

MIJLOACE ȘI METODE DE AMELIORARE A FACTORULUI DE PUTERE

1. Generalități

Echipamentele electrice sunt proiectate la o anumită putere aparentă S ce este proporțională cu produsul valorilor eficace ale tensiunii U și curentului I . Vehicularea acestei puteri în sistemul electroenergetic este însoțită, în funcție de structura consumatorului de energie electrică, de circulația puterilor active P , reactive Q și deformante D . Singura utilă dintre acestea este puterea activă și aprecierea cotei părți ce-i revine din necesarul de putere aparentă se face cu ajutorul *factorului de putere* k definit prin raportul:

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

Ponderile puterilor reactive și deformante se estimează prin *factorii reactiv* ρ și *deformant* τ ai regimului permanent nesinusoidal, conform relațiilor:

$$\rho = \frac{Q}{P} = \operatorname{tg} \varphi; \quad \tau = \frac{D}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \operatorname{tg} \psi;$$

unde fazorii P , Q , D formează un sistem triortogonal de referință, iar defazajele φ și ψ au semnificațiile din fig. 12.1. Astfel se obține o nouă expresie pentru factorul de putere:

$$k = \cos \varphi \cdot \cos \psi$$

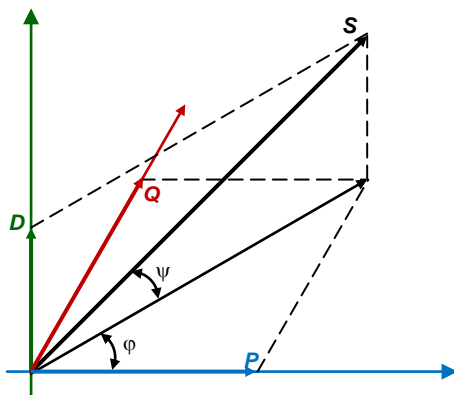


Fig.12.1 Explicativă pentru factorul reactiv ρ și deformant τ al regimului

Dacă se consideră un circuit monofazat în regim permanent sinusoidal atunci:

$$D = 0 \ (\psi = 0) \Rightarrow k = \cos \varphi,$$

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 asime-trice, 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 ($j=1,2,3$).

Relațiile anterioare definesc *factorul de putere instantaneu* ce corespunde unui anumit moment din funcționarea instalațiilor consumatorului. Deoarece sarcina electrică prezintă fluctuații, normele în vigoare 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* și pentru sistemul energetic național este de $\cos \varphi_n^* = 0,92$.

În instalațiile electrice din incinta consumatorului, studiul și analiza receptoarelor de putere reactivă urmărește mai multe aspecte: cauzele scăderii factorului de putere, efectele unui factor de putere redus, mijloace și metode de ameliorare a factorului de putere, calculul tehnico-economic al amplasării surselor de putere reactivă etc.

2. Cauzele scăderii factorului de putere

Din punct de vedere al puterii reactive deosebim *receptoare inductive* ce solicită din sistem putere reactivă pentru producerea câmpului magnetic propriu (motoare asincrone, transformatoare 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 ($P_c > 0$ și $Q_c > 0$), iar cele furnizate acestora se consideră negative ($P < 0$ și $Q < 0$).

La nivelul sistemului electroenergetic național, motoarele asincrone solicită circa 60%, iar transformatoarele 25% din puterea reactivă totală produsă în centrale. La nivelul consumatorului industrial proporția este de 20% pentru transformatoare și 70% pentru motoarele asincrone (datorită numărului apreciabil al acestora).

Puterea reactivă cerută Q_c a acestor receptoare este constituită din: *puterea reactivă de magnetizare* Q_o (principala componentă a puterii reactive), care depinde direct proporțional de volumul fierului V_{Fe} și al întrefierului V_δ , și din *puterea reactivă de dispersie* Q_d , care variază în același sens cu pătratul factorului (coeficientului, gradului) de încărcare β .

$$\text{Așadar:} \quad Q_c = Q_o + Q_d.$$

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].

Din prima expresie rezultă că majorarea acestei puteri este generată de:

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

- *cauze de exploatare*, mai frecvente fiind reparațiile necorespunzătoare; nesimetrii ale circuitului magnetic; deplasări ale 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 η_n randamentul nominal al motorului electric.

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

Puterea reactivă cerută Q_c la sarcina β , 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 poate fi pus sub

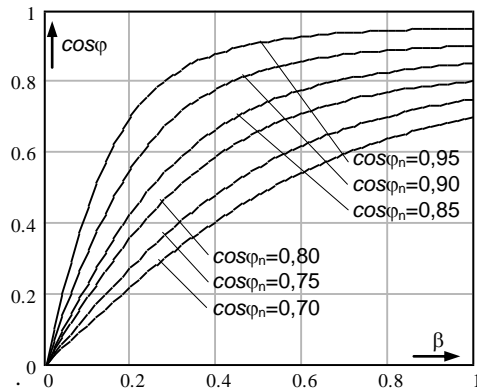


Fig.12.2 Caracteristicile $\cos\varphi=f(\beta, \cos\varphi_n)$

forma:

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

și din reprezentarea grafică (fig.12.2) rezultă că:

- factorul de putere scade rapid cu reducerea gradului de încărcare β , 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;

- dacă $\beta \leq 0,5$ atunci $Q_c \approx Q_0$ și puterea reactivă consumată este practic independentă de sarcina pe arbore și se poate considera $Q_0 \approx 0,8Q_n$. Această situație frecventă în exploatare, este generată de scara redusă de puteri nominale P_n și de funcționarea agregatelor la sarcini mult mai mici decât cele proiectate.

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.

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

$$Q_0 = 0,25fB^2 \frac{V_{Fe}}{\mu} = i_0 \cdot S_n \cong 0,08 \cdot S_n$$

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 β , 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.

La **liniile electrice de transport și distribuție** a energiei electrice, consumul propriu de putere reactivă este dat de:

$$\Delta Q = \Delta Q_L - \Delta Q_C, \text{ cu:}$$

$$\Delta Q_L = 3X_L I^2 = 3X_L (I_a^2 + I_r^2) = \frac{X_L P^2}{U^2} + \frac{X_L Q^2}{U^2} \quad \Delta Q_C = 3X_C I^2 = 3 \frac{U_n^2}{X_C}$$

ΔQ_L - consumul propriu de putere reactivă, datorat inductivității proprii L și proporțional cu pătratul puterii reactive Q vehiculate la transportul aceleiași puteri active P ;

ΔQ_C - puterea reactivă generată datorată capacității proprii C , mărime proporțională cu pătratul tensiunii de lucru U_n .

Linii electrice aeriene ce lucrează la $U_n \leq 150 \text{ kV}$ și $\beta \approx 1$ au un caracter inductiv cu $\Delta Q > 0$ și factorul de putere scade în sensul consumator → centrală, iar dacă $U_n > 150 \text{ kV}$ sau $U_n = 110 \text{ kV}$ și gradul de încărcare este redus, comportamentul liniei este capaciv cu $\Delta Q < 0$.

Receptoarele deformante solicită din sistem atât putere reactivă, cât și deformantă. Din punct de vedere al puterii deformante, elementele componente ale sistemului electroenergetic pot fi:

- de *prima speță* sau *neliniare*: linii de transport supradimensionate, transformatoare de sudare, cuptoare cu arc, surse de lumină luminescente, bobine cu miez de fier saturat etc.;

- de *speța a doua* sau *liniare* care, în prezența bobinelor de reactanță, amplifică regimul deformant prin generarea de curenți distorsionați, chiar dacă tensiunile de alimentare sunt sinusoidale (de exemplu, condensatoarele statice).

Efectele regimului deformant sunt aceleași indiferent de încărcarea rețelei (simetrică sau nu) și statisticile recente arată o creștere semnificativă a puterii instalate în receptoarele deformante ale marilor consumatori industriali.

3. Efectele unui factor de putere redus

Funcționarea instalațiilor electrice ale consumatorului la un factor de putere redus prezintă o serie de dezavantaje pentru sistemul electroenergetic național, dintre care menționăm: creșterea pierderilor de putere activă în rețelele de transport și distribuție a energiei electrice, majorarea pierderilor de tensiune în rețelele electrice, investiții suplimentare în sistem etc.

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

$$\Delta P = 3RI^2 = \frac{RS^2}{U^2} = \frac{RP^2}{U^2} \frac{1}{\cos^2 \varphi}$$

și se observă că variază invers proporțional cu pătratul factorului de putere la $P=ct.$ și $U=ct.$ Astfel, dacă aceiași putere activă P este transportată sub factori de putere diferiți $\cos \varphi_1 < \cos \varphi_2$, atunci pierderile de putere ΔP_1 și ΔP_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.

Pierderile de putere ΔP_a și ΔP_{rd} cauzate de transportul puterilor active, respectiv reactive și deformante au expresii ce rezultă din:

$$\Delta P = \frac{RP^2}{U^2} \frac{1}{\cos^2 \varphi} = \frac{RP^2}{U^2} + \frac{RQ^2}{U^2} = \Delta P_a + \Delta P_{rd}$$

$$\Delta P_{rd} = \Delta P - \Delta P_a = \frac{RP^2}{U^2} \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1 \right)$$

și deci termenul ΔP_{rd} crește rapid cu scăderea factorului de putere.

b) *Pierderile de tensiune* în rețelele de distribuție variază direct proporțional cu puterea reactivă la aceeași putere activă transportată deoarece:

$$\Delta U = \sqrt{3}RI \cos \varphi + \sqrt{3}XI \sin \varphi = \frac{R}{U}P + \frac{X}{U}Q = \Delta U_a + \Delta U_{rd}$$

unde: ΔU_a , ΔU_{rd} sunt căderile de tensiune active, respectiv reactive și deformante.

La liniile electrice aeriene subîncărcate sau cu tensiunii de peste 110 kV, pierderile de tensiune se transformă în creșteri de tensiune deoarece $\Delta Q_L < \Delta Q_C$ ceea ce conduce la $\Delta U = \Delta U_a - \Delta U_{rd} < 0$.

c) *Capacitatea de încărcare* cu putere activă a rețelelor electrice este diminuată de un factor de putere scăzut. Astfel, la aceeași putere aparentă S

corespund mai multe puteri active $P_1 = S \cos \varphi_1$, $P_2 = S \cos \varphi_2$ funcție de valoarea factorului de putere. Dacă $\cos \varphi_1 > \cos \varphi_2$ vom avea:

$$P_2 = \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} P_1$$

de unde rezultă creșterea puterii active $P_2 > P_1$ prin reducerea consumului de putere reactivă.

d) *Sporirea investițiilor* în liniile de transport și distribuție a energiei electrice care funcționează la un factor de putere scăzut se explică prin aceea că linia se dimensionează la pierderea de tensiune admisibilă și se verifică la încălzire în regim de durată.

Dacă avem în vedere expresia pierderilor de tensiune admisibile $\Delta U_{ad} = \Delta U_a + \Delta U_{rd}$, a căror mărime este normalizată, atunci la P și Q dați rezultă $\Delta U_{rd} = X \cdot Q / U_n = ct.$, ceea ce conduce la:

$$\Delta U_a = \Delta U_{ad} - \Delta U_{rd} = \rho \frac{L}{s} \frac{P}{U_n} = ct. \text{ sau } s = \rho \frac{L}{\Delta U_a} \frac{P}{U_n};$$

unde: L – lungimea liniei; s – secțiunea conductorului de fază; ρ - rezistivitatea materialului conductor; P – puterea activă vehiculată.

Pentru o putere activă dată, investițiile în centralele electrice sunt invers proporționale cu pătratul factorului de putere, iar puterea aparentă instalată variază invers proporțional cu factorul de putere.

e) *Regimul deformant* generat de receptoarele consumatorului conduce atât la scăderea factorului de putere (apare D în componența lui S), cât și la o serie de efecte negative, cum ar fi: amplificarea armonicilor de tensiune și curent, pierderi suplimentare de tensiune și putere (cresc termenii ΔU_{rd} și ΔP_{rd}), fenomene de rezonanță armonică, cupluri parazite de frânare în motoarele electrice etc.

Rezonanța de curent are ca efect, printre altele, supraîncărcarea sau distrugerea bateriilor de condensatoare atunci când armonicile de rang 5, 7, 11 sau 13 sunt importante. Rezonanța de tensiune, asociată în general celei de curent, suprasolicită izolația cablurilor și dielectricul condensatoarelor. În cazul cablurilor de energie, armonicile de rang superior majorează pierderile prin efect Joule-Lenz și accelerează efectele de coroziune.

Dezavantajele regimului deformant pot fi practic înlăturate dacă în etapa de proiectare se estimează fenomenele de rezonanță și amplificarea acestora, ceea ce va permite o dimensionare corespunzătoare a filtrelor de armonici.

4. Mijloace naturale de ameliorare a 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 trebuie să vizeze două aspecte 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 statice.

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

- încărcarea cât mai aproape de sarcina nominală a motoarelor asincrone;
- alimentarea cu tensiune redusă a motoarelor asincrone subîncărcate, prin trecerea de la conexiunea triunghi la conexiunea stea a înfășurărilor;
- înlocuirea receptoarelor supradimensionate (motoare asincrone, transformatoare) cu altele de puteri mai mici;
- înlocuirea motoarelor asincrone cu motoare sincrone, dacă procesul tehnologic o permite și puterile instalate sunt mai mari de 100 kW;
- funcționarea transformatoarelor trifazate după graficul de pierderi minime;
- folosirea optimă a capacității de compensare a motoarelor sincrone;
- perfecționarea procesului tehnologic (încărcare, întreținere, reparații) și evitarea mersului la gol, în vederea îmbunătățirii regimului energetic;
- configurația rețelelor de alimentare și distribuție să conducă la pierderi minime și la un factor de putere ridicat.

4.1 Mijloacele naturale de ameliorare în cazul motoarelor asincrone

a) *Înlocuirea motoarelor electrice supradimensionate* 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, cele cu $\beta \geq 0,7$ sau care funcționează sub 1500 ore/an nu se înlocuiesc, iar pentru cele cu $\beta = 0,45..0,7$ se impune un calcul tehnico-economic pe baza căruia se ia decizia de înlocuire sau nu.

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 supraexcitat la un factor de putere activ de 0,8.

b) *Alimentarea motoarelor asincrone cu tensiune redusă* constă în comutarea conexiunilor înfășurărilor statorice din triunghi (Δ) 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.

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

$$M_{k\Delta} \cong 2M_{n\Delta} \quad M_{kY} \cong 2M_{nY} = \frac{2}{3} M_{n\Delta}$$

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

$$M_{\max} \leq \frac{M_{kY}}{1,5} = \frac{2}{1,5 \cdot 3} M_{n\Delta} \cong 0,44M_{n\Delta}$$

pentru un coeficient de siguranță de 1,5.

Randamentul electric η la o încărcare β a motorului de acționare va fi:

$$\eta = \frac{P_s}{P_c} = \frac{P_s}{P_s + p_0 + \beta^2 p_{vn}} = \frac{\beta \cdot P_n}{\beta \cdot P_n + p_{vn}(\gamma + \beta^2)} = \frac{\beta}{\beta + \chi(\gamma + \beta^2)}$$

cu: p_0 – pierderile de mers în gol ale motorului, constante la o conexiune dată;

p_{vn} – pierderile variabile ale motorului la sarcină nominală;

$P_n = p_0 + p_{vn} = (1 - \eta_n)P_n / \eta_n$ - pierderile nominale de putere;

$\gamma = p_0 / p_{vn}$ - raportul pierderilor constante și variabile;

$\chi = \frac{1 - \eta_n}{(1 + \gamma) \cdot \eta_n}$ - constantă de calcul pentru o conexiune dată a înfășurărilor.

Randamentul și factorul de putere pentru un motor care lucrează în

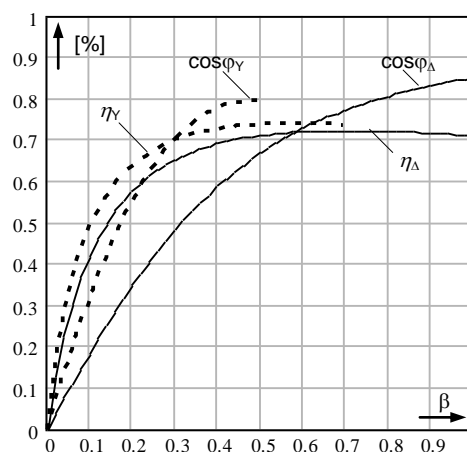


Fig.12.3 Curbele $\eta = f(\beta)$ și $\cos \varphi = f(\beta)$ pentru conexiunile stea și triunghi ale înfășurărilor statorice

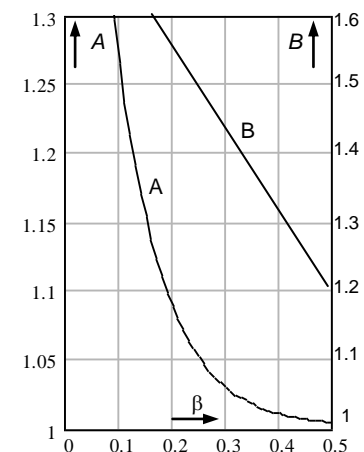


Fig.12.4 Curbele $A=f(\beta)$ și $B=f(\beta)$ pentru motoarele asincrone cu rotorul în scurtcircuit

conexiunea stea sau triunghi a înfășurărilor statorice prezintă valori diferite (fig.12.3) 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.12.4) este supraunitar în domeniul $\beta \leq 0,5$ și care se recomandă pentru conexiunea stea.

Funcția $B = \cos \varphi_Y / \cos \varphi_\Delta$ este descrisă cu suficientă aproximație de relația:

$$B \cong (3,7 - 2,66 \cdot \beta) \cdot (1,35 - \cos \varphi_n)$$

dedusă pe baza determinărilor experimentale.

4.2 Mijloacele naturale de ameliorare în cazul transformatoarelor

La transformatoarele trifazate cu două înfășurări ce funcționează în paralel, se poate stabili un grafic de conectare al acestora astfel încât să se obțină un minim pentru pierderile totale de putere:

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

cu: $\Delta P_{Fe} = \Delta P_0 + k_Q \cdot \Delta Q_0 = \Delta P_0 + k_Q \cdot i_0 \cdot S_n$ - pierderi de putere la funcționarea în gol a transformatorului;

$\Delta P_{Cu} = \Delta P_{sc} + k_Q \cdot \Delta Q_{sc} = \Delta P_{sc} + k_Q \cdot u_{sc} \cdot S_n$ - pierderi de putere la funcționarea în sarcină nominală a transformatorului;

$\Delta P_0, \Delta Q_0$ - pierderi de putere activă/reactivă la mersul în gol;

$\Delta P_{sc}, \Delta Q_{sc}$ - pierderi de putere activă/reactivă la scurtcircuit;

k_Q - echivalentul energetic al puterii reactive definit ca puterea activă necesară transportului unei unități de putere reactivă de la sursă până la punctul de utilizare, [kW/kVAr];

S - puterea aparentă vehiculată prin transformator;

$\beta = S/S_n$ - gradul de încărcare al transformatorului;

$a = \Delta P_{Fe}$ $b = \Delta P_{Cu} / S_n^2$ - notații de calcul.

Conectarea-deconectarea transformatoarelor se face conform graficului de pierderi minime totale care, pentru două transformatoare de puteri diferite are forma din fig.12.5. Determinarea puterii aparente S de la care se deconectează un transformator și se conectează celălalt se poate stabili și analitic.

Dacă $S_{n1} < S_{n2}$ sunt puterile nominale ale transformatoarelor T_1 și T_2 , atunci pierderile de putere la funcționarea individuală ($\Delta P_{t,1}$, respectiv $\Delta P_{t,2}$) sau în paralel ($\Delta P_{t,12}$) vor fi:

$$\Delta P_{t,1} = a_1 + b_1 S^2, \quad \Delta P_{t,2} = a_2 + b_2 S^2 \quad \text{și} \quad \Delta P_{t,12} = a_{12} + b_{12} S^2$$

Sarcina S de la care trebuie deconectat T_1 și conectat T_2 respectiv funcționarea în paralel $T_1 || T_2$,

$$S \geq \sqrt{\frac{a_2 - a_1}{b_1 - b_2}} \quad \text{pentru} \quad \Delta P_{t,1} \geq \Delta P_{t,2} \quad \text{și} \quad S \geq \sqrt{\frac{a_{12} - a_2}{b_2 - b_{12}}} \quad \text{pentru} \quad \Delta P_{t,2} \geq \Delta P_{t,12}$$

Graficul de pierderi minime (fig.10.5) include și curbele de variație ale pierderilor reactive totale:

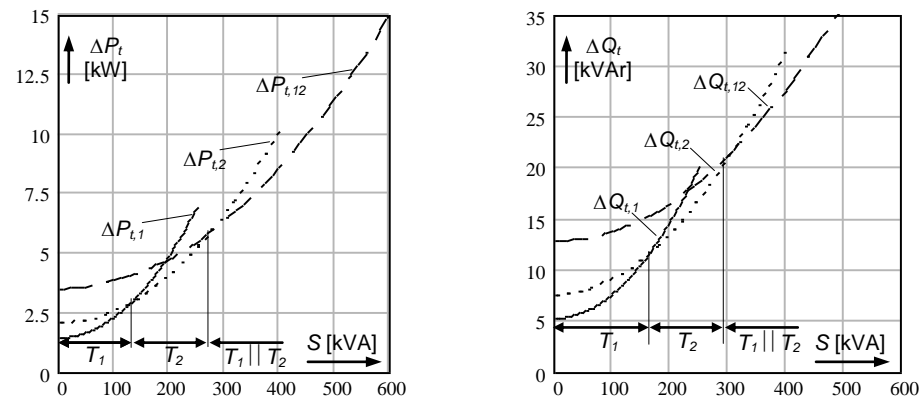


Fig.12.5 Graficul de pierderi minime totale active $\Delta P_t=f(S)$ și reactive $\Delta Q_t=f(S)$

$$\Delta Q_t = \Delta Q_0 + \frac{S^2 \Delta Q_{sc}}{S_n^2}$$

5. Mijloace speciale de ameliorare a factorului de putere

Compensarea factorului de putere se realizează, la puteri reactive cerute mici și medii, prin conectarea de baterii de condensatoare, iar la puteri mari prin compensatoare sincrone.

În rețele electrice de alimentare a consumatorilor de energie electrică, unele receptoare (transformatoare, motoare asincrone, montaje cu lămpi cu descărcare, etc.) absorb din rețea un curent inductiv, defazat în urma tensiunii.

O metodă pentru ameliorarea factorului de putere a unui **receptor monofazat inductiv** este folosirea unui condensator, conectat la bornele sale.

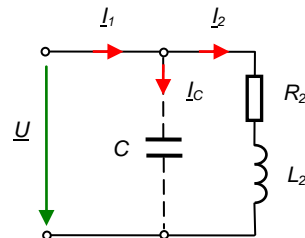
În Figura 12.6 este prezentat un receptor inductiv, de parametri R_2 și L_2 , care absoarbe putere reactivă.

Curentul prin sarcină, în cazul în care nu este conectat condensatorul electric C , este:

$$I_2 = I_1 = \frac{U}{R_2 + j\omega L_2} = \frac{U}{Z_2} e^{-j\varphi_2},$$

$$\text{unde:} \quad Z_2 = R_2 + j\omega L_2 = Z \cdot e^{j\varphi_2}.$$

Fig. 12.6 Ameliorarea factorului de putere la un receptor monofazat



Curentul absorbit de la sursă, care străbate linia de distribuție, este defazat în urma tensiunii cu unghiul $\varphi = \varphi_2$. Acest unghi este cu atât mai apropiat de $\pi/2$ radiani cu cât valoarea lui L_2 este mai mare și a lui R_2 este mai mică.

În practică, de regulă nu se cunosc parametrii R_2 și L_2 ai sarcinii. În acest caz, se măsoară puterea activă P_2 absorbită de sarcină, precum și U și I_2 .

$$\text{Din: } P_2 = U \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \quad (1)$$

rezultă $\cos \varphi_2$, apoi φ_2 .

Dacă se conectează condensatorul electric de capacitate C la bornele receptorului:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_2 + I_C = \frac{U}{Z_2} + \frac{U_2}{1} = U \cdot \left(\frac{1}{R_2 + j\omega \cdot L_2} + j\omega \cdot C \right) = \\ &= U \cdot \left[\frac{R_2}{R_2^2 + (\omega \cdot L_2)^2} + j\omega \cdot \left(C - \frac{L_2}{R_2^2 + (\omega \cdot L_2)^2} \right) \right] \end{aligned}$$

$$\text{Dacă } C = \frac{L_2}{R_2^2 + \omega^2 \cdot L_2^2} \quad (2)$$

curentul I_1 are același argument cu U , deci unghiul de fazaj între aceste semnale este nul.

Dacă se folosește un condensator de capacitate având valoarea cât mai apropiată de cea rezultată din relația (2), diagrama fazorială a circuitului este reprezentată în Figura 12.7.

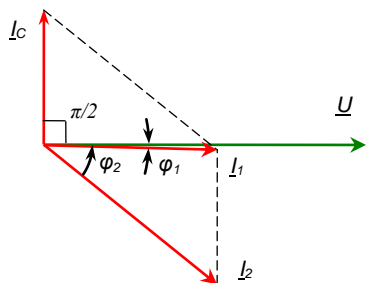


Fig. 12.7 Diagrama fazorială

deci prin creșterea factorului de putere de la valoarea $\cos \varphi_2$ la valoarea $\cos \varphi_1$, curentul absorbit scade de la valoarea I_2 la valoarea I_1 .

Pentru a stabili valoarea capacității condensatorului se poate observa că:

$$I_C = I_2 \cdot \sin \varphi_2 - I_1 \cdot \sin \varphi_1 \quad (5)$$

$$\text{și că: } I_C = \omega \cdot C \cdot U \quad (6)$$

Prin folosirea relațiilor (1), (3), (5) și (6) se obține:

$$C = \frac{P_2}{\omega \cdot U^2} (\text{tg} \varphi_2 - \text{tg} \varphi_1) \quad (7)$$

Puterea reactivă furnizată de condensator este:

$$Q_c = U \cdot I_c = \omega C U^2 = P_2 (\text{tg} \varphi_2 - \text{tg} \varphi_1) \quad (8)$$

În cazul unui **receptor trifazat inductiv**, ameliorarea factorului de putere se realizează prin conectarea la bornele receptorului a unei grupări de condensatoare, în conexiune stea sau triunghi (figura 12.8).

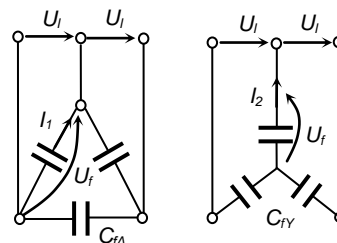


Fig. 12.8 Conexiunile condensatoarelor

În cazul conexiunii în triunghi:

$$Q_\Delta = 3U_f \cdot I_1 = 3U_f \omega C_\Delta U_f = 3\omega C_\Delta U_f^2$$

În cazul conexiunii în stea:

$$Q_Y = 3U_f \cdot I_2 = 3U_f \omega C_Y U_f = 3\omega C_Y U_f^2 = \omega C_Y U_f^2$$

Se observă că dacă se folosesc aceleași condensatoare ($C_Y = C_\Delta$), conexiunea în triunghi este mai avantajoasă, oferind o putere reactivă de trei ori mai mare decât conexiunea în stea.

Tensiunea electrică la care este supus

fiecare condensator este de $\sqrt{3}$ ori mai mare la conexiunea în triunghi, de aceea la tensiuni mari se preferă conexiunea stea.

Dacă Q_{nc} este puterea reactivă nominală a condensatorului unitar, numărul de condensatoare ce formează bateria de condensatoare este:

$$n = \frac{Q_c}{Q_{nc}}$$

unde Q_c este puterea reactivă cerută de receptorul inductiv (ce respectă relația (8), în care P_2 reprezintă puterea activă trifazată).

Dacă tensiunea rețelei U_r este diferită de cea nominală U_{nc} a condensatoarelor, puterea acestora va fi corectată conform relației:

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

Alte metode de ameliorare a factorului de putere:

- conectarea la barele de alimentare a consumatorilor inductivi importanți a motoarelor sincrone supraexcitate funcționând fără cuplu rezistent la arbore (motor în regim de gol) - așa numitul *compensator sincron*, care generează putere reactivă. Soluția se adoptă în rețele electrice de tensiuni medii sau înalte pentru situația în care consumul de putere reactivă este foarte ridicat (peste 50 MVar), dacă consumatorul are receptoare deformante și necesită compensarea unor puteri ce depășesc 10...20 MVar sau dacă apar variații foarte rapide ale sarcinii reactive (cum ar fi la cuptoarele electrice cu arc).

- acționarea electrică a unor utilaje de puteri foarte mari (peste 100 kW) cu motoare sincrone funcționând în regim neutral (neconsumatoare de putere reactivă), în locul motoarelor asincrone (consumatoare de putere reactivă importantă).

6. Desfășurarea aplicației

6.1 Se va studia compunerea standului de probă din laborator.

Standul de probă pentru studiul este realizat cu două motoare asincrone MA_1 , MA_2 , de același tip, cuplate ax în ax și încărcate cu ajutorul unei frâne Prony. Motoarele pot funcționa în conexiune stea sau în conexiune triunghi.

Standul este dotat cu aparate de măsură pentru citirea următoarelor mărimi: tensiunile de fază și de linie ale rețelei, intensitatea curentului electric de linie, intensitatea curentului electric de fază, puterea electrică activă trifazată, intensitatea curentului continuu de alimentare a frânei Prony, factorul de putere.

Instalația permite comanda alimentării motoarelor asincrone în conexiunea stea sau triunghi, încărcarea motoarelor la diferite valori ale factorului de încărcare β , realizarea a două variante de compensare a factorului de putere prin conectarea de condensatoare la bornele receptoarelor cu consum de putere reactivă. Semnalizarea diferitelor regimuri de funcționare se realizează prin lămpi de semnalizare.

6.2 Se va studia schema electrică a instalației.

Schema electrică este prezentată în cadrul planșei 1. Funcționarea schemei electrice este prezentată, succint, în continuare.

După închiderea întrerupătorului general a_1 de pe tabloul de alimentare a standului, se apasă butoanele b_{p1} și b_{p2} de pornire a motoarelor MA_1 și MA_2 în conexiune stea. Sunt alimentate bobinele contactoarelor K_1 și K_3 în circuitele 16 și 22. Contactele principale K_1 și K_3 în circuitele trifazate 6 și 7 se vor închide pregătind alimentarea motoarelor. Se închid contactele auxiliare K_1 și K_3 în circuitele 17 și 23, cu rol de automenținere a alimentării bobinelor contactoarelor, dar și în circuitele 18 și 24, pentru alimentarea bobinelor contactoarelor K'_1 și K'_3 . Aceste contactoare vor anclanșa, iar prin închiderea contactelor principale K'_1 și K'_3 în circuitele trifazate 6 și 7 (pentru realizarea conexiunii în stea a motoarelor) motoarele vor porni în conexiune stea. Curentul de linie se măsoară cu ampermetrul A_2 , iar curentul de fază al unui motor (MA_1) cu ampermetrul A_1 . În această etapă, comutatorul b_2 este pe poziția 0, iar instalația nu beneficiază de ameliorarea factorului de putere.

Pentru încărcarea motoarelor se apasă butonul b_{p5} din circuitul de comandă 31. Contactorul K_8 anclanșează și se vor închide contactele principale K_8 din circuitul de forță 1. Prin bobinele F ale frânei Prony va trece un curent continuu, reglabil cu ajutorul potențiometrului de putere P . Acest curent este măsurat de ampermetrul A_3 . Se obțin astfel diferite valori ale factorului de încărcare β a motoarelor.

Pentru trecerea funcționării motoarelor în conexiune triunghi se apasă simultan butoanele b_{p2} și b_{p4} . Contactele lor, normal închise, din circuitele 18 și 24 se vor deschide (determinând declanșarea contactoarelor K'_1 și K'_3 , deschizând conexiunile în stea) și se vor închide contactele butoanelor în circuitele 20 și 26. În acest fel sunt alimentate bobinele contactoarelor K_2 și K_4 , care prin contactele lor principale (în circuitele de forță 6 și 7) vor realiza conexiunea în triunghi a înfășurărilor motoarelor. Contactele auxiliare normal deschise K_2 și K_4 din circuitele 21 și 27 vor asigura automenținerea alimentării bobinelor contactoarelor la revenirea după apăsare a butoanelor b_{p2} și b_{p4} , iar contactele auxiliare normal închise K_2 și K_4 din circuitele 18 și 24 vor bloca realimentarea bobinelor K'_1 și K'_3 la revenirea aceluiași butoane.

Creșterea încărcării unui motor peste o valoare maxim admisă este sesizată de relele termice BRT_1 , respectiv BRT_2 , care își vor deschide contactele lor din circuitele 16, respectiv 17, conducând la deconectarea motorului supus la suprasarcină.

Pentru a realiza o primă variantă de compensare a puterii reactive, după valoarea efectivă a curentului de linie, se trece comutatorul b_2 pe poziția 1, care realizează închiderea contactului A-B în circuitul 28. Dacă curentul absorbit de la rețea depășește valoarea reglată a releului maximal de curent RI_1 , contactul său din circuitul 28 se va închide, iar prin anclanșarea contactorului K_5 și a contactelor lui din circuitul 3 se va conecta o primă treaptă a unei baterii de condensatoare. Dacă curentul de linie depășește și valoarea reglată a releului RI_2 , prin anclanșarea contactorului K_6 și închiderea contactelor lui din circuitul 4, se va conecta și treapta a doua a bateriei de condensatoare. La micșorarea curentului de linie va declanșa RI_2 , apoi RI_1 , deci se vor deconecta treptele bateriei.

Ameliorarea factorului de putere după valoarea efectivă a curentului de linie poate fi aplicată la nivelul tablourilor de distribuție, doar pentru un receptor sau grup de receptoare care funcționează simultan și în conexiune permanentă, la care se poate stabili o corelație între factorul de putere și valoarea efectivă a curentului de linie.

Instalația din laborator permite și ameliorarea factorului de putere după valoarea factorului de putere. Această metodă este cea mai fidelă, dar și cea mai complicată de implementat. Pentru activarea acestui regim se trece comutatorul b_2 pe poziția 2, prin care se închide contactul C-D din circuitul 28, permițând alimentarea bobinei contactorului K_7 (circuitul 30) și – prin contactele sale, K_7 - alimentarea primarului transformatorului de tensiune TT (circuitul 5), alimentarea celei de-a doua scheme de comandă (circuitele 33-46), precum și alimentarea blocului de control a automat BCA (întrerupătorul b_{11} este pe poziția închis).

BCA primește la intrare două semnale: un semnal de tensiune proporțional cu tensiunea fazei S (din secundarul TT) și un semnal de curent proporțional cu curentul pe faza S (din secundarul transformatorului de curent TC). Aceste semnale păstrează defazajul dintre tensiunea și curentul fazei S. În cadrul blocului BCA se stabilește valoarea unghiului de defazaj.

Funcționarea traductorului de defazaj cu medierea impulsurilor, prezentat principal în figura 12.9, se bazează pe sesizarea trecerilor prin zero ale tensiunii, respectiv curentului, și formarea unor impulsuri a căror arie este proporțională cu defazajul (figura 12.10). Cele două formatoare de impulsuri FI_1 și FI_2 asigură obținerea unor semnale dreptunghiulare, U_{11} și U_{12} , care, pe fiecare front (atât cel pozitiv, cât și cel negativ) comandă bistabilul multivibrator BS (un semnal îl inițializează, iar celălalt îl resetează), astfel că impulsurile obținute u_φ au lățimea defazajului temporal dintre tensiune și curent, iar amplitudinea riguros constantă U_0 .

Prin medierea acestor impulsuri de către dispozitivul de valori medii DVM se obține o tensiune proporțională cu defazajul, deoarece:

$$U_{DVM} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_\varphi \cdot dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^\varphi U_0 \cdot dt = \frac{U_0}{2\pi} \varphi$$

Această tensiune este mărime de intrare a patru blocuri de comparare $BC_1...$ BC_4 , ale căror referințe de tensiune $U_1 ... U_4$ au fost alese în mod crescător. Referințele de tensiune sunt realizate cu potențiometre (alimentate de la o sursă de tensiune continuă), având rolul de divizoare de tensiune.

În momentul în care potențialul bornei inversoare (-) depășește potențialul bornei neinversoare (+), ieșirea comparatorului respectiv comută de la nivel coborât la nivel ridicat. Sunt folosite patru circuite repetoare pe emitor $RE_1 \dots RE_4$ pentru adaptarea impedanței, iar la bornele 1, 2, 3 și 4 sunt conectate bobinele celor patru relee de comandă $1RI \dots 4RI$. Aceste relee, cu alimentare în curent continuu, au montate în paralel diode de descărcare (nefigurate).

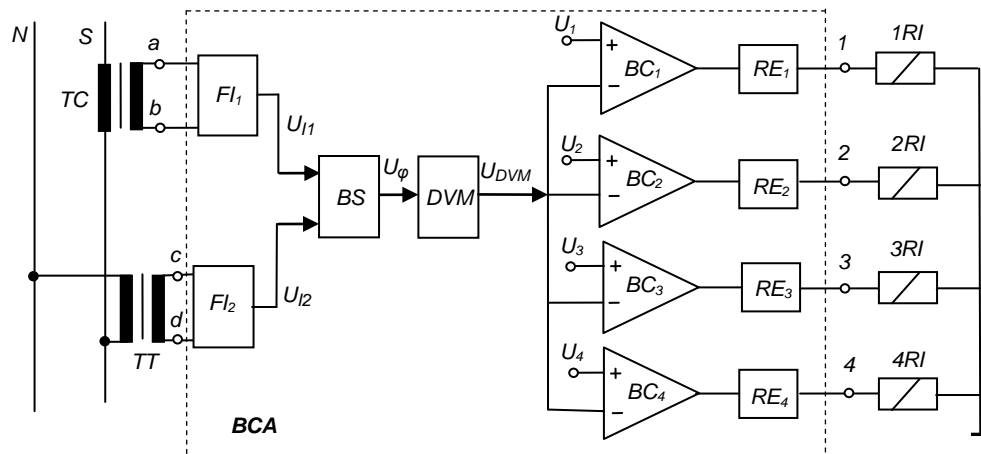


Fig. 12.9 Structura unui traductor de defazaj tensiune-curent

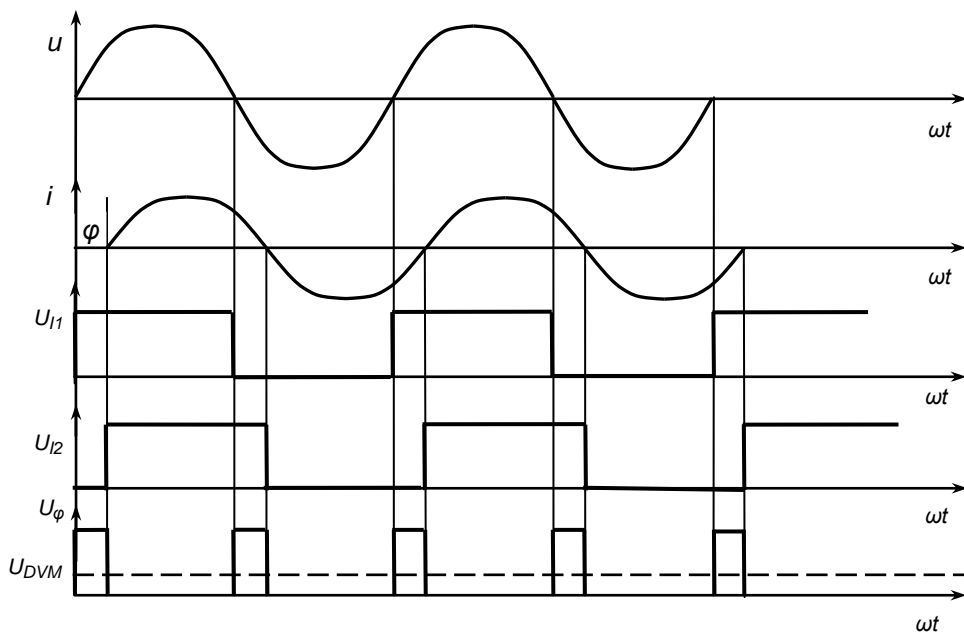


Fig. 12.10 Semnale caracteristice traductorului de defazaj

În funcție de valoarea factorului de putere, BCA (planșa 1) va avea potențial ridicat la unele dintre ieșirile sale: 1, 2, 3 și 4. Astfel, la creșterea defazajului dintre tensiune și curent, vor fi la potențial ridicat, în ordine, bornele: 1, 1+2, 1+2+3, 1+2+3+4. Vor fi alimentate, succesiv, bobinele releelor $1RI$, $2RI$, $3RI$ și $4RI$. Contactele acestora, din circuitele 39 ... 42, se vor închide și vor fi alimentate bobinele contactoarelor $K_9 \dots K_{12}$. Așadar, la creșterea defazajului și la scăderea factorului de putere, se vor conecta la bornele motoarelor, în mod succesiv, condensatoarele în conexiune triunghi: C_1 (circuitul 9), C_2 (circuitul 10), C_3 (circuitul 11) și C_4 (circuitul 12). Alimentarea succesivă a circuitelor 9 ... 12 se face temporizat, folosind relee de timp (nefigurate în cadrul planșei 1).

6.3 Se vor trasa caracteristicile: η_Y , η_Δ , $\cos \varphi_Y$, $\cos \varphi_\Delta$, A , $B = f(\beta)$

Ridicarea datelor experimentale se face în următoarea succesiune:

- se citesc de pe plăcuța mașinii datele nominale: P_n , U_n , I_n , n_n , $\cos \varphi_n$ corespunzătoare conexiunii triunghi a înfășurării statorice;
- se determină, din proba de mers în gol mărimile: p_{0Y} , I_{0Y} , $p_{0\Delta}$ și $I_{0\Delta}$;
- se determină, la diverse grade de încărcare β , puterile și curenții ceruți: P_{cY} , I_{cY} , $P_{c\Delta}$ și $I_{c\Delta}$;
- se calculează pierderile de putere în regim nominal:

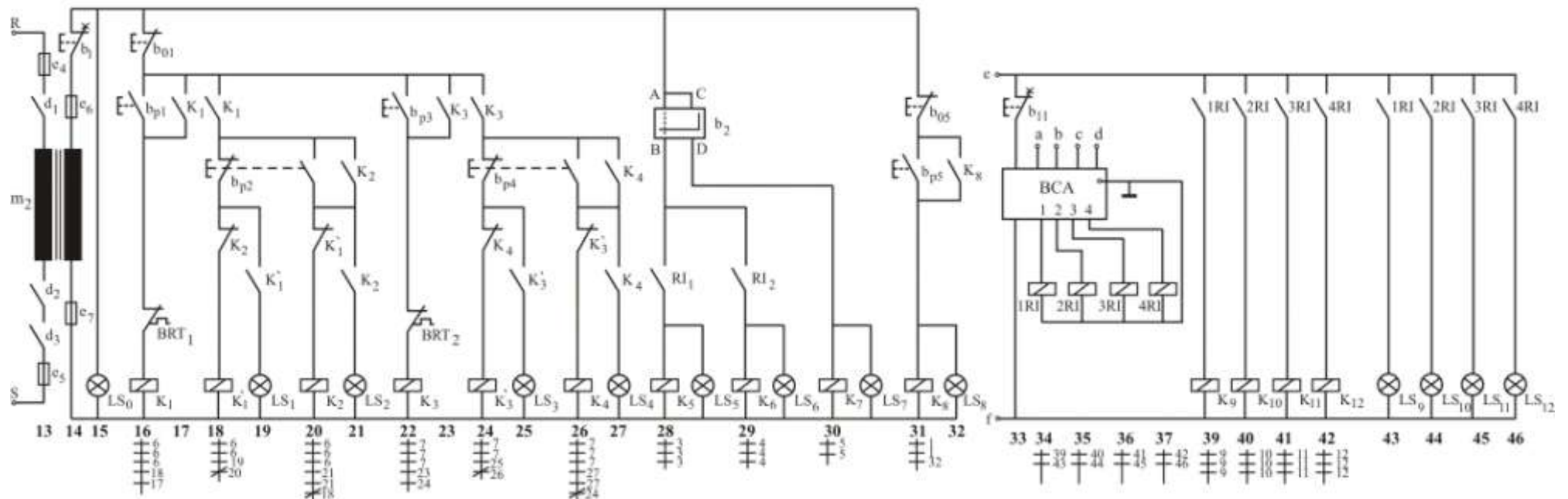
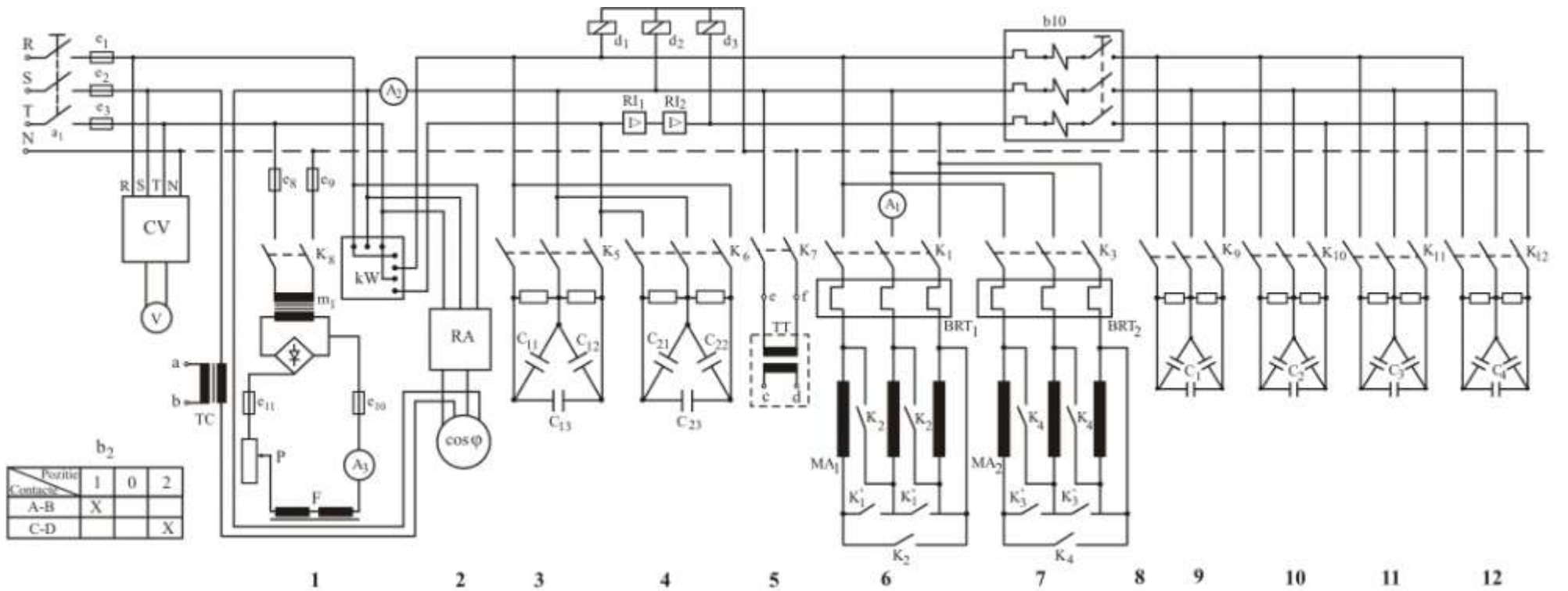
$$p_n = p_0 + p_{vn} = (1 - \eta_n)P_n / \eta_n$$
, $p_{vnY} = p_n - p_{0Y}$, $p_{vn\Delta} = p_n - p_{0\Delta}$
și rapoartele $\gamma_Y = p_{0Y} / p_{vnY}$, $\gamma_\Delta = p_{0\Delta} / p_{vn\Delta}$;
- se evaluează coeficientul de sarcină $\beta = P_c / (2 \cdot P_{cn})$, $P_{cn} = \sqrt{3}U_n I_n \cos \varphi_n$
- se calculează randamentul electric și factorul de putere la diverse grade de încărcare: $\eta_\beta = \beta / (\beta + \gamma(\gamma + \beta^2))$ și $\cos \varphi_\beta = P_c / (\sqrt{3}U_s I_c)$ în care γ depinde de conexiunea înfășurărilor.

6.4 Se realizează ameliorarea factorului de putere după valoarea efectivă a curentului și se calculează puterea reactivă introdusă de treptele bateriei de condensatoare, precum și valoarea capacităților. Pentru aceasta se trece comutatorul b_2 pe poziția 1 și se realizează creșterea gradului de încărcare până la anclanșarea releului RI_1 . Se citesc valorile mărimilor electrice. Se crește din nou factorul de încărcare β până la anclanșarea releului RI_2 . Se citesc din nou valorile mărimilor electrice.

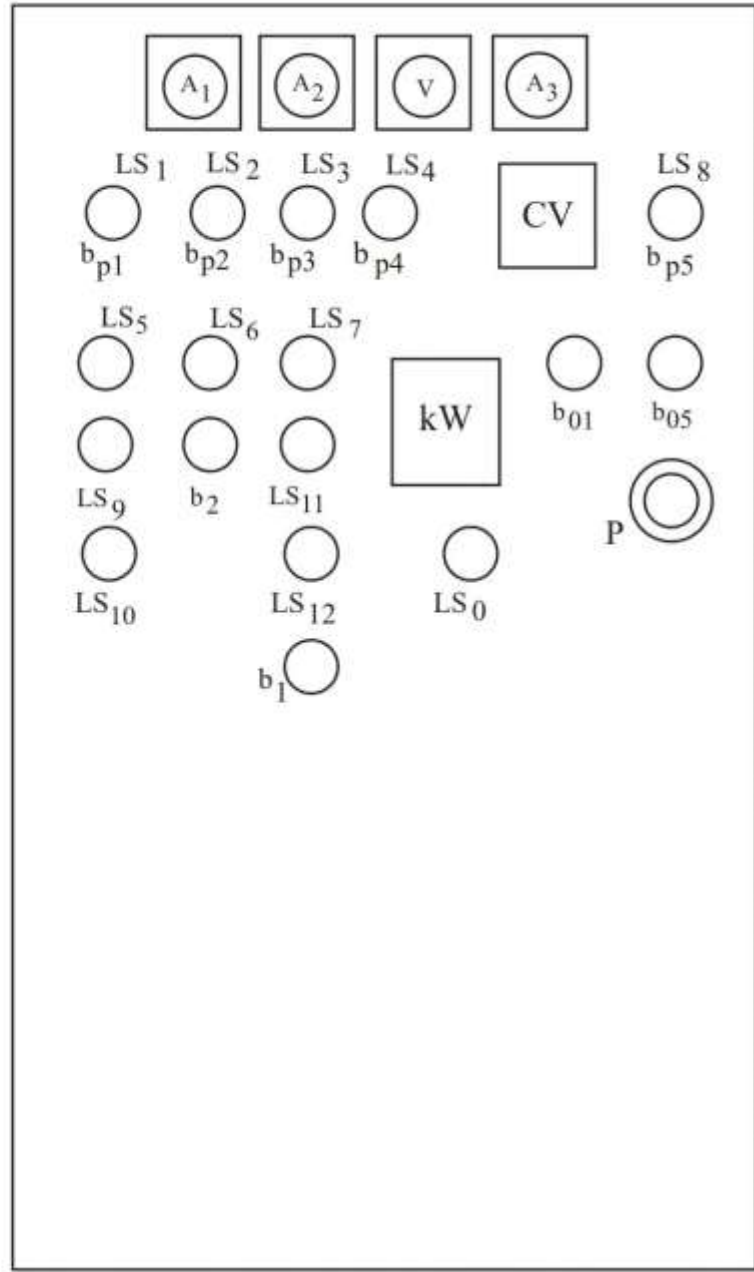
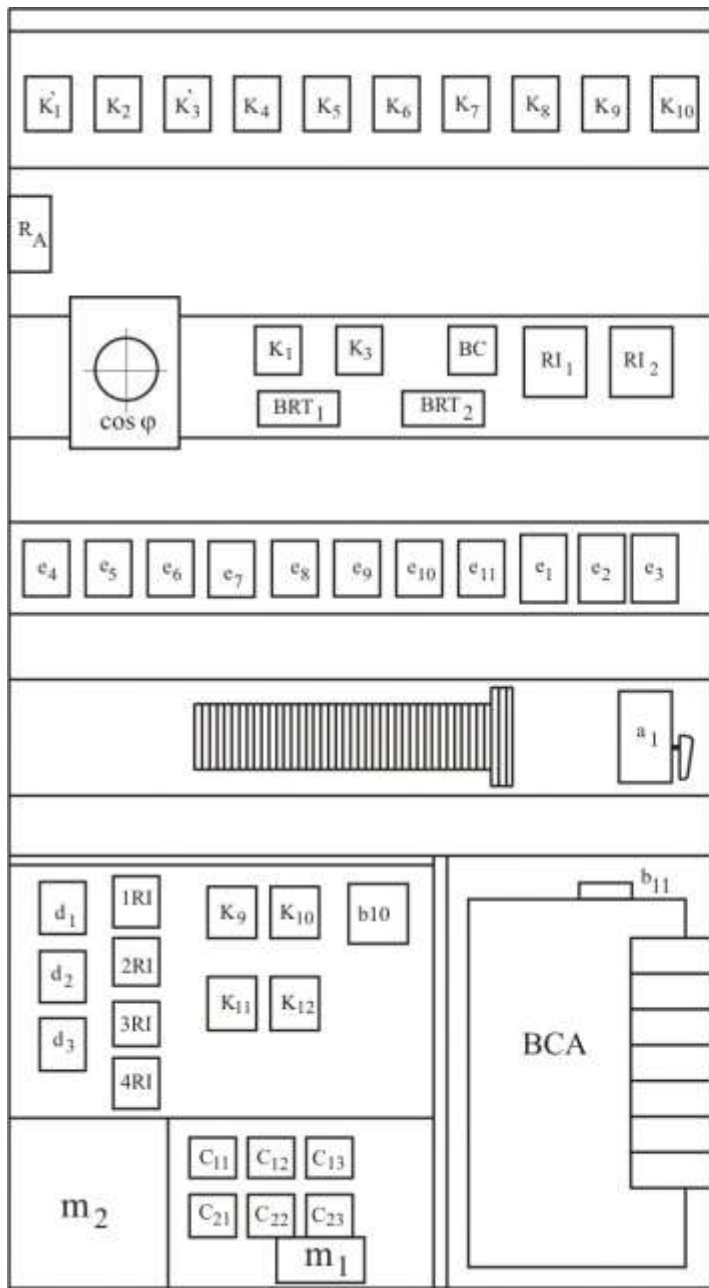
6.5 Se realizează ameliorarea factorului de putere după valoarea defazajului dintre tensiune și curent. Pentru aceasta se trece comutatorul b_2 pe poziția 2 și se modifică gradul de încărcare β până la cuplarea tuturor treptelor bateriei $C_1 \dots C_4$.

6.6 Se vor trasa curbele $\Delta Pt = f(S)$ și $\Delta Qt = f(S)$ pentru două transformatoare de puteri diferite;

6.7 Se consemnează concluziile studiului efectuat.



Planşa 1



Planşa 2

