

### 3. Puteri electrice în regim permanent

Regimurile permanente ale circuitelor sunt acele regimuri de funcționare în care s-a stabilizat variația semnalelor în timp, forma de variație a curenților fiind dictată de forma tensiunilor de alimentare și de structura circuitelor. După felul componentelor permanente ale tensiunilor și curenților există trei categorii de regimuri permanente: *curent continuu*, *regim sinusoidal* și *regim periodic nesinusoidal*.

Sensul de referință al tensiunii la bornele unui dipol se poate asocia cu sensul de referință al curentului după două convenții:

*Convenția de la receptoare*, când  $u$  și  $i$  au aceeași orientare în raport cu bornele (polii) circuitului ( $1-1'$ ) și în acest caz (figura 3.1-a)  $p=ui$  este *puterea absorbită* atunci când  $p>0$  iar  $p<0$  înseamnă *putere cedată*.

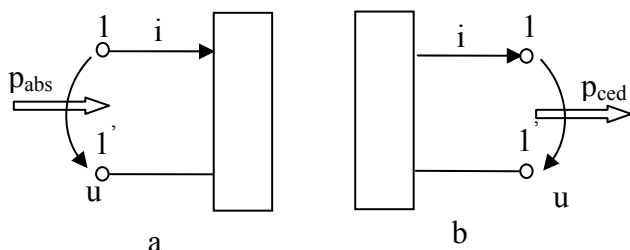


Fig. 3.1

*Convenția de la generatoare*, când  $u$  și  $i$  au sensuri diferite în raport cu bornele ( $u_{11'}$  și  $i_{1'1}$ ) și în acest caz (figura 3.1-b)  $p=ui$  dacă rezultă pozitivă înseamnă *putere cedată* (generată de

dipol, puterea care iese pe la borne) și  $p<0$  înseamnă putere care intră. Convenția de la generatoare se aplică de obicei pentru dipoli activi, care pot genera putere pe la borne.

#### 3.1 Puteri electrice în curent continuu

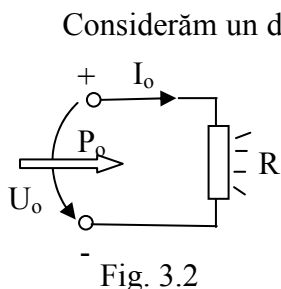


Fig. 3.2

Considerăm un dipol liniar și pasiv funcționând în curent continuu și echivalăm dipolul prin rezistența sa echivalentă  $R$ . Tensiunea la borne  $U_o$  și  $I_o$  au același sens în raport cu bornele, deci  $P_o=U_o I_o$  este puterea absorbită pe la borne și se scrie astfel:

$$P_o = U_o I_o = (R I_o) I_o = R I_o^2 \quad (3.1)$$

deci puterea  $P_o$  care intră pe la borne se consumă prin efect Joule pe rezistența  $R$  (figura 3.2).

Dacă latura de circuit este activă (conține și o sursă cu t.e.m.  $E$ , figura 3.3) atunci  $P_o = U_o I_o$  este puterea absorbită pe la borne din exterior. Dar ecuația de tensiuni pentru această latură este :

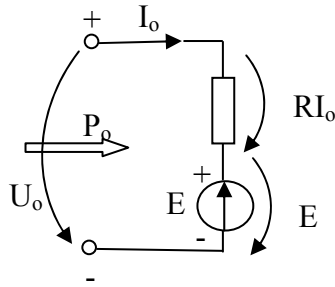


Fig. 3.3.

$$U_o = RI_o + E \quad (3.2)$$

și amplificată cu  $I_o$  va deveni o ecuație de puteri:

$$U_o I_o = RI_o^2 + E I_o \quad (3.3)$$

în care:  $P_o = U_o I_o$  este puterea absorbită din exterior pe la borne,  $\Delta p = RI_o^2$  este puterea consumată pe rezistența  $R$  iar  $P_g = EI_o$  ar reprezenta fie puterea generată de sursa  $E$  (atunci când  $E$  și  $I_o$  au același sens) fie puterea consumată de sursă (când  $E$  și  $I_o$  au sensuri contrare, cum este în cazul nostru, când  $P_g = EI_o$  este absorbită de sursa pusă la încărcat).

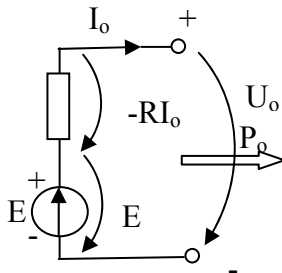


Fig. 3.4

Dacă  $U_o$  și  $I_o$  se asociază ca la generatoare (figura 3.4), atunci  $P_o = U_o I_o$  este puterea generată de circuit (puterea cedată, care iese din circuit pe la borne). Ecuația de tensiuni în acest caz este:

$$U_o = -RI_o + E \quad (3.4)$$

care amplificată cu  $I_o$  va deveni o ecuație de puteri:

$$U_o I_o = -RI_o^2 + EI_o \leftrightarrow U_o I_o = EI_o - RI_o^2 \quad (3.5)$$

Ecuația (3.5) se va interpreta astfel: „din puterea produsă de sursă  $P_g = EI_o$  o parte se consumă pe rezistența internă  $\Delta p = RI_o^2$  iar restul  $P_o = U_o I_o$  reprezintă puterea cedată spre exterior pe la borne”.

Într-un circuit de curent continuu puterile se consumă sub formă de căldură pe rezistențele interne sau sub formă de lucru mecanic (deci tot energie activă) dacă circuitul conține motoare electrice de curent continuu.

### 3.2. Puteri electrice în regim permanent sinusoidal

Spre deosebire de circuitele de curent continuu unde se definea un singur fel de putere absorbită (sau cedată), în regim sinusoidal se definesc mai multe puteri.

### 3.2.1. Puterea instantanee

Considerăm un dipol pasiv alimentat cu o tensiune sinusoidală și funcționând în regim permanent.

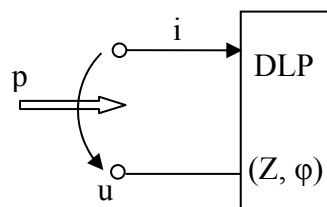


Fig. 3.5

$$\left. \begin{aligned} u &= \sqrt{2} U \sin(\omega t + \gamma_u) \\ i &= \sqrt{2} I \sin(\omega t + \gamma_i) \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

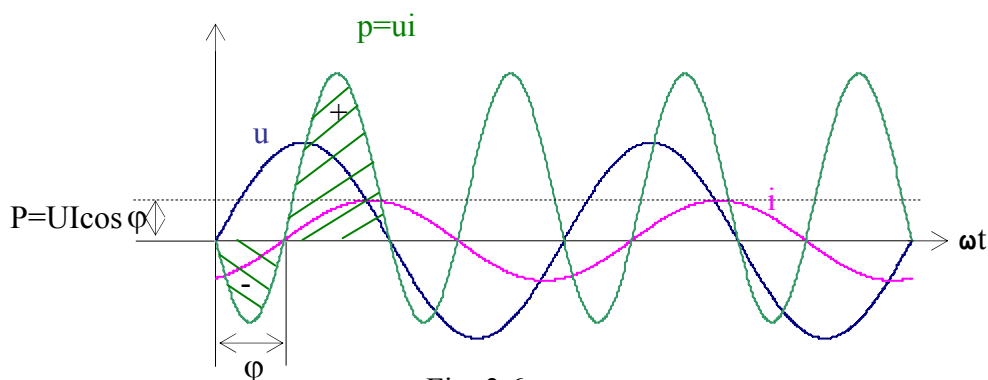


Fig. 3.6

Dipolul (figura 3.5) are impedanța  $Z$  și defazajul  $\varphi = \gamma_u - \gamma_i$ .

*Puterea instantanee* definită ca  $p = ui$  este legea de variație în timp a puterii primite (cedate) de un dipol la bornele sale, după cum  $u$  și  $i$  se asociază ca la receptoare (generatoare). Ținând seama de (3.6) se poate scrie:

$$p = ui = 2UI \sin(\omega t + \gamma_u) \sin(\omega t + \gamma_i) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \gamma_u + \gamma_i) \quad (3.7)$$

Deci puterea instantanee este o mărime periodică având o componentă constantă  $P = UI \cos \varphi$  și o componentă de frecvență dublă ( $2\omega$ ),  $p_f = UI \cos(2\omega t + \gamma_u + \gamma_i)$  numită *putere fluctuantă*, respectiv  $p$  variază cu frecvența dublă în jurul valorii medii  $P = UI \cos \varphi$ , ca în figura 3.6.

În intervalele de timp  $\Delta t = \frac{\varphi}{\omega}$  în care  $p < 0$ , dipolul absoarbe o putere negativă, respectiv cedează putere spre exterior pe la borne.

În aceste intervale, o parte din energia acumulată în câmpul magnetic al bobinelor, respectiv în câmpul electric al condensatoarelor este restituită

surselor de alimentare. Cu cât defazajul  $\varphi$  dintre  $u$  și  $i$  este mai mare, aceste intervale cresc.

La  $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$  valoarea medie a lui  $p$  este nulă (cât primesc pe la borne, aria (+), atâta restituie, aria (-)), ca în figura 3.7. Dacă  $\varphi = 0$ , nu mai există restituiri de energie, puterea este tot timpul (+) iar valoarea sa medie este maximă ca în figura 3.8. De altfel, dacă  $\varphi = 0$  înseamnă că dipolul nu conține elemente reactive  $L$  și  $C$  care ar putea înmagazina energie în câmpurile lor.

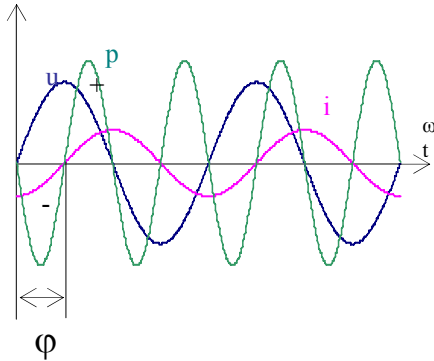


Fig. 3.7  $\begin{cases} \varphi = \frac{\pi}{2} \\ p = 0 \end{cases}$

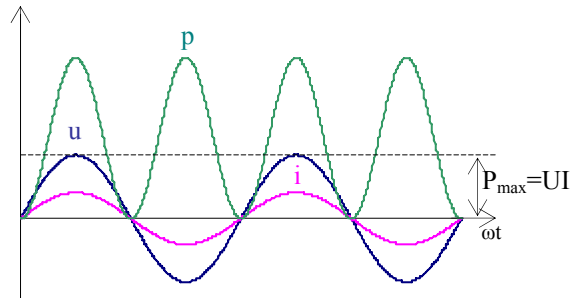


Fig. 3.8  $\varphi = 0$

În regim sinusoidal, transmiterea de energie, la  $\varphi \neq 0$ , nu se face numai spre dipol, ci în ambele sensuri.

Judecat după puterea instantanee, nu putem spune dacă un dipol este generator sau consumator de putere, numai dacă în medie pe o perioadă primește mai mult decât cedează (aria cu (+) este mai mare decât aria de sub graficul lui  $p$  cu (-)), atunci spunem că este un consumator de putere.

### 3.2.2 Puterea activă

Puterea activă, prin definiție, este valoarea medie pe o perioadă a puterii instantanee:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = UI \cos \varphi \quad [\text{W}] \quad (3.8)$$

întrucât valoarea medie pe o perioadă a puterii fluctuante  $p_f$  este nulă.

Puterea activă, ca și puterea instantanee, se măsoară în watt ( $1\text{kW} = 10^3 \text{ W}$ ,  $1\text{MW} = 10^6 \text{ W}$ ) și este măsurabilă (figura 3.9) cu ajutorul unui *wattmetru*, un dispozitiv de măsură electrodinamic format dintr-o bobină

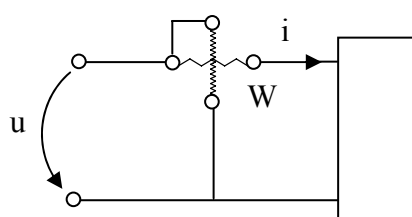


Fig. 3.9

fixă – bobină amper – prin care trece curentul  $i$  și o bobină mobilă – bobină volt - în interiorul celei fixe și care este alimentată cu tensiunea  $u$  și a cărei indicație este conformă cu (3.8).

Puterea instantanee se măsoară în  $W$ , dar nu este măsurabilă, fiind o funcție de timp. Pentru un dipol pasiv puterea activă absorbită se poate scrie în funcție

de parametrii dipolului:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = \begin{cases} \frac{U \cdot \cos \varphi}{I} \cdot I^2 = R \cdot I^2 \\ \frac{I \cdot \cos \varphi}{U} \cdot U^2 = G \cdot U^2 \end{cases} \quad (3.9)$$

Un dipol absoarbe pe la borne putere activă numai dacă conține în interiorul său elemente capabile să convertească energia electrică absorbită pe la borne, în *forme active de energie*: căldură (să conțină rezistențe – plită, fier de călcat, reșou, calorifer electric etc), lucru mecanic (să conțină motoare electrice – mașini de spălat, ventilator etc), lumină (becuri, tuburi), energie chimică (băi de electroliză, acumulatori la încărcat etc).

Pentru o rezistență  $R$  parcursă de curentul  $i$ , puterea instantanee este  $p_j = Ri^2$  iar puterea activă consumată este:

$$P_j = \frac{1}{T} \int_0^T p_j dt = R \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = RI_{ef}^2 = RI^2 \quad (3.10)$$

deci puterea activă este proporțională cu pătratul valorii efective a curentului.

### 3.2.3 Puterea aparentă

Puterea aparentă absorbită de un dipol se definește ca produsul dintre valoarea efectivă a tensiunii de alimentare  $U$  și cea a intensității  $I$ .

$$S = UI > 0 \quad [\text{VA}] \quad (3.11)$$

Ea este puterea „calculată ca în curent continuu  $P=UI$ ” dar cu valorile efective ale tensiunii și intensității. Fără a avea o interpretare energetică ea reprezintă valoarea maximă pe care ar avea-o puterea activă  $P$  la  $U$  și  $I$  constanți (solicitarea maximă a izolației unui echipament se reflectă în tensiunea sa nominală  $U$ , iar solicitarea maximă din punct de vedere termic și dinamic a componentelor se reflectă prin curentul nominal  $I$ ) și defazaj  $\varphi$  variabil între  $u$  și  $i$ . La aceeași solicitare ( $U$  și  $I$  dați) puterea aparentă arată care ar fi maximul de putere care ar putea fi absorbită în raport cu puterea activă  $P$ , care este efectiv absorbită.

Raportul celor două puteri se numește *factorul de putere* al circuitului.

$$k = \frac{P}{S} = \frac{U \cdot I \cdot \cos \varphi}{U \cdot I} = \cos \varphi \quad (3.12)$$

Factorul de putere arată de câte ori este mai mică puterea activă absorbită de un echipament (circuit) decât puterea maximă ce s-ar obține pentru  $\varphi=0$ , în aceleași condiții de solicitare a izolației ( $U$ ) și de solicitare termică și dinamică ( $I$ ). În regim sinusoidal,  $k=\cos \varphi$  și crește odată cu micșorarea defazajului dintre  $u$  și  $i$  ( $k_{\max}=1$ ).

Una dintre problemele gospodăririi energiei electrice în industrie este legată de mărirea factorului de putere al consumatorilor.

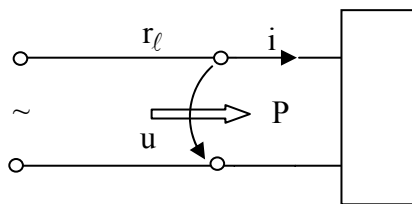


Fig. 3.10

Pierderile de putere ( $\Delta p_j$ ) pe o linie bifilară având rezistența  $r_\ell$  (figura 3.10.), la transportul spre consumator a unei puteri  $P$ , sub tensiunea  $U$  și curentul  $I$ , se poate scrie sub forma:

$$\Delta p_j = r_\ell I^2 = r_\ell \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} \quad (3.13)$$

Se observă că aceste pierderi depind de tensiunea  $U$  (transportul energiei în înaltă tensiune reduce aceste pierderi) dar la  $U=ct.$ , pierderile depind de factorul de putere al consumatorului ( $\cos \varphi$ ); cu cât  $\cos \varphi$  este mai mare, se reduc pierderile pe linia de transport.

În funcție de parametrii dipolului, puterea aparentă se scrie sub forma:

$$S = UI = ZI^2 = YU^2 \quad (3.14)$$

### 3.2.4 Puterea reactivă

Puterea reactivă absorbită de un dipol alimentat sinusoidal se definește ca o putere complementară puterii active, sub forma:

$$Q = UI \sin \varphi \quad [\text{VAR}] \quad (3.15)$$

Unitatea de măsură VAR (voltamperi reactivi) din S.I. este de origine românească.

- pentru circuite inductive  $\rightarrow \varphi > 0 \rightarrow Q_{\text{ind}} > 0$ , elementele inductive consumă putere reactivă;
- pentru circuite capacitive  $\rightarrow \varphi < 0 \rightarrow Q_{\text{cap}} < 0$ , elementele capacitive produc (cedează) putere reactivă.

Ținând seama de relațiile de definiție ale puterilor activă, reactivă și aparentă ( $P = UI \cos \varphi$ ,  $Q = UI \sin \varphi$ ,  $S = UI$ ) se observă că cele trei puteri  $P$ ,  $Q$  și  $S$  sunt pitagorice, ele definesc un *triunghi al puterilor* ca în figura 3.11, respectiv între ele există legăturile:

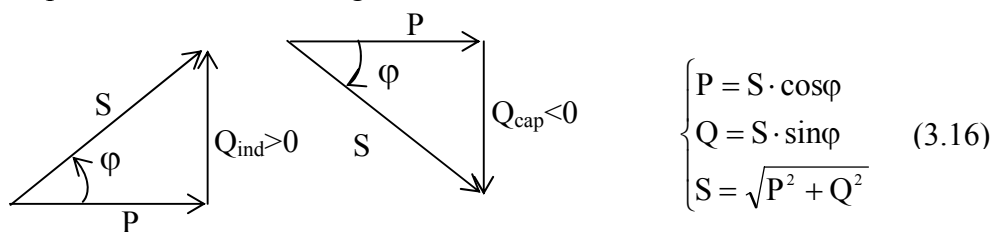


Fig. 3.11

Factorul de putere al circuitului scris sub forma :

$$k = \frac{P}{S} = \frac{\sqrt{S^2 - Q^2}}{S} = \sqrt{1 - \frac{Q^2}{S^2}} \quad (3.17)$$

arată că îmbunătățirea factorului de putere la o instalație (circuit) este legată de reducerea consumului de putere reactivă de către aceasta (pentru  $Q=0 \rightarrow k=1$ ).

În funcție de elementele dipolului, puterea reactivă se poate scrie:

$$Q = UI \sin \varphi = XI^2 = -BU^2 \quad (3.18)$$

Puterea reactivă se poate măsura cu ajutorul *varmetrelor*. Un varmetru se poate realiza dintr-un wattmetru dacă în serie cu bobina volt se introduce un circuit de defazare (C.D.) ca în figura 3.12, care va defaza

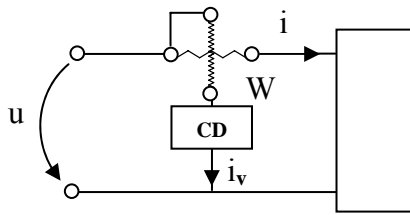


Fig. 3.12

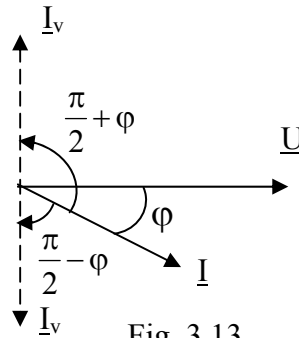


Fig. 3.13

curentul  $i_v$  prin bobina volt înainte sau în urmă cu  $\frac{\pi}{2}$ . Prin bobina amper (bobina fixă a dispozitivului de măsură) va trece curentul  $i$ .

Dispozitivul indică proporțional cu produsul celor doi curenți ( $I$  și  $I_v$ ) și cosinusul unghiului dintre cei doi (figura 3.13), deci:

$$Q = k \cdot I \cdot I_v \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \pm \varphi\right) = \pm k \cdot I \cdot I_v \cdot \sin \varphi = \pm U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (3.19)$$

Într-un circuit izolat dacă există o latură care consumă putere reactivă (latură cu bobină), trebuie să existe o latură generatoare de putere reactivă (fie o latură cu condensator, fie sursa se încarcă producând și puterea reactivă necesară).

Dacă circuitul pasiv este legat la o rețea de alimentare, o parte din puterea reactivă necesară bobinelor o generează condensatoarele din interiorul dipolului, diferența de putere reactivă se absoarbe pe la borne de la rețeaua de alimentare.

Dacă predomină puterea reactivă capacitivă, atunci surplusul de putere reactivă este debitat spre rețeaua exterioară pe la bornele dipolului. Deci puterea reactivă absorbită pe la borne ( $Q = UI \sin \varphi$ ) reprezintă o măsură a necompensării schimburilor interne de energie între câmpul magnetic al bobinelor și câmpul electric al condensatoarelor.

Așa cum orice putere corespunde unei forme de energie, puterea reactivă  $Q$  corespunde energiilor ce se înmagazinează în câmpurile magnetice, respectiv în câmpurile electrice (energii reci).



*Observație:*

Mărimile ( $R$ ,  $X$ ,  $Z$ ) definesc triunghiul impedanțelor, mărimile ( $G$ ,  $B$ ,  $Y$ ) definesc triunghiul admitanțelor, iar mărimile ( $P$ ,  $Q$ ,  $S$ ) definesc triunghiul puterilor. Cele trei triunghiuri dreptunghice sunt asemenea așa cum rezultă din figura 3.14 numai că la primul triunghi toate laturile se măsoară în  $\Omega$ , la al doilea toate laturile se măsoară în  $\Omega^{-1}$  iar al treilea, laturile au unități de măsură diferite ( $W$ ,  $VAR$ ,  $VA$ ).

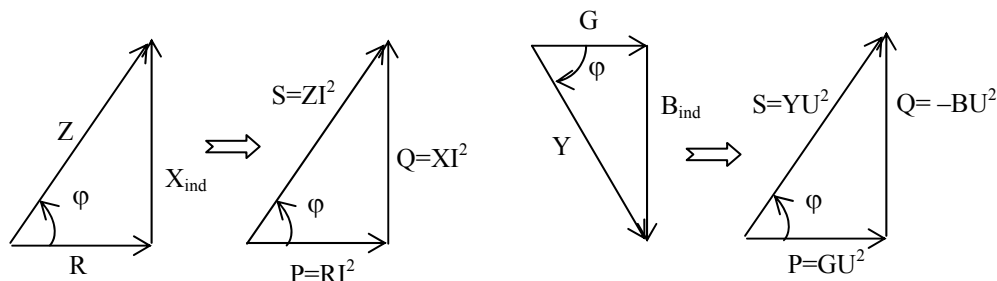


Fig. 3.14

Triunghiul puterilor se obține din triunghiul impedanțelor amplificat cu  $I^2$  sau din triunghiul admitanțelor amplificat cu  $U^2$ .

### 3.2.5 Puterea complexă

Puterea complexă (puterea aparentă complexă) se definește prin:

$$\underline{S} = \frac{1}{2} \underline{u} \underline{i}^* = \underline{U} \underline{I}^* \quad (3.20)$$

Înlocuind cu tensiunea complexă și cu conjugatul curentului complex se obține:

$$\underline{S} = \frac{1}{2} \underline{u} \underline{i}^* = \frac{1}{2} (\sqrt{2} U / \omega t + \gamma_u) (\sqrt{2} I / -\omega t - \gamma_i) = U I / \gamma_u - \gamma_i = \underline{U} \underline{I}^* \quad (3.21)$$

Puterea complexă scrisă sub forma :

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = U I / \gamma_u - \gamma_i = U I / \varphi = S / \varphi = S \cos \varphi + j S \sin \varphi = P + jQ \quad (3.22)$$

este o mărime complexă al cărei modul este puterea aparentă ( $S$ ), argumentul egal cu defazajul circuitului ( $\varphi$ ), partea reală egală cu puterea activă ( $P$ ) iar partea imaginară egală cu puterea reactivă ( $Q$ ).

Puterea complexă absorbită de un dipol se poate scrie în funcție de parametri dipolului sub forma:

$$\begin{cases} \underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = (\underline{Z} \underline{I}) \underline{I}^* = \underline{Z} \underline{I}^2 = R \underline{I}^2 + j X \underline{I}^2 \\ \underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = (\underline{Y} \underline{U})^* \underline{U} = \underline{Y}^* \underline{U}^2 = (G + jB)^* \underline{U}^2 = G \underline{U}^2 + j(-B \underline{U}^2) \end{cases} \quad (3.23)$$

Uneori se lucrează cu puterea complexă conjugată:

$$\underline{S}^* = \underline{U}^* \underline{I} = \underline{U} \underline{I} / -\varphi = UI \cos \varphi - j UI \sin \varphi = P - jQ \quad (3.24)$$

la care se schimbă convenția privind puterile reactive ( $-Q$ ).

*Observație:* Mărimea  $\underline{U} \underline{I} = UI / \gamma_u + \gamma_i$  nu are nici o semnificație fizică pentru un circuit, ea depinde de  $(\gamma_u + \gamma_i)$ , adică de alegerea arbitrară a originii timpului în raport cu care exprimăm tensiunea și curentul.

Puterea complexă  $\underline{S}$  se poate reprezenta într-un plan complex (planul  $\underline{S}$ ) a cărei axă reală este axa  $P$  iar axa imaginară este  $jQ$  ca în figura 3.15.

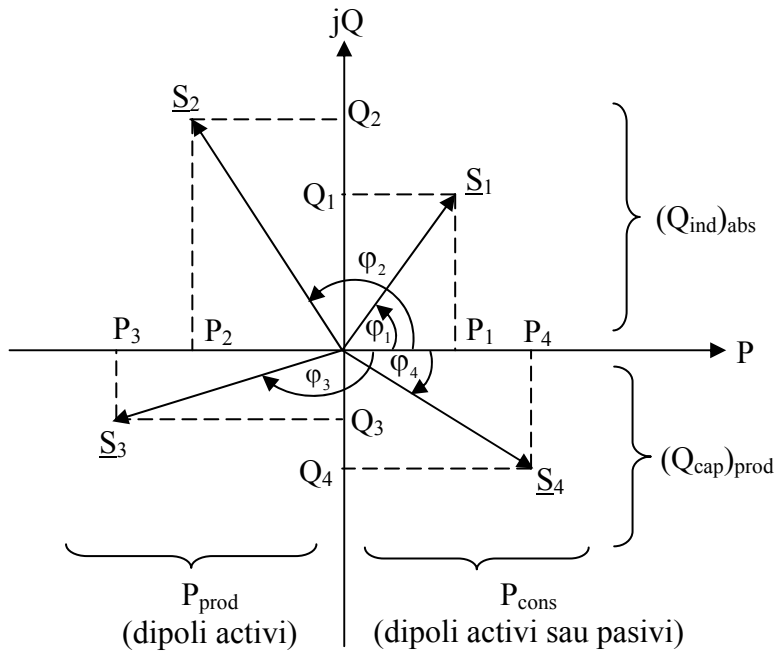


Fig. 3.15

Dacă  $\underline{U}$  și  $\underline{I}$  la bornele dipolului se asociază după regulile de la receptoare (ambele au același sens de referință), atunci puterile  $P, Q, S$  și  $\underline{S}$  pozitive reprezintă puteri absorbite (consumate, care intră pe la bornele dipolului) iar dacă au valori negative reprezintă puteri cedate (care ies pe la bornele dipolului).

Să admitem că  $\underline{U}$  și  $\underline{I}$  sunt asociate după regula de la receptoare, atunci cadrantul I și II are  $Q > 0$ , deci se referă la dipoli cu caracter inductiv, care absorb putere reactivă  $Q$ . Cadranele III și IV au  $Q < 0$ , deci se referă la dipoli cu caracter capacitiv, care produc putere reactivă.

Judecat după puterea activă  $P$ , cadranele I și IV au  $P > 0$  deci se referă la dipoli (activi sau pasivi) care absorb puterea activă pe la borne. În cadranele II și III puterea activă la borne este  $P < 0$ , deci este produsă (iese din circuit pe la borne). Cum numai circuitele active (care conțin în interior surse) pot produce putere activă, înseamnă că punctele din cadranele II și III corespund dipolilor activi.

La *dipoli pasivi* afixul puterii  $\underline{S}$  se regăsește doar în semiplanul drept, ei nu pot produce putere activă ( $P \geq 0$ ,  $Q > 0, Q < 0$ ). La *dipoli activi* poziția afixului puterii  $\underline{S}$  poate fi în oricare din cele patru cadrane ale planului.

Astfel, în figura 3.15 puterile desenate au semnificațiile:

$\underline{S}_1$  – puterea complexă pentru un dipol care absoarbe pe la borne atât putere activă  $P_1$ , cât și putere reactivă  $Q_1$  (cel mai simplu un circuit RL);

$\underline{S}_2$  – puterea complexă pentru un dipol activ care produce puterea activă  $P_2$ , dar absoarbe puterea reactivă  $Q_2$  (un generator de putere activă care pentru a funcționa trebuie să se mențină în stare magnetizată, deci absoarbe  $Q_2$ );

$\underline{S}_3$  – puterea complexă pentru un dipol activ care produce atât putere activă  $P_3$  cât și putere reactivă  $Q_3$ ;

$\underline{S}_4$  – puterea complexă pentru un dipol care absoarbe putere activă  $P_4$ , dar produce putere reactivă  $Q_4$  (cel mai simplu, un circuit RC).

### 3.3 Puteri electrice în regim permanent nesinusoidal

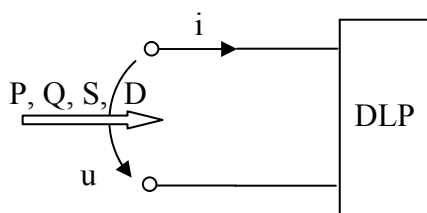


Fig. 3.16

Considerăm un dipol (figura 3.16) la bornele căruia se aplică o tensiune periodică oarecare  $u$  și absoarbe un curent periodic  $i$  (în general de aceeași perioadă ca și  $u$ , dar de altă formă). Undele  $u$  și  $i$  le presupunem descompuse în armonicile componente sub forma (am

considerat că se iau în seamă primele  $n$  armonici):

$$\begin{cases} u = U_0 + \sum_{k=1}^n \sqrt{2} U_k \sin(k\omega t + \gamma_{u_k}) \\ i = I_0 + \sum_{k=1}^n \sqrt{2} I_k \sin(k\omega t + \gamma_{i_k}) \end{cases} \quad (3.25)$$

Defazajul dintre armonica de ordin  $k$  a tensiunii și a intensității este

$$\varphi_k = \gamma_{u_k} - \gamma_{i_k} \quad (3.26)$$

Și în regim periodic nesinusoidal se definesc mai multe puteri:

- *puterea instantanee*, o funcție de timp, nemăsurabilă deși are o unitate de măsură (W):

$$p = ui \quad (3.27)$$

- *puterea activă* absorbită pe la borne, ținând seama de relația (1.40) se scrie sub forma:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^n U_k I_k \cos \varphi_k \quad [W] \quad (3.28)$$

Deci puterea activă absorbită pe la borne în regim nesinusoidal este suma dintre puterea activă absorbită prin componenta continuă ( $U_0 I_0$ ) și puterile active absorbite prin fiecare armonică în parte, ( $U_k I_k \cos \varphi_k$  este puterea activă absorbită prin armonica de ordin  $k$ ). Este măsurabilă cu ajutorul unui wattmetru.

- *puterea reactivă* absorbită pe la borne se definește ca o putere complementară puterii active  $P$ , prin relația:

$$Q = \sum_{k=1}^n U_k I_k \sin \varphi_k \quad [VAR] \quad (3.29)$$

deci este suma puterilor reactive absorbite prin fiecare armonică în parte. Puterea reactivă nu este măsurabilă, un varmetru care indică corect în regim

sinusoidal, în regim nesinusoidal va indica  $\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} U_k I_k \sin \varphi_k$ .

- *puterea aparentă* absorbită de un dipol se definește prin:

$$S = UI \quad [VA] \quad (3.30)$$

unde  $U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots}$  și  $I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}$  reprezintă valorile efective ale undelor nesinusoidale ale lui  $u$  și  $i$ .

Spre deosebire de regimul sinusoidal unde  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ , în regim nesinusoidal  $S > \sqrt{P^2 + Q^2}$ .

- Se definește *puterea deformantă*, mărimea  $D$  care reface egalitatea sub forma:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \leftrightarrow D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \quad (3.31)$$

Puterea deformantă  $D$  măsurată în [VAD], voltamper deformant, nu este măsurabilă cu un instrument de măsură propriu – zis.

În regim sinusoidal pe baza relației  $S^2 = P^2 + Q^2$  se definea un plan al puterilor iar în regim nesinusoidal  $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$  se va defini un spațiu al puterilor ca în figura 3.17, cu axele  $P$ ,  $Q$  și  $D$ .

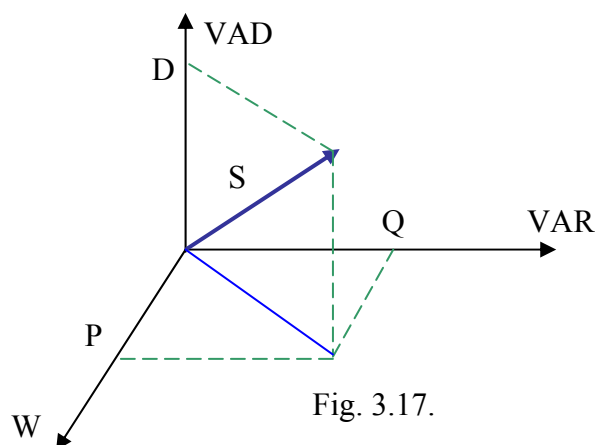


Fig. 3.17.

Factorul de putere în regim nesinusoidal

$$k = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \leq 1 \quad (3.32)$$

este subunitar chiar dacă nu se absoarbe putere reactivă ( $Q=0$ ), dacă  $D \neq 0$ .

Factorul de putere este maxim ( $k=1$ ) numai dacă:

$$\begin{cases} \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{I_2} = \dots = \frac{U_k}{I_k} & (a) \\ \varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_k = 0 & (b) \end{cases}$$

- (a) circuitul opune aceeași impedanță față de toate armonicile semnalului
- (b) fiecare armonică de curent este în fază cu armonica de tensiune de același ordin (care a creat-o).

Ambele condiții pot fi îndeplinite simultan numai pentru circuitele pur rezistive când forma lui  $u$  și  $i$  coincid.

Expresia puterii deformante  $D$  poate fi pusă în evidență dacă ținem seama de o identitate trigonometrică de forma:

$$\begin{aligned} S^2 = U^2 I^2 &= (U_0^2 + U_1^2 + \dots + U_n^2)(I_0^2 + I_1^2 + \dots + I_n^2) = \\ &= \left( \sum_1^n U_k I_k \cos \varphi_k \right)^2 + \left( \sum_1^n U_k I_k \sin \varphi_k \right)^2 + \\ &+ \left( \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n [U_k^2 I_j^2 - 2U_k U_j I_k I_j \cos(\varphi_k - \varphi_j)] \right) = P^2 + Q^2 + D^2 \end{aligned} \quad (3.33)$$

Prin identificare, puterea deformantă va avea expresia:

$$D^2 = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n [U_k^2 I_j^2 - 2U_k U_j I_k I_j \cos(\varphi_k - \varphi_j)] \quad [\text{VAD}] \quad (3.34)$$

Dacă un dipol este alimentat cu tensiunea:

$$u = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t + \gamma_1) + \sqrt{2}U_3 \sin(3\omega t + \gamma_3) + \sqrt{2}U_5 \sin(5\omega t + \gamma_5)$$

și absoarbe curentul:

$$i = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \gamma_{i1}) + \sqrt{2}I_3 \sin(3\omega t + \gamma_{i3}) + \sqrt{2}I_5 \sin(5\omega t + \gamma_{i5})$$

cu defazajele dintre armonicile lui  $u$  și  $i$  de același ordin:

$$\varphi_1 = \gamma_1 - \gamma_{i1}; \quad \varphi_3 = \gamma_3 - \gamma_{i3}; \quad \varphi_5 = \gamma_5 - \gamma_{i5};$$

atunci puterea deformantă absorbită pe la borne prin fundamentală și armonicile de ordin 3 și 5, va fi de forma (dată de 3.34):

$$D^2 = U_1^2 I_3^2 + U_1^2 I_5^2 + U_3^2 I_1^2 + U_3^2 I_5^2 + U_5^2 I_1^2 + U_5^2 I_3^2 - 2U_1 U_3 I_1 I_3 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) - 2U_1 U_5 I_1 I_5 \cos(\varphi_1 - \varphi_5) - 2U_3 U_5 I_3 I_5 \cos(\varphi_3 - \varphi_5)$$

O măsurare a puterilor  $P$ ,  $Q$  și  $D$  în regim nesinusoidal se poate realiza printr-un PQD – metru, care nu este un aparat de măsură propriu – zis, cu indicație directă pe o scală, ci este un calculator hibrid specializat care are configurația din figura 3.18.

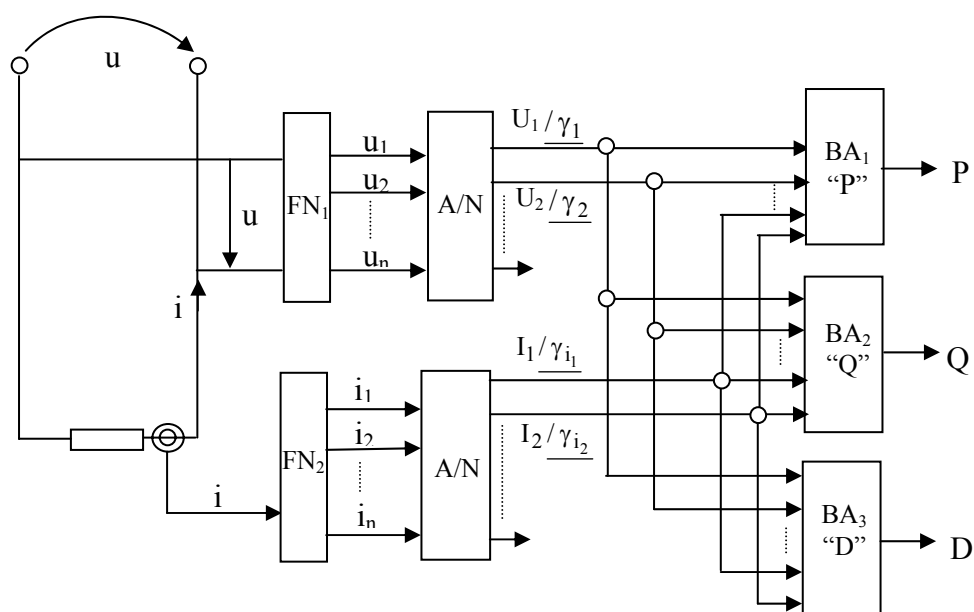


Fig. 3.18

Analiza armonică a undelor de tensiune  $u$  și intensitate  $i$ , culese de la bornele dipolului alimentat nesinusoidal, se realizează prin două blocuri de filtre numerice (FN) care separă armonicile celor două semnale. Armonicile ( $u_1, u_2, \dots, u_n$ ) și ( $i_1, i_2, \dots, i_n$ ) intră în două blocuri de conversie analog-numeric care separă valoarea efectivă și faza inițială a fiecărei armonice:  $U_1/\gamma_1, U_2/\gamma_2, \dots, U_n/\gamma_n$  și  $I_1/\gamma_{i_1}, I_2/\gamma_{i_2}, \dots, I_n/\gamma_{i_n}$ .

Blocurile aritmetice  $BA_1, BA_2$  și  $BA_3$  calculează valorile puterilor  $P, Q$  și  $D$  cu expresiile (3.28), (3.29) și (3.34) și afișează cele trei valori în orice moment.