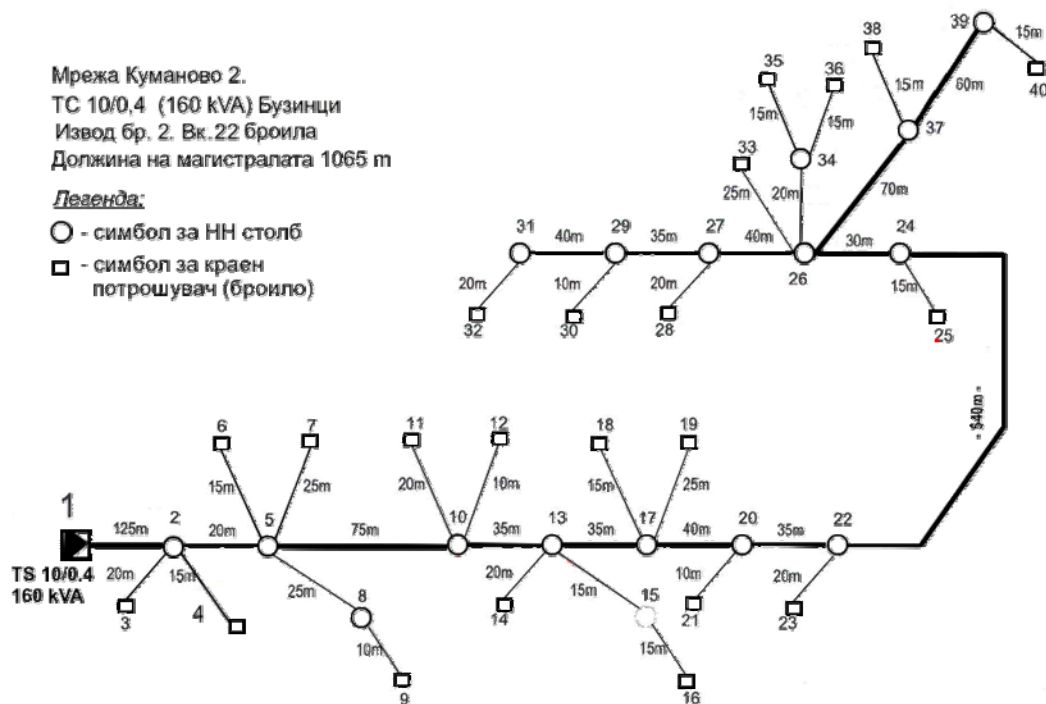
Редната импеданција на магистралниот вод (фидерот) изнесува:

$$\underline{Z} = (R + jX) = \underline{z} \cdot L = (0,90 + j0,35) \cdot 1,065 = (0,969 + j0,373) \Omega.$$

Вкупната моќност на потрошувачите во режимот максималното оповарување изнесува:

$$\underline{S}_\Sigma = (P_\Sigma + jQ_\Sigma) = n \cdot (P_1 + jQ_1) = (44 + j14,5) \text{ kVA};$$

$$P_\Sigma = 44 \text{ kW}; \quad Q_\Sigma = 14,5 \text{ kvar}.$$



Слика П.5.6. Приказ на набљудуваниот извод од НН селска надземна мрежа

Загубата на напон во магистралниот вод ќе ја процениме со помош на релацијата (5.38), додека загубите на активна и реактивна моќност со помош на релациите (5.43):

$$\Delta U = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{\Sigma} \cdot R + Q_{\Sigma} \cdot X}{U_n} = \frac{1}{2} \cdot \frac{44 \cdot 0,969 + 14,5 \cdot 0,373}{0,4} = 59,5 \text{ V}$$

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{59,5}{400} \cdot 100 = 14,9\%$$

$$\Delta P = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{\Sigma}^2 \cdot R}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} = \frac{1}{3} \cdot \frac{44^2 \cdot 0,969}{0,4^2 \cdot 0,95^2} = 4470 \text{ W} \equiv 4,47 \text{ kW};$$

$$\Delta P\% = \frac{4,98}{44} \cdot 100 = 10,2 \%$$

$$\Delta Q = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{\Sigma}^2 \cdot X}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} = \frac{1}{3} \cdot \frac{44^2 \cdot 0,373}{0,4^2 \cdot 0,95^2} = 1738 \text{ var (12,0\%)}.$$

Ако сега извршиме детално моделирање на изводот, со вистинските должини на неговите делници и со вистинската просторна распределба на потрошувачите (занемарувајќи ги притоа редните импеданции на приклучните водови), со помош на компјутерска програма (под претпоставка дека е $U_1 = 420 \text{ V}$) ќе се добијат следните резултати:

$$\Delta U = 63,6 \text{ V}; \quad (\Delta U\% = 15,9\%).$$

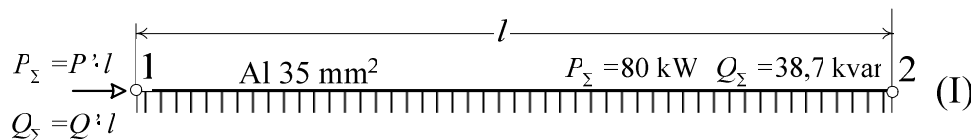
$$\Delta P = 4,61 \text{ kW} \quad (\Delta P\% = 10,5 \%);$$

$$\Delta Q = 1,79 \text{ kvar} \quad (\Delta Q\% = 12,3 \%).$$

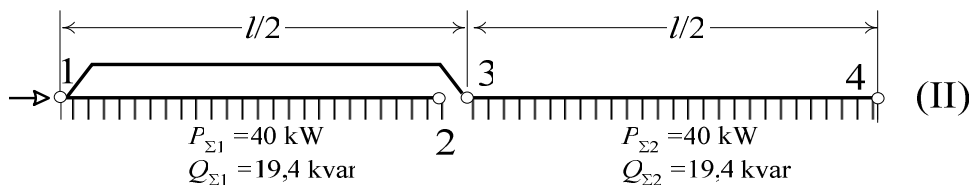
Од изложениот пример може да се заклучи дека релациите (5.38) и (5.43), кои што се однесуваат на идеализираниот случај на вод со континуиран товар, даваат и во реалните случаи доста добри проценки на загубите на напон и моќност во НН дистрибутивни мрежи. Затоа тие многу често се користат, како сосема едноставни, за брзи проценки на загубите во мрежата.

□ □ □

Пример. 5.7. НН надземен извод (слика П.5.7.1) со должина $l = 300 \text{ m}$ и спроводници од Е-А1 јаже со пресек 35 mm^2 [$\underline{z} = (0,90 + j0,33) \Omega/\text{km}$] напојува група потрошувачи со вкупна моќност во режимот на максимално оптоварување $P_{\Sigma} = 80 \text{ kW}$; $\cos \varphi = 0,9$. Потрошувачите може да се третираат како рамномерно распределен товар. Поради големата должина на изводот и растот на конзумот, загубите на напон и моќност во мрежата се веќе неприфатливо високи. Се размислува за негово појачување на тој начин што до средината на изводот, на истите столбови, ќе се пушти уште една делница со ист пресек како и постојниот вод која што ќе ја напојува втората половина од изводот, според шемата прикажана на сликата П.5.7.2.



Слика П.5.7.1. НН надземен извод оптоварен со рамномерно распределен товар (I состојба)



Слика П.5.7.2. Изводот после реконструкцијата (II состојба)

Да се пресмета за колку пати ќе се намалат загубите ΔU и ΔP , т.е. колкав ќе биде односот $\Delta U_{II}/\Delta U_I$ и $\Delta P_{II}/\Delta P_I$ помеѓу загубите после и пред реконструкцијата на изводот.

Решение:

1) Пресметка на загубите за постојната состојба (состојба бр. 1)

Со помош на релациите (5.38) и (5.43) за загубите на напон и моќност во водот ао рамномерно распределен товар ќе добиеме:

$$R = r \cdot l = 0,9 \cdot 0,3 = 0,27 \, \Omega; \quad X = x \cdot l = 0,33 \cdot 0,3 = 0,1 \, \Omega; \quad ;$$

$$P_{\Sigma} = 80 \, \text{kW}; \quad Q_{\Sigma} = P_{\Sigma} \cdot \tan \varphi = 38,8 \, \text{kvar}.$$

$$\Delta U_I = (U_1 - U_2) = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{\Sigma} \cdot R + Q_{\Sigma} \cdot X}{U_n} = 32 \, \text{V};$$

$$\Delta P_I = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{\Sigma}^2 \cdot R}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} = 4,44 \, \text{kW}.$$

1) Пресметка на загубите за новата состојба (состојба бр. 2)

$$\Delta U_{II} = (U_1 - U_3) + (U_3 - U_4) = \Delta U_{1-3} + \Delta U_{3-4};$$

$$\Delta U_{II} = \frac{1}{U_n} \cdot \left(\frac{P_{\Sigma}}{2} \cdot \frac{R}{2} + \frac{Q_{\Sigma}}{2} \cdot \frac{X}{2} \right) + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{U_n} \cdot \left(\frac{P_{\Sigma}}{2} \cdot \frac{R}{2} + \frac{Q_{\Sigma}}{2} \cdot \frac{X}{2} \right);$$

$$\Delta U_{II} = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \right) \cdot \Delta U_I = \frac{3}{4} \cdot \Delta U_I.$$

$$\frac{\Delta U_{II}}{\Delta U_I} = \frac{3}{4} = 0,75.$$

$$\Delta P_{II} = \Delta P_{1-2} + \Delta P_{1-3} + \Delta P_{3-4};$$

$$\Delta P_{1-2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{(R/2) \left(\frac{P_{\Sigma}}{2} \right)^2}{U_n^2 \cos^2 \varphi} = \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{\Sigma}^2 \cdot R}{U_n^2 \cos^2 \varphi} = \frac{1}{8} \cdot \Delta P_I$$

$$\Delta P_{1-3} = \frac{(R/2)}{U_n^2} \left(\frac{P_\Sigma / 2}{\cos \varphi} \right)^2 = \frac{1}{8} \cdot \frac{P_\Sigma^2 \cdot R}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} = \frac{3}{8} \cdot \Delta P_1,$$

$$\Delta P_{2-3} = \Delta P_{1-2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{(R/2)}{U_n^2} \left(\frac{P_\Sigma / 2}{\cos \varphi} \right)^2 = \frac{1}{8} \cdot \Delta P_1.$$

$$\Delta P_{II} = \left(\frac{1}{8} + \frac{3}{8} + \frac{1}{8} \right) \cdot \Delta P_1 = \frac{5}{8} \cdot \Delta P_1 = 0,625 \cdot \Delta P_1.$$

$$\frac{\Delta P_{II}}{\Delta P_1} = \frac{5}{8} = 0,625.$$

Значи загубата на напон и загубите на моќност во новата состојба ќе бидат:

$$\Delta U_{II} = 0,75 \cdot \Delta U_I = 0,75 \cdot 32 = 24 \text{ V (6\%)},$$

$$\Delta P_{II} = 0,625 \cdot \Delta P_I = 2,78 \text{ kW}.$$

Забелешка: Резултатите добиеи за односите $\Delta U_{II}/\Delta U_I$ и $\Delta P_{II}/\Delta P_I$ се општи и не зависат ниту од параметрите на мрежата (должина, пресек и сл.) ниту пак од оптоварувањето. Тоа значи дека со ваков зафат во една мрежа со конфигурација слична на онаа од сликата П.5.7.1 секогаш ќе се добива истото релативно намалување на загубите ΔU и ΔP .

□ □ □