Електрични мрежи

Загуби на моќност и енергија во електричните мрежи

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи
Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2018

Загуби на активна моќност во елементите на мрежата

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

$$\Delta P_{\mathrm{V}} = 3 \cdot R \cdot I^2 = R \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U^2} = R \cdot \frac{S^2}{U^2}$$

- Загуби во трансформатори

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

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

Загуби на активна енергија во елементите на мрежата

- Моќностите на оптоварување P и Q се константни во временски период

$$\Delta W = \Delta P \cdot T$$

- Моќностите на оптоварување P и Q се временски променливи

$$\Delta W = \int_0^T \Delta P(t) \cdot dt$$

$$\Delta W_{\mathrm{V}} = \int_0^T \Delta P_{\mathrm{V}}(t) \cdot dt = \int_0^T 3 \cdot R \cdot I^2(t) \cdot dt = R \cdot \int_0^T \frac{S^2(t)}{U^2(t)} \cdot dt$$

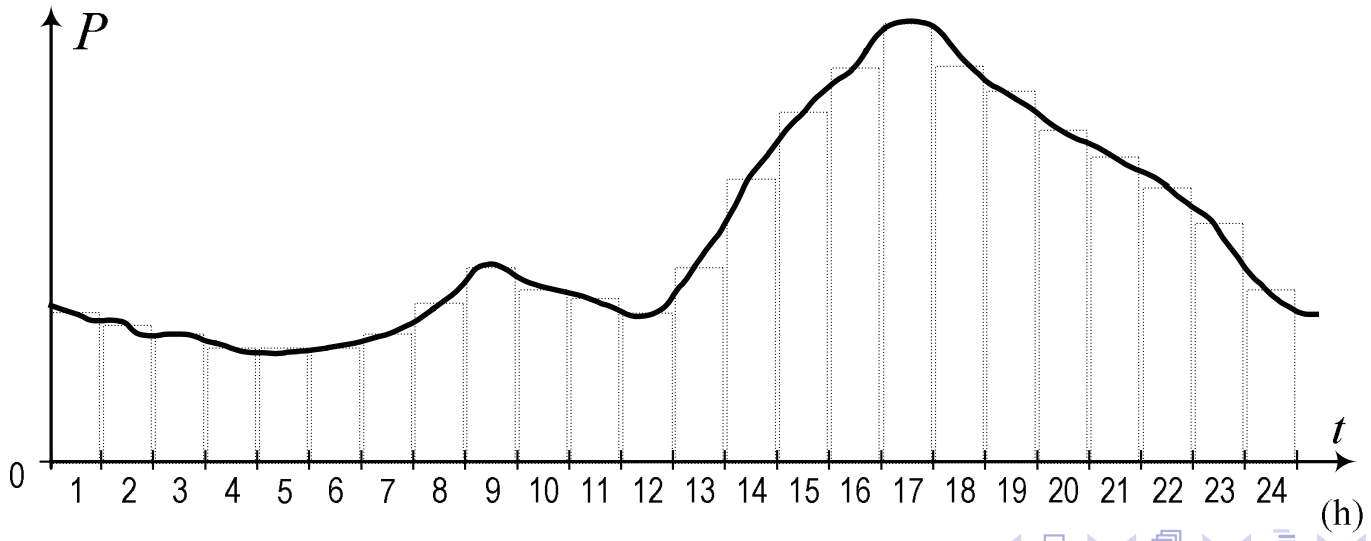
$$\Delta W_{\mathrm{T}} = \int_0^T \left[\Delta P_{\mathrm{Fe}} + \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \frac{S^2(t)}{S_{\mathrm{n}}^2} \right] \cdot dt = \Delta P_{\mathrm{Fe}} \cdot T + \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \int_0^T \frac{S^2(t)}{S_{\mathrm{n}}^2} \cdot dt$$

Загуби на активна енергија во елементите на мрежата

Временски промени $P(t)$ и $Q(t)$ честопати се прикажуваат со скалеста крива со n временски интервали

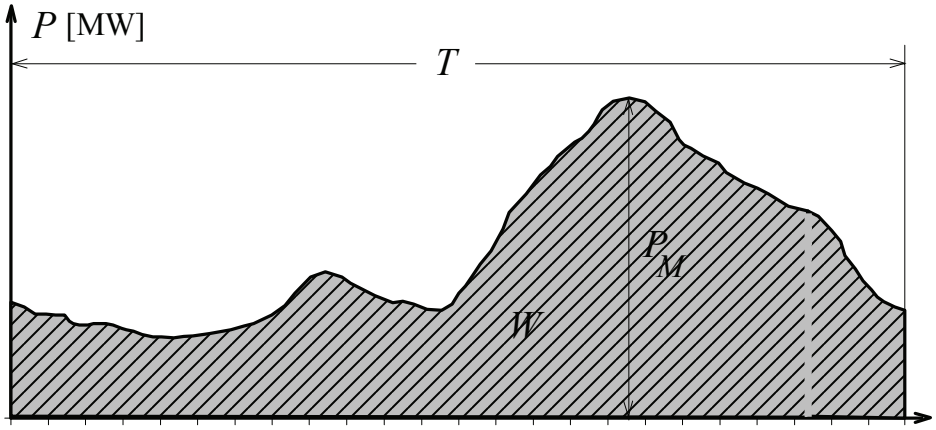
$$\Delta W_{\mathrm{V}} = R \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \cdot \Delta t_i = R \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{S_i^2}{U_i^2} \cdot \Delta t_i, \quad U_i \approx U_{\mathrm{n}}$$

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

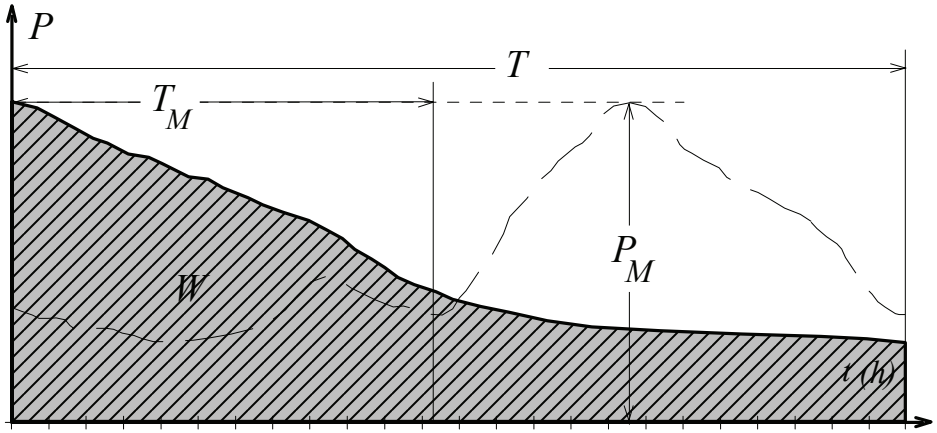


Загуби на активна енергија во елементите на мрежата

$$W = \int_0^T P(t) \cdot dt$$



Дневен дијаграм $P = P(t)$



Подреден дневен дијаграм

T_{M} – употребно време или време на максимална моќност

$$T_{\mathrm{M}} = \frac{W}{P_{\mathrm{M}}} = \int_0^T \frac{P(t)}{P_{\mathrm{M}}} \cdot dt \approx \sum_{i=1}^{n} \frac{P_i}{P_{\mathrm{M}}} \cdot \Delta t_i$$

Загуби на активна енергија во елементите на мрежата

$$\Delta W_{\mathrm{V}} = R \cdot \int_0^T \frac{S^2(t)}{U^2(t)} \cdot dt \approx \frac{R}{U_{\mathrm{n}}^2} \cdot S_{\mathrm{M}}^2 \cdot \int_0^T \frac{S^2(t)}{S_{\mathrm{M}}^2} \cdot dt$$

$$\Delta P_{\mathrm{M}} = 3 \cdot R \cdot I_{\mathrm{M}}^2 = R \cdot \frac{S_{\mathrm{M}}^2}{U_{\mathrm{M}}^2} \approx R \cdot \frac{S_{\mathrm{M}}^2}{U_{\mathrm{n}}^2}$$

$$\Delta W_V = \Delta P_M \cdot \tau$$

$$\tau = \int_0^T \frac{S^2(t)}{S_{\mathrm{M}}^2} \cdot dt \approx \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{S_i}{S_{\mathrm{M}}} \right)^2 \cdot \Delta t_i$$

τ се нарекува време на максимални загуби или време на загуби.

Загуби на активна енергија во елементите на мрежата

Времињата T_{M} и τ се однесуваат на еден ист дијаграм на оптоварување. Помеѓу нив постои врска опишана со емпириска релација

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_{\mathrm{M}}}{10.000}\right)^2 \cdot 8760, \quad \text{важи за } T = 8760\,\mathrm{h}$$

Други емпириски изрази врз основа на познатиот фактор на товарот $m = T_{\mathrm{M}}/T = P_{\text{ср.}}/P_{\mathrm{M}}$

$$\tau = (0,17 \cdot m + 0,83 \cdot m^2) \cdot T$$
$$\tau = (0,3 \cdot m + 0,7 \cdot m^2) \cdot T$$
$$\tau = (0,124 + 0,8760 \cdot m)^2 \cdot T$$

Загуби на активна енергија во елементите на мрежата

Водови

$$\Delta W_V = \Delta P_M \cdot \tau$$

Трансформатори

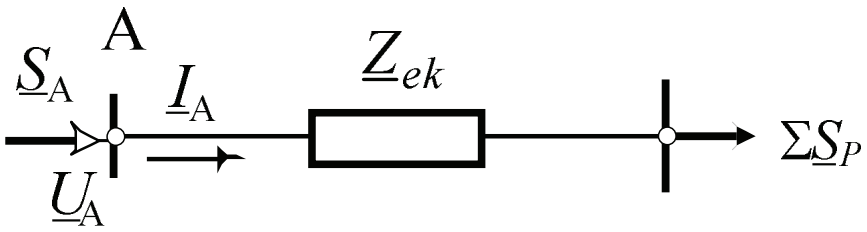
$$\Delta W_{\mathrm{T}} = \Delta P_{\mathrm{Fe}} \cdot T + \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \int_0^T \frac{S^2(t)}{S_{\mathrm{n}}^2} \cdot dt = \Delta P_{\mathrm{Fe}} \cdot T + \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \frac{S_{\mathrm{M}}^2}{S_{\mathrm{n}}^2} \cdot \int_0^T \frac{S^2(t)}{S_{\mathrm{M}}^2} \cdot dt$$

$$\Delta W_{\mathrm{T}} = \Delta P_{\mathrm{Fe}} \cdot T + \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \frac{S_{\mathrm{M}}^2}{S_{\mathrm{n}}^2} \cdot \tau$$

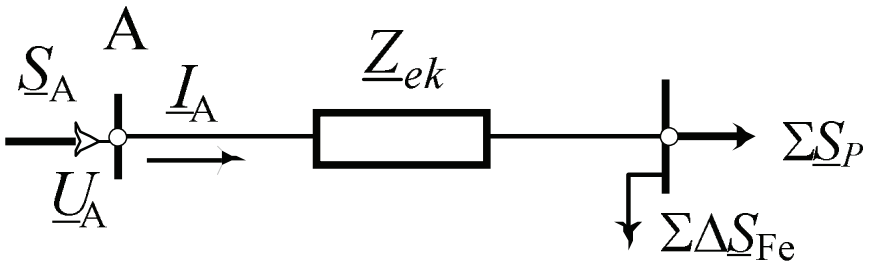
Вкупните загуби на активна и реактивна енергија во една мрежа, во даден период, претставуваат збир од загубите на активна и реактивна енергија во сите нејзини елементи, остварени во истиот тој период.

Метод на еквивалентна импеданција

- Со помош на „методот на еквивалентна импеданција“ е можно цела една мрежа, или пак дел од една постојна мрежа, заедно со нејзините потрошувачи, да се еквивалентира со друга, многу поедноставна мрежа.
- Една дистрибутивна мрежа составена само од водови може да се еквивалентира само со една единствена импеданција (слика 1)
- Кога мрежата содржи и трансформатори тогаш покрај импеданцијата еквивалентот ќе содржи и еден дополнителен фиктивен потрошувач со којшто се опфаќаат и загубите на железо во трансформаторите кои не зависат од оптоварувањето (слика 2)



а) Модел на мрежата составена само од водови



б) Модел кога мрежата содржи и трансформатори

Метод на еквивалентна импеданција

- Дистрибутивна мрежа со n_{GR} гранки со импеданции $\underline{Z}(i) = R(i) + jX(i);\ i = 1, 2, \ldots, n_{\mathrm{GR}}$.
- Ако во мрежата постојат и трансформатори нивните податоци се $S_{nT}(k)$, $\Delta P_{\mathrm{Cun}}(k)$, $\Delta P_{\mathrm{Fe}}(k)$ и $\Delta Q_{\mathrm{Fe}}(k)$.
- Со $\underline{I}_{\Sigma}(i);\ i = 1, 2, \ldots, n_{\mathrm{GR}}$ е означена струјата во гранката i.
- Со I_A е означена струјата во напојната точка А.

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

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

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

$$\Delta \underline{S}_{\mathrm{var}} = \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{GR}}} \Delta \underline{S}(i) = \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{GR}}} 3 \cdot \underline{Z}(i) \cdot I^2_{\Sigma}(i) =$$

$$= 3 \cdot I^2_{\mathrm{A}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{GR}}} \underline{Z}(i) \cdot \frac{I^2_{\Sigma}(i)}{I^2_{\mathrm{A}}} = 3 \cdot I^2_{\mathrm{A}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{GR}}} k_i^2 \cdot \underline{Z}(i).$$

Метод на еквивалентна импеданција

$$\Delta \underline{S}_{\mathrm{var}} = 3 \cdot I_{\mathrm{A}}^2 \cdot \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{GR}}} k_i^2 \cdot \underline{Z}(i).$$

$$\underline{Z}_{ek} = \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{GR}}} k_i^2 \cdot \underline{Z}(i)$$

$\underline{Z}_{ek}$ зависи од параметрите на мрежата и од просторната и временска распределба на товарот – за различни режими на работа таа е различна.

$$\Delta \underline{S}_{\mathrm{var}} = 3 \cdot \underline{Z}_{ek} \cdot I_{\mathrm{A}}^2.$$

$$\Delta \underline{S} = \Delta \underline{S}_{\mathrm{var}} + \Delta \underline{S}_{\mathrm{const.}} = 3 \cdot \underline{Z}_{ek} \cdot I_{\mathrm{A}}^2 + \Sigma \Delta \underline{S}_{\mathrm{Fe}}.$$

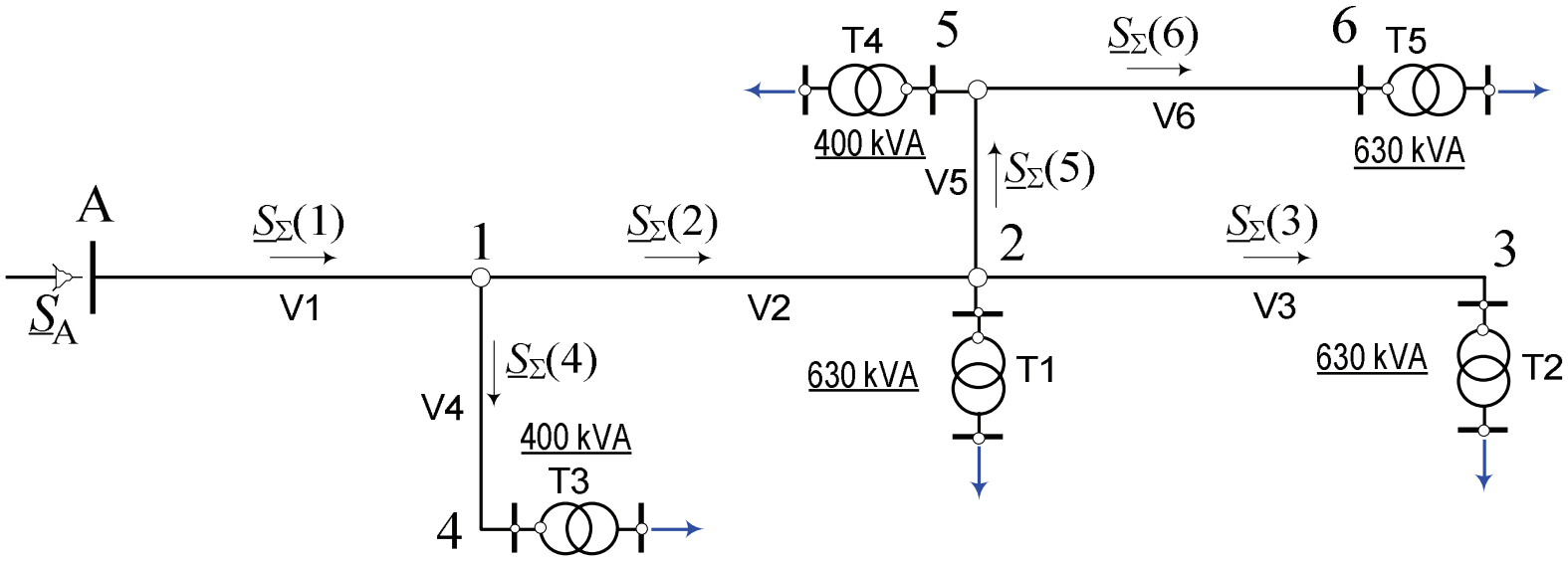
Метод на еквивалентна импеданција

За СН дистрибутивни мрежи кога не постојат податоци за конзумот се претпоставува дека учеството на моќноста на секој потрошувач од мрежата во сумарната моќност $\underline{S}_{\mathrm{A}}$ е пропорционално на инсталираната моќност на трансформаторот СН/НН преку којшто тој се напојува и е цело време константно.

$$\underline{k}_i = \frac{\underline{S}_{\Sigma}(i)}{\underline{S}_{\mathrm{A}}} = \frac{\sum\limits_{j \in \omega_i} S_{\mathrm{nT}}(j)}{\sum S_{\mathrm{nT}}} = \mathrm{const}; \quad i = 1, 2, \ldots, n_{\mathrm{GR}}.$$

ΣS_{nT} е сумарната инсталирана моќност на сите трансформатори во мрежата, $S_{\mathrm{nT}}(j)$ е номиналната моќност на транформаторот j, ω_i е множеството од потрошувачи (трансформатори) коишто се напојуваат преку гранката i.

Пример 1



$$\sum S_{\mathrm{nT}} = 630 + 630 + 400 + 400 + 630 = 2690\,\mathrm{kVA},$$

$$k_1 = \frac{2690}{2690} = 1,000; \quad k_2 = \frac{2290}{2690} = 0,851; \quad k_3 = \frac{630}{2690} = 0,237;$$

$$k_4 = \frac{400}{2690} = 0,150; \quad k_5 = \frac{1030}{2690} = 0,387; \quad k_6 = \frac{630}{2690} = 0,237.$$

$$\underline{Z}_{ek} = \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{GR}}} k_i^2 \cdot \underline{Z}(i)$$

Пример 2

Група потрошувачи со вкупна моќност $\underline{S} = (1000 + 500)\,\mathrm{kVA}$ 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 може да се менува. Да се определи бројот на трансформаторите во погонот $n_{\text{опт.}}$ така што загубите на активна моќност ΔP во трансформацијата ќе бидат минимални.
Податоци: $U_{1n}/\,U_{2n} = 10/0,4\,\mathrm{kV/kV}$; $S_\mathrm{n} = 1000\,\mathrm{kVA}$; $\Delta P_\mathrm{Cun} = 13,5\,\mathrm{kW}$; $\Delta P_\mathrm{Fe} = 2,7\,\mathrm{kW}$; $u_k\% = 6\%$; $i_0\% = 2\%$.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{1000^2 + 500^2} = 1118\,\mathrm{kVA},$$

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

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

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

Пример 2

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

$$\frac{d(\Delta P)}{dn} = \Delta P_{\mathrm{Fe}} - \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \frac{\alpha^2}{n^2} = 0,$$

$$n_{\text{опт.}} = \alpha \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{\mathrm{Cun}}}{\Delta P_{\mathrm{Fe}}}} = \frac{S}{S_{\mathrm{n}}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{\mathrm{Cun}}}{\Delta P_{\mathrm{Fe}}}}.$$

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

за $n = 2$ добиваме

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

за $n = 3$ добиваме

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

Заклучкот: треба да работат $n = 2$ трансформатора

Пример 3

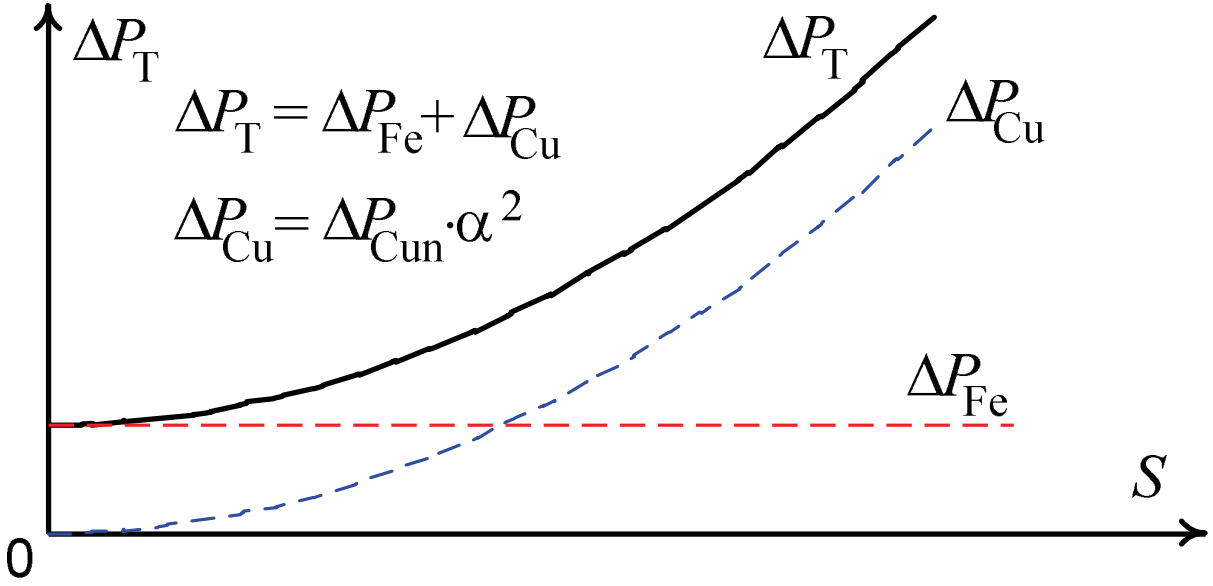
Во една дистрибутивна градска трансформаторска станица 35/10 kV/kV се инсталирани 4 идентични трансформатори кои можат да работат паралелно. Притоа бројот на трансформаторите во групата n може да се менува. Бидејќи дневниот дијаграм на оптоварувањето на трансформаторската станица е изразито нерамномерен, 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 трансформаторската станицата.

Да се утврди економичниот програм на вклучување (исклучување) на трансформаторските единици во групата во сообразност со оптоварувањето така што ќе се постигнат најмали загуби на активна моќност и енергија во трансформаторската станица.

Податоци: 35/10 kV/kV; 10 MVA; ΔP_{Cun} = 96 kW; ΔP_{Fe} = 30 kW; $u_k\%$ = 8% ; $i_0\%$ = 1,2%.

Пример 3

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

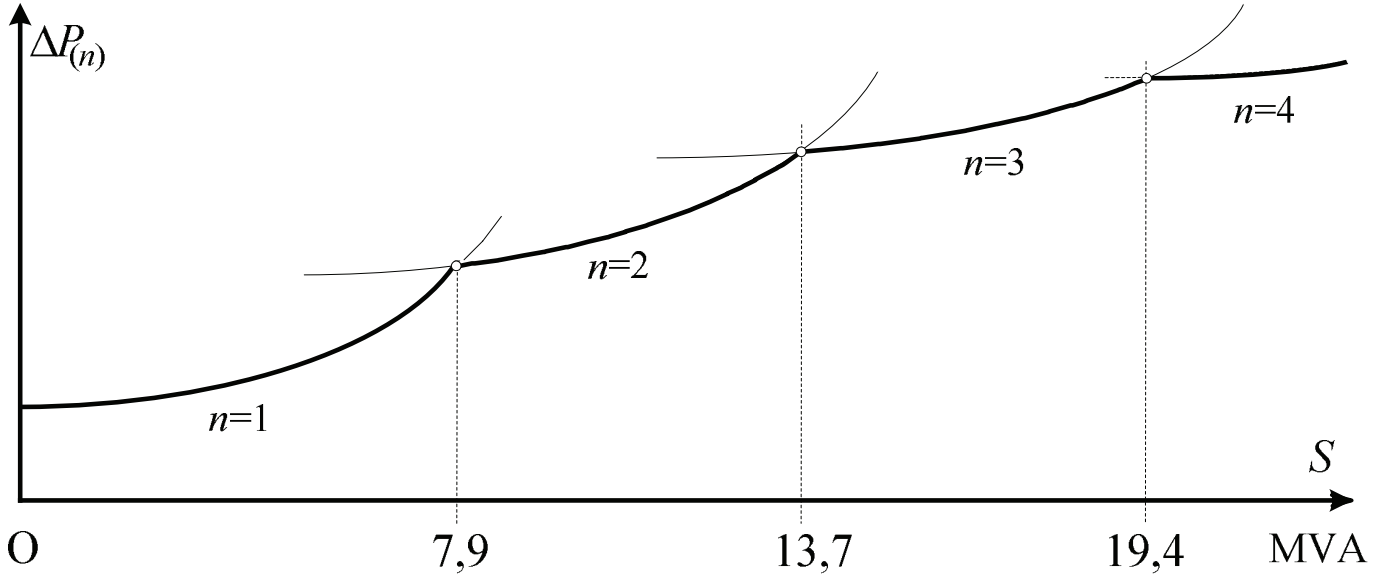


Пример 3

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

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

Од последните две равенства можеме да ја определиме привидната моќност на групата $S_{(n)}$ за која се постигнува условот $\Delta P_{(n)} = \Delta P_{(n+1)}$.



Пример 3

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

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

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

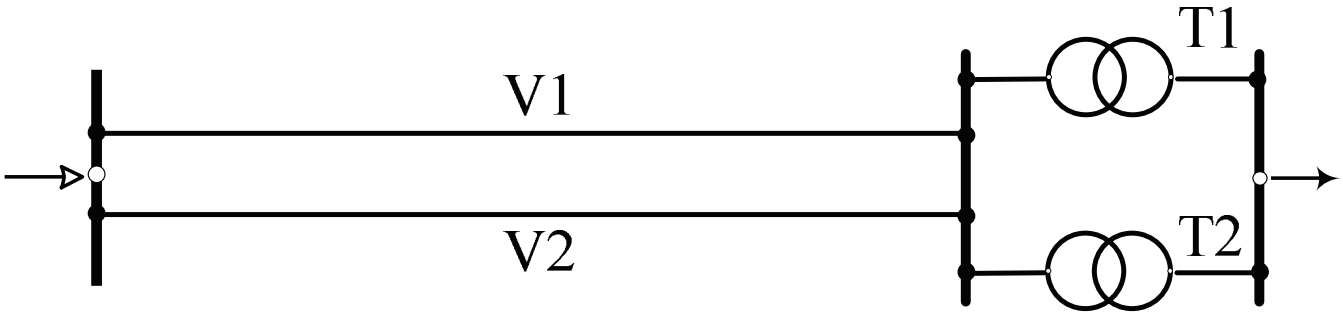
$$S_{(1)} = 10 \cdot \sqrt{1 \cdot 2 \cdot 0,313} = 7,9\,\mathrm{MVA};$$

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

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

Пример 4

На сликата е прикажана 35 kV мрежа, составена од два идентични 35 kV далекувода и два идентични трансформатора 35/10 kV/kV, кои работат во паралела. Системот напојува потрошувач (или поточно речено група потрошувачи) кој работи со константен фактор на моќност $\cos\varphi = 0,8$ = const. и со познат подреден годишен дијаграм на оптоварување, прикажан во табелата.



Период (h)	0 – 2000	2000 – 4000	4000 – 8760
P (MW)	10	5	2
Q (Mvar)	7,5	3,75	1,5
S (Mvar)	12,5	6,25	2,5

Да се определат загубите на привидната моќност $\Delta\underline{S} = \Delta P + j\Delta Q$ во режимот на максималното оптоварување како и вкупните годишни загуби на активна енергија ΔW во системот. Задачата да се реши приближно, така што зголемувањето на оптоварувањето на водовите поради загубите во трансформацијата ќе се занемари, а ќе се занемари и капацитивноста на водовите.

Водови V1 и V2: $\underline{z} = (0,28 + 0,43)\ \Omega/\mathrm{km}$; $l = 15\ \mathrm{km}$.

Трансформатори T1 и T2: $S_n = 7500\ \mathrm{kVA}$, 35/10,5 kV/kV, $\Delta P_{\mathrm{Cun}} = 75\ \mathrm{kW}$, $\Delta P_{\mathrm{Fe}} = 24\ \mathrm{kW}$, $u_k\% = 7,5\%$, $i_0\% = 3,5\%$.

Пример 4

$$S_{\mathrm{M}} = 12,5\,\mathrm{MVA}, \quad S'_{\mathrm{M}} = S_{\mathrm{M}}/2 = 6,25\,\mathrm{MVA}.$$

$$\Delta \underline{S}_{\Sigma} = 2 \cdot \Delta \underline{S}_{\mathrm{V}} + 2 \cdot \Delta \underline{S}_{\mathrm{T}} = 2 \cdot (\Delta P_{\mathrm{V}} + \Delta P_{\mathrm{T}}) + j2 \cdot (\Delta Q_{\mathrm{V}} + \Delta Q_{\mathrm{T}}).$$

$$\Delta \underline{S}_{\mathrm{V}} = \frac{S^2}{U_{\mathrm{n}}^2} \cdot (R_{\mathrm{V}} + jX_{\mathrm{V}}) = \frac{6,25^2}{35^2} \cdot (0,28 + j0,43) \cdot 15 = (0,134 + j0,206)\,\mathrm{MVA},$$

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

$$\Delta Q_{\mathrm{T}} = \Delta Q_{\mathrm{Fe}} + X_{\mathrm{T}} \cdot \frac{S^2}{U_{\mathrm{n}}^2} = (\frac{i_0\%}{100} + \frac{u_k\%}{100} \cdot \alpha^2) \cdot S_{\mathrm{n}} =$$

$$= \left(\frac{3,5}{100} + \frac{7,5}{100} \cdot \frac{6,25^2}{7,5^2}\right) \cdot 7500 = 653\,\mathrm{kvar},$$

$$\Delta \underline{S}_{\mathrm{T}} = \Delta P_{\mathrm{T}} + j\Delta Q_{\mathrm{T}} = (0,076 + 0,653)\,\mathrm{MVA}.$$

$$\begin{aligned}\Delta \underline{S}_{\Sigma} &= 2 \cdot \Delta \underline{S}_{\mathrm{V}} + 2 \cdot \Delta \underline{S}_{\mathrm{T}} = \\ &= 2 \cdot (0,134 + j0,206) + 2 \cdot (0,076 + j0,653) = \\ &= (0,420 + j1,718)\,\mathrm{MVA}.\end{aligned}$$

Пример 4

$$\Delta W_\Sigma = 2 \cdot \Delta W_\mathrm{V} + 2 \cdot \Delta W_\mathrm{T},$$

$$\Delta W_\Sigma = 2 \cdot \frac{S^2}{U_\mathrm{n}^2} \cdot R \cdot \tau + 2 \cdot \left(\Delta P_\mathrm{Fe} \cdot T + \Delta P_\mathrm{Cun} \cdot \frac{S^2}{S_\mathrm{n}^2} \cdot \tau \right).$$

$$\tau = \sum_{i=1}^{3} \frac{S_i^2}{S_\mathrm{M}^2} \cdot \Delta t_i = \sum_{i=1}^{3} \left(\frac{P_i / \cos\varphi_i}{P_\mathrm{M} / \cos\varphi_\mathrm{M}} \right)^2 \cdot \Delta t_i.$$

$$\tau = \sum \frac{P_i^2}{P_\mathrm{max}^2} \Delta t_i = \frac{12,5^2 \cdot 2000 + 6,25^2 \cdot 2000 + 2,5^2 \cdot 4760}{12,5^2} = 2650\ \mathrm{h}.$$

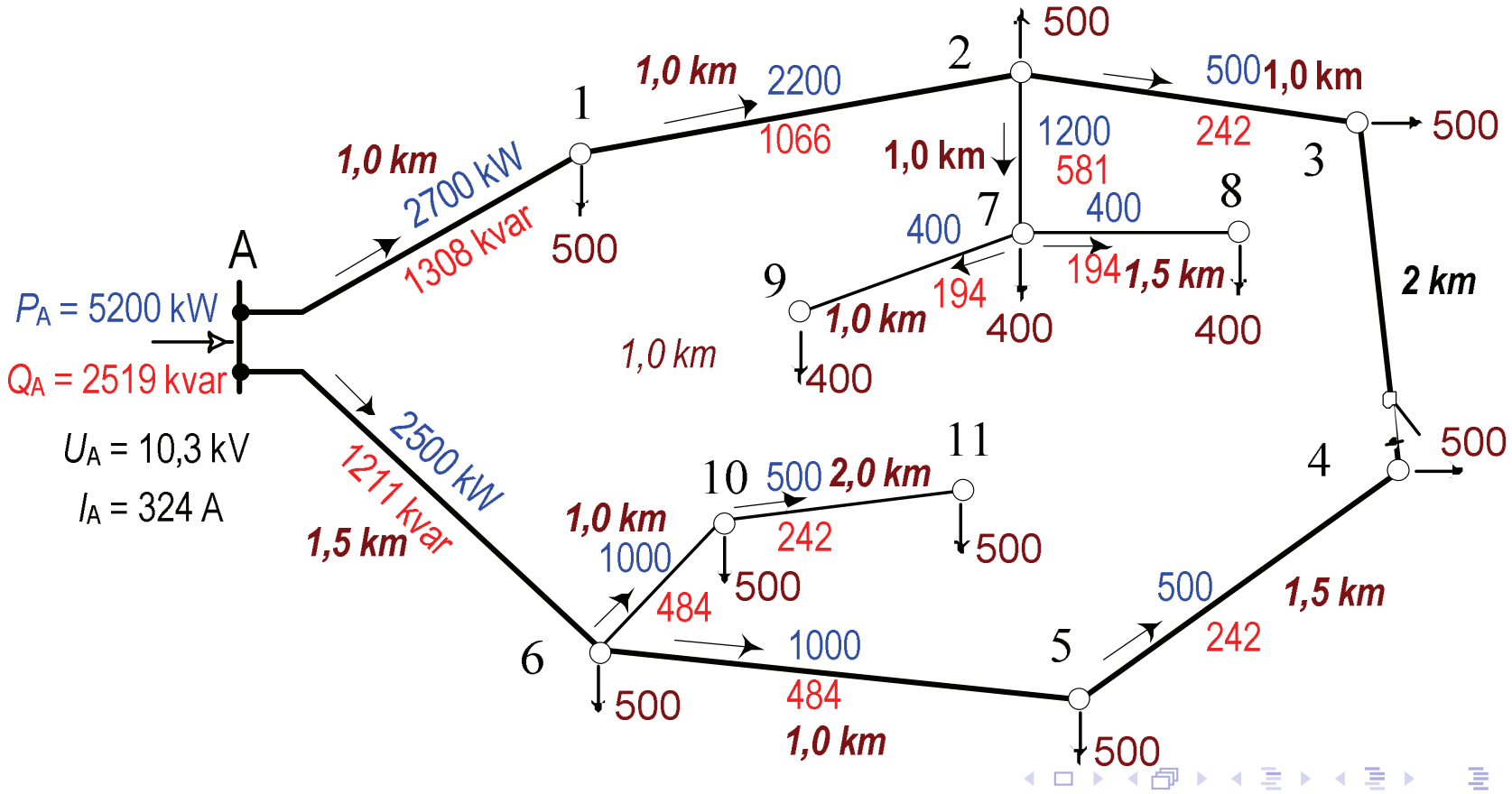
$$\Delta W_\mathrm{V} = \frac{6,25^2}{35^2} \cdot 4,2 \cdot 2650 = 355\ \mathrm{MWh}/\text{годишно},$$

$$\Delta W_\mathrm{T} = 0,024 \cdot 8760 + 0,075 \cdot \left(\frac{6,25}{7,5} \right)^2 \cdot 2650 = 348\ \mathrm{MWh}/\text{годишно}.$$

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

Пример 5

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. Сите водови во мрежата се кабли од типот XHE 49 A $3 \times 1 \times 150$, 6/10 kV со ист пресек и исти подолжни параметри $\underline{z} = (0,208 + j0,092)\ \Omega/\mathrm{km}$.



Пример 5

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

$$I_{\mathrm{A}} = \frac{S_{\mathrm{A}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{A}}} = \frac{5778}{\sqrt{3} \cdot 10} = 334\ \mathrm{A}.$$

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

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

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

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

Пример 5

број	Вод	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 5

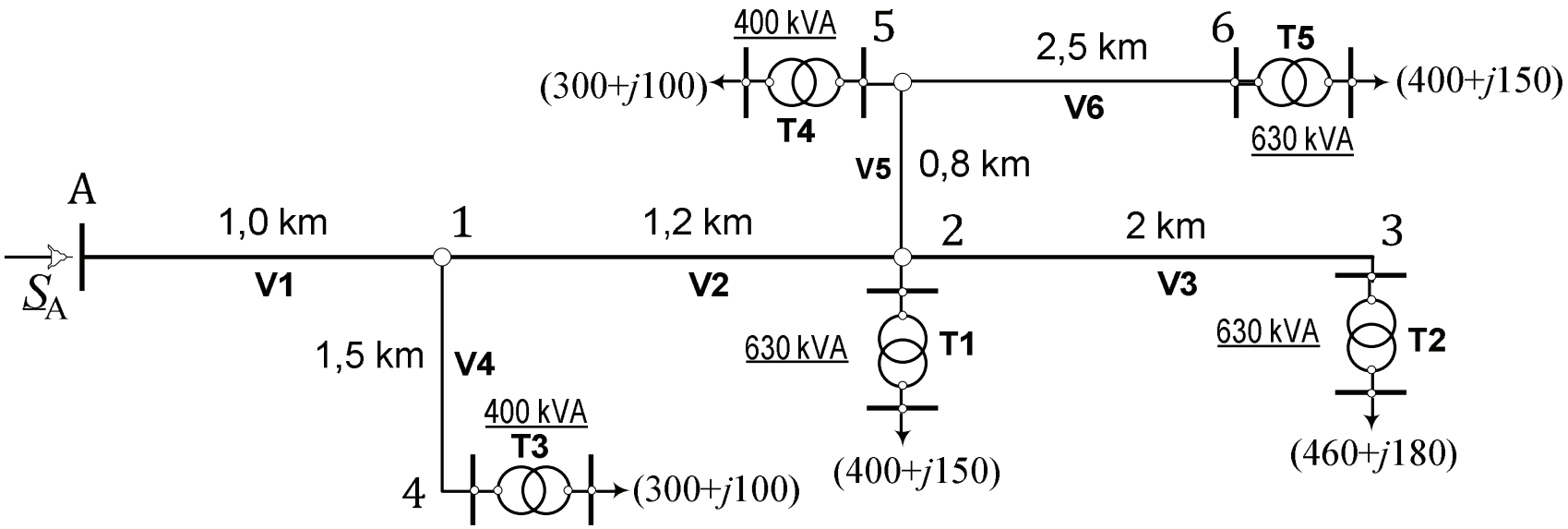
$$\underline{Z}_{ek} = \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{GR}}} k_i^2 \cdot \underline{Z}(i) = (203,6 + j90,1)\ \mathrm{m\Omega} = 222,6 \cdot e^{j23,9^\circ}\ \mathrm{m\Omega}.$$

$$\Delta P_\Sigma = 3 \cdot R_{ek} \cdot I_{\mathrm{A}}^2 = 3 \cdot 0,2036 \cdot 334^2 = 68138\ \mathrm{W} = 68,138\ \mathrm{kW}.$$

За споредба, за истиот тој режим во примерот 5.4 се пресметани загуби на активна моќност (точна вредност) во износ $\Delta P_\Sigma = 65,85\ \mathrm{kW}$.

Пример 6

Се посматра еден извод од 10 kV надземна мрежа од којшто се напојуваат пет ТС СН/НН. Магистралниот дел од изводот А-1-2-3 е изведен со спроводници Al/Č 70/12 mm^2, $\underline{z}_1 = (0,46 + j0,35)\ \Omega/\mathrm{km}$ додека отцепите 1-4, 2-5 и 5-6 со спроводници Al/Č 35/6 mm^2 $\underline{z}_2 = (0,64 + j0,38)\ \Omega/\mathrm{km}$. Напонот во напојната точка е $U_\mathrm{A} = 10,3\ \mathrm{kV}$.



	S_n (kVA)	$U_{1\mathrm{n}}/U_{2\mathrm{n}}$ (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

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

Пример 6

$$\underline{Z} = R + jX = \underline{z} \cdot l,$$

$$R_{\mathrm{T}} = \Delta P_{\mathrm{Cun}} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}}^2}; \quad Z_{\mathrm{T}} = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}}}; \quad X_{\mathrm{T}} = \sqrt{Z_{\mathrm{T}}^2 - R_{\mathrm{T}}^2};$$

$$\underline{Z}_{\mathrm{T}} = R_{\mathrm{T}} + jX_{\mathrm{T}}.$$

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 $\underline{S}_{\mathrm{A}}$

$$\Sigma \underline{S}_{\mathrm{P}} = (400 + j150) + (460 + j180) + (300 + j100) + (300 + j100) + (400 + j150),$$

$$\underline{S}_{\mathrm{A}} \approx \Sigma \underline{S}_{\mathrm{P}} = (1860 + j680)\ \mathrm{kVA}.$$

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

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

$$k_5^2 = |\underline{k}_5|^2 = 0,375^2 + 0,003^2 = 0,141.$$

Пример 6

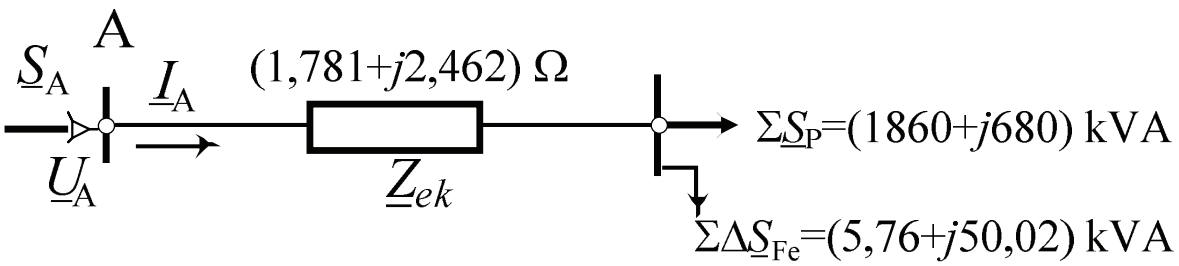
		$R(i)$ (Ω)	$X(i)$ (Ω)	$P_\Sigma(i)$ (kW)	$Q_\Sigma(i)$ (kvar)	Re$\{\underline{k}_i\}$	Im$\{\underline{k}_i\}$	k_i	k_i^2	$k_i^2 R(i)$ (Ω)	$k_i^2 X(i)$ (Ω)
1	V1	0,460	0,350	1860	680	1,000	0,000	1,000	1,000	0,460	0,350
2	V2	0,552	0,420	1560	580	0,840	0,005	0,840	0,706	0,390	0,297
3	V3	0,920	0,700	1160	430	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

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

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

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

Пример 6



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

$$\Delta\underline{S} = Z_{ek} \cdot \frac{|\underline{S}_{ek}|^2}{U_{\mathrm{n}}^2} = (1,781 + j2,462) \cdot \frac{1865,76^2 + 730,02^2}{10^2} =$$
$$= (71,5 + j98,8)\ \mathrm{kVA}.$$

$$\underline{S}_{\mathrm{A}} = \underline{S}_{ek} + \Delta\underline{S} = (1937,26 + j828,82) = 2107,1 \cdot e^{j23,2^\circ}\ \mathrm{kVA}.$$

$$I_{\mathrm{A}} = \frac{S_{\mathrm{A}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{A}}} = \frac{2107,1}{1,732 \cdot 10,3} = 118,1\ \mathrm{A}.$$