

# INSTALAȚII ELECTRICE PENTRU AMELIORAREA FACTORULUI DE PUTERE

## 1. Circulația de putere (energie) în curent alternativ

O rețea de curent alternativ conține pe lângă elementele active (rezistențe) și elemente reactive (inductivități, capacități), iar datorită acestora, circulația de putere (energie) activă este însoțită de o circulație de putere (energie) reactivă.

În regim permanent sinusoidal, un dipol liniar alimentat cu tensiunea  $u = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \gamma_u)$  și parcurs de curentul (determinat de sarcina conectată la ieșire)  $i = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \gamma_i)$  schimbă cu exteriorul o putere instantanee:

$$p = ui = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \gamma_u) \cdot \sqrt{2}I \sin(\omega t + \gamma_i) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \gamma_u + \gamma_i)$$

unde  $\varphi = \gamma_u - \gamma_i$  este defazajul dintre tensiunea la borne și curent. Se observă că puterea instantanee este o mărime periodică constituită dintr-o componentă constantă și o componentă variabilă în timp (oscilantă) de frecvență dublă.

Puterea activă definită prin:

$$P = UI \cos \varphi = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt = RI^2$$

este valoarea medie a puterii instantanee  $p$  luate pe un număr întreg de perioade ( $R$  fiind rezistența circuitului). Mai clar, expresia puterii instantanee poate fi adusă în forma echivalentă:

$$\begin{aligned} p &= UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \gamma_u - \gamma_i + 2\gamma_i) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi + 2\gamma_i) \\ &= UI \cos \varphi [1 - \cos(2\omega t + \gamma_i)] + UI \sin \varphi \sin 2(\omega t + \gamma_i) = p_p + p_o \end{aligned}$$

Primul termen notat  $p_p$  se numește putere instantanee de pulsație și este o mărime pulsatorie (armonică) și totdeauna pozitivă, așa cum se vede în graficul din Fig.X.1. Se observă că puterea activă este tocmai valoarea medie a puterii instantanee de pulsație, iar circulația de putere activă are loc într-un singur sens, de la generator la receptor.

Energia activă reprezintă componenta utilă a energiei vehiculate în sistem și singura care poate fi transformată în alte forme de energie.

Al doilea termen notat  $p_o$  se numește putere instantanee de oscilație și este o mărime armonică cu frecvența dublă față de cea a sursei de alimentare. Puterea instantanee de oscilație oscilează neamortizat între generatorul exterior și dipol. Matematic, media acesteia este 0 și, atunci, se convine a se utiliza ca măsură a acestei puteri amplitudinea ei:

$$Q = UI \sin \varphi = XI^2$$

unde  $X$  este reactanța circuitului.

Energia reactivă este energia schimbată reciproc de generator și receptor. Astfel, în decursul unei perioade, energia câmpului electromagnetic este trimisă de două ori de către generator în rețea și este totodată primită de două ori de generator din rețea.

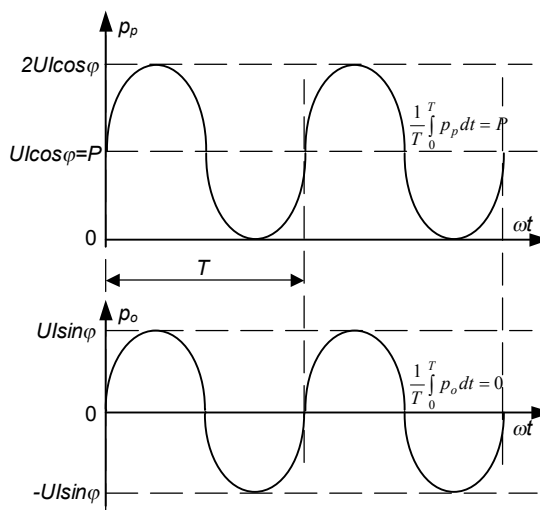


Fig.X.1

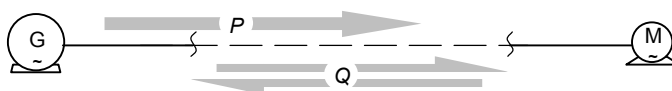


Fig. X.2

Energia reactivă nu este utilizabilă practic, nefiind posibilă conversia în alte forme de energie, dar încarcă suplimentar rețeaua electrică.

Puterea aparentă se definește prin

$$S = UI = ZI^2$$

unde  $Z$  este impedanța totală a circuitului. Ea reprezintă un maxim al puterii active în raport cu unghiul de defazaj  $\varphi$  și este puterea limită pe care un generator este capabil să o furnizeze unui receptor pur rezistiv și este o caracteristică a oricărui generator. Puterea aparentă caracterizează totodată limitele de funcționare ale mașinilor, liniilor de transport și a aparatelor electrice, căci echipamentele electrice sunt proiectate pentru o anumită putere aparentă  $S$ .

În absența receptoarelor deformante, puterea complexă este

$$\underline{S} = P + jQ, \quad \text{cu modulul} \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

relație ilustrată grafic prin așa numitul triunghi al puterilor (Fig.X.3).

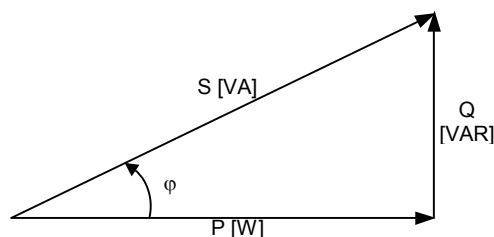


Fig. X.3 Triunghiul puterilor în regim sinusoidal

Majoritatea receptorilor ce aparțin unui consumator de energie electrică au un caracter inductiv, curentul de sarcină al consumatorului fiind defazat de regulă în urma tensiunii. În acest caz, se consideră **convențional**, că puterea reactivă este pozitivă ( $Q_L > 0$ ) și că receptoarele reprezintă „receptori de putere reactivă”. Pentru alte receptoare, curentul absorbit este înaintea tensiunii, puterea reactivă este negativă ( $Q_C < 0$ ) și, de asemenea convențional, acestea sunt considerate „surse de putere reactivă”. Puterea reactivă totală în sistem va fi:

$$Q = Q_L - Q_C$$

Factorului de putere  $k$  definit prin raportul:

$$k = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}$$

este o măsură a ponderii puterii active față de totalul puterii vehiculate în rețea. Prin  $D$  s-a notat *puterea deformantă* care reprezintă puterea conținută de armonicile de tensiune și curent în cazul unei funcționări (reale) a sistemului în regim permanent nesinusoidal.

Pentru cazurile practice, se consideră un circuit monofazat în regim permanent sinusoidal și atunci:

$$D = 0 \quad \Rightarrow \quad k = \cos \varphi,$$

deci factorul de putere este numeric egal cu cosinusul unghiului de defazaj dintre tensiune și curent.

La circuitele trifazate echilibrate, liniare și alimentate cu tensiuni sinusoidale, factorul de putere are aceeași expresie matematică și semnificație ca în cazul circuitelor monofazate. Dacă receptoarele electrice sunt ușor asimetrice, atunci defazajele tensiune-curent diferă de la fază la fază  $\varphi_1 \neq \varphi_2 \neq \varphi_3$  și factorul de putere va fi:

$$k = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\sqrt{(P_1 + P_2 + P_3)^2 + (Q_1 + Q_2 + Q_3)^2}}$$

în care  $P_j$  și  $Q_j$  sunt puterile active și reactive pe fiecare fază în parte ( $j=1,2,3$ ).

Când sarcina electrică prezintă fluctuații, se recomandă determinarea *factorului de putere mediu ponderat* pe baza consumurilor de energie activă  $E_a$  și reactivă  $E_r$  dintr-o anumită perioadă, în ipoteza că receptoarele consumatorului se comportă ca o sarcină trifazată liniară, echilibrată, care lucrează în regim permanent sinusoidal.

$$\cos \varphi = \frac{E_a}{\sqrt{E_a^2 + E_r^2}}$$

Referitor la factorul de putere mediu ponderat acesta poate fi *natural* când se determină fără a considera instalațiile de compensare a puterii reactive, și *general*, când la evaluarea sa se au în vedere și puterile furnizate de aceste instalații. Valoarea factorului de putere mediu ponderat general de la care nu se mai tarifează consumul de energie reactivă se numește *factor de putere neutral*, care este în prezent

sistemul energetic național  $\cos \varphi_n^* = 0,92$ .

## 2. Cauzele unui factor de putere scăzut

Din punct de vedere al puterii reactive deosebim *receptoare inductive* ce solicită din sistem putere reactivă pentru producerea câmpului magnetic propriu (motoare asincrone, transformatoare, bobine de reactanță, balastul lămpilor cu descărcare etc.) și *receptoare capacitive* care furnizează putere reactivă sistemului (condensatoare statice, mașini sincrone supraexcitate etc.). În calcule, puterile cerute de la rețeaua de alimentare se consideră pozitive ( $P > 0$  și  $Q > 0$ ), iar cele furnizate acestuia se consideră negative ( $P < 0$  și  $Q < 0$ ).

Datorită numărului lor mare, motoarele asincrone reprezintă principalul consumator de energie reactivă (cca. 70% din total), următorii consumatori ca importanță fiind transformatoarele (cca. 20% din total) și liniile electrice aeriene (cca. 10% din total). Trebuie remarcat că, datorită caracterului lor capacitiv, liniile electrice în cablu, subterane, sunt, din contră, generatoare de energie reactivă.

La aceeași putere activă și solicitare magnetică, receptoarele inductive susmenționate consumă diferit energia reactivă, deoarece *puterea reactivă de magnetizare*  $Q_0$  (principala componentă a puterii reactive) depinde direct proporțional de volumul fierului  $V_{Fe}$  și al întrefierului  $V_\delta$ , iar *puterea reactivă de dispersie*  $Q_d$  variază în același sens cu pătratul factorului (coeficientului, gradului) de încărcare  $\beta$ .

**A.** La *motoarele asincrone* puterea reactivă de magnetizare se determină cu:

$$Q_0 = 0,25fB^2 \left( \frac{V_{Fe}}{\mu} + \frac{V_\delta}{\mu_0} \right) \cong \sqrt{3}U_n I_0 \quad [\text{VAr}]$$

în care:  $f$  - frecvența tensiunii de alimentare, [Hz];  $B$  - inducția de lucru în circuitul magnetic, [T];  $\mu = \mu_0 \mu_r$  - permeabilitatea magnetică, [H/m];  $U_n$  - tensiunea nominală de lucru, [V];  $I_0$  - curentul de mers în gol al motorului, [A].

Analizând ultima expresie se constată că puterea reactivă de magnetizare poate avea valori mari datorită următoarelor cauze:

- *cauze de fabricație*, cum ar fi: volum mărit al întrefierului, impus de siguranța în exploatare și cerințele constructive; materiale magnetice cu performanțe modeste ( $\mu_r$  - scăzut); turații nominale reduse ce implică volum mare de fier etc.;

- *cauze de exploatare*, mai frecvente fiind: reparațiile necorespunzătoare; nesimetriile circuitului magnetic; deplasările pachetelor de tole etc.

La motoarele asincrone puterea reactivă de dispersie se determină cu:

$$Q_d = \beta^2 (Q_n - Q_0) \quad [\text{VAr}];$$

unde:  $\beta = \frac{P_s}{P_n} = \frac{P_c}{P_{en}}$  - coeficient de sarcină sau încărcare dat de raportul între puterea în sarcină

tehnologică  $P_s$  și puterea mecanică nominală  $P_n$  sau între puterea cerută din rețea  $P_c$  și puterea electrică nominală  $P_{en} = P_n / \eta_n$ , cu  $\eta_n$  randamentul nominal al motorului electric.

$Q_n = P_{en} \cdot \tan \varphi_n$  - puterea reactivă nominală, iar  $\varphi_n$  defazajul nominal.

Puterea reactivă cerută  $Q_c$  la sarcina  $\beta$ , va fi:

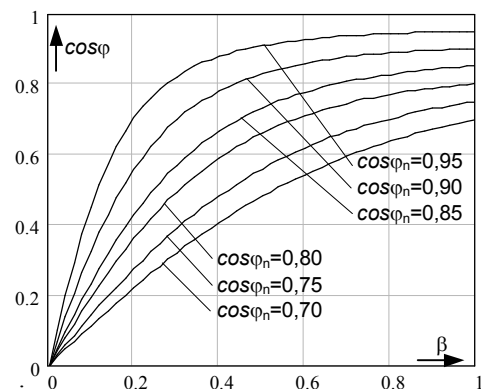
$$Q_c = Q_0 + Q_d = Q_0 + \beta^2 (Q_n - Q_0) = Q_n (a + (1-a) \cdot \beta^2)$$

$$\text{unde } a = \frac{Q_0}{Q_n}.$$

În final, factorul de putere al motorului asincron este:

$$\cos \varphi = \frac{P_c}{\sqrt{P_c^2 + Q_c^2}} = \frac{\beta}{\sqrt{\beta^2 + (a + \beta^2(1-a))^2 \tan^2 \varphi_n}} = f(\beta, \cos \varphi_n)$$

și din reprezentarea grafică (fig.10.2) rezultă că:



**Fig.10.2** Caracteristicile  $\cos \varphi = f(\beta, \cos \varphi_n)$

- factorul de putere scade rapid cu reducerea gradului de încărcare  $\beta$ , indiferent de factorul de putere nominal  $\cos\varphi_n$  al motorului asincron;
- la aceeași variație  $\Delta\beta$ , factorul de putere se modifică mai mult la motoarele ce au factorul de putere nominal mai mic;

La o creștere a tensiunii de alimentare cu mai mult de 10% apare saturarea circuitului magnetic, ceea ce conduce la creșterea consumului de putere reactivă.

**B. La transformatoare**, puterea reactivă de magnetizare este dată de:

$$Q = 0,25fB^2 \frac{V_{Fe}}{\mu} = i_0 \cdot S_n \cong 0,08 \cdot S_n$$

și se observă ca nu este influențată de sarcina vehiculată  $S$ , dar depinde de creșterea tensiunii de alimentare care va majora curentul relativ de magnetizare  $i_0$  și de putere nominală  $S_n$  a transformatorului.

La transformatoare, puterea reactivă de dispersie este dependentă de tensiunea relativă de scurtcircuit  $u_{sc}$ , puterea aparentă  $S_n$  și factorul de încărcare  $\beta$ , conform relației:

$$Q_d = u_{sc}\beta^2 S_n \cong 0,02 S_n$$

cu:  $\beta = S_m/S_n$ ,  $S_m$  - puterea medie sau medie pătratică pe intervalul de timp dat.

### 3. Efectele unui factor de putere redus

Funcționarea instalațiilor electrice ale unui consumator la un factor de putere redus prezintă o serie de dezavantaje atât pentru furnizorul de energie electrică, cât și pentru consumatorul însuși, precum:

a) *Sporirea investițiilor* în liniile de transport și distribuție a energiei electrice pentru care se acceptă funcționarea la un factor de putere scăzut. În acest regim de funcționare, la aceeași putere activă  $P$  consumată (transformată în lucru util), curentul

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U_n \cos\varphi}$$

este mai mare din cauza unui  $\cos\varphi$  mai mic și atunci, prin calculul de dimensionare vor rezulta secțiuni ale conductoarelor mai mari, aparate de protecție și comutație de capacitate mai mare, întrerupătoare cu putere de rupere mărită etc.

b) *Pierderile de putere* în liniile de transport și distribuție sunt date de :

$$\Delta P = 3RI^2 = 3R \left( \frac{P}{\sqrt{3}U \cos\varphi} \right)^2 = \frac{RP^2}{U^2} \frac{1}{\cos^2\varphi}$$

și se observă că variază invers proporțional cu pătratul factorului de putere la  $P=ct.$  și  $U=ct.$  Astfel, dacă aceeași putere activă  $P$  este transportată sub factori de putere diferiți  $\cos\varphi_1 < \cos\varphi_2$ , atunci pierderile de putere  $\Delta P_1$  și  $\Delta P_2$  sunt interdependente conform relației:

$$\Delta P_2 = \Delta P_1 \left( \frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} \right)^2$$

de unde rezultă că prin îmbunătățirea factorului de putere se obține diminuarea pierderilor de putere.

c) *Pierderile de tensiune* în rețelele de transport și distribuție sunt date de relația:

$$\Delta U = R \frac{P}{U} + X \frac{Q}{U}$$

O creștere a puterii reactive vehiculate determină o creștere a pierderii de tensiune și, în consecință, o alimentare cu tensiune mai scăzută a receptoarelor. Astfel, receptoarele de iluminat vor avea un flux luminos mai mic (generând inconfort celor din încăperea), iar receptoarele de forță vor intra în suprasarcină (la aceeași solicitare mecanică la arbore, la scăderea tensiunii va crește curentul, iar cuplul motoarelor asincrone va scăde proporțional cu pătratul tensiunii).

d) *Capacitatea de încărcare* cu putere activă a rețelelor electrice este mai mică la un factor de putere scăzut. Din considerente de încălzire, mărirea caracteristică a generatoarelor, transformatoarelor și liniilor

de transport este puterea aparentă. Dar, la aceeași putere aparentă  $S$  (la aceeași limită maximă de încărcare a rețelei) corespund mai multe puteri active  $P_1 = S \cos \varphi_1$ ,  $P_2 = S \cos \varphi_2$  funcție de valoarea factorului de putere. Dacă  $\cos \varphi_2 < \cos \varphi_1$  vom avea  $P_2 < P_1$ , datorită creșterii consumului de putere reactivă.

e) *Regimul deformant* este datorat receptoarelor consumatorului și conduce la mai multe efecte negative. Pe de o parte are loc scăderea factorului de putere (întrucât  $S$  crește prin apariția lui  $D$ ), iar pe de altă parte se constată: amplificarea armonicilor de tensiune și curent, fenomene de rezonanță armonică, cupluri parazite de frânare în motoarele electrice, pierderi suplimentare de tensiune și putere etc.

#### 4. Îmbunătățirea factorului de putere

Necesitatea ameliorării (îmbunătățirii, compensării) factorului de putere prin reducerea puterilor reactive și deformante este impusă de faptul că marea majoritate a receptoarelor electrice, deși lucrează la sarcina nominală, au un factor de putere cu mult sub cel neutral. Din această cauză măsurile de îmbunătățire a factorului de putere urmăresc simultan două obiective și anume:

- aducerea factorului de putere al receptoarelor în exploatare la valori cât mai apropiate de cea nominală;

- creșterea factorului de putere cel puțin până la valoarea factorului de putere neutral.

Corespunzător acestor criterii, metodele de compensare a factorului de putere se grupează în: *mijloace naturale* ce constau în aplicarea unor măsuri tehnico-organizatorice și *mijloace speciale* ce presupun instalarea unor surse de putere reactivă, de regulă baterii de condensatoare.

##### 4.1 Mijloace naturale de ameliorare a factorului de putere

Mijloacele naturale de ameliorare a factorului de putere se referă la alegerea și exploatarea corectă a utilajelor din instalațiile consumatorului și anume:

###### 4.1.1 Mijloacele naturale de ameliorare în cazul motoarelor electrice

a) *Înlocuirea motoarelor asincrone supradimensionate* cu altele de putere mai mică se recomandă atunci când: nu apar suprasarcini de durată în timpul funcționării, reducerea puterii nu afectează randamentul energetic al utilajului prin creșterea excesivă a pierderilor în noul motor, există condiții de montaj corespunzătoare.

Schimbarea motorului este rentabilă dacă rezultă o reducere de putere activă în noul motor și în sistemul electroenergetic, iar cheltuielile ocazionate de înlocuire se amortizează în 7 ani.

În practică, motoarele cu  $\beta \leq 0,45$  se înlocuiesc fără nici un calcul economic dacă la pornire este asigurat cuplul necesar pornirii, cele cu  $\beta \geq 0,7$  sau care funcționează sub 1500 ore/an nu se înlocuiesc, iar pentru cele cu  $\beta = 0,45 \dots 0,7$  se impune un calcul de eficiență tehnico-economică pe baza căruia se ia decizia de înlocuire sau nu.

b) *Înlocuirea motoarelor asincrone cu motoare sincrone* se face pe baza unui studiu tehnico-economic atât în faza de proiectare, cât și în cazul instalațiilor în funcțiune, numai dacă procesul tehnologic permite acest lucru (absența șocurilor de sarcină, turație constantă, porniri adecvate etc.). Avantajul metodei constă în capacitatea motorului sincron de a funcționa la orice factor de putere, inductiv sau capacitiv sau egal cu 1, prin reglarea curentului de excitație.

Altfel spus, motorul sincron poate fi utilizat cu dublu scop, de producere a lucrului mecanic util și, totodată, ca sursă de energie reactivă, când funcționează supraexcitat, de obicei la un factor de putere capacitiv de 0,8. În practică, înlocuirea se recomandă pentru puteri de peste 100kW și, de multe ori, se are în vedere chiar o supradimensionare a motorului sincron față de puterea mecanică cerută. Astfel, cu o investiție suplimentară minimă se poate acoperi o mai mare parte din necesarul de putere reactivă.

c) *Alimentarea motoarelor asincrone cu tensiune redusă* constă în comutarea conexiunilor înfășurărilor statorice din triunghi ( $\Delta$ ) în stea ( $Y$ ), numai dacă varianta constructivă de mașină permite acest lucru (cazul motoarelor cu pornire stea-triunghi manuală sau automată). Prin această metodă tensiunea aplicată înfășurării se reduce de  $\sqrt{3}$  ori, ceea ce conduce la scăderea curentului de magnetizare și, implicit, a puterii reactive. Totodată, cuplul dezvoltat de motor scade de trei ori (cu pătratul raportului tensiunilor).

Funcționarea în conexiunea stea va fi stabilă doar dacă valoarea cuplului rezistent pe arbore este de cel mult  $0,44M_{n\Delta}$ , altfel mașina se supraîncălzește. Într-adevăr, dacă avem în vedere proporționalitățile dintre cuplurile de desprindere  $M_d$  și cele nominale  $M_n$  pentru cele două conexiuni

$$M_{d\Delta} \cong 2M_{n\Delta} \quad M_{dY} \cong 2M_{nY} = \frac{2}{3}M_{n\Delta}$$

atunci, rezultă pentru cuplul maxim pe arbore la conexiunea stea valoarea:

$$M_{max} \leq \frac{M_{dY}}{1,5} = \frac{2}{4,5}M_{n\Delta} \cong 0,44M_{n\Delta}$$

pentru un coeficient de siguranță de 1,5.

Randamentul și factorul de putere pentru un motor care lucrează în conexiunea stea sau triunghi a înfășurărilor satorice prezintă valori diferite (fig. 10.3) în zona încărcărilor reduse. Utilizarea conexiunii stea la  $\beta \leq 0,5$  este performantă prin scăderea pierderilor în circuitul magnetic. Raportul randamentelor  $A = \eta_Y / \eta_{\Delta}$  și factorilor de putere  $B = \cos \varphi_Y / \cos \varphi_{\Delta}$  pentru celor două conexiuni (fig. 10.4) este supraunitar în domeniul  $\beta \leq 0,5$  și care se recomandă pentru conexiunea stea.

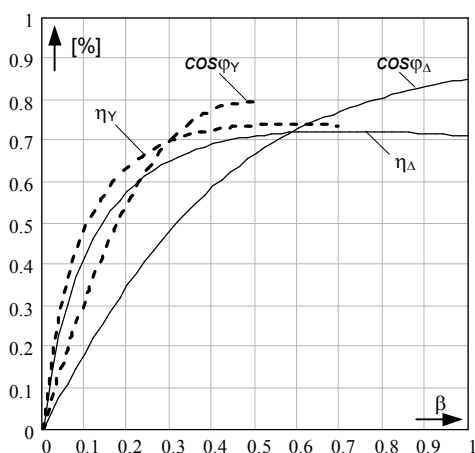


Fig. 10.3 Curbele  $\eta=f(\beta)$  și  $\cos\varphi=f(\beta)$  pentru conexiunile stea și triunghi ale înfășurărilor satorice

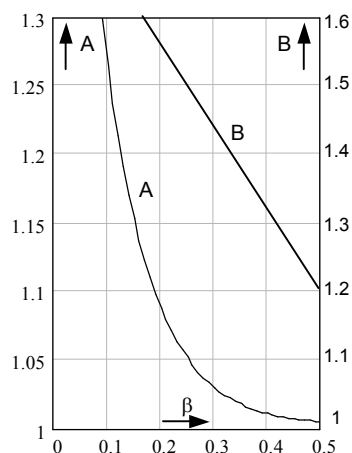


Fig. 10.4 Curbele  $A=f(\beta)$  și  $B=f(\beta)$  pentru motoarele asincrone cu rotorul în scurtcircuit

#### 4.1.2 Mijloacele naturale de ameliorare în cazul transformatoarelor

a) *Înlocuirea transformatoarelor slab încărcate* cu altele de putere mai mică este eficientă numai dacă are loc o reducere a pierderilor de energie în transformator, în rețeaua consumatorului și în sistemul de alimentare. Metoda se recomandă numai când transformatoarele vizate au o încărcare mai mică de 50% din puterea lor nominală și o durată de funcționare mai mare de 1500 ore/an, căci altfel nu este eficientă economic.

b) *Funcționarea transformatoarelor de putere după graficul de pierderi minime* se va aplica ori de câte ori condițiile de exploatare permit acest lucru. La funcționarea în paralel, se poate stabili un grafic de conectare al transformatoarelor astfel încât să se obțină un minim pentru pierderile totale de putere:

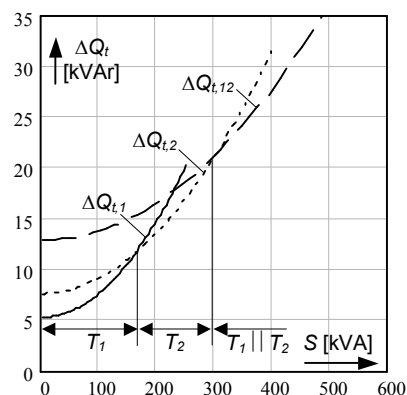
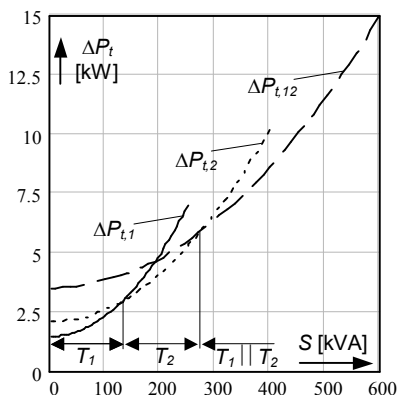


Fig. 10.5 Graficul de pierderi minime totale active  $\Delta P_t=f(S)$  și reactive  $\Delta Q_t=f(S)$

$$\Delta P_t = \Delta P_{Fe} + \beta^2 \Delta P_{Cu} = a + bS^2$$

unde:  $\Delta P_{Fe}$  - pierderi de putere la funcționarea în gol a transformatorului;  $\Delta P_{Cu}$  - pierderi de putere la funcționarea în sarcină nominală a transformatorului;  $a = \Delta P_{Fe}$  și  $b = \Delta P_{Cu} / S_n^2$  - notații de calcul.

În fig. 10.5 se prezintă graficul de pierderi minime pentru două transformatoare de puteri diferite. Determinarea puterii aparente  $S$  de la care se deconectează un transformator și se conectează celălalt se poate stabili atât grafic cât și analitic.

c) *Montarea limitatoarelor de mers în gol* Evitarea mersului în gol al utilajelor de producție constituie una dintre cele mai importante și mai eficiente măsuri de economisire a energiei. Utilajele înglobează motoare sau transformatoare electrice care la mersul în gol sau la încărcare mult redusă față de cea nominală funcționează cu randamente energetice scăzute și deci cu consumuri inutile de energie activă și reactivă.

Utilizarea *limitatoarelor de mers în gol* se face îndeosebi la motoarele electrice asincrone și la transformatoarele de sudare, dacă mersul în gol dintre perioadele de lucru ale utilajelor are o durată ce depășește 20% din timpul lor total de utilizare și doar în urma unui calcul de eficiență tehnico-economic. Se are în vedere că, pe durata pornirii utilajele absorb o putere mai mare decât la funcționarea lor normală, dezvoltând aceeași putere utilă. Când timpul de mers în gol este  $t_0$  iar timpul de pornire este  $t_p$ , economia de energie activă se calculează cu relația:

$$W_a = P_0 t_0 - P_p t_p$$

în care  $P_0$  este puterea absorbită de motor la mersul în gol, iar  $P_p$  este puterea medie absorbită de motor în timpul pornirii. Așadar, oprirea utilajelor în perioadele neproductive aduce o economie reală de energie electrică numai când energia de mers în gol este mai mare decât energia suplimentară de pornire.

## 4.2 Ameliorarea factorului de putere pe cale artificială

Dacă au fost epuizate toate mijloacele naturale de ameliorare și factorul de putere nu a ajuns la valoarea factorului de putere neutral, atunci se are în vedere instalarea locală a unor surse de putere reactivă. Acestea au rolul de a acoperi "la fața locului" mare parte din consumul de putere reactivă și de a evita în acest fel vehicularea acesteia prin rețea.

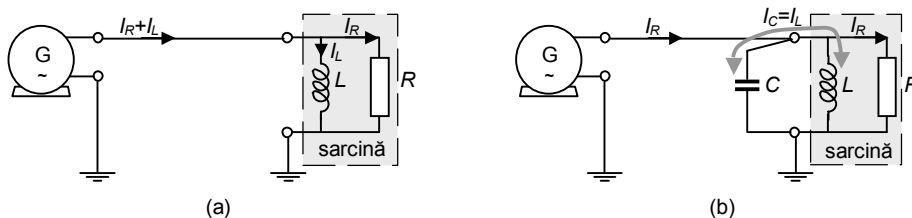


Fig. X.3 Circulația componentelor curentului înainte (a) și după compensare (b)

Decizia de a introduce surse specializate de putere reactivă, ca și optimizarea parametrilor acestora, are la bază, de asemenea, un calcul tehnico-economic. Mai întâi se parcurg trei etape preliminare

### 4.2.1 Determinarea puterii reactive necesare $Q_c$

Pentru realizarea factorului de putere neutral  $\cos \varphi_2$  plecând de la factorul de putere natural  $\cos \varphi_1$ , trebuie conectată o sursă de putere reactivă cu capacitatea

$$Q_c = P_1 (tg \varphi_1 - tg \varphi_2) - \Delta P_c tg \varphi_2$$

unde  $P_1$  este puterea activă a consumatorului necompensat, iar  $\Delta P_c$  reprezintă pierderile de putere activă în sursa de compensare.

În practică, acolo unde se cunoaște din facturi energia activă a consumatorului necompensat  $E_{a1}$ , se folosește relația

$$Q_c = \frac{E_{a1} (tg \varphi_1 - tg \varphi_2)}{t_{Qm}}$$

prin  $t_{Qm}$  notându-se durata de utilizare a puterii reactive

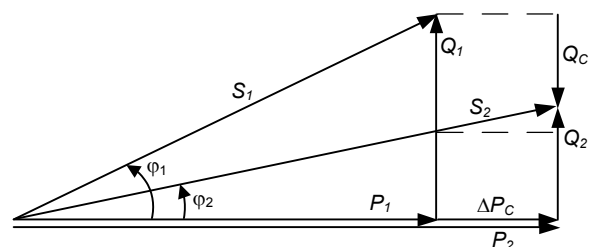


Fig. X.3 Triunghiul puterilor în regim sinusoidal monofazat

maxime (de exemplu, 3000h/an pentru întreprinderi într-un schimb).

#### 4.2.2 Alegerea tipului sursei de compensare

Cele mai frecvente surse de putere reactivă sunt bateriile de condensatoare și compensatoarele sincrone.

Condensatoarele derivație furnizează o putere reactivă  $Q_c$  care depinde de capacitatea  $C$  a condensatorului și de tensiunea  $U_c$  la bornele acestuia

$$Q_c = \omega C U_c^2$$

Ele sunt preferate atunci când puterea reactivă cerută este  $Q_c < 35\text{MVar}$  datorită următoarelor avantaje: sunt mai simple și ieftine, au pierderi de putere activă relativ reduse (cca. 0,3-0,4%), oferă condiții de exploatare mai ușoare decât compensatoarele sincrone și oferă posibilitatea de extindere sau de fracționare a bateriei de condensatoare în scopul adaptării la necesitățile de compensare.

Condensatoarele trebuie utilizate cu precauție în rețelele cu număr mare de convertizoare statice, datorită posibilității apariției armonicilor superioare (de rang  $n=kp+1$ ,  $p$  fiind numărul de comutații în decursul unei perioade a tensiunii alternative). Apariția armonicilor superioare poate conduce la rezonanțe de curent și de tensiune, care pot avaria bateria de condensatoare.

Compensatoarele sincrone sunt mașini electrice sincrone, construite special în scopul compensării factorului de putere. Mașinile sincrone supraexcitate funcționează cu un factor de putere capacitiv și deci generează putere reactivă. Valoarea maximă a puterii reactive furnizate se calculează cu formula

$$Q_m = \frac{\alpha_m \cdot P_n \cdot \tan \varphi_n}{\eta_n}$$

unde  $\alpha_m$  este un factor care depinde de tipul motorului, de coeficientul de încărcare  $\beta$  al acestuia și de tensiunea relativă la borne,  $U/U_n$ .

Ele sunt luate în considerare ca variantă de compensare dacă  $Q_c > 50\text{MVar}$ , dacă consumatorul are receptoare deformante care necesită  $Q_c > 10..20\text{MVar}$ , sau dacă trebuie compensată o sarcină reactivă cu variații rapide (de exemplu, la cuptoarele cu arc). În oricare dintre variante, utilizarea compensatoarelor sincrone în locul condensatoarelor se adoptă numai în urma unui calcul de eficiență tehnico-economică.

#### 4.2.3 Amplasarea surselor de compensare

Amplasarea compensatoarelor sincrone se face aproape întotdeauna în stațiile sistemului energetic, la barele de MT.

Amplasarea condensatoarelor sincrone corespunde la trei tipuri de compensare:

- *compensarea individuală* – condensatoarele sunt conectate direct la bornele receptoarelor și se aplică când receptorul (motor asincron, cuptor electric, transformator etc) are o putere semnificativă în raport cu puterea totală a instalației și totodată o funcționare continuă. Este cel mai scump procedeu, dar asigură compensarea puterii reactive chiar la locul de consum și elimină astfel curenții reactivi importanți din instalație. Totodată reduce puterea aparentă cerută, reduce dimensiunile cablurilor și pierderile în acestea.
- *compensarea de grup (sectorială)* – bateriile de condensatoare sunt conectate la barele tablourilor de distribuție la care sunt grupați mai mulți consumatori reactivi. De această structură beneficiază transformatorul și coloanele de alimentare din amonte de locul de conectare, în care este astfel limitată circulația de putere reactivă. Curentul reactiv continuă să existe în toate cablurile din aval, iar când au loc modificări mari de sarcină apare riscul de supracompensare și în consecință de supratensiune, cu toate problemele aferente
- *compensarea centralizată* – bateria de condensatoare este conectată la barele tabloului general de distribuție de JT din postul de transformare. Este cea mai ieftină ca investiție, reduce încărcarea transformatorului, dar curentul reactiv continuă să existe în întreaga rețea alimentată din tabloul general odată cu pierderile de putere aferente. Dacă valoarea puterii reactive a condensatoarelor este  $\leq 15\%$  din valoarea puterii transformatorului de alimentare, este preferabilă o compensare cu valoare fixă. Peste 15% bateria se execută în trepte cu comutare automată pentru a urmări necesarul de putere reactivă cerut de receptoarele alimentate.

### 5. Calculul bateriei de condensatoare



### 5.1 Stabilirea puterii reactive a bateriei

Determinarea puterii reactive a bateriei de condensatoare se face, în general, neglijând pierderile  $\Delta P_c$  în aceasta, adică cu formula:

$$Q_c = P(tg\varphi_1 - tg\varphi_2)$$

La compensarea individuală trebuie avute în vedere caracteristicile receptorului compensat. Astfel, la compensarea individuală a transformatoarelor, puterea bateriei va acoperi numai necesarul la mersul în gol al acestora, adică:

$$Q_{c0} \leq (0,1..0,2)S_{nT}$$

La compensarea individuală a unui motor electric, conectarea și deconectarea de la rețea se face odată cu motorul prin același aparat de comutație și este important să se verifice dacă valoarea capacității bateriei este sub valoarea la care apare autoexcitarea. În înfășurările statorice ale unui motor cu inerție de rotație mare și care continuă să se rotească și după întreruperea alimentării, sunt induse tensiuni electromotoare datorită magnetismului remanent al rotorului. În cazul motorului necompensat acestea se vor reduce la zero în 1-2 perioade.

Dacă motorul este compensat, condensatoarele de compensare vor constitui o sarcină trifazată, capacitivă, care va produce curenți capacitivi în înfășurările statorului. Acești curenți vor da naștere unui câmp magnetic rotitor care acționează după aceeași axă și în același sens cu câmpul magnetic aflat în diminuare al motorului. Astfel, fluxul rotoric crește, curenții din stator se măresc, iar tensiunea la bornele motorului crește uneori la valori periculoase de mari. Fenomenul este cunoscut sub numele de autoexcitare și este motivul pentru care generatoarele nu funcționează, în mod normal, în regim capacitiv (există tendința autoexcitării spontane, necontrolate).

Pentru a evita supracompensarea când motorul este subîncărcat și autoexcitarea în cazul frânării motorului, puterea reactivă în bateria de condensatoare se limitează la maximum 90% din puterea reactivă de mers în gol, adică:

$$Q_c \leq 0,9\sqrt{3}U_n I_0$$

unde  $U_n$  este tensiunea de linie și  $I_0$  este curentul absorbit de motorul în gol.

Pentru motoarele cu puterea nominală mai mare de 30kW, se poate utiliza relația aproximativă:

$$Q_{c0} \cong 0,35 \cdot P_n$$

Dacă un condensator unitar, monofazat sau trifazat, este capabil să furnizeze puterea reactivă  $Q_{nC}$  iar necesarul de putere reactivă calculat este  $Q_c$  atunci numărul necesar de condensatoare ce formează bateria este

$$N_c = Q_c / Q_{nC}$$

Dacă tensiunea nominală a condensatorului  $U_{nC}$  nu coincide cu tensiunea rețelei  $U_r$  ci este mai mare, puterea reactivă furnizată în rețea care trebuie luată în calcul va fi mai mică și egală cu:

$$Q_c^* = Q_{nC} \left( \frac{U_r}{U_{nC}} \right)^2$$

### 5.2 Caracteristicile condensatoarelor

După modul de conectare a condensatoarelor, bateriile sunt monofazate sau trifazate. În regim monofazat, puterea reactivă furnizată de un condensator cu capacitatea  $C$  este:

$$Q = \omega C U_f^2$$

unde  $U_f$  și  $\omega=2\pi f$  sunt mărimea efectivă și pulsația tensiunii de alimentare. Dacă se impune  $Q_b$ , capacitatea necesară a bateriei rezultă din

$$C = \frac{Q_b}{\omega U_f^2}$$

Capacitatea condensatoarelor bateriei în rețele trifazate depinde de modul de conectare: în stea sau în triunghi. Capacitatea bateriei cu conexiune în stea (fig. \*\*) este

$$Q_Y = 3 \cdot \omega C_{fY} U_f^2 = \omega C_{fY} (\sqrt{3} U_f)^2 = \omega C_{fY} U_l^2$$

Capacitatea bateriei cu conexiune în triunghi (fig. \*\*\*) este:

$$Q_{\Delta} = 3 \cdot \omega C_{f\Delta} U_f^2$$

Dacă impunem ca, indiferent de conexiune, să se obțină același nivel de compensare:  $Q_Y = Q_{\Delta}$ , atunci rezultă:

$$C_Y = 3 \cdot C_{\Delta}$$

Prin urmare, la aceeași putere reactivă, conexiunea în triunghi necesită capacități de trei ori mai mici decât conexiunea stea, dar solicitarea dielectrică a acestora este de  $\sqrt{3}$  ori mai mare. În instalațiile de JT, unde solicitarea dielectrică nu este o problemă deosebită, se utilizează practic numai conexiunea în triunghi, iar conexiunea stea poate fi întâlnită la MT.

Constructiv, condensatoarele sunt de interior (cel mai des) sau de exterior (mai rar), cu mediu de impregnare sau fără (de tip uscat). În țară se fabrică două tipuri principale de condensatoare cu impregnare: în ulei mineral (simbol CU) și în ulei sintetic (simbol CS). Uleiul sintetic este neinflamabil și prezintă pierderi dielectrice mai reduse, deci este de preferat.

În ultimul timp se folosesc tot mai mult condensatoare de tip uscat (fără dielectric), realizate din două folii de polypropylenă metalizată, cu proprietăți autocicatrizante. Ele sunt protejate contra defecțiunilor interne de un dispozitiv de suprapresiune cuplat cu siguranță. Dacă curentul de defect este mare atunci se topește siguranța, iar dacă este prea mic pentru aceasta, el va determina refacerea izolației prin încălzirea locală produsă (autocicatrizare). Dacă totuși curentul de scurgere persistă, acesta va evolua spre scurtcircuit și va determina acțiunea siguranței. Acest tip de condensatoare are carcasa din material izolant, prevăzută cu dublă izolare, astfel că nu mai necesită conectarea acestora la pământ.