

---

### Lucrarea 13

## REDRESORUL TRIFAZAT ÎN PUNTE (B6)

### 1. Introducere

Dintre redresoarele trifazate (M3, M6, B6, ... ) cea mai utilizată structură este cea în punte (B6). Așa cum se prezintă în Fig.13.1, aceasta este formată din trei brațe cu diode în cazul redresorului necomandat sau cu tiristoare în cazul redresorului comandat. În total, rezultă 6 dispozitive redresoare, cu trei mai multe decât pentru redresorul M3. Investiția suplimentară în dispozitivele de putere și în schema de comandă este justificată dacă se au în vedere dezavantajele structurii cu punct median și avantajele schemelor în punte.

### 2. Redresorul trifazat în punte (B6) prevăzut cu filtru de curent la ieșire

În majoritatea aplicațiilor puntea trifazată este alimentată direct de la rețea. Dacă printr-o redresare directă amplitudinea tensiunii continue nu satisface sarcina de c.c., se va utiliza un transformator de rețea trifazat, notat cu TR în Fig.13.1. S-au prezentat sarcinile de c.c. care necesită o filtrare a curentului, respectiv sarcinile pasive de tip R-L (Fig.13.1.a) și sarcinile active de tip R-L-E (motor de c.c. → Fig.13.1.b). Chiar în condițiile în care frecvența pulsurilor la o punte B6 este de trei ori mai mare decât la puntea monofazată B2 ( $f_p = 6 \times f = 300\text{Hz}$ ) de multe ori inductanța proprie a sarcinii nu este suficient de mare pentru buna filtrare a curentului și sunt utilizate *inductanțe de filtrare (bobine de netezire)* adiționale, notate cu  $L_f$ . Pentru simplitate, tensiunile din secundarul transformatorului au fost notate cu  $u_R, u_S$  și  $u_T$ , iar pentru tiristoare s-a ales o numerotare larg utilizată în literatura de specialitate care evidențiază ordinea de intrare în conducție a dispozitivelor în timpul unei cicluri complete de funcționare.

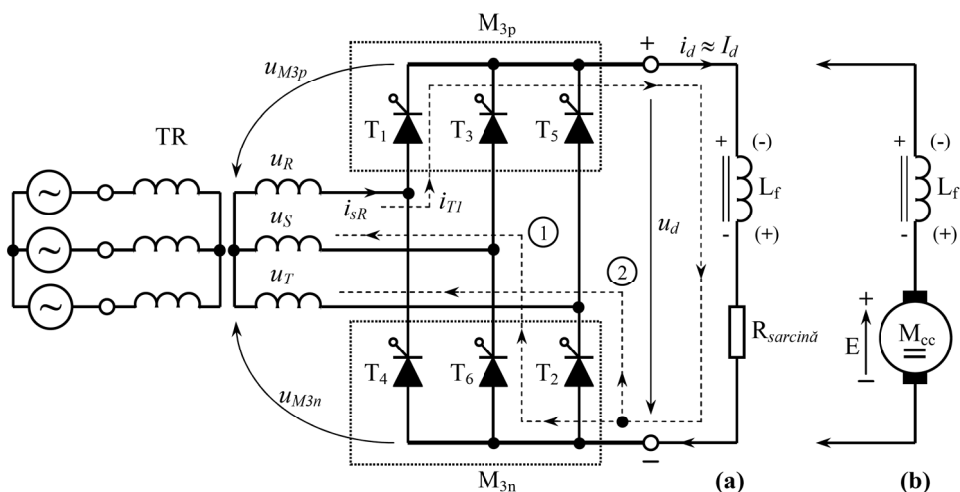
#### a) Analiza redresorului necomandat (cu diode)

Dacă în structura trifazată din Fig.13.1 se folosesc diode în loc de tiristoare se obține un redresor necomandat prevăzut cu un filtru de curent la ieșire. Funcționarea redresorului necomandat poate fi obținută și cu ajutorul redresorului cu tiristoare dacă este comandat cu un unghi  $\alpha = 0^\circ$ . În Fig.13.2 sunt prezentate formele de undă corespunzătoare acestui caz particular.

Prima diagramă prezintă tensiunile sistemului trifazat simetric  $u_R, u_S$  și  $u_T$  care alimentează puntea trifazată, împreună cu punctele de comutație naturală:

- $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_3, \mathbf{P}_5$  pentru tiristoarele polarizate direct pe *alternanța pozitivă*  $\rightarrow T_1, T_3, T_5$ ;
- $\mathbf{N}_2, \mathbf{N}_4, \mathbf{N}_6$  pentru tiristoarele polarizate direct pe *alternanța negativă*  $\rightarrow T_2, T_4, T_6$ .

Acste puncte se află la intersecția formelor de undă a tensiunilor de fază, așa cum s-a prezentat în referatul dedicat procesului de comutație naturală în cazul convertorului trifazat cu punct median M3 (vezi Lucrarea 12).



**Fig. 13.1** Redresor trifazat în punte cu: (a) sarcină R-L; (b) sarcină R-L-E.

Pentru a determina intuitiv forma de undă a tensiunii redresate se consideră structura B6 ca fiind formată din două structuri cu punct median M3: convertorul  $M_{3p}$  ale cărui tiristoare  $T_1, T_3, T_5$  vor lucra pe semialternanțele pozitive și convertorul  $M_{3n}$  ale cărui tiristoare  $T_2, T_4, T_6$  vor lucra pe semialternanțele negative. Astfel, aplicând Kirchhoff, se poate determina tensiunea  $u_d(t)$  pe baza relației:

$$u_d(t) = u_{M_{3p}}(t) - u_{M_{3n}}(t) \quad (13.1)$$

Dacă se consideră potențialul de referință ca fiind nulul sistemului trifazat de tensiuni, dat în Fig.13.1 de punctul median al transformatorului  $TR$ , pentru un unghi de comandă  $\alpha = 0^\circ$  (impulsuri de comandă chiar în punctele de comutație naturală), rezultă formele de undă  $u_{M_{3p}}$  și  $u_{M_{3n}}$  ca cele prezentate în Fig.13.2.

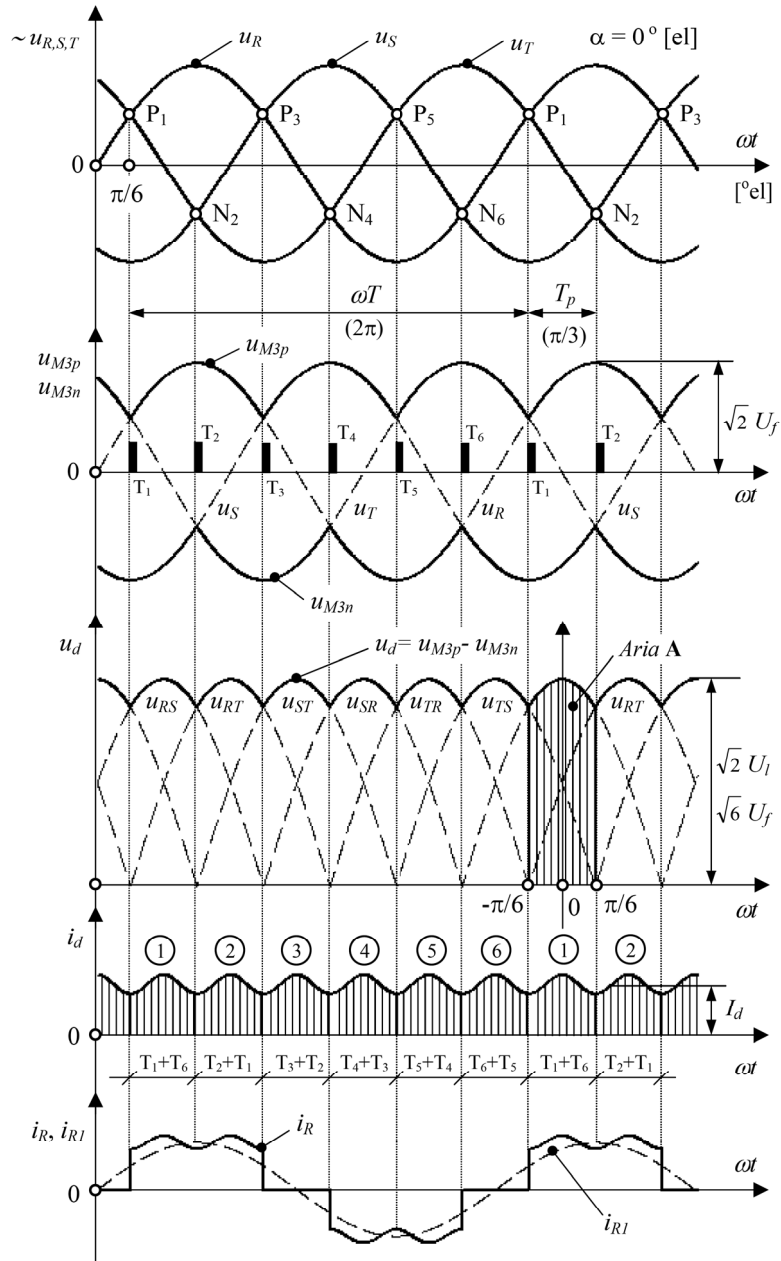


Fig. 13.2 Formele de undă corespunzătoare unui redresor trifazat în punte (B6) cu diode sau cu tiristoare comandate cu unghiul  $\alpha=0^\circ$ .

Într-o funcționare normală a punții trifazate întotdeauna va conduce un dispozitiv din structura  $M_{3p}$  împreună cu un dispozitiv din structura  $M_{3n}$ . Astfel, pe sarcina de c.c. legată la bornele de ieșire apar pulsuri ale tensiunilor de linie în funcție de combinația de tiristoare (diode) aflate în conducție.

Așa cum reiese din Fig.13.2, fiecare tiristor (diodă) va conduce un unghi electric de  $120^\circ$ . La jumătatea fiecărui interval de conducție se produce o comutație a curentului între două tiristoare (diode) din partea opusă a punții aparținând brațelor pe care nu se află tiristorul (dioda) în discuție. Astfel, rezultă 6 combinații de perechi de tiristoare aflate în conducție, respectiv 6 pulsuri sau combinații ale tensiunilor de linie la ieșirea punții trifazate. Aceste 6 combinații ( $u_{RS}$ ,  $u_{RT}$ ,  $u_{ST}$ ,  $u_{SR}$ ,  $u_{TR}$ ,  $u_{TS}$ ) sunt prezentate cu linie întreruptă în diagrama a treia din Fig.13.2. Cu linie plină sunt figurate numai pulsurile corespunzătoare acestor tensiuni pe intervalele în care conduc succesiv perechile de tiristoare:  $(T_1, T_6)$ ,  $(T_2, T_1)$ ,  $(T_3, T_2)$ ,  $(T_4, T_3)$ ,  $(T_5, T_4)$ ,  $(T_6, T_5)$ .

Pentru a calcula componenta continuă a tensiunii  $u_d$  de la ieșirea redresorului cu diode sau cu tiristoare comandate cu unghiul  $\alpha = 0^\circ$  se aplică formula valorii medii pe un interval  $T_p$  ( $\pi/3$  radiani):

$$U_{d0} = \text{val. medie } u_d(t) = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} u_d(t) \cdot dt = \frac{1}{T_p} \cdot \text{Aria A} \quad (13.2)$$

Cel mai simplu este să se considere originea în dreptul pulsului căruia i se aplică formula valorii medii, la jumătatea distanței dintre două puncte de comutație naturală, P și N (vezi Fig.13.2). În consecință, tensiunea  $u_d(t)$  este dată de funcția cosinus pe intervalul  $T_p$  a unui puls:

$$u_d(t) = \sqrt{2}U_l \cdot \cos \omega t = \sqrt{6}U_f \cdot \cos \omega t \quad \text{pentru} \quad \left( -\frac{\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{\pi}{6} \right) \quad (13.3)$$

unde  $U_f$  este valoarea efectivă a tensiunii de fază, iar  $U_l = \sqrt{3} \cdot U_f$  este valoarea efectivă a tensiunii de linie. Astfel,

$$\begin{aligned} U_{d0} &= \frac{1}{\pi/3} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} u_d(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{2}U_l \cos(\omega t) \cdot d(\omega t) = \\ &= \frac{3\sqrt{2}U_l}{\pi} \left[ \sin(\omega t) \right]_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} = \frac{3\sqrt{2}U_l}{\pi} \left[ \sin \frac{\pi}{6} - \sin \left( -\frac{\pi}{6} \right) \right] = \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_l = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_f = 1,35 \cdot U_l \approx 2,34 \cdot U_f \end{aligned} \quad (13.4)$$

Dacă se compară relația (13.4) cu cea obținută pentru structura monofazată în punte B2 ( $U_{d0} \approx 0,9 \cdot U_f$ ) se constată că tensiunea continuă maximă dată de redresorul trifazat în punte furnizează la ieșire o tensiune medie (continuă) cu mult mai mare, pentru o aceeași tensiune de fază  $U_f$ .

Inductanța de filtrare  $L_f$  necesară pentru redresorul B6 are o valoare mult mai mică decât inductanța folosită de un redresor monofazat pentru a obține un același riplu al curentului datorită frecvenței triple a pulsurilor de tensiune din forma de undă a tensiunii de ieșire:  $f_p = 6 \times f = 300\text{Hz}$ , dacă  $f = 50\text{Hz}$  este frecvența rețelei. Totuși, chiar în aceste condiții inductanța nu poate netezi perfect curentul  $i_d(t)$  și în Fig.13.2 este prezentată forma de undă reală a acestuia, cu ondulațiile datorate pulsurilor tensiunii  $u_d(t)$ . În studiul redresorului se lucrează cu valoarea medie  $I_d$  a acestui curent.

Dacă se analizează în paralel schema redresorului din Fig.13.1 și diagrama curentului  $i_d$  din Fig.13.2 se poate înțelege modul în care are loc comutația curentului de pe ramura tiristorului  $T_6$  pe ramura tiristorului  $T_2$ . Astfel, la jumătatea intervalului de conducție a lui  $T_1$ , atunci când este comandat  $T_2$ , curentul trece de pe calea notată cu (1), pe calea notată cu (2). Fenomenul se desfășoară în continuare până ce sunt parcurse toate cele 6 cicluri prezentate în Fig.13.2. Pentru determinarea relației (13.4) s-au neglijat duratele de comutație.

În ultima diagramă din Fig.13.2 este prezentată forma de undă a curentului absorbit de redresorul necomandat din partea de c.a. S-a luat spre exemplificare curentul de pe faza  $R \rightarrow i_R(t)$ . Se observă că acesta este alternativ, dar prezintă întreruperi. Pe intervalul în care:

- conduce tiristorul  $T_1$  curentul  $i_R(t) = i_d(t) > 0$ ;
- conduce tiristorul  $T_4$  curentul  $i_R(t) = -i_d(t) < 0$ ;

Semialternanțele curentului  $i_R(t)$  au o formă dreptunghiulară la care se adaugă două pulsații din ce în ce mai proeminente cu cât curentul  $i_d$  este mai prost filtrat. Având o asemenea formă este evident că, pe lângă armonica fundamentală  $i_{R1}(t)$ , curentul absorbit de la rețea conține și numeroase armonici.

Presupunând că  $i_d(t) \approx I_d - \text{const.}$  se poate calcula valoarea efectivă a curentului de fază  $I_f$  în funcție de valoarea medie a curentului în partea de c.c. Astfel, valoarea efectivă a curentului de pe faza  $R$  este:

$$\begin{aligned}
 I_f = I_R &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_s^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left( \int_{\pi/6}^{5\pi/6} I_d^2 \cdot d(\omega t) + \int_{7\pi/6}^{11\pi/6} (-I_d)^2 \cdot d(\omega t) \right)} = \\
 &= I_d \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \left( \frac{4\pi}{6} + \frac{4\pi}{6} \right)} = I_d \sqrt{\frac{2}{3}}
 \end{aligned}
 \tag{13.5}$$

În regimul stabilizat de funcționare al redresorului trifazat în care nu se modifică unghiul de comandă și curentul de sarcină, consumul este simetric pe cele 3 faze de unde rezultă valori efective egale ale curenților de fază:

$$I_f = I_R = I_S = I_T \quad (13.6)$$

#### Perturbații introduse în rețeaua de alimentare

Forma de undă a curentului de fază  $i_R(t)$  din Fig.13.2 evidențiază faptul că *redresorul trifazat necomandat poluează numai armonic rețeaua de alimentare*. Armonica fundamentală  $i_{R1}(t)$  a curentului  $i_R(t)$  este aproximativ în fază cu tensiunea de alimentare  $u_R(t)$  și puterea reactivă absorbită tinde spre zero. Observația este valabilă și pentru celelalte două faze, S și T.

Pe de altă parte, unghiul de suprapunere la comutație  $\gamma$  este cel mai mare atunci când procesul comutației începe imediat după punctul de comutație naturală. Are loc o evoluție lentă a curentului  $i_k$  datorită faptului că tensiunea de comutație  $u_k$  în acest interval este mică. În consecință, scurt circuitul de pe durata unghiului  $\gamma$  se prelungește creștând mai mult sinusoidale tensiunilor de linie.

#### **b) Analiza redresorului comandat (cu tiristoare)**

În Fig.13.3 sunt prezentate formele de undă corespunzătoare unui redresor trifazat în punte comandat în regim de redresor cu unghiul  $\alpha = 30^\circ$ . Spre deosebire de Fig.13.2, în Fig.13.3 s-a introdus separat o diagramă cu impulsurile de comandă ale celor 6 tiristoare  $T_1 \div T_6$ . Fiecare impuls este decalat cu unghiul  $\alpha$  față de punctele de comutație naturală corespunzătoare: P<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, N<sub>4</sub>, P<sub>5</sub>, N<sub>6</sub>.

Modul de funcționare al punții trifazate comandate în regim de redresor ( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ) este același cu cel descris în paragraful anterior pentru  $\alpha = 0^\circ$ . Întotdeauna va conduce un tiristor din structura  $M_{3p}$  împreună cu unul din structura  $M_{3n}$  (vezi Fig.13.1), astfel încât tensiunea la ieșirea redresorului este:

$$u_d(t) = u_{M_{3p}}(t) - u_{M_{3n}}(t)$$

Din diferența celor două unde  $u_{M_{3p}}$  și  $u_{M_{3n}}$  rezultă forma de undă a tensiunii  $u_d$  formată din 6 pulsuri identice într-o perioadă  $T$  a tensiunii de alimentare. Cele 6 pulsuri sunt date de tensiunile de linie:  $u_{RS}, u_{RT}, u_{ST}, u_{SR}, u_{TR}, u_{TS}$  pe intervalele în care conduc succesiv perechile de tiristoare:  $(T_1 T_6), (T_2 T_1), (T_3 T_2), (T_4 T_3), (T_5 T_4), (T_6 T_5)$ . Fiecare tiristor va conduce un unghi electric de  $120^\circ$ . La jumătatea fiecărui interval de conducție se produce o comutație a curentului între două tiristoare din partea opusă a punții.

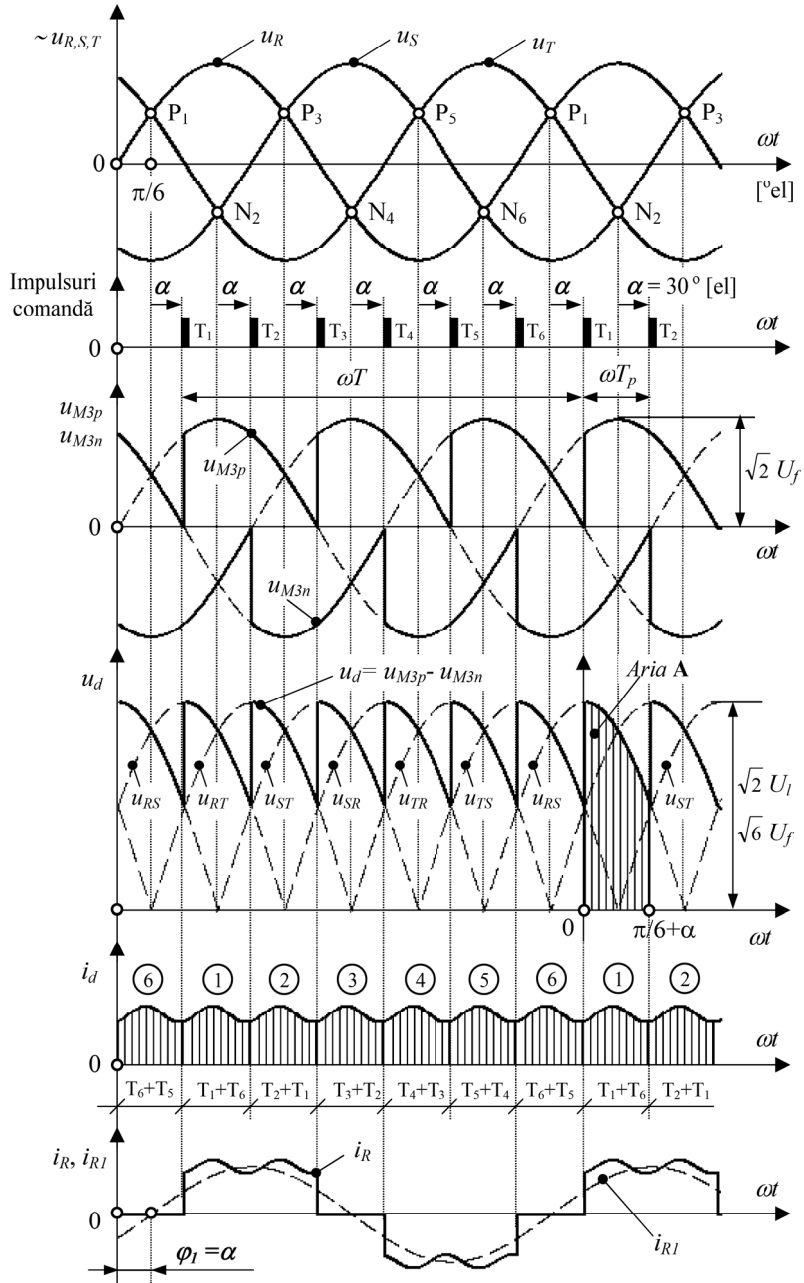


Fig. 13.3 Formele de undă corespunzătoare unui redresor trifazat în punte comandat cu un unghi  $\alpha=30^\circ$  [el].

Pentru a calcula componenta continuă a tensiunii  $u_d$  de la ieșirea redresorului trifazat în punte, comandat cu unghiul oarecare  $\alpha$ , se aplică formula valorii medii pe intervalul  $T_p$  ( $\pi/6$  radiani) din Fig.13.3:

$$U_{d\alpha} = \text{val. medie } u_d(t) = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} u_d(t) \cdot dt = \frac{1}{T_p} \cdot \text{Aria A} \quad (13.7)$$

Dacă se consideră originea în dreptul pulsului a căruia i se aplică formula valorii medii, la jumătatea distanței dintre două puncte de comutație naturală,  $U_{d\alpha}$  devine:

$$\begin{aligned} U_{d\alpha} &= \frac{1}{\pi/3} \int_{-\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} u_d(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} \sqrt{2}U_l \cos(\omega t) \cdot d(\omega t) = \\ &= \frac{3\sqrt{2}U_l}{\pi} [\sin(\omega t)]_{-\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} = \frac{3\sqrt{2}U_l}{\pi} \left[ \sin\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) - \sin\left(-\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right] = \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_l \cdot \cos \alpha = U_{d0} \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (13.8)$$

Relația (13.8) evidențiază posibilitatea reglării, exclusiv prin unghiul de comandă  $\alpha$ , a tensiunii continue de la ieșirea structurii B6 dacă acesta funcționează în regim de curent neîntrerupt. Caracteristica de reglaj  $U_{d\alpha} = f(\alpha)$  este aceeași cu cea prezentată în referatul dedicat redresorului monofazat în punte – Fig.13.4. Neliniaritatea funcției de transfer a redresorului se poate menține în limite acceptabile din punctul de vedere al teoriei sistemelor dacă se restrânge gama de comandă în intervalul:  $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ .

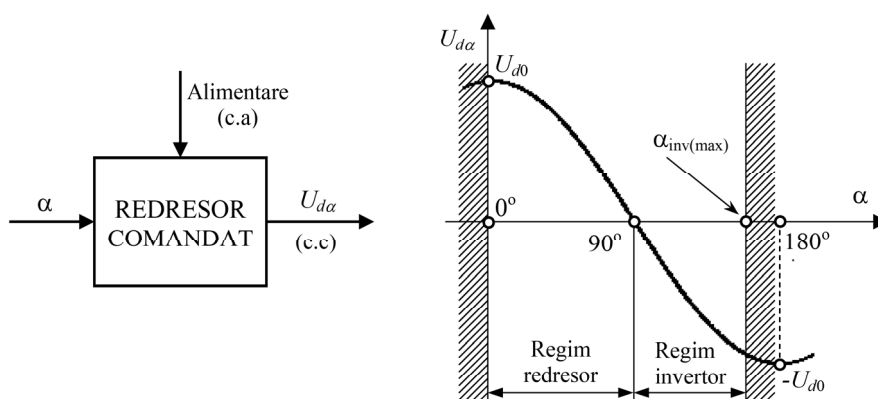


Fig. 13.4 Caracteristica de reglaj a redresorului trifazat în punte comandat:

$$U_{d\alpha} = f(\alpha) = U_{d0} \cdot \cos \alpha.$$



Analizând diagrama tensiunii  $u_d(t)$  din Fig.13.3, relația (13.8) sau caracteristica din Fig.13.4 se constată că, odată ce unghiului de comandă părăsește valoarea de  $0^\circ$  și evoluează crescător:

- Tensiunea medie  $U_{d\alpha}$  scade progresiv până la valoarea zero atunci când unghiul de comandă atinge valoarea  $\alpha = 90^\circ$ . În intervalul  $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$  convertorul funcționează în regim global de redresor ( $U_{d\alpha} > 0$ ).
- Pentru  $90^\circ < \alpha \leq \alpha_{inv(max)}$  convertorul poate funcționa în regim global de invertor ( $U_{d\alpha} < 0$ ) dacă sunt îndeplinite condițiile descrise la redresorul monofazat.
- Regimul de curent întrerupt sau conducția discontinuă poate să apară pentru un unghi  $\alpha > 60^\circ$  dacă inductanța de filtrare lipsește sau este insuficientă.

Dacă se analizează comparativ unda  $u_d(t)$  din Fig.13.2 cu cea din Fig.13.3 se constată că amplitudinea pulsurilor tensiunii de la ieșirea redresorului comandat este mai mare decât cea de la ieșirea redresorului necomandat. Din motive economice inductanța de filtrare  $L_f$  se dimensionează astfel încât riplul sau factorul de formă al curentului  $i_d$  să fie menținut sub o anumită valoare, atunci când pulsațiile tensiunii sunt maxime. Accastă condiție implică și evitarea regimului de curent întrerupt peste o anumită valoare a curentului mediu de sarcină  $I_d$ . Astfel, în aplicațiile reale forma de undă a curentului  $i_d(t)$  prezintă undulații, așa cum se arată în Fig.13.3. În analiza redresorului se lucrează cu valoarea medie  $I_d$  a acestui curent.

#### Perturbații introduse în rețeaua de alimentare

Forma de undă a curentului absorbit de puntea trifazată comandată rezultă așa cum a fost explicat în cazul punții necomandate. Și în acest caz a fost prezentată doar forma de undă a curentului de pe faza  $R$ , notat cu  $i_R(t)$  în Fig.13.3. Pe intervalul în care:

- conduce tiristorul  $T_1$  curentul  $i_R(t) = i_d(t) > 0$ ;
- conduce tiristorul  $T_4$  curentul  $i_R(t) = -i_d(t) < 0$ .

Conform diagramei  $i_R(t)$  prezentate în Fig.13.3, în cazul în care puntea trifazată **nu** este alimentată prin intermediul unui transformator cu *primarul legat în triunghi*, curentul de fază este alternativ, prezintă întreruperi, iar semialternanțele curentului au o formă dreptunghiulară la care se adaugă două pulsații date de riplul curentului  $i_d$ . Se observă o defazare a armonicii fundamentale  $i_{R1}(t)$  față tensiunea de alimentare cu un unghi  $\varphi_1 = \alpha$ .

Trebuie remarcat că, pe lângă poluarea armonică datorată formei de undă a curentului absorbit de la rețea și a creștăturilor din forma de undă a tensiunii rețelei datorate procesului comutației naturale, redresorul trifazat absoarbe și o **putere reactivă de comandă**:

$$Q = 3 \cdot U_f \cdot I_{f1} \cdot \sin \varphi_1 = 3 \cdot U_f \cdot I_{f1} \cdot \sin \alpha \quad (13.9)$$

unde  $I_{f1}$  este valoarea efectivă a armonicii fundamentale a curenților de fază. Atenție, această valoare este diferită de valoarea efectivă  $I_f = I_R = I_S = I_T$  a întregului curent de fază calculat cu ajutorul relației (13.5).

#### Aspecte practice de comandă ale redresorului trifazat în punte

Sunt două aspecte importante care trebuie luate în considerație atunci când se concepe schema de comandă pentru un redresor trifazat în punte cu tiristoare. Primul este legat de *amorsarea redresorului* (pornirea acestuia) și *menținerea funcționării acestuia în regim de curent întrerupt*, iar al doilea este legat de *modalitatea în care este implementată funcția de sincronizare a circuitului de comandă*.

##### 1) Amorsarea redresorului

În Fig.13.3 impulsurile de comandă sunt generate succesiv în funcție de ordinea în care tiristoarele trebuie să preia conducția. Intrarea în conducție a fiecărui tiristor determină blocarea altuia din aceeași parte a punții datorită procesului comutației naturale, descris anterior. În timpul funcționării toate comutațiile au loc atunci când în partea opusă a punții un tiristor se află în conducție fermă (la jumătatea intervalului de conducție a acestuia). S-ar putea crede că rolul circuitului de comandă este aceea de a genera succesiv aceste impulsuri la un anumit unghi  $\alpha$  pentru ca redresorul să funcționeze normal.

Problema apare în momentul pornirii convertorului, atunci când tiristorul care trebuia să fie în conducție, de fapt nu este. Din acest motiv schema de comandă ar trebui să genereze două impulsuri simultane, separate galvanic: unul care să comande tiristorul care trebuia să fie în conducție și celălalt pentru tiristorul care trebuie să preia de drept conducția în momentul respectiv. Dacă se ia, de exemplu, momentul în care trebuie comandat tiristorul  $T_1$ , atunci când se trimite impuls de comandă pentru acesta se va trimite impuls de comandă și tiristorului  $T_6$  ( $T_1 \rightarrow T_6$ ) – Fig.13.5. Mai departe când va fi comandat  $T_2$  i se va trimite impuls de comandă și tiristorului  $T_1$ . Se observă că tiristorul  $T_1$  va primi două impulsuri de comandă: primul atunci când trebuie să preia conducția prin procesul de comutație naturală și un al doilea impuls decalat cu  $60^\circ$ [el] care ajută la pornirea și funcționarea redresorului.

Schemele de comandă sunt realizate cu structuri combinaționale care asigură comanda cu câte două impulsuri a fiecărui tiristor din structura punții după cum urmează:  $T_1 \rightarrow T_6$ ;  $T_2 \rightarrow T_1$ ;  $T_3 \rightarrow T_2$ ;  $T_4 \rightarrow T_3$ ;  $T_5 \rightarrow T_4$ ;  $T_6 \rightarrow T_5$ . Dacă s-ar comanda numai tiristorul  $T_1$  și  $T_6$  simultan, redresorul ar porni și ar funcționa cu toate combinațiile de tiristoare numai dacă redresorul este în conducție continuă (permanentă). În cazul apariției regimului de curent întrerupt ambele tiristoare din cele 6 combinații se blochează la un moment dat pe intervalul  $T_p$ . Astfel, se impune comanda simultană a ambelor tiristoare din următoarea pereche care trebuie să preia conducția. Din acest motiv, pentru a trece redresorul prin toți cei 6 cicluri de

funcționare, se impune utilizarea unui circuit de comandă care asigură pentru fiecare tiristor două impulsuri de comandă decalate cu  $60^\circ$ [el], așa cum s-a prezentat mai sus.

În Fig.13.5 este prezentat într-o formă simplificată circuitul de comandă de pe faza R, cea care alimentează primul braț al punții trifazate, respectiv tiristoarele  $T_1$  și  $T_4$ . Se observă că fiecare transformator de impuls este prevăzut cu două secundare, unul pentru comanda tiristorului de drept și al doilea pentru comanda tiristorului care trebuia să fie în conducție. Pentru ca grila fiecărui tiristor să poată primi impulsuri din două direcții se utilizează o combinație de tip SAU formată din două diode.

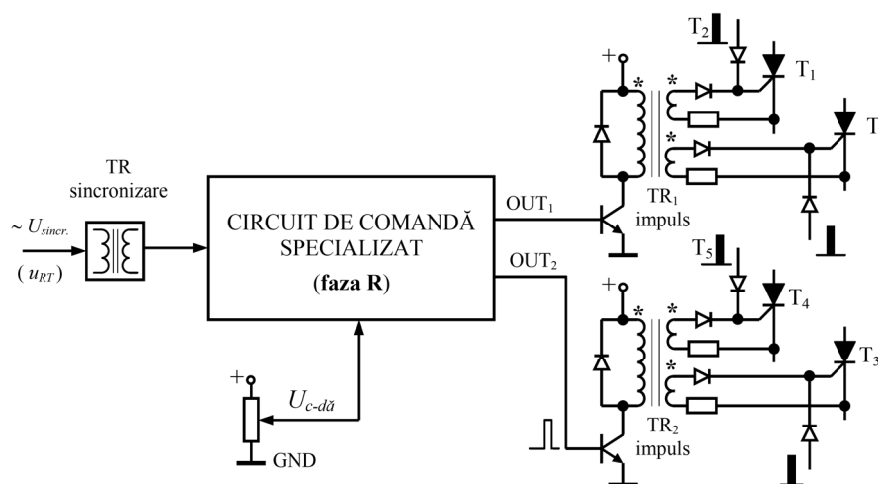


Fig. 13.5 Exemplu de realizare a circuitului de comandă pentru primul braț al punții trifazate ( $T_1$ ,  $T_4$ ).

## 2) Sincronizarea circuitului de comandă

Pentru o comandă corectă a tiristoarelor aparținând unei structuri trifazate funcția de sincronizare trebuie implementată astfel încât să se marcheze exact punctele de comutație naturală aflate la intersecția undelor tensiunilor de fază. În practică, pentru realizarea circuitelor de comandă se utilizează integrate specializate cum ar fi  $\beta\Lambda\Lambda 145$  ( $U\Lambda\Lambda 145$ ). Acestea pot detecta cel mai exact trecerile prin zero ale tensiunii de sincronizare ( $U_{sincr}$ ). Dacă sincronizarea se face după tensiunile de fază, trecerea prin zero are loc cu  $30^\circ$  înaintea punctelor de comutație naturală (vezi trecerea prin zero a tensiunii  $u_R$  față de punctul de comutație naturală  $P_1$  din Fig.13.3). O soluție la această variantă de sincronizare ar fi limitarea tensiunii de comandă, astfel încât impulsul să apară după un decalaj minim de  $30^\circ$  față de trecerea prin zero a tensiunii de fază. Soluția limitează gama de comandă, restrângând-o la maxim  $150^\circ$ el. Pentru a evita toate aceste dificultăți, cel mai indicat este să se sincronizeze circuitele de comandă după tensiunile de linie care trec prin zero exact în punctele de comutație naturală. În Fig.13.5 circuitul de comandă pentru brațul punții de faza R a fost

sincronizat după tensiunea de linie  $u_{RT}$  (vezi Fig.13.4) care trece prin zero exact în punctele de comutație naturală  $P_1$  și  $N_4$ , puncte corespunzătoare tiristoarelor  $T_1, T_4$ .

### 3. Montajul de laborator

Pentru realizarea montajului experimental al punții trifazate B6 se va utiliza aceeași instalație de laborator flexibilă descrisă în referatul dedicat structurii cu punct median M3. Pe acest stand de laborator se vor realiza legăturile din partea de forță în scopul obținerii structurii trifazate în punte într-un prim experiment cu sarcină rezistiv-inductivă ( $R-L$ ) ca în Fig.13.1(a), respectiv cu sarcină activă  $R-L-E$  (motor de c.c.) ca în Fig.13.1(b). În Fig.13.6 este prezentată imaginea lucrării de laborator în care se utilizează ca sarcină a redresorului trifazat motorul de c.c. în serie cu o inductanță de filtrare.

În cazul sarcinii  $R-L$ , ca inductanță de filtrare se va utiliza un autotransformator, iar ca rezistență de sarcină un reostat. Prin modificarea poziției cursorului la autotransformator poate fi reglată valoarea inductanței  $L_f$  și poate fi indus regimul de curent întrerupt. La limită atunci când cursorul este adus în poziția zero sarcina poate fi considerată pur rezistivă. Pe de altă parte, prin modificarea poziției cursorului reostatului se modifică rezistența de sarcină și implicit amplitudinea curentului mediu de la ieșirea redresorului.

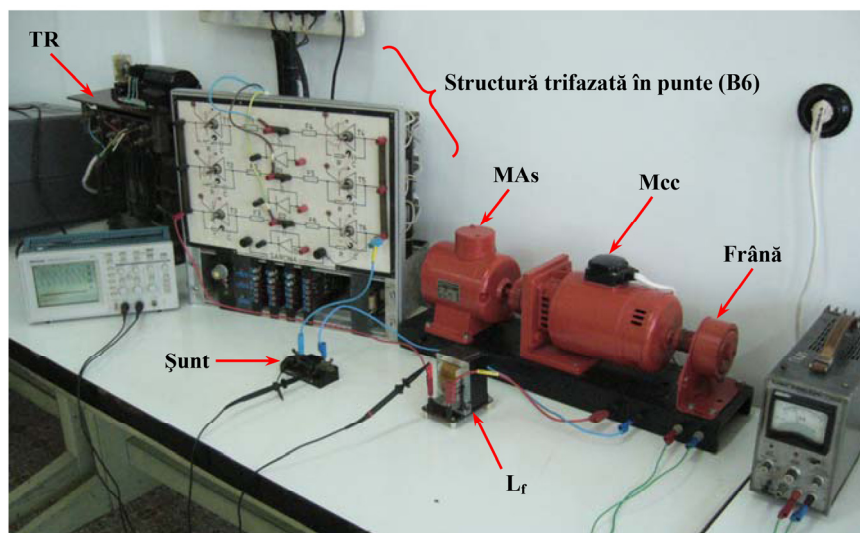


Fig. 13.6 Imaginea montajului din laborator al lucrării.

În cazul sarcinii active, ca inductanță de filtrare se poate utiliza același autotransformator sau o inductanță de valoare fixă special realizată pentru montaje de laborator (vezi Fig.13.6). Prin utilizarea autotransformatorului se poate obține regimul de

curent întrerupt. Modificarea amplitudinii curentului de sarcină poate fi realizată prin intermediul unei frâne electromagnetice cuplate mecanic pe axul motorului de c.c. Aceasta este alimentată de la sursă de laborator și prin reglarea tensiunii acesteia poate fi modificat cuplu de frânare și implicit curentul prin indusul motorului. Pentru oscilografiera formelor de undă ale curenților  $i_d$  și  $i_R$  se vor folosi șunturi de laborator. Conectarea acestora și a celorlalte elemente de circuit se vor realiza prin intermediul unor cabluri prevăzute cu banane la capete.

Pentru a oscilografia simultan semnalele  $u_d$  și  $i_d$  se va folosi un osciloscop cu două spoturi, iar pentru măsurarea valorii medii a tensiunii de ieșire  $U_{d\alpha}$  se va utiliza un voltmetru.

#### 4. Modul de lucru

1. Se vor studia aspectele teoretice cu privire la funcționarea redresorului trifazat în punte prevăzut cu filtru de curent la ieșire: forme de unde, relația de calcul a tensiunii medii în cazul structurii cu diode și în cazul structurii cu tiristoare, caracteristica de reglaj, perturbații introduse în rețea, aspecte de comandă, de sincronizare etc.
2. Se va realiza schema din Fig.13.1(a) pe instalația din laborator – redresor trifazat în punte comandată cu sarcină  $R-L$ ;
3. Se va pune în funcțiune schema de comandă și se vor oscilografia succesiv cu ajutorul osciloscopului, tensiunile de sincronizare împreună cu impulsurile de zero, semnalul dinte de fierăstrău și impulsurile de comandă de pe panoul frontal al fiecărui modul de comandă corespunzător fiecărui braț al punții realizat cu integratul specializat  $\beta AA145$  (UAA145);
4. De pe panul frontal al modului de distribuție a impulsurilor de comandă se vor oscilografia impulsurile pentru fiecare tiristor și se va observa că fiecare dispozitiv este comandat cu două impulsuri succesive defazate cu  $60^\circ$ el, aspect observat și în cazul oscilografierii semnalului de comandă direct de pe grila tiristoarelor;
5. Se va alimenta schema de forță apăsând butonul de START și se vor oscilografia formele de undă ale tensiunilor  $u_{M3p}$ , respectiv  $u_{M3n}$  furnizate de cele două structuri M3 din structura punții trifazate (conducție continuă -  $L_f$  mare);
6. Se vor vizualiza formele de undă  $u_d$  și  $i_d$  de la ieșirea punții trifazate pentru diferite unghiuri de comandă în regim global de redresor. Se va observa că tensiunea  $u_d$  rezultă din diferența celor două tensiuni  $u_{M3p}$  și  $u_{M3n}$ .
7. Se va măsura componenta continuă  $U_{d\alpha}$  pentru diferite unghiuri de comandă cu ajutorul voltmetrului în cazul conducției continue;

8. Se va fixa un unghi de comandă peste  $60^\circ$ el. și se va scădea progresiv inductanța din circuitul de sarcină acționând asupra cursorului autotransformatorului până se instalează regimul de curent întrerupt și se va observa creșterea tensiunii medii pe măsură ce acest regim se accentuează;
  9. Se va oscilografia formele de undă  $u_d$  și  $i_d$  la limită, când inductanța  $L_f$  este anulată (sarcină este pur rezistivă) și se va observa instalarea regimului de curent întrerupt imediat ce unghiul de comandă  $\alpha > 60^\circ$ el.
  10. Se va realiza schema din Fig.13.1(b) pe instalația din laborator – redresor trifazat în punte comandată cu sarcină activă  $R-L-E$  (motor de c.c – Fig.13.6);
  11. Se va pune în evidență variația vitezei motorului odată cu modificarea unghiului de comandă în gama ( $0^\circ \div 90^\circ$ ) în prezența un cuplu sarcină relativ ușor impus de frâna electromagnetică;
  12. În condițiile utilizării unei inductanțe de filtrare variabile (autotransformator) se va induce regimul de curent întrerupt și se va observa modificarea formei de undă a tensiunii  $u_d$ , creșterea valorii medii și mărirea vitezei motorului după instalarea acestui regim;
  13. Se va fixa valoarea inductanței de filtrare la limita regimului de curent întrerupt și se va observa dispariția conducției discontinue dacă este crescut cuplul de sarcină al motorului de c.c. cu ajutorul frânei electromagnetice (creșterea curentului de sarcină peste o limită corespunzătoare unei anumite inductanțe de filtrare);
  14. Se va oscilografia și se va interpreta forma de undă a curentului de fază cu ajutorul unui șunt conectat pe traseul de alimentare al fazei  $R$ . Se va pune în evidență modificarea undei acestuia odată cu scăderea inductanței de filtrare, atât în regimul conducției continue, cât și în regimul conducției discontinue.
  15. Instalația de laborator are prevăzută și o diodă de descărcare cu borne de acces pe panoul frontal pentru a fi conectată cu ușurință în antiparalel cu puntea  $B6$  complet comandată. În aceste condiții se va observa cum se modifică tensiunea  $u_d$  atunci când unghiul de comandă  $\alpha > 60^\circ$ el. Cu toate că prin sarcina de c.c. curentul este permanent convertorul va trece în regim de curent întrerupt, iar forma de undă a tensiunii de ieșire este identică cu cea obținute în cazul utilizării unei sarcini pur rezistive de către redresor. Se va verifica experimental acest aspect.
-