

CAP.4. MĂSURĂRI ELECTRICE

4.1. Noțiuni generale.

Clasificarea instrumentelor de măsurat electrice se poate face după următoarele criterii: - după natura mărimii măsurate; - după natura curentului; - după gradul de precizie; - după principiul de funcționare, în funcție de sistemul utilizat etc..

După natura mărimii măsurate avem: ampermetre, voltmetre, wattmetre, varmetre, ohmmetre, etc..

După naturii curentului, instrumentele electrice se împart în: - instrumente de curent continuu, care pot fi folosite numai în circuitele de curent continuu; - instrumente de curent alternativ, care pot fi folosite numai în curent alternativ; - instrumente de curent continuu și alternativ, care pot fi folosite și în circuitele de curent continuu și în cele de curent alternativ.

După gradului de precizie, instrumentele pot avea următoarele clase de precizie: 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5

Prin clasa de precizie se înțelege eroarea relativă admisibilă tolerată (considerată pozitivă sau negativă) exprimată în procente, din valoarea maximă a mărimii măsurată de aparat. Astfel, dacă notăm cu c , clasa de precizie, putem scrie relația:

$$c = \frac{(\Delta X)_t}{X_n} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

unde $(\Delta X)_t$ reprezintă eroarea absolută tolerată, posibilă a aparatului care apare în condiții normale (adică aparatul se află așezat în poziția înscrisă pe cadranul aparatului, într-un mediu cu temperatura normală (20°) și nu se află sub influența câmpului magnetic exterior - afară de cel al pământului -).

X_n reprezintă valoarea nominală a mărimii măsurată de aparat, adică limita superioară de măsurare a aparatului.

După principiul de funcționare, aparatele de măsurat se împart în următoarele tipuri principale: aparate cu magnet permanent și bobină mobilă (magneto-electrice); aparate electromagnetice (cu fier mobil); aparate electrodinamice; aparate de inducție; aparate termice; aparate electrostatice; aparate cu termocuplu; aparate cu redresori; aparate de rezonanță (cu vibrații), etc..

Aparatele de măsurat au marcate pe cadranele lor simbolurile și indicațiile corespunzătoare atât felului lor de construcție, cât și felului

curentului în care se întrebuițează, modului de așezare pe masa de lucru, clasei de precizie din care fac parte, etc.

După modul de întrebuițare aparatele electrice de măsură se împart în: aparate fixe, care sunt montate rigid pe locul de funcționare, de exemplu pe tablourile electrice și aparate mobile, care pot fi transportate dintr-un loc în altul după necesități.

Cele mai utilizate aparate analogice de măsură sunt: aparatele magnetoelectrice; aparate electromagnetice; aparate electrodinamice; aparate de inducție; aparate termice; aparate termoelectrice, etc..

Aparatele magnetoelectrice se folosesc numai pentru măsurarea mărimilor de c. c., cum ar fi; tensiune; intensitate de curent electric; rezistențe electrice, etc.. Dacă sunt dotate cu dispozitive de redresare pot fi utilizate și în c.a.

Aparatele magnetoelectrice au următoarele calități: - au o scară uniformă, ceea ce înlesnește citirea și mărește precizia citirii; - sunt foarte sensibile, putând măsura valori extrem de mici ale mărimilor respective; - sunt practic insensibile față de câmpurile magnetice exterioare; - au un consum redus de energie.

Ca un neajuns de seamă al acestor aparate, se poate evidenția, sensibilitatea deosebită la suprasarcini.

Aparatele electromagnetice se pot folosi pentru măsurarea tensiunilor electrice, a intensităților curenților electrici, a impedanțelor, a factorului de putere, etc.. Ele au o serie de calități: sunt simple și robuste; sunt rezistente la suprasarcini; pot fi folosite în *curent continuu* și în *curent alternativ*; pot fi construite pentru curenți mari. Au însă și o serie de neajunsuri: precizie redusă; scala neuniformă; pot fi influențate de câmpurile magnetice exterioare. Fiind robuste și relativ ieftine, aparatele electromagnetice sunt aparatele de măsură cele mai răspândite, în special în curent alternativ și cu precădere ca aparate de tablou.

Aparate electrodinamice pot fi utilizate atât în c.c. cât și c.a. și se pot folosi pentru măsurarea tensiunilor electrice, a intensităților curenților electrici, a puterilor electrice, a factorului de putere, etc.. Principiul de funcționare al aparatelor de tip electrodinamic se bazează pe interacțiunea conductoarelor parcurse de curenți, adică pe apariția forțelor electrodinamice. Sunt sensibile la suprasarcină, întrucât curentul ce trece prin bobina mobilă trece și prin arcurile spirale (care se pot încălzi la suprasarcină până la limite periculoase).

4.2. Măsurarea mărimilor electrice

4.2.1. Măsurarea intensității curenților

Măsurarea intensității curentului se face cu ajutorul unui ampermetru intercalat în serie cu receptorul. La intercalarea aparatului în circuit, rezistența totală se mărește cu r_a – rezistența interioară a aparatului.

Intensitatea curentului inițial, este dată de relația: $I_0 = \frac{e}{R+r}$, unde r reprezintă rezistența interioară.

După intercalarea ampermetrului intensitatea curentului scade la

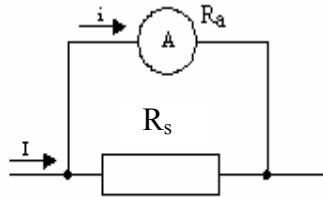


Fig. 4.1

valoarea: $I = \frac{e}{R+r+R_a}$. Diferența $I_0 - I = \Delta I$

reprezintă eroarea absolută datorată intercalării aparatului, eroare care este cu atât mai mică cu cât R_a are o valoare mai mică. Pentru a măsura intensități de curenți mai mari decât valoarea nominală i pe care o poate măsura ampermetrul, de

exemplu: $I = ni$, se leagă în paralel cu aparatul un rezistor R_s , numit șunt (fig.4.1), Numărul n , indică de câte ori se lărgeste domeniul de măsurare al ampermetrului.

Valoarea rezistenței șuntului se determină cu expresia:

$$R_s = \frac{R_a}{n-1} \quad (4.2)$$

În curent alternativ, pentru măsurarea curenților de intensități mari sau pentru măsurarea curenților din circuitele de înaltă tensiune se folosesc transformatoarele de intensitate.

4.2.2. Măsurarea tensiunilor.

Pentru măsurarea unei tensiuni sau a unei căderi de tensiune, se utilizează un voltmetru ce se leagă în paralel față de receptorul căruia i se măsoară tensiunea. Considerând rezistența interioară a voltmetrului r_v ,

rezistența echivalentă este: $R' = \frac{RR_v}{R+R_v}$

Adică $R' < R$ și deci în circuit intensitatea curentului se modifică

de la valoarea I dată de relația: $I = \frac{e}{R+r}$

la valoarea
$$I' = \frac{e}{R'+r}$$

Voltmetrul măsoară deci, căderea de tensiune $U' = R'I'$ și nu $U = RI$. Diferența $U - U' = \Delta U$ reprezintă eroarea absolută, care este egală cu:

$$\Delta U = RI - R'I' = \frac{Re}{R+r} - \frac{R'e}{R'+r}$$

Se observă că ΔU tinde către zero atunci când R' este apropiat de R , adică atunci când R_v tinde către infinit.

În concluzie, pentru ca un voltmetru să măsoare cât mai exact valoarea tensiunii, adică pentru ca eroarea relativă datorată intercalării aparatului în circuit să fie cât mai mică, trebuie ca rezistența interioară a aparatului să fie cât mai mare.

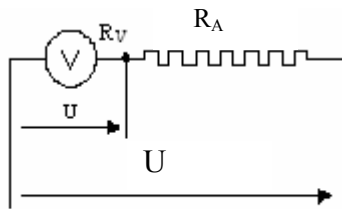


Fig.4.2

Pentru a lărgi domeniul de măsurare la un voltmetru, adică dacă un voltmetru poate măsura o tensiune nominală $u = R_v i$ și dorim să măsoare o tensiune $U = nu$ (n -un număr care reprezintă de câte ori se mărește domeniul de măsură), atunci în serie cu voltmetrul trebuie să se pună un rezistor a cărui rezistență R_A o vom numi rezistență adițională (fig.4.2.).

Din relația: $U = u + R_A i$, rezultă:

$$R_A = R_v (n-1) \quad (4.3)$$

Pentru măsurarea tensiunilor alternative mari, se folosesc transformatoare de tensiune.

În practică se întâlnesc foarte frecvent aparate universale, care măsoară curenți, tensiuni și rezistențe, numite avometre sau voltampermetre.

4.2.3. Măsurarea rezistențelor

Există mai multe metode pentru măsurarea rezistențelor și anume:

- metode indirecte (cu ampermetru și voltmetru);
- metode directe (cu ohmmetrul sau cu circuite în punte);

4.2.3.1 Metoda ampermetrului și voltmetrului

Această metodă constă în măsurarea intensității curentului continuu ce trece prin rezistorul de rezistență necunoscută R_x și a tensiunii de la bornele rezistorului. Făcând raportul U_x/I_x se determină R_x , însă meto-

da este afectată de o eroare datorită intercalării în circuit a aparatelor de măsură. După modul de conectare a ampermetrului și voltmetrului în schema de măsură, se deosebesc două montaje:

- **montajul aval** (fig.4.3), în care voltmetrul măsoară exact tensiunea de la bornele rezistorului de rezistență R_x ;

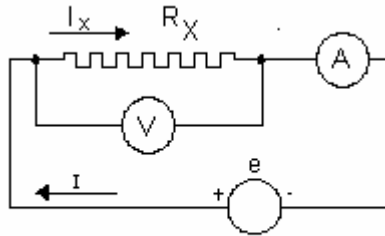


Fig.4.3

- **montajul amonte** (fig.4.4), în care ampermetrul măsoară exact curentul ce trece prin rezistor.

În cazul montajului aval, valoarea exactă a rezistenței R_x se va calcula cu ajutorul relației:

$$R_x = \frac{U}{I - \frac{U}{r_v}} \quad (4.4)$$

În cazul montajului amonte, valoarea exactă a rezistenței R_x se va calcula cu relația:

$$R_x = \frac{U - r_a I}{I} \quad (4.5)$$

Notând $R'_x = U/I$, eroarea relativă este dată de relațiile:

a) montajul aval

$$\varepsilon_r = \frac{R'_x - R_x}{R_x} = \frac{\frac{U}{I_x + I_v} - R_x}{R_x} = \frac{\frac{1}{\frac{I_x}{U} + \frac{I_v}{U}} - R_x}{R_x} = \frac{R_x}{R_x + R_v} \quad (4.6)$$

b) montajul amonte:

$$\varepsilon_r = \frac{R'_x - R_x}{R_x} = \frac{r_a}{R_x} \quad (4.7)$$

Se observă că în cazul montajului aval eroarea relativă este cu atât mai mică cu cât rezistența de măsurat este mai mică față de rezistența interioară a voltmetrului, iar în cazul montajului amonte eroarea relativă este cu atât mai mică cu cât rezistența de măsurat este mai mare față de rezistența interioară a ampermetrului. În concluzie, montajul aval se utili-

zează la măsurarea rezistențelor mici, iar montajul amonte la măsurarea rezistențelor mari.

4.2.3.2 Măsurare rezistențelor cu ohmmetru

Ohmmetrele sunt aparate cu citirea directă și se pot realiza în mai multe variante, în funcție de tipul instrumentului utilizat și de schema de măsură adoptată. În fig.4.5. este prezentată schema de principiu de măsurare directă cu ohmmetrul cu miliampermetrul magnetoelectric, numit ohmmetru serie.

Ohmmetrul serie are o sursă de tensiune continuă (o baterie uscată de $1,5 \div 4,5V$), conectată în interiorul aparatului, în serie cu un rezistor R_V de rezistență variabilă. Rezistența R_V se reglează astfel încât

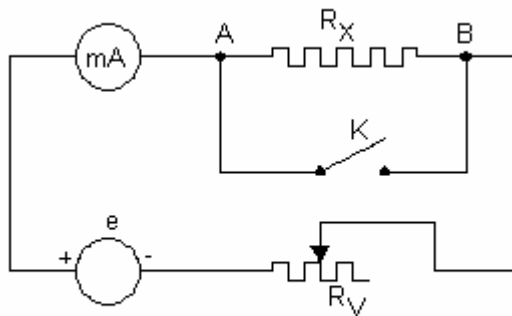


Fig.4.5

la închiderea întrerupătorului K , adică la scurtcircuitarea rezistenței necunoscute R_X , acul indicator al instrumentului să arate indicație maximă. Cazul deviației maxime a acului indicator îi corespunde rezistenței $R_X=0$, iar deviației zero îi va corespunde o rezistență $R_X= \infty$. Scara ohmmetrului va fi etalonată în sens invers față de aparate

ite. Etalonarea se face în ohmi sau kiloohmi obișnuite. Etalonarea se face

Aceste ohmmetre au scara neuniformă. Pentru efectuarea unei măsurători se scurtcircuitează bornele A și B și se reglează R_V până când acul indică deviație maximă, adică valoarea zero pe scara ohmmetrului. Se scoate apoi legătura de scurtcircuitare, se conectează rezistorul a cărui rezistență R_X trebuie măsurată și se citește valoarea arătată de acul indicator pe scara ohmmetrului.

Aceste ohmmetre se utilizează pentru măsurători mai puțin precise, eroarea relativă fiind de $1 \div 2 \%$.

Deviația acului indicator este în funcție de mărimea tensiunii electromotoare a bateriei, care scade cu timpul. Funcționarea ca ohmmetre serie a aparatelor universale de măsură (avometre) se obține prin trecerea comutatorului pe poziție corespunzătoare de alegere a parametrului măsurat.

4.2.3.3. Punți pentru măsurarea rezistențelor

Cea mai răspândită metodă de zero pentru măsurarea rezistențelor utilizează puntea Wheatstone. Ea permite măsurarea cu precizie a rezistențelor cuprinse între 1 ohm și 10^6 ohmi. Schema electrică este redată în fig.4.6. Galvanometrul G intercalat pe diagonala CD este utilizat ca instrument de zero. Principiul metodei constă în aflarea unei relații între

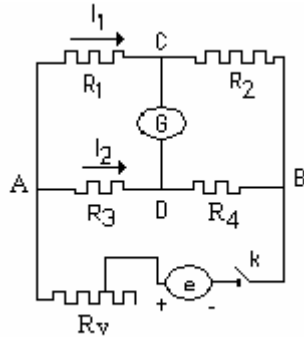


Fig.4.6

cele patru rezistențe în așa fel încât galvanometrul să indice zero, adică $V_C = V_D$. Această relație se obține ținând cont că rezistoarele R_1 și R_3 sunt la aceeași diferență de potențial, de asemenea și rezistoarele R_2 și R_4 și că prin R_2 circulă curentul I_1 , iar prin R_4 va circula curentul I_2 . Se poate scrie deci:

$$R_1 I_1 = R_3 I_2 \text{ și } R_2 I_1 = R_4 I_2$$

Împărțind relațiile, rezultă:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \text{ sau } R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (4.8)$$

Pentru măsurarea unei rezistențe necunoscute R_x , se conectează această rezistență pe una din laturile punții și se reglează una din celelalte trei rezistențe până se ajunge la echilibrul punții (galvanometrul G va indica zero). În funcție de modul cum se realizează echilibrul punții putem avea punți manuale și punți automate.

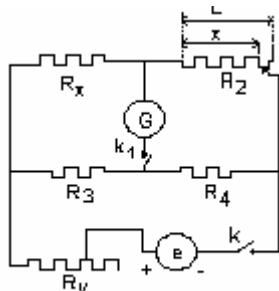


Fig.4.7

Schema unei punți Wheatstone cu echilibrare manuală este dată în fig.4.7. Rezistențele R_3 și R_4 sunt variabile în trepte, astfel încât raportul lor este cunoscut și poate fi modificat decadic: 0.01; 0.1; 1; 10; 100; 1000 etc. Rezistența R_2 este de asemenea variabilă, construită sub forma unei cutii de rezistențe în decade. Uneori însă, rezistența R_2 se realizează ca un reostat bobinat, de lungime L, la care valoarea R_2 depinde de deplasarea x a cursorului:

$$R_2 = R_0 \frac{x}{L} \quad (4.9)$$

unde R_0 este rezistența maximă a reostatului.

Măsurarea rezistenței R_x se face în felul următor: se leagă R_x , se alege raportul R_3/R_4 la o valoare depinzând de ordinul de mărime a rezistenței necunoscute și se închide întrerupătorul K, apoi K_1 . Se reglează R_2 până când galvanometrul va indica zero. Inițial echilibrarea punții se realizează cu reostatul R_v pus la valoarea maximă și apoi pentru a mări sen-

sibilitatea punții, R_v se micșorează până la scurtcircuitare. La echilibru, este valabilă:

$$R_x = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4} = R_0 \frac{x R_3}{L R_4} \quad (4.10)$$

Dacă se notează: $K = \frac{R_0 R_3}{L R_4}$

rezultă $R_x = K \cdot x$ (4.11)

4.4.4. Măsurarea puterilor electrice

4.4.4.1. Măsurarea puterilor în curent continuu

În curent continuu, puterea este dată de produsul dintre tensiunea la bornele receptorului și intensitatea curentului ce străbate receptorul. Se poate face deci o măsurare cu ajutorul ampermetrului și voltmetrului, schema de montaj fiind aceeași ca și la măsurarea rezistenței, adică cea din fig.4.3 pentru montajul aval și cea din fig.4.4 pentru montajul amonte. Relațiile de calcul vor fi:

- pentru montajul în aval:

$$P_x = U \left(I - \frac{U}{r_v} \right) = UI - \frac{U^2}{r_v} \quad (4.12)$$

unde $\frac{U^2}{r_v}$ reprezintă puterea consumată de voltmetru;

- pentru montajul în amonte:

$$P_x = I(U - r_a I) = UI - r_a I^2 \quad (4.13)$$

unde $r_a I^2$ reprezintă puterea consumată de ampermetru.

Rezultă că eroarea afectată de metodă la montajul în aval va fi mai mică atunci când tensiunea de la bornele receptorului este mică și rezistența interioară a voltmetrului este mare, iar pentru montajul amonte, eroarea va fi mai mică atunci când receptorul este străbătut de un curent mic și rezistența interioară a ampermetrului este mică.

Măsurarea puterii în curent continuu se poate face și cu ajutorul unui aparat cu citire directă, numit wattmetru. Wattmetrele cele mai răspândite în practică sunt cele de tip electrodinamic. Bobina fixă, numită și bobină de curent, se leagă în serie cu receptorul, iar bobina mobilă, numită și bobină de tensiune, se leagă în paralel față de receptor (fig.4.8). În general, în serie cu bobina de tensiune se leagă o rezistență adițională. Bornele wattmetrului marcate cu o steluță sau cu o săgeată, indică îm-

preună spre plusul de la sursa de energie. Deviația acului indicator este proporțională cu puterea receptorului. Pentru a pune în evidență acest lucru vom considera deviația α dată de relația la aparatele electrodinamice:

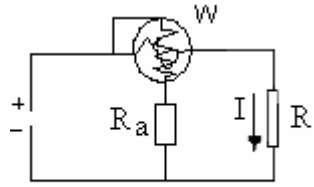


Fig.4.8

$$\alpha = KI_1 I_2 = KI \frac{U}{r_v + R_a} = K'UI = K'P \quad (4.14)$$

Scara instrumentului va fi uniformă.

Orice wattmetru are marcat atât curentul maxim, cât și tensiunea maximă admise să treacă prin bobinele de curent și de tensiune. Produsul acestor două mărimi dă puterea maximă, corespunzătoare numărului maxim de diviziuni ale wattmetrului.

4.4.4.2. Măsurarea puterilor în curent alternativ monofazat

În c.a. avem o putere activă $P=UI\cos\varphi$ care se măsoară în wați și o putere reactivă $Q=UI\sin\varphi$, care se măsoară în VAR.

Puterea activă se măsoară direct cu wattmetrul, iar puterea reactivă cu varmetru.

Wattmetrele întrebuințate la măsurarea puterii în c.a., sunt în general de tip electrodinamic. Se folosesc însă și wattmetre de inducție, a căror funcționare se bazează pe fenomenul de inducție electromagnetică și care sunt folosite mai des ca aparate înregistratoare.

Schema de montaj a unui wattmetru, în curent alternativ, este asemănătoare cu cea din curent continuu cu deosebirea că în locul sursei de c.c. intervine o sursă de c.a. .

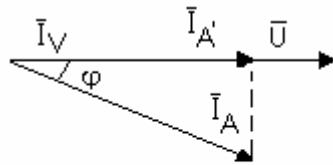


Fig.4.9

La un instrument de tip electrodinamic deviația acului indicator este proporțională cu produsul curenților care străbat cele două bobine, însă intervine și cosinusul unghiului dintre cei doi curenți, adică:

$$\alpha = KI_A I_V \cos\varphi \quad (4.15)$$

unde I_A este curentul ce trece prin bobina amper și I_V , curentul ce trece prin bobina volt. Din diagrama de fazori, reprezentată în fig.4.9, se observă că interacțiunea are loc între curentul I_V , care este în fază cu tensiunea de la bornele receptorului, deoarece este un curent activ ce străbate bobina volt și rezistența adițională și I_A care este componenta activă a curentului ce trece prin bobina amper (I_A este același cu curentul ce trece prin receptorul de impedanță Z și are factorul de putere $\cos\varphi$).

Curenții I_A și I_V sunt dați de relațiile :

$$I_A = I, I_V = \frac{U}{Z_V} = \frac{U}{\sqrt{(r_V + R_a)^2 + X_V^2}} \cong \frac{U}{R_a}$$

Înlocuind acești curenți în relația (4.15), se obține:

$$\alpha = KI \frac{U}{R_a} \cos \varphi = K' P \quad (4.16)$$

Aparatul măsoară deci puterea activă a receptorului și scara va fi uniformă.

Măsurarea puterii reactive se face cu un varmetru, aparat care diferă de wattmetru numai prin aceea că în serie cu bobina volt se leagă o reactanță inductivă. Din această cauză în schemele de montaj aparatul se distinge numai prin simbolul său (în schema din figura 4.8 în dreptul aparatului se pune Var). Rezistența adițională de la wattmetru și reactanța inductivă de la varmetru fiind montate în interiorul aparatului, în schemele electrice acestea nu figurează separat.

Deviația acului indicator, la un varmetru de tip electrodinamic este dată de aceeași relație ca și la wattmetru, însă curenții I_A și I_V vor fi:

$$I_A = I \quad \text{și} \quad I_V = \frac{U}{Z_V} = \frac{U}{\sqrt{r_V^2 + (X_V + X_a)^2}} \cong \frac{U}{X_a}$$

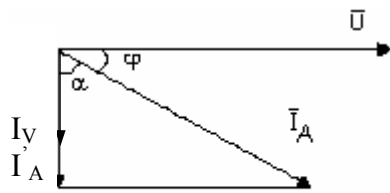


Fig.4.10

unde I_V este un curent aproape reactiv, fiind defazat în urmă cu $\pi/2$ față de tensiune (X_a =reactanța inductivă adițională legată în serie cu bobina volt), iar α este defazajul între fazorii $\overline{I_A}$ și $\overline{I_V}$ (fig.4.10).

Rezultă:

$$\alpha = KI_A I_V \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = KI \frac{U}{X_a} \sin \varphi = K' Q \quad (4.17)$$

Aparatul măsoară deci și puterea reactivă a receptorului și scara va fi uniformă.

4.4.4.3. Măsurarea puterii active în curent alternativ trifazat

Puterea activă în curent alternativ trifazat se poate măsura : fie cu un wattmetru monofazat, fie cu două wattmetre monofazate, fie cu trei wattmetre monofazate, fie cu un wattmetru trifazat.

Măsurarea puterii active cu un wattmetru monofazat se face numai în cazul receptoarelor trifazate echilibrate. Puterea măsurată

$P=3P_W$ (P_W este indicația wattmetrului). Wattmetrul indică puterea pe o singură fază. Schema de montaj este cea din fig.4.11 sau 4.12.

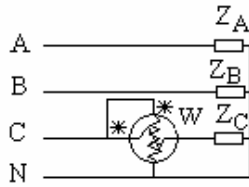


Fig.4.11

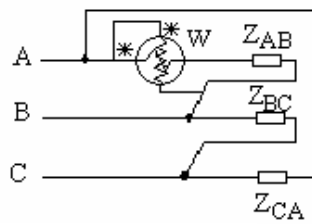


Fig.4.12

În cazul receptoarelor la care nulul nu este accesibil sau la care nu se poate intercala wattmetru ca în fig.4.12, atunci se realizează o schemă de montaj ca în fig.4.13 sau 4.14, adică se creează un

punct neutru artificial.

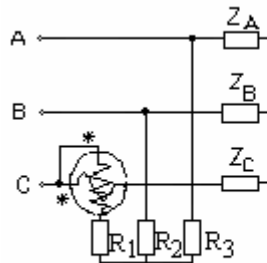


Fig.4.13

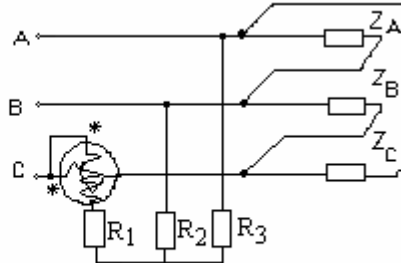


Fig.4.14

Rezistențele R_1 , R_2 și R_3 se aleg în așa fel încât să fie îndeplinită condiția: $r_v + R_1 = R_2 = R_3$, unde r_v este rezistența ohmică a bobinei volt inclusiv rezistența adițională corespunzătoare tensiunii de funcționare. Puterea este dată de relația:

$$P = 3P_W \quad (4.18)$$

Măsurarea puterii active cu trei wattmetre monofazate, se face în cazul receptoarelor trifazate neechilibrate. Se montează câte un wattmetru pe fiecare fază în parte și puterea totală rezultă din însumarea puterilor indicate de fiecare wattmetru, adică:

$$P = P_{w1} + P_{w2} + P_{w3} \quad (4.19)$$

Schema de montaj se realizează fie ca în fig.4.15 fie ca în fig.4.16.

Măsurarea puterii active cu două wattmetre monofazice se folosește în cazul receptoarelor trifazate echilibrate sau neechilibrate, însă fără fir neutru, adică trebuie îndeplinită relația :

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (4.20)$$

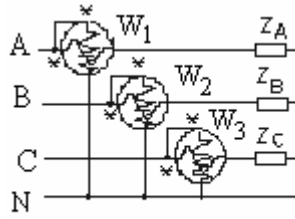


Fig.4.15

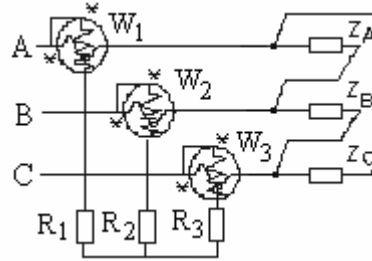


Fig.4.16

Schema de montaj a celor două wattmetre este cea din fig.4.17.
Puterea instantanee a receptorului este:

$$P = p_1 + p_2 + p_3 \text{ sau}$$

$$P = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C$$

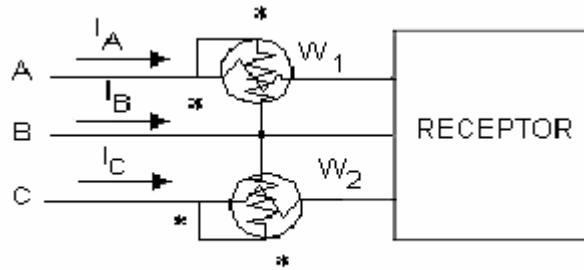


Fig.4.17

Însă $i_B = -(i_A + i_C)$ și deci:

$$P = u_A i_A - u_B (i_A + i_C) + u_C i_C = (u_A - u_B) i_A + (u_C - u_B) i_C = u_{AB} i_A + u_{CB} i_C$$

Integrând rezultă:

$$P = \int_0^T (u_{AB} i_A + u_{CB} i_C) dt = U_{AB} I_A \cos(\overline{U_{AB}}, \overline{I_A}) + U_{CB} I_C \cos(\overline{U_{CB}}, \overline{I_C}) \quad (4.21)$$

Din diagrama de fazori, reprezentată în fig.4.18 rezultă că:

$$\langle \overline{U_{AB}}, \overline{I_A} \rangle = 30^\circ + \varphi \text{ și } \langle \overline{U_{CB}}, \overline{I_C} \rangle = 30^\circ - \varphi$$

$$\text{Dacă notăm: } P_1 = U_{AB} I_A \cos(30^\circ + \varphi) \text{ și } P_2 = U_{CB} I_C \cos(30^\circ - \varphi) \quad (4.22)$$

se observă că P_1 este puterea indicată de wattmetrul W_1 și P_2 este puterea indicată de wattmetrul W_2 . Rezultă că puterea totală este:

$$P = P_{W1} + P_{W2} \quad (4.23)$$

Dacă notăm: $U_{AB} = U_{CB} = U_l$, $I_A = I_C = I_l$ și dezvoltăm $\cos(30 \pm \varphi)$,
se obține relația puterii în curent trifazat, adică:

$$P = U_l I_l (\cos 30 \cos \varphi - \sin 30 \sin \varphi + \cos 30 \cos \varphi + \sin 30 \sin \varphi),$$

$$\text{Sau } P = U_l I_l \cdot 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi$$

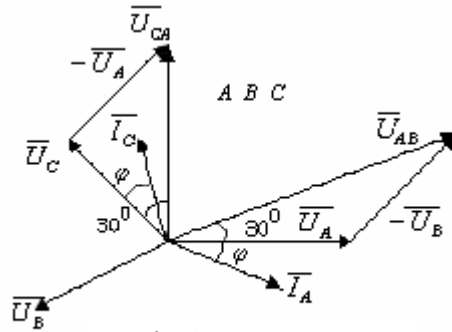


Fig.4.18

În general defazajul φ poate avea diferite valori și deci putem avea următoarele cazuri:

- $\varphi = 0$, rezultă $P_{W1} = P_{W2}$, deci cele două wattmetre vor indica aceeași putere;
- $\varphi_{ind} = 60^\circ$, rezultă $P_{W1} = 0$ și $P = P_{W2}$;
- $\varphi_{cap} = 60^\circ$, rezultă $P_{W2} = 0$ și $P = P_{W1}$;
- $\varphi_{ind} > 60^\circ$, rezultă $P_{W1} < 0$, deci wattmetrul W_1 va devia în sens invers; pentru a schimba sensul de deviație trebuie să schimbăm sensul prin una din cele două bobine (de preferat la bobina volt) și rezultă că puterea totală se va obține făcând diferența $P_{W2} - P_{W1}$;
- $\varphi_{cap} > 60^\circ$, rezultă că $P_{W2} < 0$ deci wattmetrul W_2 va indica în sens invers și puterea totală se va obține făcând diferența $P_{W1} - P_{W2}$.

Dacă se face diferența $P_2 - P_1$ se obține:

$$P_2 - P_1 = U_l I_l [\cos(30 - \varphi) - \cos(30 + \varphi)] = U_l I_l \cdot 2 \cdot \frac{1}{2} \sin \varphi = \frac{Q}{\sqrt{3}} \text{ sau}$$

$$Q = \sqrt{3}(P_2 - P_1) \quad (4.24)$$

Rezultă că dacă se multiplică diferența puterilor indicate de cele două wattmetre cu $\sqrt{3}$ se obține puterea reactivă a receptorului trifazat.

De asemenea se poate calcula și $\text{tg}\varphi$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{\sqrt{3}(P_1 - P_2)}{P_1 + P_2} \quad (4.25)$$

Măsurarea puterii active cu un wattmetru trifazat

În scopul măsurării puterii active cu un singur aparat s-au construit wattmetre trifazate, compuse din două sau trei wattmetre monofazate, având bobinele volt cuplate pe același ax, asupra căruia acționează astfel suma cuplurilor date de cele două sau trei wattmetre.

4.4.4.4. Măsurarea puterii reactive în curent alternativ trifazat

Puterea reactivă se poate măsura: fie cu un varmetru monofazat, fie cu trei varmetre monofazate, fie cu un wattmetru monofazat, fie cu două wattmetre monofazate, fie cu un varmetru trifazat.

Măsurarea puterii reactive cu un varmetru monofazat se folosește în cazul receptoarelor trifazate echilibrate, indicația aparatului multiplicându-se cu trei. Schemele de montaj sunt reprezentate în figurile: 4.11; 4.12; 4.13 sau 4.14 cu singura deosebire că în locul wattmetrului trebuie considerat varmetrul (în schemă în locul simbolului W se trece Var).

Măsurarea puterii reactive cu trei varmetre monofazate se folosește în cazul receptoarelor trifazate neechilibrate. Puterea reactivă a receptorului se obține însumând puterile reactive indicate de fiecare varmetru în parte. Schemele de montaj sunt reprezentate în fig.4.15 și 4.16, cu singura deosebire că în locul wattmetrelor se consideră varmetre.

Măsurarea puterii reactive cu două varmetre monofazate se folosește în cazul receptoarelor trifazate echilibrate sau neechilibrate, cu trei conductoare (ca și în cazul puterii active), schema de montaj fiind cea din fig.4.17, numai că în loc de wattmetre sunt varmetre.

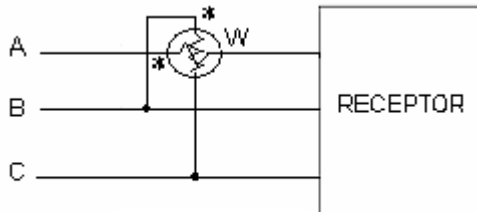


Fig.4.19

Măsurarea puterii reactive cu un wattmetru monofazat se folosește în cazul receptoarelor trifazate simetrice și echilibrate. Schema de montaj este reprezentată în fig.4.19. Puterea măsurată de wattmetru

este dată de relația:

$$P_W = U_{BC} I_A \cos \angle (\bar{U}_{BC}, \bar{I}_A) \quad (4.26)$$

Din diagrama de fazori, reprezentată în fig.4.20 rezultă că $\angle (\bar{U}_{BC}, \bar{I}_A) = 90^\circ - \varphi$ și deci relația (4.26) devine:

$$P_w = U_l I_l \cos(90^\circ - \varphi) = U_l I_l \sin \varphi,$$

Puterea reactivă a receptorului va fi dată de relația:

$$Q = \sqrt{3} U_l I_l \sin \varphi = \sqrt{3} P_w \quad (4.27)$$

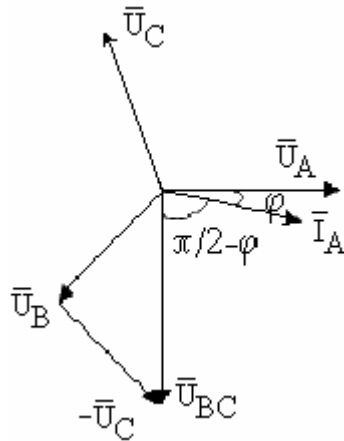


Fig.4.20

În circuitele trifazate fără conductor neutru, dacă se măsoară puterea reactivă cu trei wattmetre, bobinele lor de curent trebuie montate pe cele trei faze ale circuitului, iar bobinele de tensiune trebuie alimentate cu tensiuni defazate cu 90° în urma tensiunilor pe fază respective. Din diagrama de fazori reprezentată în fig.4.20, pentru cazul simetriei de tensiuni, se constată că tensiunile auxiliare căutate sunt:

$$U_A \rightarrow U_{BC}; U_B \rightarrow U_{CA}; U_C \rightarrow U_{AB};$$

adică tensiunile între fazele următoare celei pe care se montează bobina amper. Expresia puterii reactive este dată,

în cazul montării celor trei wattmetre, de relația:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} (P_{w1} + P_{w2} + P_{w3}) \quad (4.28)$$

Măsurarea puterii reactive cu ajutorul unui varmetru trifazat, se face la fel ca în cazul măsurării puterii active cu un wattmetru trifazat. Construcția varmetrului trifazat diferă de cea a wattmetrului trifazat numai prin aceea că în serie cu bobinele volt, la varmetru se intercalează reactanțe adiționale.

4.4.5. Măsurarea energiei electrice.

4.4.5.1. Măsurarea energiei electrice în circuitele de curent continuu.

Aparatele care pot măsura direct energia electrică consumată de un receptor sau furnizată de un generator se numesc contoare de energie electrică.

Contoarele analogice de c.c. sunt de tip electrodinamic și sunt asemănătoare, din punct de vedere constructiv, cu wattmetrele electrodinamice, având ca părți principale ale sistemului activ o bobină amper, care este fixă și o bobină volt, mobilă, care se comportă ca un indus (rotor) de motor de c.c. Axul contorului este vertical și se rotește între două lagăre. Pe ax este fixat un disc subțire de aluminiu care se rotește între polii unui magnet permanent (în scopul producerii unui cuplu

între polii unui magnet permanent (în scopul producerii unui cuplu de frânare) și un șurub fără sfârșit care angrenează roțile dințate ale mecanismului înregistrator. Mecanismul înregistrator înregistrează numărul de rotații executate de discul de aluminiu care este proporțional cu energia consumată și este dat în Kwh. Momentul cuplului motor, dat de interacțiunea curenților ce străbat cele două bobine, este proporțional cu produsul celor doi curenți și deci:

$$M_m = kI \cdot I_v$$

I_v – curentul din circuitul bobinei volt are expresia:

$$I_v = \frac{U - E}{r_v + R_a} = \frac{U}{r_v + R_a}$$

unde: r_v – rezistența bobinei volt;

R_a – rezistența adițională legată în serie cu bobina volt;

U – tensiunea aplicată circuitului de tensiune;

E – tensiunea contra-electromotoare indusă în bobina volt datorită rotației sale în câmpul magnetic care, fiind mult mai mică decât U , se poate neglija.

În acest mod expresia momentului cuplului motor devine:

$$M_m = kI \frac{U}{r_v + R_a} = kIU = kP \quad (4.29)$$

și deci momentul cuplului motor este proporțional cu puterea receptorului.

Scheme de montaj a contorului este identică cu cea a unui wattmetru, cu deosebirea că aparatul va fi marcat cu kWh în loc de W.

4.4.5.2. Măsurarea energiei electrice active în circuitele de curent alternativ

Măsurarea energiei electrice active în curent alternativ se poate face cu contoare de inducție, cu contoare electronice sau cu contoare numerice. În ultima perioadă aparatele de măsură electronice și numerice ocupă din ce în ce mai mult teren în instalațiile de măsurare, ca urmare a preciziei mai ridicate și posibilității de integrare a acestora într-un sistem de măsurare automat. Ele pot fi monofazate sau trifazate, după tipul circuitului.

Contoarele monofazate de inducție sunt construite din doi electromagneți 1 și 2 (fig.4.21) având întrefieruri între care se poate roti un disc de aluminiu 3. Electromagnetul 1 are o înfășurare cu un număr de spire mare, reprezentând bobina volt. Electromagnetul 2, sub formă de U, așezat sub disc, are o înfășurare cu un număr mic de spire, reprezentând bobina amper. Fluxul magnetic produs de curentul ce parcurge bobine

volt se închide, în cea mai mare parte, prin ramificația 4, numită șunt magnetic, iar cealaltă parte străbate discul de aluminiu. Fluxul magnetic produs de

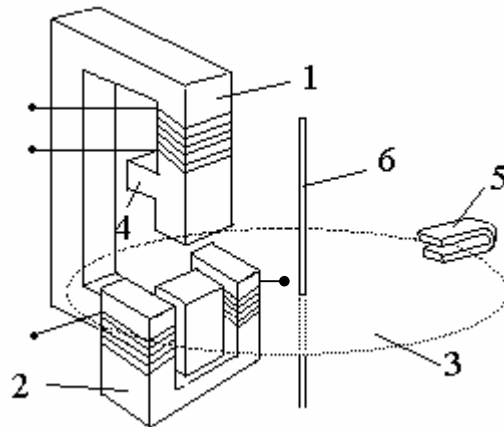


Fig.4.21

fluxul magnetic produs de curentul ce străbate bobina amper, străbate discul de aluminiu de două ori. Deoarece discul de aluminiu este străbătut de trei fluxuri magnetice, aparatul descris se numește aparat de inducție cu trei fluxuri.

Funcționarea se bazează pe faptul că la trecerea curentului alternativ prin cele două bobine, fluxurile magnetice

variabile induc în discul de aluminiu **curenți turbionari**. Curenții turbionari produși de un electromagnet interacționează cu câmpul magnetic al celuilalt electromagnet și prin intermediul forțelor electromagnetice, se produce un cuplu motor sub acțiunea căruia discul se va roti. Se poate demonstra că momentul cuplului motor este dat de relația:

$$M_m = K \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot \sin \psi \quad (4.30)$$

unde:

ϕ_1 – reprezintă valoarea eficace a fluxului magnetic produs în disc de electromagnetul 1;

ϕ_2 – fluxul magnetic produs în disc de electromagnetul 2;

φ - defazajul dintre curenții i_1 și i_2 care străbat bobinele electromagnetelor.

Deoarece fluxurile magnetice ϕ_1 și ϕ_2 sunt proporționale cu valorile eficace I_1 și I_2 ale curenților care îi produc, relația (4.30) se poate scrie:

$$M_m = K_1 I_1 I_2 \sin \psi,$$

Bobina electromagnetului 1 având reactanța inductivă mult mai mare ca rezistența ohmică, curentul ce o străbate va fi defazat în urmă față de tensiune cu un unghi de aproape 90° (fig.4.22) și deci:

$$\sin \psi = \cos \varphi. \text{ Dar } I_2 = I; \quad I_1 = \frac{U}{L\omega}.$$

Rezultă , deci relația: $M_m = K_1 I \frac{U}{L\omega} \cos \varphi = K_2 U I \cos \varphi = K_2 P$,

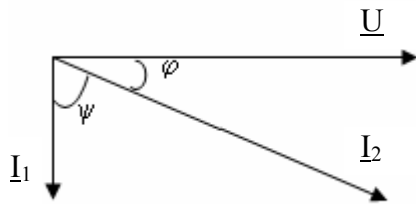


Fig.4.22

Cuplul de frânare fiind produs în mod analog ca la contoarele de curent continuu, va fi proporțional cu $d\alpha/dt$. La echilibru $M_m = M_f$ și deci se ajunge la relația:

$$W_e = K \cdot n_t \quad (4.31)$$

Unde: W_e este energia electrică; K este o constantă, iar n_t este numărul

total de rotații în intervalul de timp t .

Schema de montaj a contorului monofazat este asemănătoare cu cea de la măsurarea puterii active cu wattmetru monofazat cu deosebirea că în dreptul aparatului se trece la kWh.

Contoarele trifazate de energie activă se construiesc din trei sau două echipaje (fig.4.23a, b). În cazul contoarelor de inducție, fiecare echipaj este compus din câte doi electromagneți, discurile de aluminiu având același ax, iar mecanismul de înregistrare a energiei active fiind comun.

În figurile 4.23 a) și b) sunt prezentate schemele de montaj pentru două contoare de energie electrică, primul cu trei echipaje și al doilea cu două echipaje, folosite pentru instalațiile cu 4 conductoare sau cu 3 conductoare.

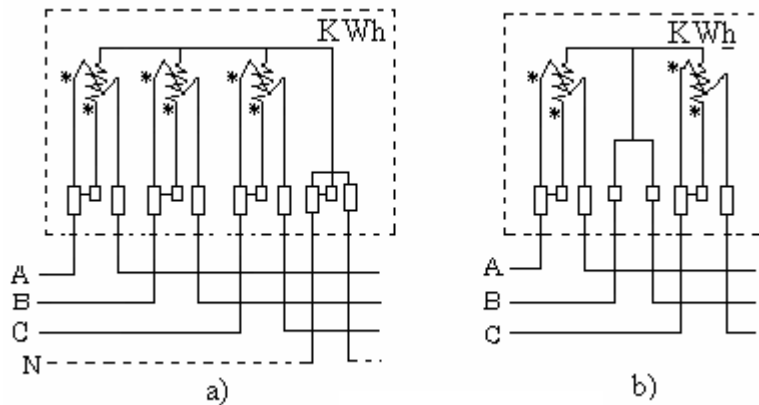


Fig.4.23

4.4.5.3. Măsurarea energiei reactive

Pentru măsurarea energiei electrice reactive în locul contoarelor de energie electrică activă, se folosesc contoare de energie reactivă. Întrucât puterea reactivă integrată de aceste contoare poate fi pozitivă sau

negativă (inductivă sau capacitivă), contoarele de energie reactivă se execută în mod special pentru fiecare din aceste două feluri de sarcină, existând deci contoare de energie inductivă (consumată) și contoare de energie capacitivă (debitată). Diferența lor constructivă se reduce numai la inversarea sensului curentului în unele bobine, de obicei în bobinele amper. Schemele de montaj sunt aceleași ca și în cazul măsurării energiei electrice active, numai că se utilizează contoarele pentru energie reactivă.

4.4.6. Măsurarea impedanțelor (inductivități și capacități)

Măsurarea impedanțelor se poate face direct folosind metode de punte sau aparate specializate care să măsoare direct una din componentele impedanței și indirect - folosind fie un ampermetru, un voltmetru, o sursă de c.c și o sursă de c.a., sau - un ampermetru, un voltmetru și un wattmetru. În cazul măsurării inductivităților și capacităților, trebuie să se țină seama de o serie de factori, cum ar fi: variația în funcție de curent, în cazul bobinelor cu miez de fier, a inductivităților proprii și mutuale datorită dependenței permeabilității magnetice de intensitatea câmpului magnetic; variația cu tensiunea aplicată, cu temperatura, cu umiditatea și cu alți parametri, a capacităților dielectricilor neliniari. Rezultatele măsurătorilor mai sunt influențate: de frecvența curentului alternativ; de pierderile de putere datorită fenomenului de histerezis; de efectul curenților turbionari prin efectul Joule-Lenz, etc.. Metodele cele mai exacte, folosite la măsurarea inductivităților și capacităților sunt metodele de punte.

4.4.6.1. Metode de punte

Metodele de punte folosite în curent alternativ, se bazează pe schema punții Wheatstone. Pe laturile punții se introduc patru impedanțe Z_1 , Z_2 , Z_3 și Z_4 , în locul sursei de curent continuu se folosește o sursă de curent alternativ, iar pe diagonala CD, se montează un aparat indicatorul IN. Echilibrul punți de curent alternativ (fig.4.24) se realizează atunci când se obține egalitatea potențialilor punctelor C și D ($V_C = V_D$) și indicatorul de nul I.N., arată zero. În aceste condiții, la echilibru este valabilă relația:

$$\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3 \quad (4.32)$$

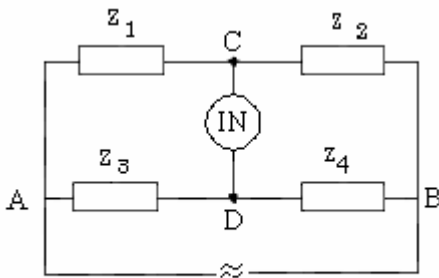


Fig.4.24

în care $\underline{Z}_1, \dots, \underline{Z}_4$ sunt impedanțele din laturile punții scrise ca mărimi complexe.

$$\text{Notând: } \underline{Z}_1 = Z_1 e^{j\varphi_1}; \underline{Z}_2 = Z_2 e^{j\varphi_2}; \underline{Z}_3 = Z_3 e^{j\varphi_3}; \underline{Z}_4 = Z_4 e^{j\varphi_4},$$

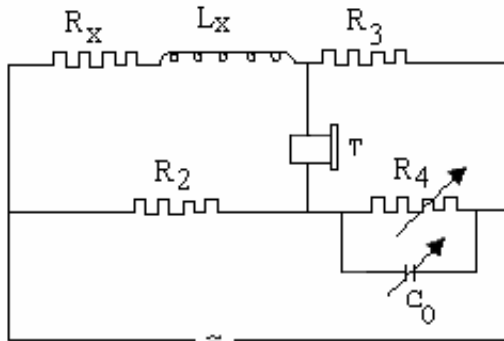


Fig.4.25

din condiția de echilibru rezultă două relații, una pentru module și a doua pentru argumente. Astfel avem relațiile: $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$ - pentru module și $\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$ - pentru argumente.

Deci, pentru aducerea punții la echilibru trebuie să fie satisfăcute cele două condiții în același timp. În practică există mai multe tipuri de punți.

Măsurarea inductivității proprii. Un exemplu de punte utilizată în măsurarea inductivității proprii este reprezentată în fig.4.25 (puntea Maxwell cu capacitate etalon). Condensatorul de capacitate etalon C_0 fără pierderi, poate fi șuntat de o rezistență variabilă R_4 . La echilibrul punții există relația:

$$(R_x + jL_x \omega) \frac{R_4(-jX_c)}{R_4 - jX_c} = R_2 R_3 \text{ sau } (R_x + jL_x \omega) \frac{R_4}{1 + jR_4 \cdot C_0 \cdot \omega} = R_2 R_3$$

de unde rezultă condițiile de echilibru:

$$R_x R_4 = R_2 R_3 \text{ și } L_x = C_0 R_2 R_3 \quad (4.33)$$

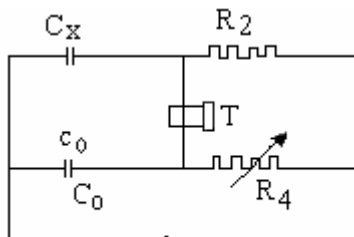


Fig.4.26

La echilibrul punții se poate scrie:

Prima condiție se obține echilibrând puntea în curent continuu (în locul căștii telefonice T se intercalează un galvanometru), iar a doua condiție se obține variind pe C_0 .

Măsurarea capacităților. Pentru măsurarea capacităților se poate folosi puntea reprezentată în fig.4.26 (puntea Sauty).

$$-\frac{j}{C_x \omega} \cdot R_4 = -\frac{j}{C_0 \omega} \cdot R_2$$

de unde se obține relația:

$$C_x = C_0 \frac{R_4}{R_2} \quad (4.34)$$

Această punte este folosită la măsurarea capacității condensatoarelor cu pierderi mici în dielectric. Condiția de echilibru nu depinde de frecvența sursei de alimentare. Echilibrul punții se realizează cel mai comod prin variația rezistenței R_4 , la valori constante și alese convenabil pentru R_2 și C_0 .

4.4.6.2. Metoda ampermetrului și voltmetrului

Această metodă poate fi folosită la măsurarea inductivităților și a capacităților la fel ca la măsurarea rezistențelor, utilizând fie montaj aval, fie montaj amonte. Metoda oferă o precizie relativ redusă, datorită erorilor sistematice ale aparatelor de măsură folosite, însă prezintă avantajul esențial de a permite măsurarea mărimilor în condițiile de lucru ale bobinei sau condensatorului.

Măsurarea inductivităților proprii se face realizându-se un montaj ca în fig.4.27. Inductivitatea proprie rezultă din relația:

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (4.35)$$

în care R și Z sunt: rezistența chimică și impedanța a bobinei, ce se determină utilizând legea lui Ohm pentru mărimile măsurate în c.c. și c.a..

Măsurarea inductivității comportă două determinări: una în c.c.

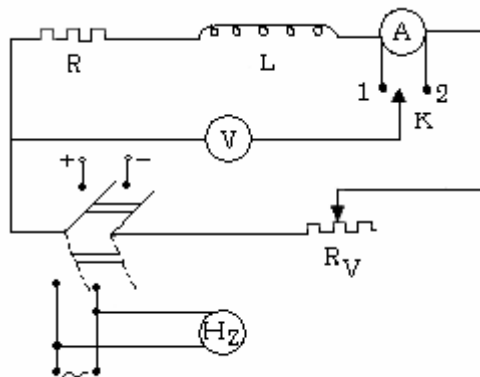


Fig.4.27

pentru determinarea rezistenței chimice și una în c.a. pentru determinarea impedanței. În principiu se poate folosi fie montajul aval (K pus pe poziția 1), fie montajul amonte (K pus pe poziția 2), însă practic se folosește mai frecvent montajul aval pentru măsurarea rezistenței chimice a bobinei utilizând sursa de c.c. și montajul amonte pentru măsurarea impedanței, utilizând sursa de c.a..

Se știe că o bobină cu

miez de fier are rezistența ohmică echivalentă, datorită pierderilor în fier, mai mare decât cea măsurată în c.c. Pentru determinarea acestei rezistențe echivalente trebuie utilizat un wattmetru, care să măsoare puterea bobinei $P=R_e I^2$.

Măsurarea inductivității mutuale prin metoda ampermetrului și voltmetrului constă în măsurarea inductivității proprii a celor două bobine legate în serie, o dată adițional și a doua oară diferențial (fig.4.28). Din relațiile: $L_a = L_1 + L_2 + 2M$; $L_d = L_1 + L_2 - 2M$

Rezultă :
$$M = \frac{L_a - L_d}{4} \quad (4.36)$$

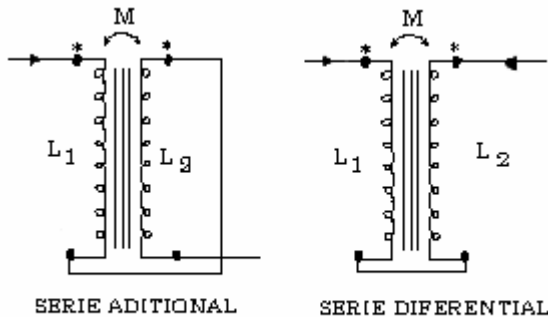


Fig.4.28

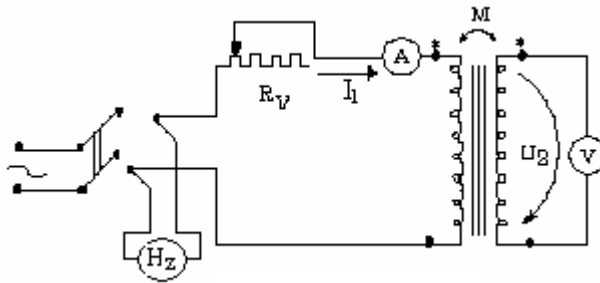


Fig.4.29

Astfel:
$$e_2 = -M \frac{di_1}{dt} \text{ sau } \underline{E}_2 = -jM \omega I_1 = M \omega I_1 e^{-j\omega t}$$

Rezultă:
$$M = \frac{E_2}{\omega I_1} \text{ sau } M = \frac{U_2}{2\pi f I_1} \quad (4.37)$$

Pentru măsurarea inductivităților proprii L_a și L_d se realizează montajul din fig.4.28.

O altă metodă, mai simplă, se bazează pe măsurarea tensiunii induse într-una din cele două bobine, cuplate magnetic, la trecerea unui curent alterativ prin cealaltă bobină, de intensitate și frecvență cunoscute. Schema utilizată este reprezentată în fig.4.29. Relația de calcul a inductivității mutuale se deduce pornind de la relația t.e.m. de inducție mutuală indusă în bobina a doua și măsurată de un voltmetru cu rezistență interioară cât mai mare.