

8. CALCULUL ELECTRIC PENTRU ALEGEREA SECȚIUNII CONDUCTOARELOR

8.1. METODA ÎNCĂLZIRII CONDUCTOARELOR ÎN REGIM PERMANENT NORMAL DE FUNCȚIONARE

Regimul permanent se tratează considerând că elementele conductoare sunt corpuri omogene și că disiparea căldurii către exterior se face în mod uniform, ipoteze cu care se pot asimila situațiile curente reale.

Se cunoaște că orice conductor parcurs de curentul electric se comportă ca o rezistență transformând o parte din energia electrică în căldură prin efect Joule.

Bilanțul energetic pentru o porțiune de conductor, într-un timp dat se poate scrie sub forma ecuației următoare:

$$RI^2 dt = dQ_1 + dQ_2 \quad (8.1)$$

unde: RI^2 - pierderea de putere în W, disipată în conductor prin efect termic (în regim monofazat, în care s-a notat cu R rezistența în $[\Omega]$ și cu I valoarea efectivă a curentului, în [A]);

dQ_1 - căldura acumulată în conductor;

dQ_2 - căldura disipată prin suprafața exterioară a conductorului prin convecție;

$$dQ_1 = M \cdot c \cdot d\theta \quad (8.2)$$

în care: M - masa conductorului, în [kg];

c - căldura specifică a conductorului [$J/kg^\circ C$];

$$dQ_2 = K \cdot A \cdot \theta \cdot dt \quad (8.3)$$

în care: K - coeficientul de transmisie a căldurii prin suprafața exterioară [$W/m^2^\circ C$];

A - aria laterală a conductorului, în [m^2];

θ - supratemperatura, în [$^\circ C$] (diferența dintre temperatura oarecare a conductorului și temperatura mediului);

Cu aceste explicitări ecuația devine:

$$RI^2 dt = M \cdot c \cdot d\theta + K \cdot A \cdot \theta \cdot dt / : KA \quad (8.4)$$

Dacă se împarte ecuația cu produse KA și se notează:

$$\frac{RI^2}{KA} = \theta_s \quad (8.5)$$

θ_s - supratemperatura de regim staționar;

$$\frac{MC}{KA} = T \quad (8.6)$$

T - constanta de timp a încălzirii circuitului în [s], ecuația devine:

$$\theta_s \cdot dt = T \cdot d\theta + \theta \cdot dt \quad (8.7)$$

care este o ecuație diferențială liniară.

Ecuția se poate scrie sub forma:

$$T \frac{d\theta}{dt} + \theta = \theta_s \quad (\text{ecuație diferențială liniară}) \quad (8.8)$$

Soluția ecuației este:

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 \quad (8.9)$$

$\theta_1 = \theta_s$, reprezintă o soluție particulară și este temperatura stabilizată care corespunde regimului termic de lungă durată, când întreaga căldură produsă prin efect Joule se disipă în mediul exterior și deci temperatura nu mai crește:

$$\theta_1 = \theta_s = \frac{RI^2}{KA} \quad (8.10)$$

Dacă $I=0$, rezultă $\theta_s=0$ - regimul staționar al conductorului și anume înainte de a fi parcurs de curent.

Ecuția devine:

$$T \frac{d\theta}{dt} + \theta = 0, \quad (8.11)$$

care este o ecuație diferențială liniară omogenă.

$$\frac{d\theta}{\theta} + \frac{dt}{T} = 0 \quad (8.12)$$

$$\frac{d\theta}{\theta} = -\frac{dt}{T} \quad (8.13)$$

rezultă prin integrare: $\ln_e \theta = -\frac{t}{T}$ (8.14)

$$\theta = e^{-\frac{t}{T}} + C \quad (8.15)$$

rezultă: $\theta_2 = Ce^{-\frac{t}{T}}$ (constanta poate fi adițională sau multiplicativă)

Soluția generală este: $\theta = \theta_1 + \theta_2$ (8.16)

adică: $\theta = \theta_s + Ce^{-\frac{t}{T}}$ (8.17)

Punem condițiile inițiale pentru a determina constanta:

$t=0$; $\theta = \theta_i$ (θ_i =temperatura inițială); (8.18)

Rezultă: $\theta_i = \theta_s + C$

Rezultă: $C = \theta_i - \theta_s$ (8.19)

Deci:

$$\theta_2 = (\theta_i - \theta_s)e^{-\frac{t}{T}} \quad (8.20)$$

Soluția generală va fi:

$$\theta = \theta_s + (\theta_i - \theta_s)e^{-\frac{t}{T}} \quad (8.21)$$

$$\text{sau } \theta = \theta_i e^{-\frac{t}{T}} + \theta_s(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (8.22)$$

Această soluție este reprezentată grafic în figura de mai jos:

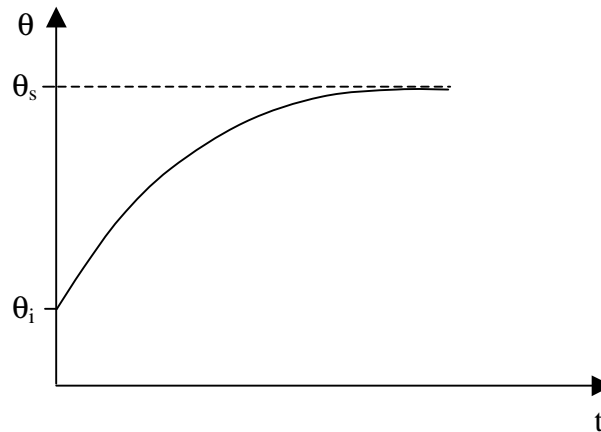


Fig.8.1. Reprezentarea grafică a soluției

De remarcat, este faptul, că în regim permanent conductorul se încălzește ajungând la supratemperatura de regim staționar (θ_s), teoretic după un timp infinit, practic după un timp $t=4...5T$, care depinde de caracteristicile materialului, caracteristicile geometrice și de transmiterea căldurii.

Determinarea încărcării maxime admisibile capabile (I_{ma}) a secțiunii conductorului se face astfel în funcție de temperatura maximă admisă de conductor, determinată de natura conductorului și izolația sa. Temperatura admisă a conductoarelor este în general cuprinsă între 50°C și 100°C .

Dacă se notează temperatura maximă admisă a conductorului cu θ_{cad} și temperatura de referință a mediului ($20^\circ\text{C} \div 25^\circ\text{C}$) cu θ_m , rezultă:

$$I_{ma} = \frac{\sqrt{KA(\theta_{ad} - \theta_m)}}{R} \quad (8.23)$$

Pe baza acestei relații în tabele din literatură sunt date intensitățile maxime admise pentru conductoare, cabluri și bare pentru:

- temperatura mediului ambiant: $20 \div 30^\circ\text{C}$;
- temperaturile admisibile: $60 \div 80^\circ\text{C}$.

Încărcarea maxim admisă scade cu creșterea numărului de conductoare în:

- cablu;
- tub;
- canal.

Acest lucru apare datorită condițiilor de transmitere a căldurii.

Pentru conductoarele montate în tuburi, liber sau canal, precum și pentru bare se realizează corecția încărcării maxime admisibile:

- dacă $\theta_m \neq 25^\circ$ (25° - temperatura pentru care e dat tabelul);
- I_{ma} = încărcarea maxim admisă pentru temperatura $\theta_m = 25^\circ\text{C}$;
- $I_{ma\theta}$ = încărcarea maxim admisă pentru temperatura $\theta_m \neq 25^\circ\text{C}$;

$$I_{ma\theta} = K_\theta I_{ma} \quad (8.24)$$

K_θ -coeficient de corecție indicat în tabel.

Corectarea este obligatorie deoarece o creștere de 15°C , posibilă în încăperi cu degajări de căldură, în special vara, provoacă o scădere a capacității de încărcare cu 20%.

Neglijarea corectării provoacă:

- îmbătrânirea rapidă a izolației;
- scoaterea din uz a instalațiilor.

Necesitatea modificării încărcării admise apare sub formă mai complexă la cablurile montate în pământ, în săpătură, sau în aer, unde în afara corecției de temperatură intervin și caracteristicile diferite de transmisie a căldurii.

Pozarea în săpătură: [19]

$$I'_{ma} = K_{p1} \cdot K_{p2} \cdot K_{p3} \cdot I_{ma} \quad (8.25)$$

unde: I'_{ma} = încărcarea maxim admisă corectată;

K_{p1} = coeficientul de corecție ales în funcție de rezistența termică specifică a terenului;

K_{p2} = coeficientul de corecție pentru numărul de cabluri pozate alăturat în același șanț;

K_{p3} = coeficientul de corecție funcție de temperatura solului.

Pozare în aer (pe console sau ferme metalice, pe brățări sau alte sisteme de prindere). [19]

$$I''_{ma} = K_{a1} \cdot K_{a2} \cdot I_{ma} \quad (8.26)$$

K_{a1} = coeficientul de corecție funcție de modul de pozare;

K_{a2} = coeficientul de corecție funcție de temperatura mediului ambiant.

Toți coeficienții se găsesc dați în tabele.

8.2. CALCULUL CĂDERILOR DE TENSIUNE ÎN LINIILE ELECTRICE

Este știut faptul că tensiunea este în strânsă interdependență cu energie distribuită. Reducerea tensiunii la bornele receptoarelor are următoarele consecințe negative:

- scăderea randamentului de funcționare a receptoarelor;

- supradimensionarea liniilor de transport și distribuție.
- Căderile de tensiune pe liniile electrice sunt normate astfel:
- a) pentru instalațiile de forță (mașini de conversie a energiei electrice în energie mecanică).
 - în regim normal de funcționare, de lungă durată: $\Delta U[\%]=5\%$;
 - în regim de pornire: $\Delta U[\%]=8\%$;
 - în regim de scurtcircuit: $\Delta U[\%]=12\%$.
 - b) Pentru receptoarele de iluminat și încălzit $\Delta U[\%]=3\%$
 - c) Pentru liniile electrice de interconectare a stațiilor (de sistem) se admite o cădere de tensiune: $\Delta U[\%] \leq \Delta U\%$ - reglare trafo

Fie o porțiune de linie a cărei schemă echivalentă este următoarea:

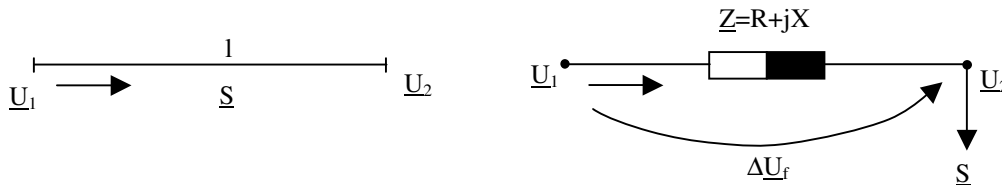


Fig.8.2. Schema echivalentă a liniei electrice considerate

Rezistența de izolație și capacitatea liniei sunt parametri transversali și se neglijează. Se vor lua în considerare numai parametrii longitudinali.

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \Delta \underline{U}_f \quad (8.27)$$

$$\underline{S} = P \pm jQ \quad (8.28)$$

Căderea de tensiune pe fază va fi:

$$\Delta \underline{U}_f = \underline{Z} \cdot \underline{I}_f \quad (8.29)$$

Între curentul de fază și sarcină pe linie pentru un consumator trifazat există relația:

$$\underline{S} = \sqrt{3} \underline{U}_2 \underline{I}_f^* = P + jQ \quad (8.30)$$

$$\underline{S} = \sqrt{3} \underline{U}_2^* \underline{I}_f = P - jQ \quad (8.31)$$

rezultă:
$$\underline{I}_f = \frac{\underline{S}}{\sqrt{3} \underline{U}_2} = \frac{P - jQ}{\sqrt{3} \underline{U}_2} \quad (8.32)$$

$$\Delta \underline{U}_f = \underline{Z} \cdot \underline{I}_f = (R + jX) \frac{P - jQ}{\sqrt{3} \underline{U}_2} = \underbrace{\frac{PR + QX}{\sqrt{3} \underline{U}_2}}_I + j \underbrace{\frac{PX - QR}{\sqrt{3} \underline{U}_2}}_{II} \quad (8.33)$$

I - este în fază cu \underline{U}_2 și este o cădere de tensiune longitudinală;

II - este perpendicular pe \underline{U}_2 și este o cădere de tensiune transversală.

$$\Delta \underline{U}_f = \Delta \underline{U}_{lf} + j\Delta \underline{U}_{trf} \quad (8.34)$$

Practic aportul căderii de tensiune transversală asupra valorii eficace a căderii de tensiune de pe fază este sub 3% din căderea de tensiune de pe faza respectivă.

$$\text{Practic: } \Delta \underline{U}_f = \Delta \underline{U}_{lf} \quad (8.35)$$

$$\text{deci: } \Delta \underline{U}_f = \frac{PR + QX}{\sqrt{3}U_2} \quad (8.36)$$

De obicei căderea de tensiune nu se dă pe faze ci pe linie.

$$\Delta U = \sqrt{3}\Delta \underline{U}_f = \frac{PR + QX}{U_2} \quad (8.37)$$

Căderea de tensiune procentuală va fi:

$$\Delta U[\%] = \frac{\Delta U}{U_2} \cdot 100 \quad (8.38)$$

$$\Delta U[\%] = \frac{PR + QX}{U_2^2} \cdot 100 \quad (8.39)$$

Reprezentarea grafică a căderilor de tensiune:

Se consideră ca punct de plecare tensiunea \underline{U}_2 poziționată pe orizontală.

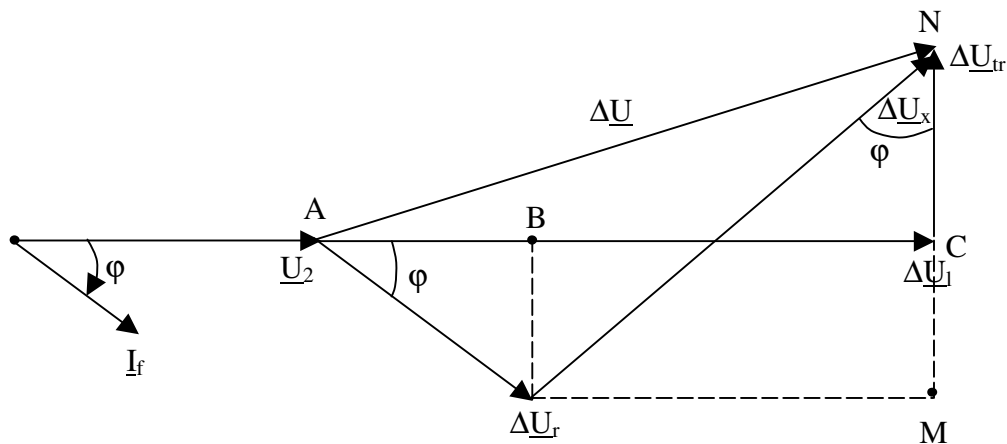


Fig.8.3. Reprezentarea grafică a căderilor de tensiune

$\Delta \underline{U}$ are două componente:

- componenta longitudinală $\Delta \underline{U}_1$;
- componenta transversală $\Delta \underline{U}_{tr}$.

$$\Delta \underline{U}_1 = \overline{AB} + \overline{BC} = |\Delta \underline{U}_r| \cos \varphi + |\Delta \underline{U}_x| \sin \varphi \quad (8.40)$$

$$\Delta \underline{U}_{tr} = \overline{CN} = \overline{MN} - \overline{CM} = |\Delta \underline{U}_x| \cos \varphi - |\Delta \underline{U}_r| \sin \varphi \quad (8.41)$$

$$\Delta U_1 = \Delta U_R \cos \varphi + \Delta U_x \sin \varphi \quad (8.42)$$

$$\Delta U_1 = RI_f \cos \varphi + xI_f \sin \varphi = \frac{PR + QX}{\sqrt{3}U_2} \quad (8.43)$$

$$\Delta U_{tr} = \Delta U_x \cos \varphi - \Delta U_R \sin \varphi = XI_f \cos \varphi - RI_f \sin \varphi = \frac{PX - QR}{\sqrt{3}U_2} \quad (8.44)$$

8.2.1. Legătura dintre căderile de tensiune pe linie și parametrii constructivi ai liniei

Căderea de tensiune pe linie este:

$$\Delta U\% = \frac{PR + QX}{U^2} 100 = \frac{P\rho \frac{l}{S} + QX_0 l}{U^2} 100 \quad (8.45)$$

ρ - rezistivitatea materialului [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]

$$\rho_{Al} = \frac{1}{34} \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$\rho_{Cu} = \frac{1}{57} \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$$

X_0 = reactanța specifică a liniei [Ω/km]

Pentru calculele curenți se poate adopta:

$X_0 = 0,4 \Omega/\text{km}$ - pentru LEA

$X_0 = 0,07 \div 0,1 \Omega/\text{km}$ - pentru LEC

Pentru cabluri cu izolație din PVC și cauciuc se poate adopta $X_0 = 0,07 \Omega/\text{km}$.

Pentru cabluri cu izolație din hârtie impregnată în ulei: $X_0 = 0,1 \Omega/\text{km}$.

Pentru orice cablu sau linie $\Delta U\%$ poate fi calculată cu relația:

$$\Delta U\% = \frac{P\rho \frac{l}{S} + QX_0 l}{U^2} = \frac{l \left(P \frac{\rho}{S} + QX_0 \right)}{U^2} \cdot 100 \quad (8.46)$$

Se observă că în relația căderii de tensiune ponderea cea mai mare o are l (lungimea liniei), deci modificând acest parametru în sensul scăderii lui, adică modificând traseul liniei, apropiind tablourile, receptoarele de sursă se poate micșora căderea de tensiune.

Procedee de micșorare a căderii de tensiune:

- micșorarea parametrului l - apropierea receptoarelor de sursă;

- micșorarea rezistivității prin alegerea conductoarelor din Cu (dar Cu este material mai scump și deficitar);
- creșterea secțiunii conductoarelor dar atunci crește cantitatea de material conductor;
- micșorarea puterii reactive prin producerea ei la consumator.

8.3. CALCULUL PIERDERILOR DE PUTERE

Pornind de la aceeași schemă echivalentă și admitând că lui $\underline{Z} = R + jX$ i se aplică o cădere de tensiune $\Delta \underline{U}$ să calculăm căderea de putere pe linie $\Delta \underline{S}$.

$$\Delta \underline{S} = \sqrt{3} \Delta \underline{U} \underline{I} \quad (8.47)$$

$$\Delta \underline{U} = \frac{PR + QX}{U_2} + j \frac{PX - QR}{U_2} \quad (8.48)$$

$$\underline{I} = \frac{S}{\sqrt{3} U_2} \quad (8.49)$$

$$\underline{I} = \frac{P + jQ}{\sqrt{3} U_2} \quad (8.50)$$

$$\begin{aligned} \Delta \underline{S} &= \sqrt{3} \frac{[(PR + QX) + j(PX - QR)](P + jQ)}{U_2 \sqrt{3} U_2} = \\ &= \frac{P^2 R + PQX + jP^2 X - jPQR + jPQR + jQ^2 X - PQX + Q^2 R}{U_2^2} \end{aligned} \quad (8.51)$$

$$\Delta \underline{S} = \frac{P^2 R + Q^2 R}{U_2^2} + j \frac{P^2 X + Q^2 X}{U_2^2} \quad (8.52)$$

$$\text{sau } R_e(\Delta \underline{S}) = \frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} R = I^2 R \quad (8.53)$$

$$\text{sau pentru cele trei faze: } R_e(\Delta \underline{S}) = 3RI^2 \quad (8.54)$$

$$\text{Im}(\Delta \underline{S}) = \frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} X = I^2 X \quad (8.55)$$

$$\text{sau } \text{Im} \Delta \underline{S} = 3XI^2 \quad (8.56)$$

În cazul în care se lucrează cu conjugata curentului:

$$\underline{I}^* = \frac{P - jQ}{\sqrt{3} U_2}$$

se obține

$$\Delta \underline{S} = \sqrt{3} \frac{[(PR + QX) + j(PX - QR)](P - jQ)}{\sqrt{3} \underline{U}_2^2} =$$

$$= \frac{P^2 R + PQX + jP^2 X - jPQR - jPQR - jQ^2 X + PQX - Q^2 R}{\underline{U}_2^2} \quad (8.57)$$

$$\Delta \underline{S} = \frac{P^2 R - Q^2 R + 2PQX}{\underline{U}_2^2} + j \frac{P^2 X - Q^2 X - 2PQR}{\underline{U}_2^2} \quad (8.58)$$

$$R_e(\Delta \underline{S}) = \frac{R(P^2 - Q^2) + 2PQX}{\underline{U}_2^2} \quad (8.59)$$

$$\text{Im}(\Delta \underline{S}) = \frac{(P^2 - Q^2)X - 2PQR}{\underline{U}_2^2} \quad (8.60)$$

Pierderile de putere pe linie sunt pierderi prin efect Joule. Componenta imaginară nu conduce la pierderi efective de energie prin linie. Pierderea de putere pe reactanța liniei nu determină pierderi de căldură ci generează un schimb de energie între reactanța liniei și sursele de energie la care este racordată linia.

Aceste pierderi de putere, pe reactanța liniei sunt transversale și vor determina o înrăutățire a calității energiei, adică o scădere a tensiunii și o mărire a circulației puterilor care vor conduce la solicitări nepermise la scurtcircuit.

În regim normal de funcționare interesează componenta longitudinală activă a căderii de tensiune pentru că aceasta se pierde sub formă de energie termică.

Calculul pierderilor de putere folosind conjugata are numai caracter demonstrativ și indică faptul că în mod efectiv pe o linie se produc pierderi atât datorită circulației de putere activă cât și datorită circulației puterii reactive prin rezistența și reactanța liniei.

Această relație exprimă faptul că se pot obține reduceri ale pierderilor de putere activă prin linie, în condițiile în care reactanța liniei este neglijabil de mică în raport cu rezistența.

Pierderile transversale de putere prin linie afectează în mică măsură pierderile totale de putere prin linie și de aceea în calculele practice de pierdere de putere se poate folosi cu rezultate bune componenta reală determinată considerând că prin linie circulă curentul real de sarcină complexă.

Pierderile de energie se calculează astfel:

$$\Delta E = \text{Re}(\Delta \underline{S})t \quad (8.61)$$

$$\Delta E = 3RI^2 t \quad (8.62)$$

8.4. DIMENSIUNEA REȚELELOR ELECTRICE INTERIOARE PENTRU RECEPTOARE DE FORȚĂ

Rețelele electrice prezintă în calculul secțiunii conductoarelor particularități determinate de specificul lor:

- lungimea relativ redusă a rețelelor;
- natura receptoarelor alimentate.

Instalațiile de forță sunt destinate în principal pentru alimentarea cu energie electrică a motoarelor electrice de acționare a utilajelor tehnologice.

Calculul secțiunii conductoarelor pentru receptoarele de forță comportă următoarele etape:

- a) Dimensionarea la încălzire în regim permanent (de durată).
- b) Verificarea secțiunii la regimul de pornire (de scurtă durată).
- c) Verificarea secțiunii la căderea de tensiune în condiții normale de funcționare și la pornire.

8.4.1. Dimensionarea la încălzire a secțiunii conductoarelor

Dimensionarea la încălzire a secțiunii conductoarelor în regim permanent se face în funcție de încărcarea maxim admisă I_{ma} , a conductoarelor punând condiția:

$$I_c < I_{ma} \quad (8.63)$$

I_c - este curentul de calcul care se determină astfel:

- *pentru circuite trifazate:*

$$I_c = \frac{k_i \cdot P_n}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi_n \cdot \eta_n} \quad (8.64)$$

unde: P_n - este puterea nominală a receptorului în [W];

U_n - tensiunea nominală de linie în [V];

K_i - coeficientul de încărcare;

$\cos \varphi_n$ - factorul de putere nominal indicat de utilizator;

η_n - randamentul nominal indicat de utilizator.

- *pentru circuite monofazate ce alimentează unele receptoare de mică putere*

$$I_c = \frac{k_i \cdot P_n}{U_f \cos \varphi_n} \quad (8.65)$$

unde: U_f = tensiunea de fază [V].

- pentru coloane trifazate

$$I_c = \frac{P_c}{\sqrt{3}U_n \cos\varphi_m} \quad (8.66)$$

unde: P_c - puterea cerută în [W];

$\cos\varphi_m$ - factorul de putere mediu.

Pentru tablourile de distribuție secundare ce alimentează un număr mic de receptoare, încărcate la valoare nominală și al cărui regim de funcționare se cunoaște în raport cu celelalte receptoare (simultaneitatea), curentul de calcul pe coloană se poate obține prin însumarea curenților receptoarelor ce funcționează simultan:

$$I_c = \sum_{i=1}^m I_{ci} \quad (8.67)$$

în care: I_{ci} - curentul unui receptor;

m - numărul de receptoare ce pot funcționa simultan.

8.4.2. Verificarea secțiunii obținute la regimul de pornire (de scurtă durată)

Această verificare se face prin compararea densității de curent efective $J_{p\text{ef}}$ (la pornire) cu densitatea de curent la pornire admisă, adică:

$$J_{p\text{ef}} \leq J_{p\text{ad}} \quad (8.68)$$

Densitatea de curent la pornire se determină cu relația:

$$J_{p\text{ef}} = \frac{I_p}{S} \quad (8.69)$$

în care: I_p - este curentul de pornire [A];

S - secțiunea conductorului [mm²].

Curentul de pornire I_p depinde de modul de pornire și se adoptă astfel:

- la motoare asincrone cu rotorul în scurtcircuit cu pornire directă:

$$I_p = 6 \div 8 I_N$$

- la motoarele asincrone cu rotorul în scurtcircuit și cu pornire prin comutatoare stea-triunghi:

$$I_p \cong 2,7 I_n$$

- la motoare asincrone cu rotorul bobinat:

$$I_p = 1,6 I_n$$

Curenții de pornire de valori ridicate pe circuite pot influența și coloanele de alimentare a tablourilor secundare care alimentează un număr mic de motoare provocând în unele cazuri depășirea densității de curent admise.

Acest curent se determină cu relația:

$$I_{c \max} = I_{P \max} + \sum_{i=1}^{m-1} I_{c_i} \quad (8.70)$$

în care s-a notat:

$I_{c \max}$ - curentul maxim pe coloană;

$I_{P \max}$ - curentul de pornire al motorului ce produce cel mai mare curent de pornire din cele m motoare care pot funcționa simultan și care pornește când celelalte $m-1$ motoare funcționează în sarcină.

8.4.3. Verificarea secțiunii la căderea de tensiune

Această verificare se face atât în condiții normale de funcționare cât și în condițiile regimului de pornire.

De asemenea această verificare se face pe traseul cel mai lung și mai încărcat începând de la tabloul general și în aval până la receptorul cel mai îndepărtat.

Dacă rezultatele obținute sunt edificatoare calculul se limitează la 1-3 trasee mai dezavantajoase ușor de citit în planurile instalației electrice.

Dacă nu, se continuă calculele pe câte trasee este necesar, pentru a asigura alimentarea receptoarelor la tensiunea nominală.

Verificarea se face cu ajutorul inegalității:

$$\Delta U_{ef} [\%] < \Delta U_{ad} [\%] \quad (8.71)$$

unde:
$$\Delta U_{ef} = \frac{PR + QX}{U_N^2} \cdot 100$$

$\Delta U_{ad} [\%]$ - căderea de tensiune admisă în procente specificată în subcapitolul 8.2.

Calculul căderilor de tensiune la pornire se face pe traseul motorului care dă cel mai mare curent de pornire.

Căderea de tensiune la pornire se determină cu relația:

$$\Delta U_p = \sqrt{3} (R I_p \cos \varphi + X I_p \sin \varphi) \quad (8.72)$$

Acoperitor se poate lua în calcul factorul de putere nominal al motorului.

Verificarea constă în verificarea inegalității:

$$\Delta U_{pef} [\%] \leq \Delta U_{pad} [\%] \quad (8.73)$$

Valoarea admisă trebuie indicată de regulă de producător în funcție de caracteristicile motorului.

Orientativ, la pornire se adoptă:

$$\Delta U_{pad} [\%] = 8\%.$$

8.5. DIMENSIONAREA REȚELELOR EXTERIOARE

Caracteristica acestor rețele electrice este lungimea lor mai mare decât a rețelelor interioare. La dimensionarea rețelelor exterioare se utilizează aceleași principii și metode de calcul ca și la rețelele interioare.

Alegerea secțiunii conductoarelor se face pe baza căderilor de tensiune plecând de la condiția ca pierderea de tensiune reală să fie mai mică cel mult egală cu pierderea de tensiune admisibilă, adică:

$$\Delta U_{ef} < \Delta U_{ad} \quad (8.74)$$

$$\Delta U_{ef} = \Delta U_{activ} + \Delta U_{reactiv} = \Delta U_{ad} \text{ [V]}$$

$$\Delta U_{ef} = \frac{P \cdot \rho \cdot l}{U_n \cdot s} + \frac{Q \cdot X_0 \cdot l}{U_n} = \Delta U_{ad} \quad (8.75)$$

ΔU_{ad} este cunoscută.

$$\Delta U_{ad} = U_n \frac{\Delta U_{ad} [\%]}{100} \quad (8.76)$$

$$\frac{P \cdot \rho \cdot l}{U_n \cdot s} = U_n \frac{\Delta U_{ad} [\%]}{100} - \frac{Q X_0 l}{U_n} \quad (8.77)$$

Din această ecuație se determină secțiunea S a conductorului cunoscându-se toate celelalte mărimi. Verificarea se face la încălzire, din tabele observând dacă la secțiunea calculată încărcarea maxim admisă este superioară curentului de calcul ce circulă prin conductoare în regim normal de funcționare.

8.6. RELAȚIA DINTRE SECȚIUNEA CONDUCTOARELOR ȘI PARAMETRII DE SCURTCIRCUIT AI CONDUCTOARELOR

În regimul de scurtcircuit, care este un regim de scurtă durată, scriind bilanțul energetic cu relația din subcapitolul 8.1, se poate considera că pierderea de căldură către mediul ambiant ($K \cdot A \cdot \theta \cdot dt$) este mult mai mică decât cantitatea de căldură degajată prin efect termic ($RI^2 \cdot dt$) cât și față de cantitatea de căldură acumulată în conductor ($M \cdot c \cdot dt$), deci poate fi neglijată în raport cu acestea.

Ecuația de bilanț termic este următoarea:

$$R(\theta) \cdot i^2(t) \cdot dt = M \cdot c \cdot d\theta \quad (8.78)$$

Presupunem că l (lungimea) și s (secțiunea) conductorului sunt constante în timpul scurtcircuitului. Rezistența conductorului este dependentă de temperatură $R(\theta)$. Componenta aperiodică a curentului de scurtcircuit se amortizează și rămâne doar componenta periodică a curentului de scurtcircuit.

Pentru regimul de scurtcircuit se definește solicitarea termică la scurtcircuit.

$$\int_0^{t_{sc}} i^2(t) \cdot dt = \int_0^{t_{sc}} dS = S_{sc} \quad (8.79)$$

$$R(\theta) = \rho_0(1 + \alpha\theta) \frac{l}{S} \quad (8.80)$$

$$M = \gamma \cdot l \cdot S \quad (8.81)$$

$$c = c_0(1 + \beta\theta) \quad (8.82)$$

γ = densitatea materialului care rămâne și ea constantă.

Ecuția devine:

$$\rho_0 \frac{l}{S} (1 + \alpha\theta) \cdot i^2(t) dt = \gamma \cdot l \cdot s \cdot c_0 (1 + \beta\theta) d\theta \quad (8.83)$$

$$\text{sau: } i^2(t) dt = \frac{\gamma \cdot l \cdot s \cdot c_0 (1 + \beta\theta)}{\rho_0 \frac{l}{S} (1 + \alpha\theta)} d\theta \quad (8.84)$$

Integrând ecuația obținem:

$$\int_0^{t_{sc}} i^2(t) \cdot dt = s^2 \int_{\theta_{in}}^{\theta_{sc}} \frac{\gamma \cdot c_0 (1 + \beta\theta)}{\rho_0 (1 + \alpha\theta)} d\theta \quad (8.85)$$

$$S_{sc} = s^2 R_{\theta_{in}}^{\theta_{sc}} \quad (8.86)$$

$R_{\theta_{in}}^{\theta_{sc}}$ = rigiditatea termică la scurtcircuit

Verificarea secțiunii conductorului se face cu relația:

$$s \geq \sqrt{\frac{S_{sc}}{R_{\theta_{in}}^{\theta_{sc}}}} \quad (8.87)$$

Pentru determinarea solicitării termice la scurtcircuit există două metode:

1. metoda timpului fictiv;
2. metoda componentelor periodice și aperiodice ale curentului de scurtcircuit.

1. Metoda timpului fictiv

Se presupune că solicitarea termică de scurtcircuit este dată de:

$I_{p\infty}$ = valoarea eficace a componentei periodice a curentului de scurtcircuit în regim permanent.

$$S_{sc} = I_{p\infty}^2 \cdot t_f \quad (8.88)$$

$I_{p\infty}$ = poate fi determinat prin calcule;

t_f = timpul fictiv care este greu de determinat deoarece presupune să cunoaștem generatoarele sistemului energetic și modul de variație a excitației lor pe perioada scurtcircuitului.

În sistemul electroenergetic pot să existe generatoare prevăzute cu regulator automat de tensiune (RAT) și fără RAT.

În funcție de existența sau nu a RAT-ului pot exista următoarele curbe de variație a curentului de scurtcircuit (componentă periodică).

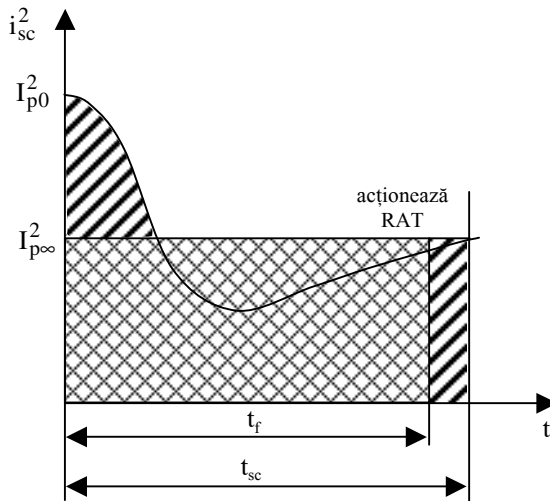


Fig. 8.4. Curba de variație a curentului periodic de scurtcircuit al generatorului prevăzută cu RAT

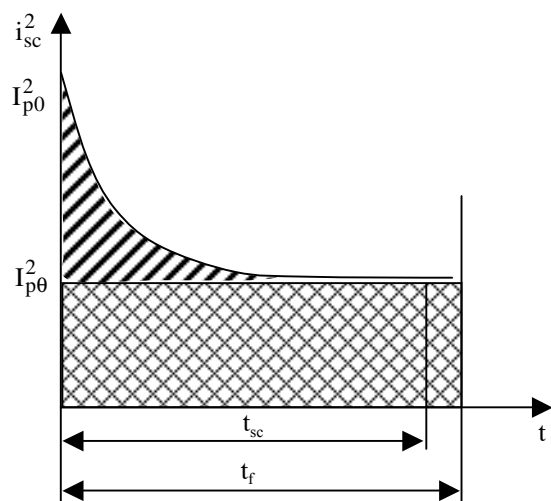


Fig. 8.5. Curba de variație a curentului periodic de scurtcircuit al generatorului fără RAT

Se dorește ca aria hășurată dublu a cărei lungime este timpul fictiv (t_f) să fie cea a unui dreptunghi. Această metodă presupune cunoașterea solicitărilor termice de scurtcircuit date de toate generatoarele sistemului.

Cea de-a doua metodă presupune calculul slicitărilor termice de scurtcircuit pe baza unui curent echivalent (I_{echiv}) și în timp de o secundă.

$$S_{sc} = I_{echiv}^2 \cdot 1sec = t_{sec} \left(I_{asc}^2 + I_{psc}^2 \right) \quad (8.89)$$

Cele două componente ale curentului de scurtcircuit sunt:

$$I_{asc}^2 = I_{p0}^2 \cdot m \quad (8.90)$$

unde: I_{p0} = curentul supratranzitoriu de scurtcircuit, adică valoarea eficace a curentului periodic de scurtcircuit la $t=0$.

$$i_{sc} = I_{sc_{max}} \left(\cos \omega t + e^{-\frac{t}{T_{sc}}} \right) \quad (8.91)$$

$$T_{sc} = \frac{L}{R} \quad (8.92)$$

unde:

m=coeficientul de corecție al componentei aperiodice a curentului de scurtcircuit.

$$S_{sc} = I_{p0}^2 (m + n) t_{sc} \quad (8.93)$$

unde: t_{sc} =timpul real al curentului de scurtcircuit la care sunt reglate protecțiile.

m, n= variabile în timp.

Dacă:

$$i_{sc} = I_{sc_{max}} \left(\cos \omega t + e^{-\frac{t}{T_{sc}}} \right); \quad T_{sc} = \frac{L}{R} \quad (8.94)$$

$$\cos \omega t + e^{-\frac{t}{T_{sc}}} = k_{soc} \quad (8.95)$$

Coeficientul de șoc (k_{soc}) variază cu constanta $T_{sc} = \frac{L}{R}$.

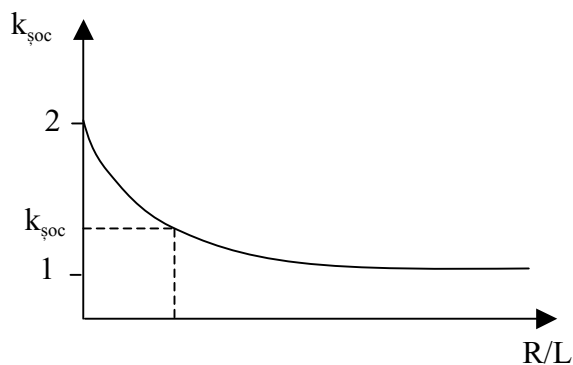


Fig.8.6. Variația coeficientului de șoc cu constanta de timp

Variația lui m față de k_{soc} și de timp este dată în figura următoare, $m = \mu(k_{soc}, t)$.

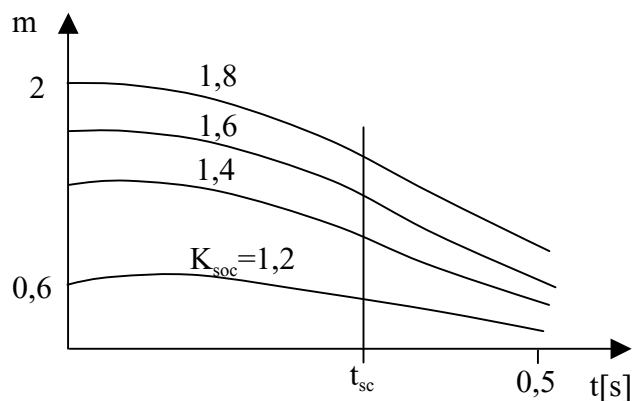


Fig.8.7. Variația coeficientului m cu timpul

$$\text{rezultă: } \theta = \frac{x-1}{\alpha}$$

$$\alpha d\theta = dx$$

$$\text{rezultă: } d\theta = \frac{dx}{\alpha}$$

$$\begin{aligned} \int_{\theta_{in}}^{\theta_{sc}} \frac{\beta \theta d\theta}{1 + \alpha \theta} &= \frac{\beta}{\alpha^2} \int_{1+\alpha\theta_{in}}^{1+\alpha\theta_{sc}} dx - \frac{\beta}{\alpha^2} \int_{\theta_{in}}^{\theta_{sc}} \frac{dx}{x} = \frac{\beta}{\alpha^2} x \Big|_{1+\alpha\theta_{in}}^{1+\alpha\theta_{sc}} - \frac{\beta}{\alpha^2} \ln x \Big|_{1+\alpha\theta_{in}}^{1+\alpha\theta_{sc}} \\ &= \frac{\beta(1 + \alpha\theta)}{\alpha^2} \Big|_{\theta_{in}}^{\theta_{sc}} - \beta \frac{\ln(1 + \alpha\theta)}{\alpha^2} \Big|_{\theta_{in}}^{\theta_{sc}} \end{aligned} \quad (8.100)$$

Rezultatul va fi:

$$R(\theta) = \frac{\gamma_c}{\rho_0} \left[\frac{1}{\alpha} \ln(1 + \alpha\theta) \Big|_{\theta_{in}}^{\theta_{sc}} + \frac{\beta(1 + \alpha\theta)}{\alpha^2} \Big|_{\theta_{in}}^{\theta_{sc}} - \frac{\beta}{\alpha^2} \ln(1 + \alpha\theta) \Big|_{\theta_{in}}^{\theta_{sc}} \right] \quad (8.101)$$

8.7. DIMENSIUNEA REȚELOR ELECTRICE FOLOSIND CRITERII TEHNICO-ECONOMICE

8.7.1. Criteriul densității economice de curent

Pentru o linie electrică se înregistrează cheltuieli de investiție și de exploatare. Acestea sunt:

C_1 - o parte constantă, în raport cu secțiunea care reprezintă cheltuielile necesare pentru pozarea liniei, respectiv pentru ridicarea și montarea stâlpilor, pentru construcția tunelului de cabluri ș.a.m.d.

C_2 - o parte liniar variabilă cu secțiunea liniei care constă din cheltuielile necesare pentru cumpărarea cablului cu care se va realiza linia și variază liniar cu secțiunea.

$$C_2 = m \cdot r + C_{20} \quad (8.102)$$

C_3 - cheltuielile de exploatare pentru o linie electrică și care sunt proporționale cu $R I^2$.

$$C_3 = K \operatorname{Re}(\Delta \underline{S}) = K 3 I^2 \rho \frac{1}{S} \quad (8.103)$$

Aceste cheltuieli sunt dependente de secțiunea liniei.

Cheltuielile totale sunt:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (8.104)$$

Reprezentarea grafică a cheltuielilor este următoarea:

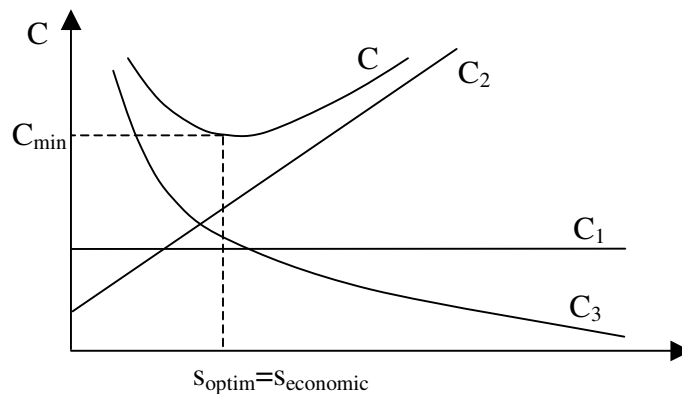


Fig.8.9. Reprezentarea cheltuielilor funcție de secțiune

Pentru o linie dată există o secțiune optimă s_{optim} căreia îi vor corespunde cheltuieli totale minime. Deci putem vorbi de o secțiune economică căreia îi corespunde o densitate optimă de curent:

$$J_{\text{ec}} = \frac{I}{s_{\text{ec}}} \text{ [A/mm}^2\text{]} \quad (8.105)$$

Pentru diverse categorii de linii se pot construi matrici care să conțină densitatea de curent economică $\{I_{\text{ec}}\}$ în raport cu tipul liniei.

Iată câteva exemple de densități economice de curent pentru anumite tipuri de linii:

- linii electrice din cablu la JT $\rightarrow j_{\text{ec}} = 0,8 \div 1,5 \text{ A/mm}^2$;
- linii electrice din cablu la ÎT $\rightarrow j_{\text{ec}} = 1,5 \div 2,5 \text{ A/mm}^2$;
- linii electrice aeriene la ÎT $\rightarrow j_{\text{ec}} = 2,5 \div 5 \text{ A/mm}^2$.

Aceste densități economice se modifică în raport cu modificarea prețurilor materialelor și energiei electrice.

8.7.2. Criteriul volumului minim de material și al pierderilor minime de putere

Volumul de material pentru conductoarele liniilor este:

$$V = l \cdot s \quad (8.106)$$

Pierdere de putere este:

$$\text{Re}(\Delta S) = 3I^2 \rho \frac{l}{s} \quad (8.107)$$

Volumul de material variază liniar cu secțiunea iar pierdere de putere pe linie variază hiperbolic cu secțiunea.

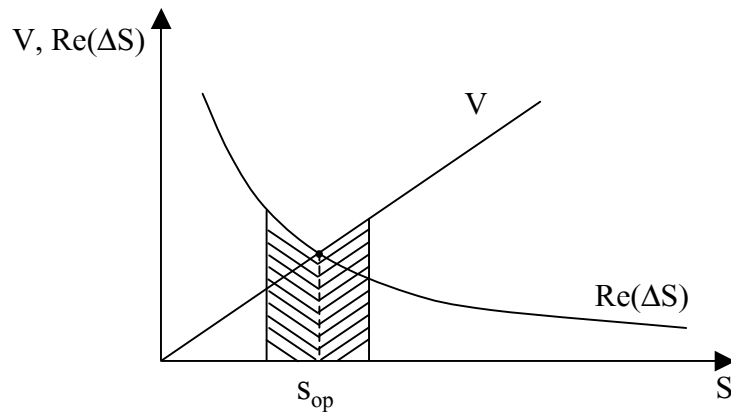


Fig.8.10. Variația volumului de mterial și a pierderilor de energie cu secțiunea

Punctul de intersecție reprezintă valoarea secțiunii optime (s_{op}) care indică volumul minim de material și o pierdere acceptabilă de putere. Indicatorul principal va fi volumul specific de material pentru linia electrică, în m^3 material conductor pentru fiecare MW de putere pierdută.

$$V_{sp} = \frac{V}{Re(\Delta S)} \quad (8.108)$$

$$V_{sp} = \frac{s^2}{3I^2\rho} \quad (8.109)$$

Pentru o linie pentru care se cunoaște curentul și se alege materialul conductor se obține o corelație între secțiune și volumul specific. Dacă volumul specific este dat ca indicator pentru linia dintr-un material cunoscut se poate afla secțiunea.

Secțiunea standard a conductoarelor liniei nu este egală riguros cu cea rezultată din calcule.

$$S_{STAS} \cong \sqrt{3I^2\rho V_{sp}} \quad (8.110)$$

Pentru că în ultimul timp se cere ca pierderile de energie pe linie să fie cât mai mici se va adopta s_{STAS} astfel că:

$$s_{STAS} > \sqrt{3I^2\rho V_{sp}} \quad (8.111)$$

Aplicație

Un motor asincron având datele nominale:

$$P_n = 7,5 \text{ KW}$$

$$\eta_n = 85,5\%$$

$$\cos\varphi = 0,84$$

$$k_p = I_p / I_n = 6,5$$

$$k_i = 1$$

trebuie alimentat prin conductoare de aluminiu cu izolație PVC montate în tub de protecție la temperatura $\theta_{med} = 35^\circ\text{C}$.

Să se aleagă conductoarele de alimentare. Distanța până la motor este $l = 50$ m.

Rezolvare

Se alege secțiunea cu criteriul termic.

$$I_c = \frac{k_i P_n}{\sqrt{3} U_n \cos\varphi_n \eta_n} = \frac{7,5 \cdot 10^3 \cdot 1}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,84 \cdot 0,833} = 15,87 \text{ A}$$

Din tabele se alege conductorul de tip AFY cu $I_{ma} = 16 \text{ A}$, rezultă $S' = 2,5$ mm².

$$I'_{ma} = K_\theta \cdot I_{ma} = K_{\theta_{35^\circ\text{C}}} \cdot I_{ma_{(25^\circ\text{C})}} = 0,94 \cdot 16 = 15,04 \text{ A}$$

Se alege secțiunea imediat următoare: $S = 4 \text{ mm}^2$

$$\text{Rezultă: } I_{ma_{(\theta_m = 25^\circ\text{C})}} = 20 \text{ A}$$

$$I'_{ma} = K_\theta \cdot I_{ma} = 0,94 \cdot 20 = 18,8 \text{ A}$$

Verificarea la densitatea de curent admisibilă la pornire:

$$I_p = K_p \cdot I_n = 6,5 \cdot 15,87 = 103,15 \text{ A}$$

$$j_{p_{ef}} = \frac{I_p}{S} = \frac{103,15}{4} = 25,78 \text{ A/mm}^2$$

$$\text{Se vede că } j_{p_{ef}} > j_{pad} = 20 \text{ A/mm}^2$$

Alegem secțiunea imediat următoare:

$$S = 6 \text{ mm}^2$$

$$\text{Rezultă: } j_{p_{ef}} = \frac{103,15}{6} = 17,2 \text{ A/mm}^2 < 20 \text{ A/mm}^2$$

Verificăm la căderea de tensiune admisibilă în regim normal de funcționare:

$$\Delta U_{ad} \% = \frac{PR + QX}{U^2} 100$$

$$\text{tg}\varphi = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} = \frac{\sqrt{1 - 0,84^2}}{0,84} = 0,65$$

$$P=7,5 \text{ KW}$$

$$Q = P \cdot \operatorname{tg}\varphi = 7,5 \cdot 0,65 = 4,89 \text{ KVAR}$$

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1}{34} \cdot \frac{50}{6} = 0,24 \text{ } \Omega$$

$$\Delta U_{\text{ad}} \% = \frac{7,5 \cdot 10^3 \cdot 0,24 + 4,89 \cdot 10^3 \cdot 0,035}{380^2 \cdot 0,4^2 \cdot 10^6} 100 = \frac{13,5 + 0,17}{16} = 0,85\% < 5\%$$

Verificăm la regimul de pornire căderea de tensiune:

$$\Delta U_{\text{efp}} = \sqrt{3}(RI_p \cos \varphi + XI_p \sin \varphi) = \sqrt{3}(0,24 \cdot 103,15 + 0,035 \cdot 103,15 \cdot 0,54) = 25,7 \text{ V}$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = 0,54$$

$$\Delta U_{\text{efp}} [\%] = \frac{\Delta U_{\text{efp}}}{U} 100 = \frac{25,7}{3,50} 100 = \frac{25,7}{3,8} = 6,76\% < 8$$