

PIERDERI ȘI CĂDERI DE TENSIUNE IN REȚELELE ELECTRICE

CURS 8

06.10.2007

PTDEE - Curs 8 - prof. R.
TIRNOVAN

8.1. Căderi de tensiune admisibile în rețelele electrice în regim normal de funcționare

Tensiunea nominală a unei rețele electrice este valoarea eficace a tensiunii între faze, prin care se definește rețeaua respectivă și la care se face referință pentru anumite caracteristici de funcționare a rețelei.

Tensiunea maximă de serviciu a unei rețele electrice este cea mai mare valoare efectivă a tensiunii între faze, care poate să apară într-un punct al rețelei, în condiții de exploatare normală, excluzând variațiile temporare (datorate unor defecte, sau unor declanșări susținute de sarcină).

Tensiunea minimă de serviciu este cea mai mică valoare efectivă a tensiunii între faze admisă de consumatorii de energie electrică.

Variația de tensiune într-un punct al rețelei în regim normal de exploatare este diferența algebrică dintre tensiunea de serviciu din acel punct și tensiunea nominală a rețelei respective.

Valori indicate în România			Valori indicate de C.E.I.		
U _n kV	U _{max} kV	$\frac{U_{\max} - U_n}{U_n} \cdot 100$ [%]	U _n kV	U _{max} kV	$\frac{U_{\max} - U_n}{U_n} \cdot 100$ [%]
0,23	-	-	-	-	-
0,4	-	-	0,4	-	-
0,50	-	-	0,415	-	-
0,66	-	-	0,660	-	-
3,00	3,60	20,00	1,00	3,60	20,00
6,00	7,20	20,00	3,00	7,20	20,00
10,00	12,00	20,00	6,00	12,00	20,00
20,00	24,00	20,00	10,00	24,00	20,00
(25,00)	30,00	20,00	20,00	-	-
(30,00)	36,00	20,00	-	40,50	20,00
(35,00)	42,00	20,00	35,00	-	-
-	-	-	-	52,00	15,56
(60,00)	72,50	20,83	45,00	72,50	9,85
110,00	123,0	11,82	65,00	123,00	11,82
-	0	-	110,00	145,00	9,85
-	-	-	132,00	170,00	13,33
220,00	-	11,36	150,00	245,00	11,36
-	245,0	-	220,9	300,00	9,09
-	-	-	(275)	362,00	9,09
-	-	-	(330,00)	420,00	10,53
400,00	-420	5,00	400,00	-	-

Tensiunea rețelei	Banda de variație %
Rețele cu tensiune nominală de maximum 60 kV	± 5
Rețele cu tensiune nominală de minimum 110 kV	± 7

Coeficientul de multiplicare	Factorul de putere $\cos\varphi$
1,20	0,84 – 0,80
1,40	0,79 – 0,70
1,60	0,69 – 0,60
2,00	0,59 – 0,50

1. Abaterile prevăzute sunt valabile numai dacă factorul de putere al consumatorilor este de cel puțin 0,85
2. În cazul în care factorul de putere este mai mic, limitele de abatere se multiplică prin amplificarea cu un coeficient funcție de factorul de putere.

Căderea de tensiune reprezintă diferența geometrică dintre fazorii tensiunilor din două puncte ale rețele, având aceeași tensiune nominală.

Pierderea de tensiune reprezintă diferența algebrică dintre valorile eficace ale tensiunilor din două puncte ale unei rețele, având aceeași tensiune nominală.

Pentru calcularea căderii, respectiv a pierderii de tensiune într-o rețea electrică, este necesară cunoașterea circulației de curenți/puteri prin elementele componente ale rețelei.

8.2. Calculul liniilor de distribuție radiale (alimentate de la un singur capăt)

8.2.1. Linie de curent continuu cu sarcini concentrate

Se consideră un sistem de distribuție format dintr-o linie de curent continuu ce alimentează trei receptoare instalate de-a lungul liniei (figura 8.1). Linia este alimentată cu o tensiune U , iar receptoarele absorb curenții i_1 , i_2 , i_3 , a căror valori le presupunem cunoscute. Ținând seama că pierderile de tensiune pe linie sunt provocate atât de conductorul de ducere cât și pe cel de întoarcere, se poate calcula pierderea totală de tensiune:

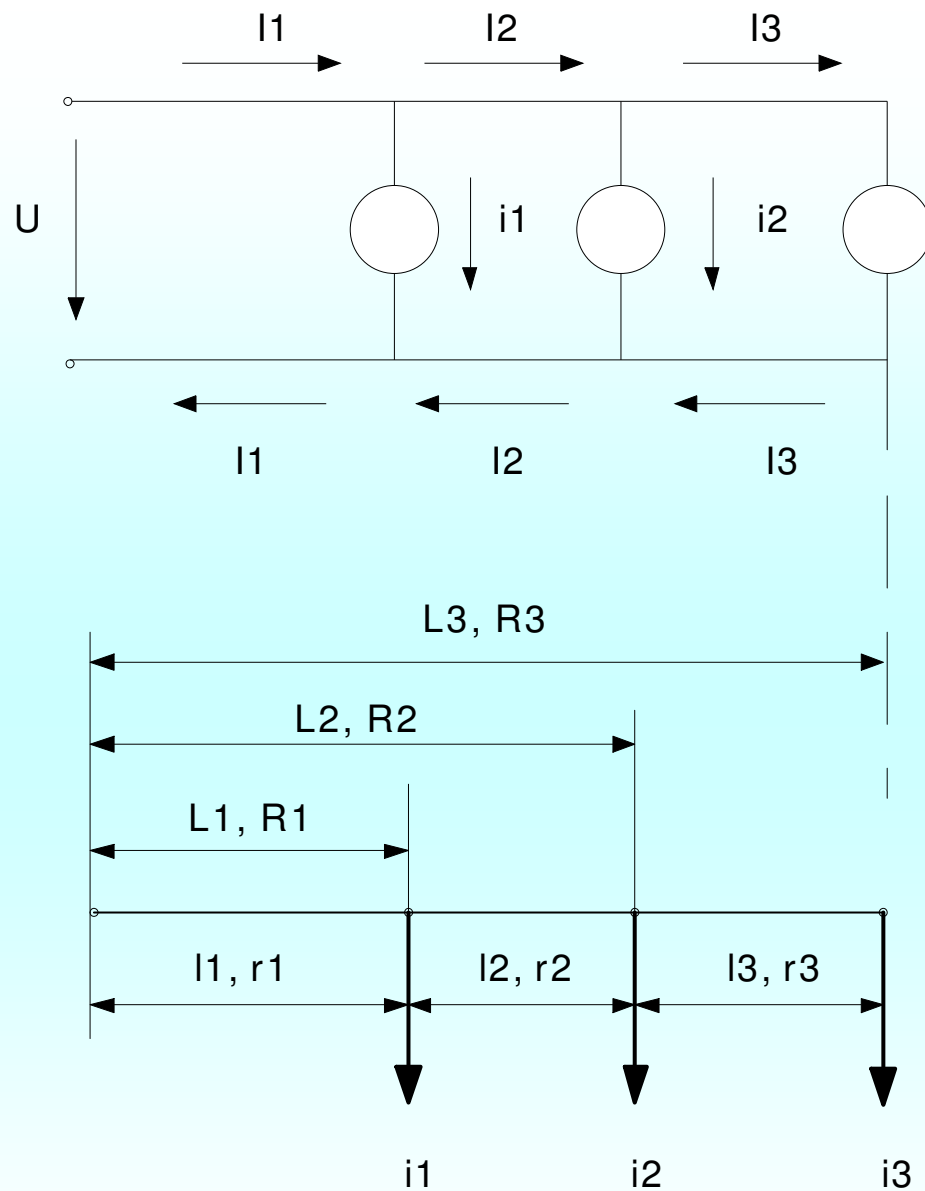


Fig.8.1

$$\Delta U = 2(R_1 i_1 + R_2 i_2 + R_3 i_3), (8.1)$$

$$\Delta U = 2 \frac{\rho}{s} (L_1 \cdot i_1 + L_2 \cdot i_2 + L_3 \cdot i_3) =$$

$$= 2 \frac{\rho}{s} \sum L \cdot i (8.2)$$

$$\Delta U = 2 \frac{\rho}{\chi \cdot s} \sum L \cdot i (8.3)$$

$$\begin{aligned} R_1 &= r_1; & I_1 &= i_1 + i_2 + i_3 \\ R_2 &= r_1 + r_2; & I_2 &= i_2 + i_3 \\ R_3 &= r_1 + r_2 + r_3; & I_3 &= i_3 \end{aligned} (8.4)$$

$$\Delta U = 2(r_1 I_1 + r_2 I_2 + r_3 I_3), (8.5)$$

$$\Delta U = \frac{2}{\chi \cdot s} \sum I \cdot \ell (8.6)$$

$$s = \frac{2}{\chi \cdot \Delta U} \cdot \sum L \cdot i, [\text{mm}^2] (8.7)$$

$$s = \frac{2}{\chi \cdot \Delta U} \cdot \sum \ell \cdot I, [\text{mm}^2] (8.8)$$

8.2.2. Linie trifazată cu sarcină concentrată la capăt (figura 8.2.)

Schema echivalentă a liniei are aspectul din figura 8.3, unde s-au luat în considerare numai parametrii longitudinali.

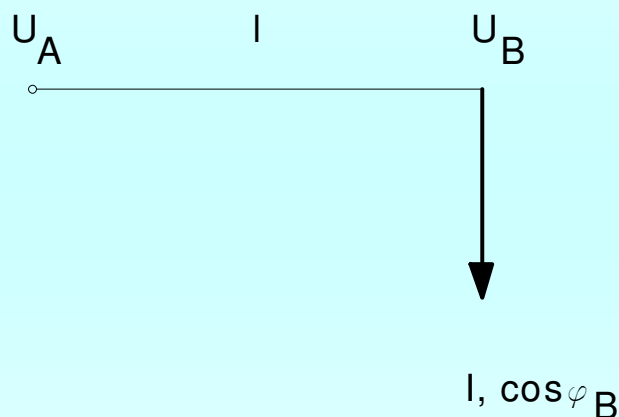


Fig.8.2 Linie trifazată cu sarcină concentrată la capăt.

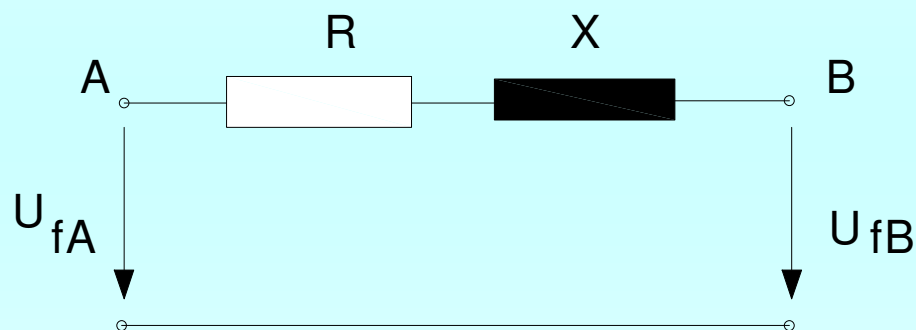


Fig.8.3 Schema echivalentă a unei linii trifazate cu sarcina concentrată la capăt.

Căderea de tensiune pe fază este dată de relația:

$$\underline{Z} \cdot \underline{I} = \Delta U_f + j\delta U_f = \underline{U}_{fA} - \underline{U}_{fB}, \quad (8.9)$$

în care: ΔU_f este componenta longitudinală, iar

δU_f – componenta transversală a căderii de tensiune.

Pierdere totală de tensiune pe fază a liniei $\underline{\Delta U}'_f$ se obține făcând diferența algebrică a fazorilor tensiunilor, adică:

$$\underline{\Delta U}'_f = \underline{U}_{fA} - \underline{U}_{fB} \quad (8.10)$$

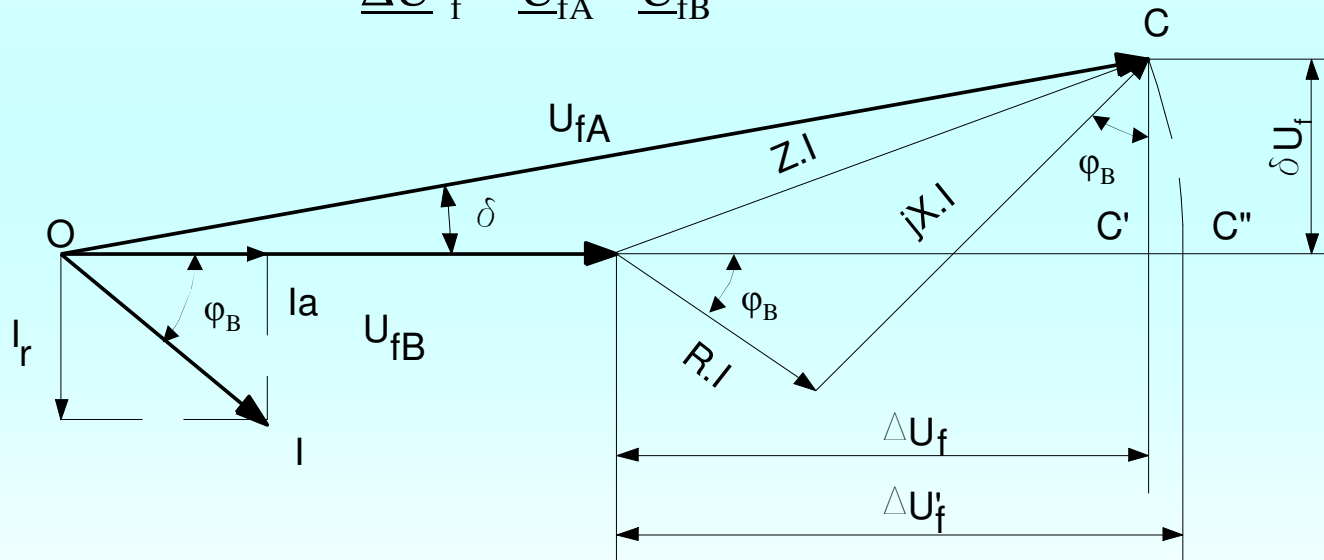


Fig.8.4. Diagrama fazorială a tensiunilor pe o fază a liniei.

$$U_{fA} = \sqrt{(O_a + aC')^2} = \sqrt{(U_{fA} + \Delta U_f)^2 + \delta U_f^2} \quad (9.11)$$

$$U_{fA} = \sqrt{(O_a + aC')^2} = \sqrt{(U_{fA} + \Delta U_f)^2 + \delta U_f^2} \quad (8.12)$$

$$\Delta U'_f = \sqrt{(U_{fB} + \Delta U_f)^2} - U_{fB} \cong \Delta U_f \quad (8.13)$$

$$\Delta U_f = ab' + b'c' = RI \cos \varphi_B + X \cdot I \sin \varphi_B \quad (8.14)$$

$$\delta U_f = CC' = X \cdot I \cos \varphi_B - R \cdot I \sin \varphi_B \quad (8.15)$$

$$\Delta U = \sqrt{3} \Delta U_f = \sqrt{3} (R \cdot I \cos \varphi_B + X \cdot I \sin \varphi_B) \quad (8.16)$$

$$\delta U = \sqrt{3} \delta U_f = \sqrt{3} (X \cdot I \cos \varphi_B - R \cdot I \sin \varphi_B) \quad (8.17)$$

$$I \cdot \cos \varphi_B = \frac{P}{\sqrt{3} U_B} \text{ și } I \cdot \sin \varphi_B = \frac{Q}{\sqrt{3} U_B} \quad (9.18) \quad \Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_B} \quad (8.20)$$

$$\delta U = \frac{P \cdot X - Q \cdot R}{U_B} \quad (8.21)$$

în care: P este sarcina activă, în W ;
 Q – sarcina reactivă, în VAR ;
 U_B – tensiunea de linie a receptorului, în V .

Observația 1:

În cazul când nu se cunoaște tensiunea U_B , calculul pierderii de tensiune se efectuează cu valoarea tensiunii nominale U_N .

Calculul secțiunii conductoarelor cu ajutorul relației se poate efectua în modul următor:

- ☐ se alege în prealabil o secțiune arbitrară;
- ☐ se calculează R și X pentru secțiunea aleasă;
- ☐ se calculează ΔU cu ajutorul relației (8.20) și se compară valoarea calculată cu pierderea de tensiune admisibilă;
- ☐ dacă valorile obținute pentru ΔU nu sunt corespunzătoare, se alege o altă secțiune cu care se refac calculele.

Observația 2:

Pentru a începe calculul cu o secțiune cât mai apropiată de cea reală, în

relația (8.19) se neglijează pentru început X și pe baza unui ΔU_{adm} se obține o valoare orientativă pentru secțiune. Pentru secțiunea rezultată se calculează X și ΔU , care se compară cu ΔU_{adm} .

8.2.3. Linie trifazată cu mai multe sarcini concentrate (figura 8.5).

Ca și în cazul precedent, se pornește de la construirea diagramei fazoriale a tensiunilor, începând de la tensiunea, curentul și factorul de putere al celui mai îndepărtat receptor, figura 8.6.

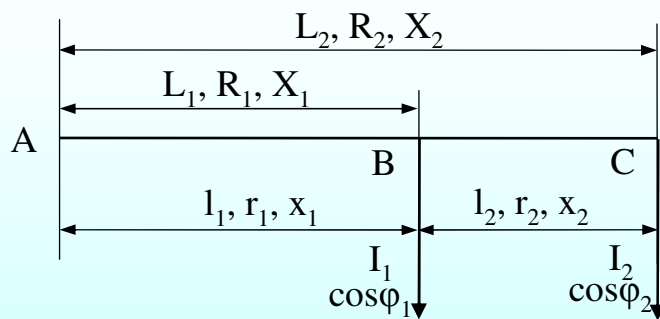


Fig.8.5. Linie trifazată cu mai multe sarcini concentrate

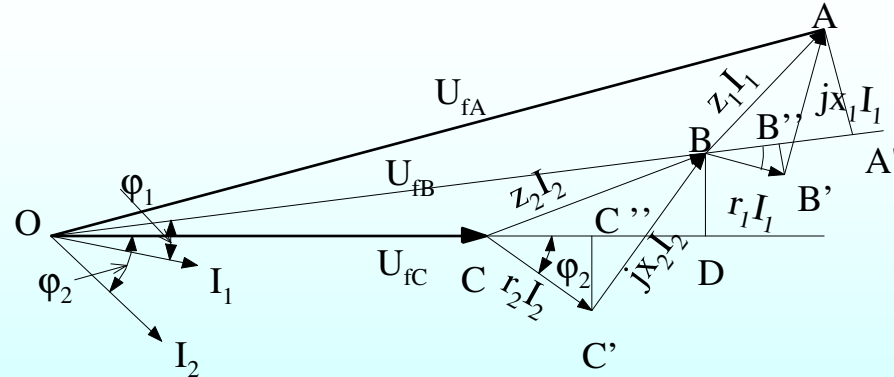


Fig.8.6. Diagrama fazorială pentru o linie trifazată cu mai multe sarcini concentrate.

Căderea de tensiune pe fază pe porțiunea de linie BC este:

$$z_2 \underline{I}_2 = r_2 \underline{I}_2 + j x_2 \underline{I}_2 \quad (8.22)$$

iar pe porțiunea AB:

$$z_1 \underline{I}_1 = r_1 \underline{I}_1 + j x_1 \underline{I}_1 \quad (8.23)$$

Căderea totală de tensiune pe fază este:

$$z_1 \underline{I}_1 + z_2 \underline{I}_2 \quad (8.24)$$

Pierdere totală de tensiune pe fază este dată de relația:

$$\begin{aligned} \Delta U_f &= CC'' + C''D + BB'' + B''A' = \\ R_2 I_2 \cos \varphi_b + X I_2 \sin \varphi_b + R_1 I_1 \cos \varphi_a + X_1 I_1 \sin \varphi_a &= \quad (8.25) \\ \sum (RI \cos \varphi + XI \sin \varphi) \end{aligned}$$

Pierdere de tensiune în linia trifazată este:

$$\Delta U = \sqrt{3} \Delta U_f = \sqrt{3} \sum (RI \cos \varphi + XI \sin \varphi) \quad (8.26)$$

cu

$$I \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} U_N}; \quad I \sin \varphi = \frac{Q}{\sqrt{3} U_N} \quad (8.27)$$

relația (8.26) devine:

$$\Delta U = \sum \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_N} \quad (8.28)$$

8.3. Calculul pierderilor de putere și energie în rețelele electrice

Nivelul pierderilor de energie în rețele oscilează între 10% și 15% din energia produsă în centrale, în funcție de structura rețelei, de condițiile de exploatare etc.(figura 8.7)

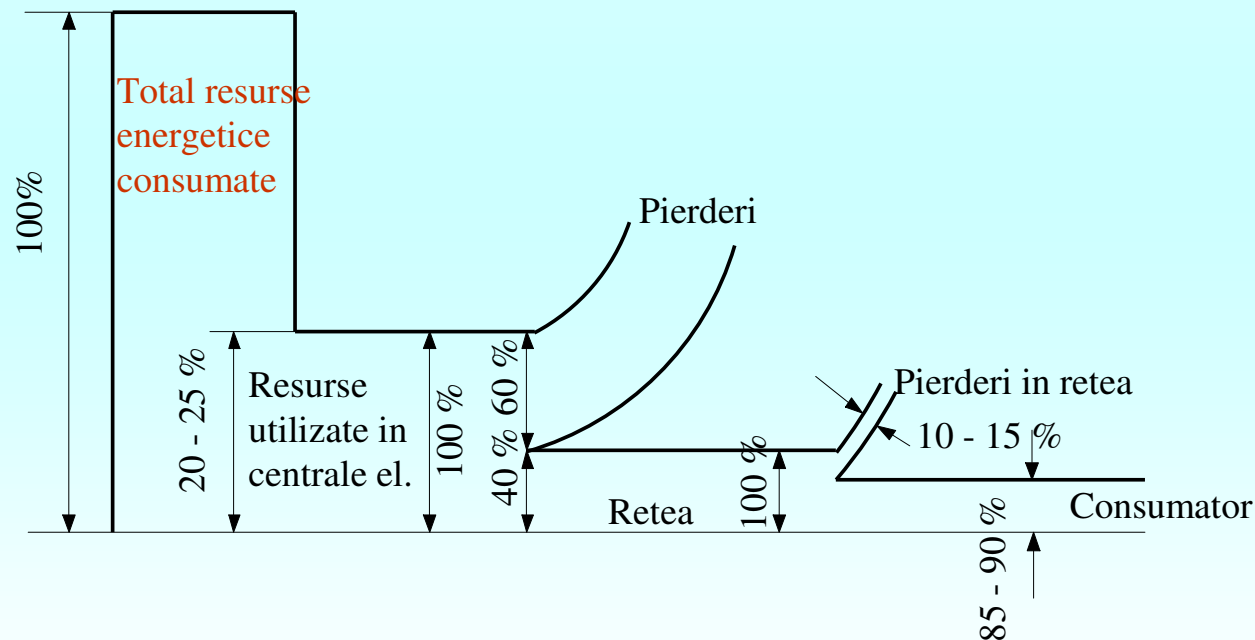


Fig.8.7. Balanța energetică a unui sistem electroenergetic dezvoltat

În rețele electrice cu tensiuni nominale până la 60 kV pierderile de energie sunt datorate aproape exclusiv încălzirii conductoarelor și transformatoarelor la trecerea curentului electric. La tensiuni nominale peste 110 kV, se mai adaugă și pierderile datorate scurgerilor de curent în izolație și efectului corona. Acestea din urmă însă au valori reduse care pot fi neglijate încă din faza de proiectare a rețelelor, prin alegerea corespunzătoare a diametrului conductoarelor și a nivelului de tensiune.

Se deosebesc următoarele categorii de pierderi:

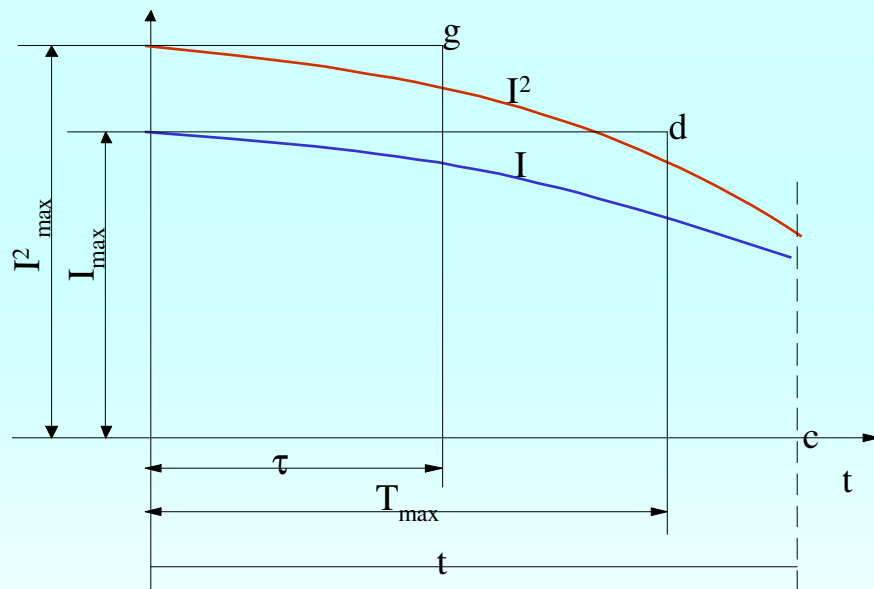
pierderi tehnice sau calculate, reprezentând pierderile în elementele rețelei evaluate prin calcul;

pierderi de evidență, determinate pe baza diferenței dintre indicațiile contoarelor privind energie injectată în rețea și energia livrată.

8.3.1. Determinarea duratei de utilizare a sarcinii maxime T_{max} și a duratei pierderilor maxime τ

La determinarea pierderilor de energie electrică trebuie să se țină seama de variația în timp a sarcinii consumatorilor.

Curba de sarcină clasată pentru un consumator oarecare este prezentată în figura 8.8. Cantitatea de energie electrică consumată în decursul intervalului t este proporțională cu suprafața cuprinsă între axele de coordonate și curba curențului. Dacă sarcina ar rămâne constantă și egală cu sarcina maximă I_{\max} atunci aceeași cantitate de energie ar putea fi consumată în intervalul de timp mai scurt T_{\max} :



$$\int_0^t I \cdot dt = I_{\max} \cdot T_{\max} \quad (8.29)$$

de unde rezultă:

$$T_{\max} = \frac{\int_0^t I \cdot dt}{I_{\max}} \quad (8.30)$$

Fig.8.8. Curba de sarcină clasată a unei linii electrice.

T_{max} este denumit timp sau durată de utilizarea puterii maxime și reprezintă o durată convențională, în care linia, dacă ar funcționa la sarcină maximă, ar transporta aceeași cantitate de energie ca și la funcționarea după graficul real de sarcină. Dacă se consideră intervalul de timp t corespunzător unui an atunci relația (8.29) devine:

$$T_{max} = \frac{\int_0^{8760} I \cdot dt}{I_{max}} = \frac{\int_0^{8760} P \cdot dt}{P_{max}} = \frac{W_{an}}{P_{max}} \quad (8.31)$$

Valorile lui T_{max} pentru instalații de iluminat și forță sunt indicate în tabele.

Pentru determinarea duratei pierderilor maxime τ , se trasează curba de variație a pătratului curentului cerut de consumator. Suprafața delimitată de această curbă și axele de coordonate, reprezintă la o scară oarecare cantitatea de energie pierdută în intervalul de timp t . Dacă transportul energiei s-ar fi făcut la o sarcină egală cu I_{max} , aceeași cantitate de energie s-ar fi putut pierde într-un interval de timp mai scurt τ , adică

$$\int_0^t I^2 \cdot dt = I_{\max}^2 \cdot \tau \quad (8.32)$$

de unde rezultă:

$$\tau = \frac{\int_0^t I^2 \cdot dt}{I_{\max}^2} \quad (8.33)$$

*Mărimea τ se numește timpul sau **durata pierderilor maxime** și reprezintă timpul convențional în care instalația funcționând la sarcină maximă constantă are aceleași pierderi de energie ca și în cazul în care ar funcționa după curba de sarcină reală.*

Între timpul de utilizare a puterii maxime T_{\max} și timpul pierderilor τ este stabilită o legătură prin intermediul curbelor de sarcină. În acest caz, se poate stabili, pentru fiecare curbă, dependența dintre T_{\max} , τ și $\cos\varphi$, prin intermediul curbelor de sarcină. În felul acesta se pot construi curbe care pot fi folosite pentru determinarea timpului de pierderi, atunci când se cunosc T_{\max} și $\cos\varphi$, figura 8.9.

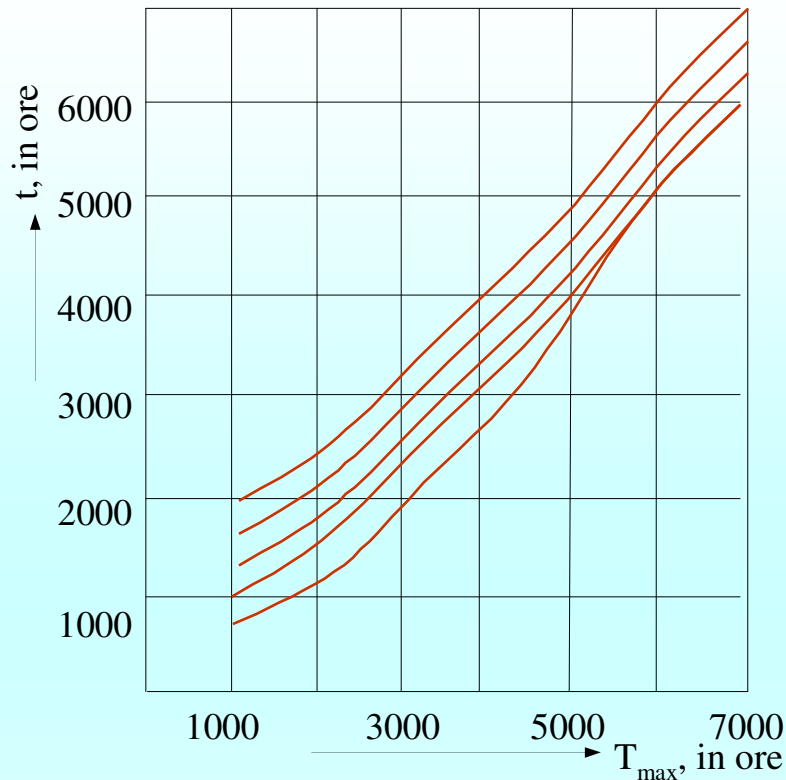


Fig. 8.9. Determinarea pierderilor de putere și de energie în liniile electrice.

Pierderile de putere în liniile electrice trifazate de curent alternativ, neglijând pierderile din izolație se determină cu relația:

$$\Delta P = 3RI^2 \cdot 10^{-3} = R \frac{S^2}{U^2} \cdot 10^{-3}$$

$$= R \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW}] \quad (8.34)$$

în care:

- I este curentul de calcul corespunzător puterii cerute, în A;
- R – rezistența unei faze la temperatura efectivă a liniei, în Ω ;

□ puterile P și Q sunt exprimate în kW, respectiv în kVar și U – în kV.

Dacă puterea absorbită de consumator este constantă, pierderile de energie au valoarea:

$$\Delta W = \Delta P \cdot t = 3RI^2 \cdot t \cdot 10^{-3} = R \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot t \cdot 10^{-3} \quad [\text{kWh}] \quad (8.35)$$

Când puterea absorbită este variabilă în timp, pierderea de energie într-un interval oarecare este:

$$\Delta W = 3 \cdot 10^{-3} R \int_0^t I^2 \cdot dt \quad [\text{kWh}] \quad (8.36)$$

Pentru a evita efectuarea integralei din (9.36) se folosește timpul pierderilor τ

$$\Delta W = 3 \cdot I_{\max}^2 \cdot R \cdot \tau \cdot 10^{-3} \quad [\text{kWh}] \quad (8.37)$$

unde τ se determină din variația $\tau=f(T_{\max})$, din figura 8.9.

Relația (8.37) devine:

$$\Delta W = \frac{S_{\max}^2}{U^2} \cdot R \cdot \tau \cdot 10^{-3} = \frac{P_{\max}^2 + Q_{\max}^2}{U^2} \cdot R \cdot \tau \cdot 10^{-3} \quad [\text{kWh}] \quad (8.38)$$

8.3.2. Determinarea pierderilor de putere și de energie în transformatoare

Pierderile de putere activă în transformatoare sunt de două categorii și anume:

- ❑ pierderi de putere independente de sarcina transformatorului: pierderile de energie în fierul transformatorului, care depind numai de puterea și timpul de funcționare ale acestuia

$$\Delta W_1 = \Delta P_{Fe} \cdot t \quad (8.39)$$

pierderi de putere care depind de sarcina transformatorului - pierderi în cupru care sunt proporționale cu pătratul curentului. Se calculează pentru o sarcină oarecare din pierderile în scurtcircuit pentru sarcina nominală a transformatorului (date de producător)

$$\Delta P_{cu} = (\Delta P_{Sc}) \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 = (\Delta P_{Sc}) \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 \quad (8.40)$$

Se notează cu $\alpha = S/S_n = I/I_n$ coeficientul de încărcare al transformatorului.
În acest caz relația (8.40) devine:

$$\Delta P_{cu} = (\Delta P_{Sc}) \cdot \alpha^2 \quad (8.41)$$

Pierderile totale de putere activă într-un transformator sunt:

$$\Delta P_T = \Delta P_{Fe} + \alpha^2 \Delta P_{Sc} \quad (8.42)$$

iar pierderile de energie în intervalul t :

$$\Delta W_T = \Delta P_{Fe} \cdot t + \alpha_{\max}^2 \Delta P_{Sc} \cdot \tau \quad (8.43)$$

unde α_{\max} corespunde încărcării maxime a transformatorului.

Când sarcina este distribuită pe mai multe transformatoare conectate în paralel, pierderile totale de putere sunt:

$$(\Delta P_T)_N = N \cdot \Delta P_{Fe} + \alpha^2 \frac{\Delta P_{Sc}}{N} \quad (8.44)$$

unde coeficientul de încărcare corespunde curentului total

$$\alpha = S_{\text{tot}}/S_n = I_{\text{tot}}/I_n.$$