
Lucrarea 8

REDRESORUL MONOFAZAT ÎN PUNTE PREVĂZUT CU FILTRU DE CURENT LA IEȘIRE

1. Introducere

Structura monofazată în punte (B2) este utilizată la puteri mici, de preferat sub 1kW. În comparație cu puntea trifazată, puntea monofazată este mai simplă, mai ieftină și mult mai ușor de comandat. Pe de altă parte, realizând doar o redresare bialternanță, frecvența pulsurilor tensiunii de ieșire este joasă și sunt necesare filtre de curent sau de tensiune mari și scumpe.

O redresare bialternanță poate fi realizată și cu ajutorul unui redresor monofazat cu punct median (M2) care necesită, obligatoriu, utilizarea unui transformator supradimensionat cu două secundare identice. Spre deosebire de M2, structura în punte B2 poate fi alimentată direct de la rețea dacă nu se impune o adaptare a nivelurilor tensiunii. În acest fel, este eliminat un element de circuit scump, cu volum și masă mare cum este transformatorul. Dacă se impune o adaptare a tensiunilor și/sau o separare galvanică în variantă modernă se preferă redresarea directă a tensiunilor de rețea și utilizarea mai departe a unor convertoare c.c. – c.c., cu sau fără separare galvanică (surse în comutație).

Un argument în plus în favoarea punții redresoare constă în posibilitatea găsirii cu ușurință și la un preț mic a unor module integrate de putere (module PIM) care integrează această structură pentru o gamă largă de tensiuni și curenți.

2. Structura redresorului monofazat în punte (montajul de laborator)

Așa cum rezultă din Fig.8.1, redresorul monofazat în punte este format din două brațe, fiecare braț fiind format din două dispozitive înseriate, diode în cazul redresorului necomandat sau tiristoare în cazul redresorului comandat. În total rezultă 4 dispozitive redresoare, cu două mai multe decât la redresorul M2. Această diferență este acceptabilă dacă se au în vedere avantajele structurii în punte, menționate mai sus, și faptul că sunt dispozitive cu tensiune inversă maximă mult diminuată.

În Fig.8.1 s-a prezentat cazul cel mai general în care se impune un transformator TR de adaptare a tensiunilor. Sarcinile de c.c. care necesită o filtrare a curentului sunt, în general, de tip rezistiv-inductiv R-L (Fig.8.1.a) sau de tip R-L-E (Fig.8.1.b). Acestea din urmă sunt sarcini active care conțin o sursă proprie de tensiune. Cel mai reprezentativ exemplu din această categorie este motorul de c.c. a cărui schemă echivalentă conține, pe lângă rezistența indusului R_a și inductanță L_a ,

tensiunea contra-electromotoare E . Dacă inductanța proprie a sarcinii nu este suficient de mare pentru buna filtrare a curentului sunt folosite **inductanțe de filtrare** adiționale, notate cu L_f numite și **bobine de netezire**.

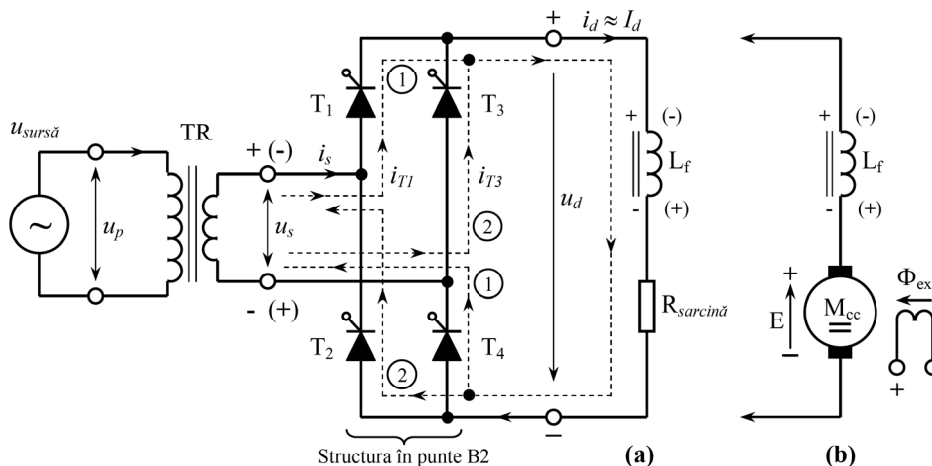


Fig. 8.1 Redresor monofazat în punte cu: (a) sarcină R-L; (b) sarcină R-L-E.

3. Analiza redresorului necomandat (cu diode)

Dacă în schema din Fig.8.1 se folosesc diode în loc de tiristoare se obține un redresor în punte necomandat prevăzut cu filtru de curent la ieșire. Funcționarea acestuia poate fi obținută și cu ajutorul redresorului cu tiristoare dacă este comandat cu un unghi $\alpha = 0^\circ$. Astfel, analiza redresorului necomandat în condițiile filtrării curentului în partea de c.c. devine un caz particular de funcționare al redresorului comandat. În Fig.8.2 sunt prezentate formele de undă corespunzătoare acestui caz particular.

În prima diagramă aparținând tensiunii de alimentare u_s (tensiunea din secundarul transformatorului) s-au figurat punctele de comutație naturală:

- **P** pentru tiristoarele polarizate direct pe *alternanța pozitivă* $\rightarrow T_1, T_4$;
- **N** pentru tiristoarele polarizate direct pe *alternanța negativă* (potențialele din paranteze de la bornele transformatorului) $\rightarrow T_3, T_2$;

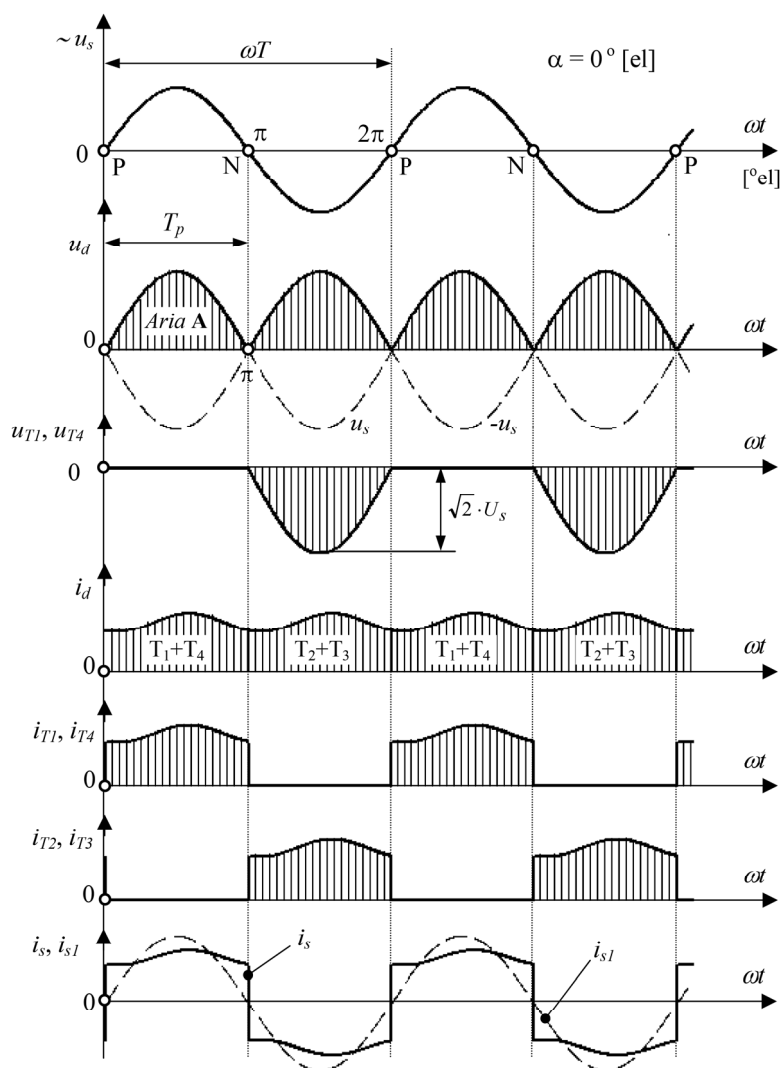


Fig. 8.2 Formele de undă corespunzătoare unui redresor monofazat în punte cu diode sau cu tiristoare comandate la un unghi $\alpha=0^\circ$.

Tensiunea u_d de la ieșirea redresorului, în cazul regimului de curent neîntrerupt și $\alpha = 0^\circ$, este constituită din pulsuri de forma unor semialternanțe pozitive datorită efectului de redresare a punții. Astfel, valorile instantanee pentru tensiunea u_d sunt date de relația:

$$u_d(\omega t) = |u_s(\omega t)| = \begin{cases} u_s(\omega t) & \text{pentru } 0 \leq \omega t < \pi \text{ (conduc } T_1 \text{ si } T_4) \\ -u_s(\omega t) & \text{pentru } \pi \leq \omega t < 2\pi \text{ (conduc } T_2 \text{ si } T_3) \end{cases} \quad (8.1)$$

În relația (8.1) și în Fig.8.2 s-a considerat cazul comutației ideale a curentului de pe calea tiristoarelor (T_1, T_4) pe calea tiristoarelor (T_2, T_3) și viceversa.

Pentru a calcula componenta continuă se aplică formula valorii medii pe un interval T_p (π radiani):

$$\begin{aligned} U_{d0} &= \text{val. medie } u_d(t) = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} u_d(t) \cdot dt = \frac{1}{T_p} \cdot \text{Aria } A = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_d(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_s \sin(\omega t) \cdot d(\omega t) = \\ &= \frac{\sqrt{2}U_s}{\pi} [-\cos(\omega t)]_0^{\pi} = \frac{\sqrt{2}U_s}{\pi} [\cos 0 - \cos \pi] = \\ &= \frac{2\sqrt{2}U_s}{\pi} \cong 0,9 \cdot U_s \end{aligned} \quad (8.2)$$

Relația (8.2) pune în evidență legătura dintre valoarea tensiunii continue la ieșirea unui redresor necomandat cu diode (sau a unuia cu tiristoare comandat cu un unghi $\alpha = 0^\circ$) și valoarea efectivă a tensiunii alternative aplicată la intrare. Se observă că tensiunea continuă maximă pe care poate să o furnizeze un redresor monofazat bialternanță nu poate atinge valoarea tensiunii efective ($U_{d(\max)} = U_{d0} \approx 0,9 \cdot U_s$).

Inductanța de filtrare L_f oricât ar fi de mare nu poate netezi perfect curentul $i_d(t)$ și în figură este arătată forma de undă reală a acestuia cu ondulațiile datorate pulsurilor tensiunii $u_d(t)$. În analiza redresorului se lucrează cu valoarea medie I_d a acestui curent. Dacă se privește schema redresorului din Fig.8.1 și formele de undă ale curenților din Fig.8.2 se constată că un interval $T_p = T/2$ curentul i_d este preluat de ramura tiristoarelor T_1 și T_4 pe calea notată cu (1), iar în cealaltă semiperioadă este preluat de ramura tiristoarelor T_2 și T_3 pe calea notată cu (2). În timpul conducerii perechii (T_1, T_4), curentul pe partea de c.a. (i_s) este pozitiv și în timpul conducerii perechii (T_2, T_3) curentul i_s este negativ.

Dacă se consideră $i_d(t) \approx I_d = \text{const.}$ se poate calcula valoarea efectivă a curentului în partea de c.a. în funcție de valoarea medie a curentului în partea de c.c.:

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_s^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^{T/2} I_d^2 \cdot dt + \int_{T/2}^T (-I_d)^2 \cdot dt \right)} = I_d \quad (8.3)$$

Forma de undă nesinusoidală a curentului $i_s(t)$ din partea de c.a. evidențiază faptul că redresorul necomandat poluează armonice rețeaua de alimentare, pe lângă armonica fundamentală i_{s1} apar pe linia de alimentare numeroase armonici superioare.

4. Analiza redresorului comandat (cu tiristoare)

În Fig.8.3 sunt prezentate formele de undă corespunzătoare unui redresor monofazat în punte comandat în regim de redresor cu unghiul $\alpha = 60^\circ$.

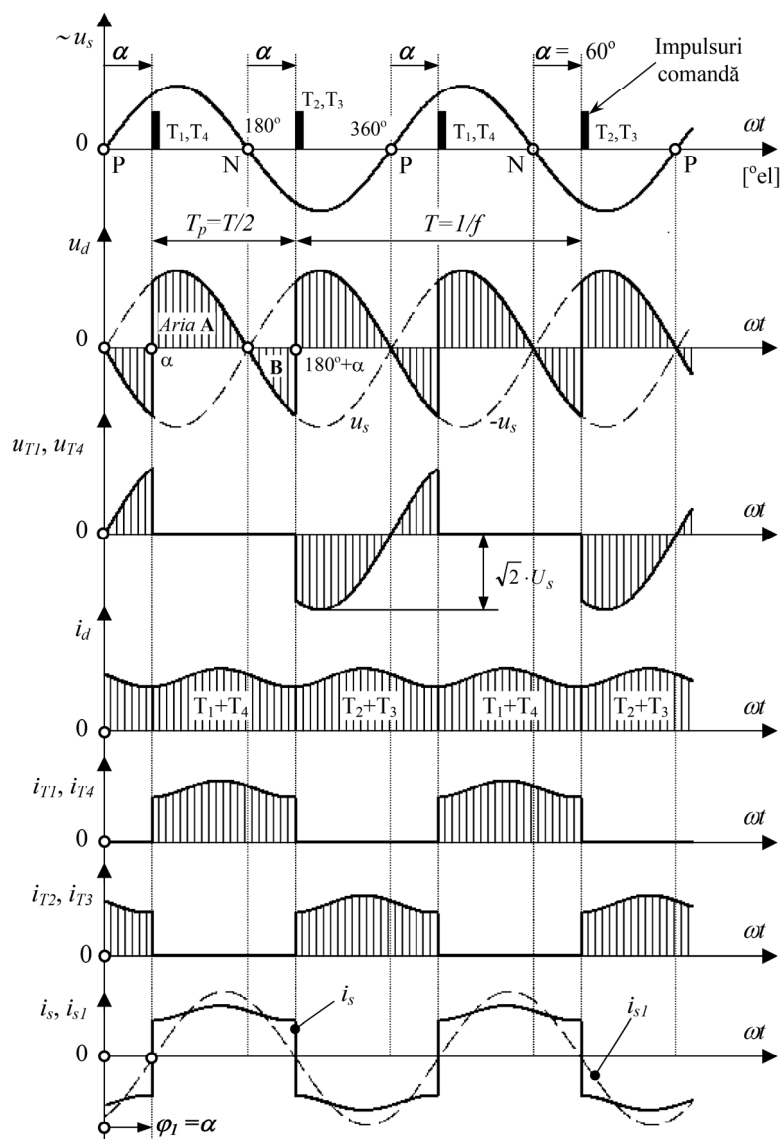


Fig. 8.3 Formele de undă corespunzătoare unui redresor monofazat în punte comandat cu unghi $\alpha=60^\circ$ [el].

Tensiunea u_d de la ieșirea redresorului, în cazul conducerii continue și în condițiile unei comutații ideale este constituită din pulsuri ale căror valori instantanee sunt date de relațiile:

$$u_d(\omega t) = \begin{cases} u_s(\omega t) & \text{pentru } \alpha \leq \omega t < \pi + \alpha \text{ (conduc } T_1 \text{ și } T_4) \\ -u_s(\omega t) & \text{pentru } \pi + \alpha \leq \omega t < 2\pi + \alpha \text{ (conduc } T_2 \text{ și } T_3) \end{cases} \quad (8.4)$$

Pe durata unei perioade $T = 1/f$ a tensiunii alternative de alimentare se obțin două pulsuri identice având perioada $T_p = T/2$. Pentru a calcula componenta continuă se aplică formula valorii medii pe durata unui puls (T_p sec. sau π rad.):

$$\begin{aligned} U_{d\alpha} &= \text{val. medie } u_d(t) = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} u_d(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \cdot (\text{Aria A} + \text{Aria B}) = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}U_s \sin(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}U_s}{\pi} [-\cos(\omega t)]_{\alpha}^{\pi+\alpha} = \\ &= \frac{\sqrt{2}U_s}{\pi} [\cos \alpha - \cos(\pi + \alpha)] = \frac{2\sqrt{2}U_s}{\pi} \cdot \cos \alpha = U_{d0} \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (8.5)$$

Relația (8.5) evidențiază că la un redresor comandat funcționând în conducție continuă (permanentă sau regim de curent neîntrerupt) tensiunea medie la ieșire poate fi reglată exclusiv prin unghiul de comandă α (*convertor controlabil*).

Dacă se privește sistemic redresorul comandat se poate defini funcția de transfer sau **caracteristica de reglaj** $U_{d\alpha} = f(\alpha)$ așa cum se prezintă în Fig.8.4. Aceasta este neliniară datorită funcției trigonometrice *cosinus* din expresia tensiunii continue de la ieșirea redresorului comandat. Observația este valabilă pentru toate redresoarele comandate.

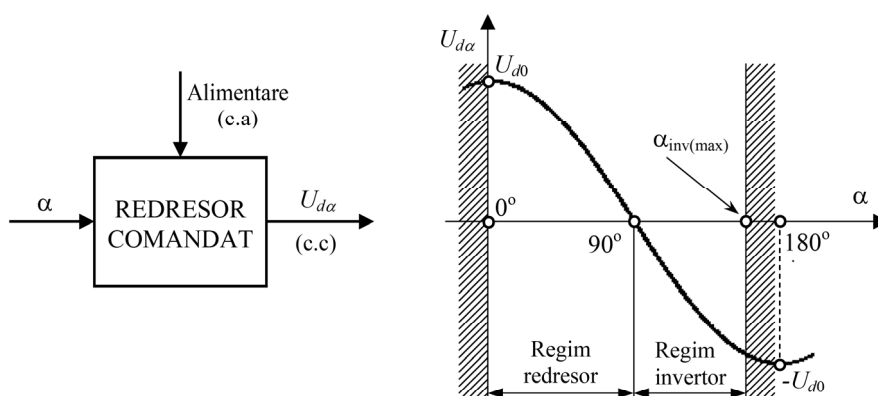


Fig. 8.4 Caracteristica de reglaj a unui redresor comandat $U_{d\alpha} = f(\alpha) = U_{d0} \cdot \cos \alpha$.

Așa cum reiese din Fig.8.4, neliniaritatea funcției de transfer se reduce substanțial dacă se restrânge gama de reglaj a unghiului de comandă la un interval din jurul valorii de 90° . Având în vedere că unghiul de comandă este limitat la maxim de $\alpha_{\text{inv(max)}}$ (ca o consecință a procesului comutației naturale), pentru a păstra simetria în ceea ce privește amplitudinea maximă a tensiunii continue se limitează unghiul de comandă și la minim: $\alpha_{\text{redr(min)}} = 180^\circ - \alpha_{\text{inv(max)}}$. Astfel, în cazul în care se lucrează cu redresorul în sisteme controlate, pentru a nu da sistemului un puternic caracter neliniar, se preferă ca unghiul de comandă să fie menținut în intervalul:

$$\alpha_{\text{redr(min)}} \leq \alpha \leq \alpha_{\text{inv(max)}} \quad (8.6)$$

Se obișnuiește ca intervalul de reglaj să fie: $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$

Analizând forma de undă a tensiunii $u_d(t)$ din Fig.8.3 se observă că, odată ce unghiul de comandă crește peste valoarea de 0° , pulsurile vor conține și porțiuni de alternanțe negative. În consecință:

- Tensiunea medie $U_{d\alpha}$ scade progresiv așa cum se prezintă în Fig.8.4 ajungând la valoarea zero atunci când unghiul de comandă este $\alpha = 90^\circ$. În intervalul $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ convertorul funcționează în regim global de redresor. Pentru $90^\circ < \alpha \leq \alpha_{\text{inv(max)}}$ convertorul poate funcționa în regim global de invertor ($U_{d\alpha} < 0$) dacă sunt îndeplinite și alte condiții. Acest regim de funcționare al redresoarelor comandate va fi tratat într-un alt referat.
- Dacă inductanța din partea de c.c. lipsește sau este insuficientă poate să apară regimul de curent întrerupt care va fi tratat în secțiune următoare.

Pentru formele de undă din Fig.8.3 inductanța de filtrare L_f a fost considerată suficient de mare astfel încât redresorul să evite conducția întreruptă și curentul de sarcină să fie relativ bine netezit. În ciuda unei componente alternative (riplu) din forma de undă a curentului $i_d(t)$ în analiza redresorului se lucrează cu valoarea medie I_d . Acest curent este comutat ciclic între calea notată cu (1) și calea notată cu (2) în Fig.8.1. Întotdeauna va conduce un tiristor din partea superioară a punții împreună cu unul din partea inferioară. În timpul conducției perechii (T_1, T_4) curentul i_s este pozitiv, iar în timpul conducției perechii (T_2, T_3) curentul este negativ.

Analizând forma de undă a curentului $i_s(t)$ din partea de c.a. se observă că redresorul comandat poluează rețeaua de alimentare în mai multe feluri. Pe lângă **poluarea armonică** datorată formei de undă a curentului $i_s(t)$ și a **crestăturilor** din forma de undă a tensiunii rețelei datorate procesului comutației naturale (nereprezentate în Fig.8.3) se absoarbe și o **putere reactivă de comandă** :

$$Q = U_s \cdot I_{s1} \cdot \sin \varphi_1 = U_s \cdot I_{s1} \cdot \sin \alpha \quad (8.7)$$

datorată defazării armonicii fundamentale $i_{s1}(t)$ a curentului alternativ față tensiunea de alimentare cu un unghi $\varphi_1 = \alpha$ (vezi Fig.8.3).

5. Funcționarea redresorului monofazat în regim de curent întrerupt

Toate analizele care s-au făcut mai sus asupra redresorului monofazat prevăzut cu un filtru de curent la ieșire au pornit de la premiza unei funcționări normale a acestuia, atunci când curentul continuu este bine filtrat și nu se întrerupe prin convertor (conducție continuă sau permanentă). Nu întotdeauna poate fi obținut acest regim de funcționare. Existența permanentă a curentului în partea de c.c. și implicit pe tot intervalul alocat conducerii unei diode, tiristor sau a unei perechi de asemenea componente se bazează pe energia acumulată în inductanța văzută de redresor la bornele de ieșire. Dacă inductanța aceasta este insuficientă sau curentul de sarcină I_d scade sub o valoare minimă $I_{d(min)}$ energia acumulată în inductanță ($W_L = L \cdot I_d^2 / 2$) scade sub o valoare care nu mai poate asigura conducția dispozitivelor redresoare pe tot intervalul în care tensiunea alternativă de alimentare sau tensiunea sarcinii active are tendința să polarizeze invers aceste dispozitive. Într-o asemenea situație curentul se întrerupe prin redresor și se instaurează **regimul de curent întrerupt (conducție discontinuă, intermitentă sau întreruptă a curentului)**. Odată cu apariția acestui regim formele de undă prezentate în paragrafele anterioare se modifică în funcție de tipul sarcinii conectate la ieșirea redresorului. Totodată, apar și o serie de consecințe negative care vor fi menționate ulterior.

a) Conducția întreruptă în cazul unei sarcini rezistive

Un regim de curent întrerupt clar și sugestiv apare atunci când la bornele de ieșire a unui redresor comandat este legată o sarcină rezistivă, așa cum se prezintă în Fig.8.5.

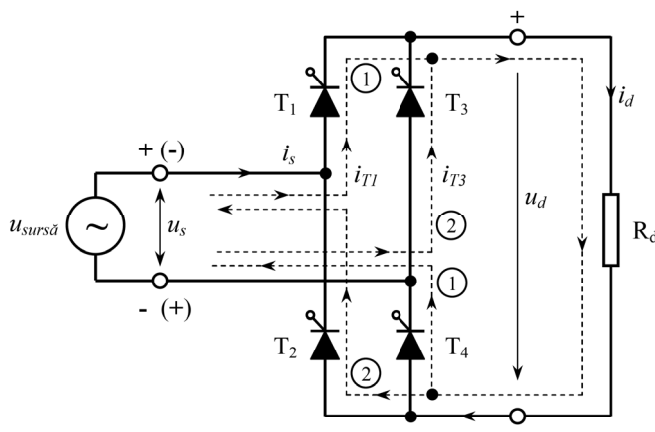


Fig. 8.5 Redresor în punte comandat cu sarcină de c.c. pur rezistivă.

Este o aplicație întâlnită rar în practică deoarece sarcinile de c.c. sunt, în general, de tip $R-L$ sau de tip $R-L-E$. Totuși, studiul structurii din Fig.8.5 se impune din rațiuni didactice, cazul plasându-se la limita cea mai simplă a unui larg spectru de aplicații cu redresoare comandate. În condițiile în care sunt neglijate toate inductanțele din circuit (inductanța sursei alternative, inductanța conductoarelor de legătură și inductanța proprie a sarcinii) curentul $i_d(t)$ va urmări fidel unda tensiunii $u_d(t)$ conform celor ilustrate în Fig.8.6.

Dacă tiristoarele structurii redresoare sunt comandate cu un unghi $\alpha = 0^\circ$ sau redresorul este de tip necomandat cu diode curentul $i_d(t)$ nu se întrerupe. Dacă unghiul de comandă este diferit de zero ($\alpha > 0^\circ$) conducția fiecărei perechi de tiristoare (T_1, T_4), respectiv (T_2, T_3), are loc până în momentul trecerii prin zero a tensiunii alternative deoarece nu există o inductanță care să întrețină, pe baza energiei acumulate în câmp, circulația curentului și după schimbarea alternanței. Astfel, curentul se întrerupe și dispozitivele care erau în conducție se blochează. Este ruptă legătura între partea de c.a. și partea de c.c. până când este comandată următoarea pereche de tiristoare. Pe intervalul în care curentul se întrerupe tensiunea instantanee la ieșire se anulează:

$$u_d(\omega t) = 0 \text{ pentru } k\pi < \omega t \leq k\pi + \alpha, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (8.8)$$

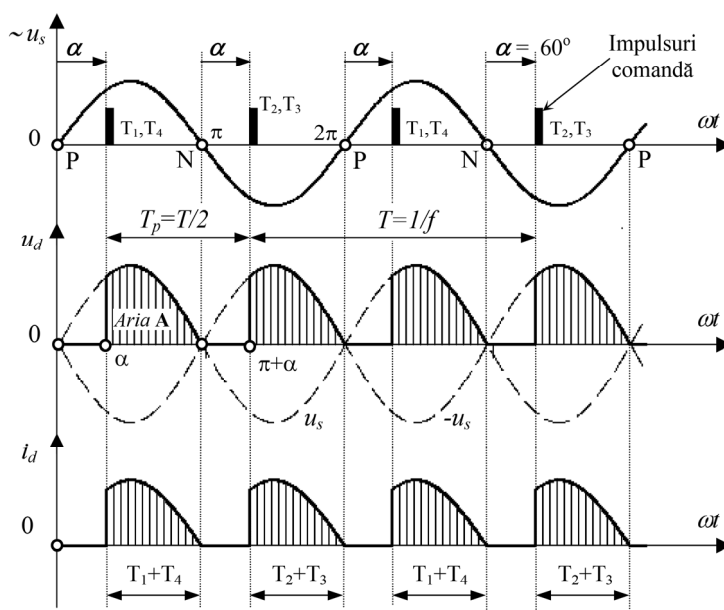


Fig. 8.6 Conducția întreruptă (discontinuuă) în cazul unui redresor monofazat cu sarcină pur rezistivă ($\alpha=60^\circ$ [el]).

Într-o asemenea situație dispar intervalele în care redresorul funcționează în regim instantaneu de inverter unde tensiunea $u_d(t) < 0$, așa cum apar în cazul conducerii continue (vezi Fig.8.3). Evident că și valoarea medie a tensiunii la ieșirea redresorului se modifică:

$$\begin{aligned} U'_{d\alpha} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} u_d(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} u_d(\omega t) \cdot d(\omega t) + \frac{1}{\pi} \int_{\pi}^{\pi+\alpha} 0 \cdot d(\omega t) = \\ &= \frac{1}{\pi} \cdot \text{Aria A} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_s \sin(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}U_s}{\pi} [-\cos(\omega t)]_{\alpha}^{\pi} = \quad (8.9) \\ &= \frac{\sqrt{2}U_s}{\pi} (\cos \alpha - \cos \pi) = \frac{\sqrt{2}U_s}{\pi} \cdot (1 + \cos \alpha) = \frac{U_{d0}}{2} \cdot (1 + \cos \alpha) \geq 0 \end{aligned}$$

Se observă că tensiunea medie în partea de c.c. a unui redresor comandat care funcționează într-un regim de curent întrerupt este tot timpul pozitivă și este mai mare decât tensiunea dată de același redresor funcționând cu o conducție continuă la un același unghi de comandă α :

$$U'_{d\alpha} \geq U_{d\alpha} \Leftrightarrow \frac{U_{d0}}{2} (1 + \cos \alpha) \geq U_{d0} \cdot \cos \alpha \Leftrightarrow 1 \geq \cos \alpha \rightarrow \text{adevarat} \quad (8.10)$$

Relația (8.10) este întărită și de Fig.8.7 unde se prezintă comparativ graficul caracteristicii de reglaj al unui redresor comandat cu inductanță de filtrare și conducție continuă ($U_{d\alpha} = f(\alpha)$) împreună cu graficul unui redresor comandat funcționând în regim de curent întrerupt ($U_{d\alpha}' = f(\alpha)$) ca o consecință a unei sarcini pur rezistive.

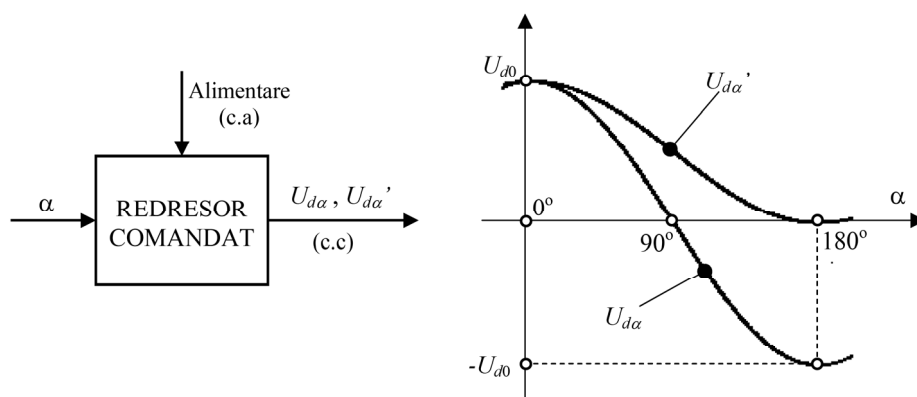


Fig. 8.7 $U_{d\alpha} = f(\alpha)$ pentru un redresor cu inductanță de filtrare și conducție continuă;
 $U_{d\alpha}' = f(\alpha)$ pentru un redresor cu sarcină pur rezistivă și conducție întreruptă.

Deoarece în cazul conducerii întrerupte curentul este nul înainte de a comanda următoarea pereche de tiristoare (sau următorul tiristor în cazul structurii cu punct median), nu există procesul comutației naturale. În consecință, nu se pune problema limitării unghiului maxim de comandă ca în cazul conducerii continue. Astfel, un redresor cu sarcină rezistivă sau așa cum se va vedea într-un referat ulterior un redresor cu ramură de descărcare, poate fi comandat în toată gama de $(0^\circ \div 180^\circ)$ obținându-se tot timpul o tensiune pozitivă a cărei valoare urmărește graficul $U_{d\alpha}' = f(\alpha)$ din Fig.8.7. Nu se pune problema unei funcționări în regim de invertor.

b) Conductia întreruptă în cazul unei sarcini rezistiv-inductive

Sunt sarcini pasive de c.c. care au nevoie de o filtrare a curentului dacă sunt alimentate de la surse care furnizează tensiunea sub forma unor pulsuri cu o componentă continuă, așa cum este redresorul. În acest caz, pe lângă inductanța proprie a sarcinii ($L_{sarcină}$) care este de multe ori insuficientă, se adaugă o inductanță de filtrare L_f . Astfel, din punct de vedere al redresorului sarcina văzută la bornele de ieșire este una de tip rezistiv-inductiv cum se prezintă în Fig.8.8, unde:

$$L_d = L_f + L_{sarcină} \text{ și } R_d = R_f + R_{sarcină}$$

Inductanța de filtrare se dimensionează în funcție de amplitudinea maximă a ondulațiilor curentului acceptate de sarcină și în funcție de o valoare minimă a curentului continuu peste care redresorul funcționează în conducție continuă (permanentă). Această valoare minimă este aleasă astfel încât într-un regim normal de funcționare curentul de sarcină nu coboară sub ea. Pe de altă parte, este de dorit ca această limită minimă să fie cât mai sus pentru a utiliza o inductanță cât mai mică și a reduce gabaritul, masa și prețul componente, implicit al convertorului.

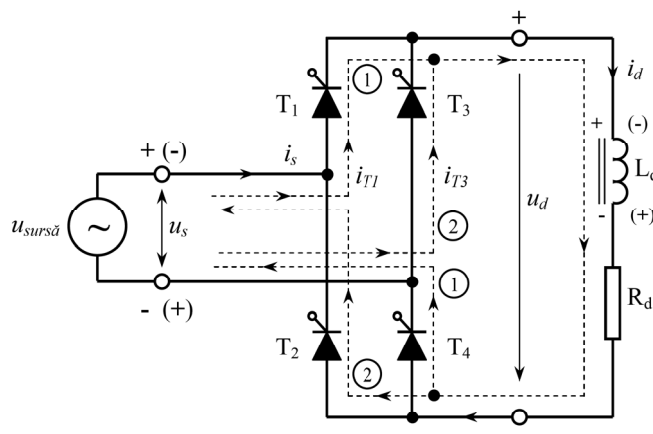


Fig. 8.8 Redresor monofazat în punte comandat cu sarcină de c.c. rezistiv-inductivă.

Se observă că valoarea inductanței de filtrare L_f este rezultatul unui compromis și în consecință există o valoare de prag a curentului de sarcină I_d^* sub care se instalează regimul de curent întrerupt. Formele de undă corespunzătoare acestui regim pentru o sarcină $R-L$ sunt prezentate în Fig.8.9.

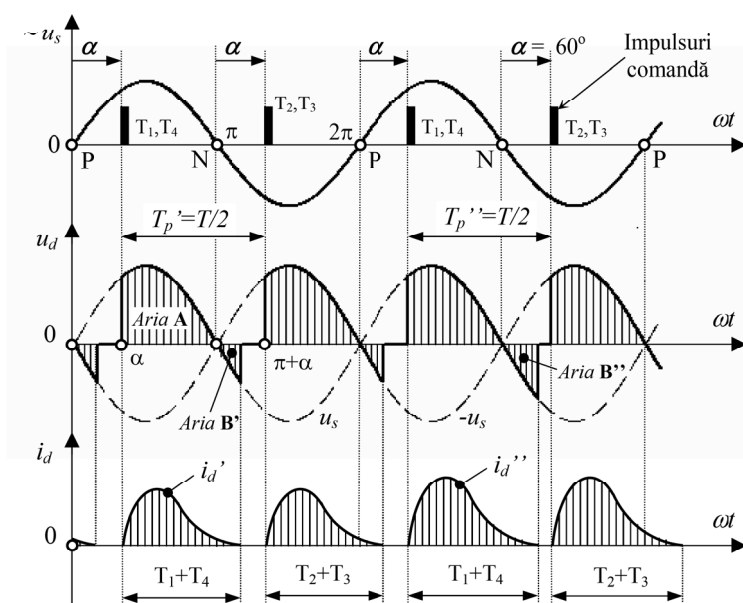


Fig. 8.9 Conducția întreruptă (discontinuuă) în cazul unui redresor monofazat cu sarcină rezistiv-inductivă ($\alpha=60^\circ$ [el]).

În prima parte a intervalelor de conducție corespunzătoare celor două perechi de tiristoare (T_1, T_4) și (T_2, T_3) din structura punții monofazate, curentul $i_d(t)$ are o evoluție crescătoare ($di_d/dt > 0$) și inductanța de sarcină L_d acumulează energie în câmpul propriu. În al doilea subinterval în care panta curentului este negativă ($di_d/dt < 0$) și amplitudinea semialternanțelor scade, inductanța începe să cedeze din energia acumulată. La trecerea tensiunii prin zero există un interval în care redresorul funcționează în regim instantaneu de inverter când circulația curentului se prelungește și pe durata semialternanței opuse. Dacă energia acumulată în inductanța de sarcină este relativ mică aceste intervale nu se prelungesc până în momentul deschiderii celeilalte perechi de tiristoare. Astfel, apare regimul de curent întrerupt (conducția discontinuuă) cu următoarele consecințe:

- O funcționare anormală a sarcinii sensibile la forma de undă a curentului. Dacă sarcina a impus un filtru de curent rezultă că necesită un curent continuu cât mai neted, iar întreruperile acestuia pot afecta buna ei funcționare.

- Redresorul devine necontrolabil din punct de vedere al tensiunii de ieșire deoarece aceasta va depinde, pe lângă unghiul de comandă α și de curentul de sarcină I_d . Pentru a pune în evidență acest efect se vor scrie relațiile de calcul ale tensiunii medii la ieșirea redresorului pentru doi curenți diferiți $i_d'(t)$ și $i_d''(t)$ ale căror forme de undă sunt prezentate în Fig.8.9:

- În cazul curentului $i_d'(t)$ tensiunea continuă se calculează aplicând formula valorii medii pentru intervalul notat în figură cu T_p' (perioada pulsului):

$$U_{d\alpha}' = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} u_d(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \cdot (\text{Aria A} + \text{Aria B}') \quad (8.11)$$

- În cazul curentului $i_d''(t)$ tensiunea continuă se calculează aplicând formula valorii medii pentru intervalul T_p'' :

$$U_{d\alpha}'' = \frac{1}{\pi} \int_{2\pi+\alpha}^{3\pi+\alpha} u_d(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \cdot (\text{Aria A} + \text{Aria B}'') = f(\alpha, I_d) \quad (8.12)$$

Așa cum reiese și din Fig.8.9 valoarea medie I_d'' corespunzătoare curentului $i_d''(t)$ este mai mare decât valoarea medie I_d' corespunzătoare curentului $i_d'(t)$ ($I_d'' > I_d'$) și:

$$\left. \begin{array}{l} |\text{Aria B}''| > |\text{Aria B}'| \\ \text{Aria B}' < 0, \text{Aria B}'' < 0 \end{array} \right\} \Rightarrow U_{d\alpha}' > U_{d\alpha}'' > 0 \quad (8.13)$$

Relația (8.13) pune în evidență dependența tensiunii medii de la ieșirea unui redresor funcționând în regim de curent întrerupt de o variabilă aleatorie cum este curentul de sarcină. Totodată, în condițiile unei sarcini pasive $|\text{Aria B}'| < \text{Aria A}$ și tensiunea medie furnizată de redresor este tot timpul pozitivă ($U_{d\alpha}' > 0$), dar de valoare mai mică decât în cazul unei sarcini pur rezistive dată de relația (8.9). În relația de calcul a $U_{d\alpha}'$ pentru sarcina rezistivă lipsește $\text{Aria B}'$ dependentă de curentul de sarcină, deci poate fi controlată exclusiv prin unghiul de comandă.

Forma de undă a curentului $i_d(t)$ poate fi determinată prin rezolvarea ecuației diferențiale de echilibru a tensiunilor pe durata conducției tiristoarelor:

$$R_d \cdot i_d(t) + L_d \frac{di_d(t)}{dt} = u_s(t) = \sqrt{2} \cdot U_s \sin \omega t \quad (8.14)$$

Ecuția (3.96) are două soluții, o soluție liberă $i_{dl}(t) = K \cdot e^{-t/\tau}$ și o soluția forțată dată de relația: $i_{df}(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot U_s}{\sqrt{R_d^2 + (\omega L_d)^2}} \cdot \sin(\omega t - \varphi_d)$.

c) Conducția întreruptă în cazul unei sarcini active R-L-E

Este un caz des întâlnit în acționările electrice reglabile cu motoare de c.c. alimentate de la redresoare comandate. Fiind o sarcină ce are nevoie de un curent cât mai bine netezit, motorul M_{cc} este însoțit de o inductanță de filtrare L_f , așa cum se prezintă în Fig.8.10. În timpul funcționării ca motor mașina de c.c. se va roti cu viteza n și va genera o tensiune contraelectromotoare $E = k_v \cdot \Phi_{pv} \cdot n$ a cărei polaritate se opune polarității tensiunii de alimentare U_{da} . Astfel, schema echivalentă a sarcinii văzută la ieșirea redresorului comandat este de tip R-L-E cum se prezintă în figură unde: $L_d = L_f + L_a \rightarrow L_a$ este inductanța indusului M_{cc} și $R_d = R_f + R_a \rightarrow R_a$ este rezistența indusului.

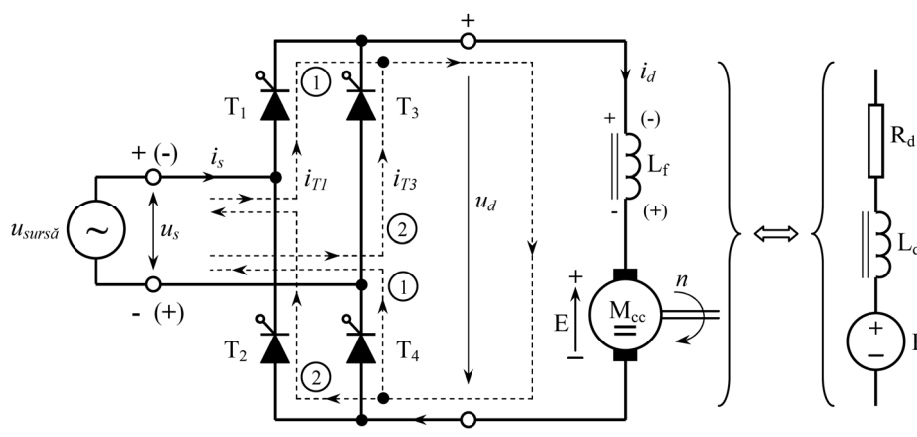


Fig. 8.10 Redresor monofazat în punte comandat cu sarcină activă R-L-E.

Conform celor argumentate în paragraful anterior, valoarea inductanței L_f este rezultatul unui compromis punând față în față gabaritul, masa și prețul bobinei cu riplul acceptat al curentului de sarcină $i_d(t)$ și gama în care variază acesta. Dacă sarcina este un motor de c.c. valoarea medie a curentului prin indusul acestuia I_d este proporțională cu sarcina mecanică de la arbore. Astfel, dacă această sarcină scade sub o valoare de prag, curentul mediu de sarcină $I_d < I_d^*$ și redresorul va funcționa în regim de curent întrerupt (conducție discontinuă). Formele de undă corespunzătoare acestui regim pentru o sarcină R-L-E sunt prezentate în Fig.8.11.

Trebuie precizat că **sarcina activă favorizează regimul de curent întrerupt** al redresorului deoarece momentul din care inductanța începe să cedeze energie este devansat în punctele F (vezi Fig.8.11) atunci când modulul valorii instantanee a tensiunii alternative scade sub valoarea tensiunii E : $|u_s(t)| < E$. După aceste momente

tensiunea contra-electromotoare are tendința de a polariza invers perechea de tiristoare aflată în conducție și a bloca circulația curentului $i_d(t)$. Datorită energiei acumulate în câmpul inductanțelor ($L_d = L_f + L_a$) odată cu scăderea curentului ($di_d/dt < 0$) apare o tensiune autoindusă:

$$u_L(t) = L_d \cdot \frac{di_d(t)}{dt} = |u_s(t)| - E - R_d \cdot i_d < 0 \tag{8.15}$$

a cărci polaritate (+ pe borna inferioară a L_d) și amplitudină ajută la întreținerea circulației curentului prin compensarea diferenței dintre tensiunea de alimentare și tensiunea electromotoare.

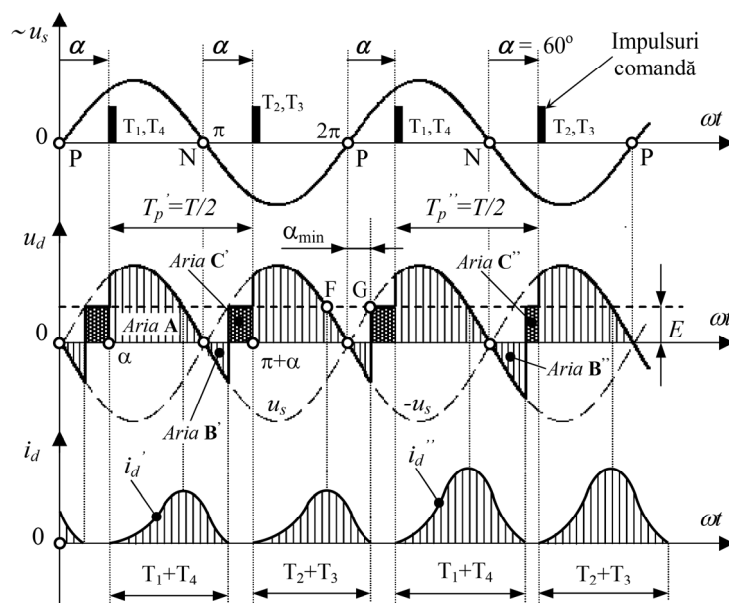


Fig. 8.11 Conducția întreruptă (discontinua) în cazul unui redresor monofazat cu sarcină activă $R-L-E$ ($\alpha=60^\circ$ [el]).

În cazul în care sarcina motorului scade sub o anumită valoare ($I_d < I_d^*$) sau bobina de netezire este subdimensionată energia acumulată în inductanță nu este suficientă pentru a menține circulația curentului $i_d(t)$ până la deschiderea următoarei perechi de tiristoare la un anumit unghi de comandă α . Apare, astfel, regimul de curent întrerupt cu toate consecințele negative aferente:

- Funcționarea necorespunzătoare a sarcinii (a motorului de c.c.):
 - *funcționare zgomotoasă* datorită anulării cuplului electromagnetic pe intervalele în care se întrerupe curentul;

- creșterea pierderilor în mașină (a pierderilor în fier și a pierderilor pe rezistența indusului) datorită suprapunerii unei componente alternative importante peste componenta continuă (factor de formă ridicat). Prin creșterea pierderilor mașina se poate supraîncălzi și din acest motiv sunt alese motoarele de c.c. proiectate special pentru a fi alimentate de la convertoare electronice de putere, cu un circuit magnetic format din tole și puterea ușor mărită.
- Redresorul devine necontrolabil din punct de vedere al tensiunii de ieșire deoarece aceasta depinde, pe lângă unghiul de comandă α și de curentul de sarcină I_d . Fenomenul a fost explicat în paragraful anterior în cazul regimului de curent întrerupt pentru o sarcină $R-L$. Dacă se privește comparativ Fig.3.21 cu Fig.3.19 se observă că în regimul de curent întrerupt pentru o sarcină $R-L-E$ forma de undă a tensiunii $u_d(t)$ conține porțiuni ale tensiunii electromotoare E pe intervalele în care $i_d(t)$ se întrerupe. Este un indiciu că redresorul se află în regim de curent întrerupt dacă se oscilografiază doar tensiunea de la ieșirea redresorului.

Dependența tensiunii continue de curentul de sarcină reiese din figură unde sunt prezentate formele de undă pentru doi curenți diferiți $i_d'(t)$ și $i_d''(t)$:

- În cazul curentului $i_d'(t)$ tensiunea continuă se calculează aplicând formula valorii medii pentru intervalul T_p' (perioada pulsului):

$$U_{d\alpha}' = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} u_d(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \cdot (Aria A + Aria B' + Aria C') \quad (8.16)$$

- În cazul curentului $i_d''(t)$ tensiunea continuă se calculează aplicând formula valorii medii pentru intervalul T_p'' :

$$U_{d\alpha}'' = \frac{1}{\pi} \int_{2\pi+\alpha}^{3\pi+\alpha} u_d(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \cdot (Aria A + Aria B'' + Aria C'') \quad (8.17)$$

Având în vedere că valorile medii $I_d'' > I_d'$ rezultă:

$$\left. \begin{array}{l} Aria B'' < Aria B' < 0 \\ 0 < Aria C'' < Aria C' \end{array} \right\} \Rightarrow 0 < U_{d\alpha}'' < U_{d\alpha}' \quad (8.18)$$

- Limitarea unghiului de comandă la un minim impus de necesitatea amorsării tiristoarelor:

$$\alpha > \alpha_{\min} \quad (8.19)$$

Pe măsură ce unghiul de comandă scade, crește valoarea tensiunii medii de ieșire determinând creșterea turației motorului n și implicit a tensiunii

electromotoare E . Astfel, limita unghiului de comandă se apropie rapid de punctele G aflate la intersecția dintre tensiunea electromotoare E și $|u_s(t)|$ (vezi Fig.3.21). Dacă unghiul de comandă devine $\alpha < \alpha_{\min} \Rightarrow |u_s(t)| < E$ tensiunea electromotoare a motorului (sau tensiunea sarcinii active) va polariza invers tiristoarele comandate împiedicând intrarea în conducție a acestora la momentul respectiv. În condițiile unor impulsuri scurte de comandă urmează un interval T_p sau un număr de mai multe asemenea cicluri în care dispare tensiunea de la ieșirea redresorului. Pe aceste intervale motorul nu este alimentat și începe să își reducă viteza (tensiunea electromotoare E). La un moment dat: $E < |u_s(\omega t)|_{\omega t = \alpha}$ și tiristoarele se pot amorsa din nou, reluând alimentarea motorului. Acesta își crește turația, respectiv tensiunea electromotoare E ajungându-se iarăși în situația polarizării inverse a tiristoarelor. Fenomenele încep să se repete conducând la *aparitia unor oscilații a ansamblului convertor-motor*. Situația poate fi evitată dacă se realizează o comandă continuă în grila tiristoarelor după momentul $\omega t = \alpha$, acestea căpătând mai departe comportamentul unor diode care se vor deschide imediat ce tensiunea sinusoidei întrunește condiția: $|u_s(t)| > E$.

Pe lângă consecințele neplăcute menționate mai sus care apar atunci când redresorul funcționează într-un regim de curent întrerupt bine instalat sau stabilizat, mai poate fi evidențiat un fenomen de oscilație a ansamblului convertor-motor atunci când redresorul trece de la o conducție continuă la o conducție întreruptă.

Conform celor arătate, pentru o anumită inductanță de filtrare L_f și un anumit unghi de comandă α , dacă sarcina mecanică a motorului scade sub o anumită valoare ($I_d < I_d^*$), convertorul trece de la conducția continuă la conducția întreruptă. Această basculare se face cu o creștere semnificativă a valorii tensiunii medii:

$$U_{d\alpha} \rightarrow U'_{d\alpha} = U_{d\alpha} + \Delta U_d \quad \text{unde } \Delta U_d = f(\alpha, I_d) \quad (8.20)$$

deoarece o porțiune din aria negativă B corespunzătoare conducției continue (vezi Fig.3.11) se transformă în aria pozitivă C'. Datorită creșterii bruște a tensiunii continue de la bornele motorului va crește după constanta de timp electromagnetică și valoarea medie a curentului prin indus deoarece turația (E) se modifică mai lent, după constanta de timp electromecanică:

$$U'_{d\alpha} = U_{d\alpha} + \Delta U_d = E + R_d(I_d + \Delta I_d) \quad (8.21)$$

Creșterea cu ΔI_d a curentului prin indusul motorului va determina o accelerație a motorului datorită creșterii cuplului electromagnetic și totodată va aduce redresorul din nou la o conducție continuă deoarece:

$$I_d + \Delta I_d > I_d^* \quad (8.22)$$

Prin trecerea redresorului în regimul conducerii continue tensiunea la bornele lui scade la valoarea U_{da} , ceea ce provoacă scăderea curentului mediu I_d și o decelerare a motorului. După un timp se ajunge din nou în situația $I_d < I_d^*$ și convertorul recade în regimul de curent întrerupt, procesele reluându-se, așa s-a arătat mai sus, într-o oscilație care este dăunătoare, atât pentru motor, cât și pentru convertor.

Se observă că regimul de curent întrerupt al redresorului pentru o sarcină activă este mult mai dăunător decât în cazul unei sarcini pasive $R-L$, mai ales dacă sarcina activă este un motor de c.c. ($R-L-E$). Din acest motiv în asemenea aplicații se calculează și se alege cu grijă inductanța de filtrare L_f pentru a evita conducția întreruptă chiar și la sarcinile cele mai mici pe care le preia motorul în timpul funcționării. Cu atât mai mult, dacă ansamblul convertor-motor face parte dintr-o buclă de reglare a vitezei, poziției etc. apariția la un moment a regimului de curent întrerupt poate să provoace o instabilitate a sistemului deoarece regulatoarele au fost acordate luând în calcul regimul normal de funcționare al redresorului (conducția continuă sau permanentă).

În concluzie, se poate afirma că regimul de curent întrerupt este unul anormal în funcționarea unui redresor comandat cu sarcină $R-L$ sau $R-L-E$. Studiul acestuia se impune pentru a ști cum poate fi evitat sau dacă apare în timpul funcționării, ce măsuri trebuie luate pentru a reduce la minim influența consecințelor negative menționate mai sus.

6. Montajul de laborator

În scopul studiului experimental al aspectelor legate de funcționarea punții redresoare monofazate comandate se va realiza schema din Fig.8.1 cu cele două variante: de sarcină pasivă R și $R-L$, respectiv sarcină activă $R-L-E$. Pentru aceasta în laborator se dispune de următoarele elemente de circuit :

- un transformator (TR) de alimentare a montajului cu o tensiune joasă ($24V_{ca}$);
 - o punte redresoare monofazată (B2) cu tiristoare realizată sub forma unui modul de putere PIM. Modulul este plasat pe un radiator pe care s-au montat și bornele de legătură pentru terminalele de forță, respectiv comandă;
 - un circuit de comandă pe grilă (CCG) al punții redresoare realizat cu ajutorul integratului specializat $\beta AA145$ (circuit descris în Lucrarea 3 de laborator);
 - un motor de c.c. cu magneți permanenți (M) cuplat pe același ax cu o altă mașină identică (G) care va funcționa în regim de generator având rolul de a încărcă mecanic motorul și a obține, în acest fel, o variație a curentului absorbit de la redresorul comandat în scopul studiului conducerii întrerupte al punții redresoare pentru diferiți curenți de sarcină;
 - un autotransformator (ATR.) conectat între borna 0 și cursor în poziția inductanței L_f a cărei valoare poate fi reglată continuu;
-

- un reostat conectat între un capăt și cursor în poziția rezistenței variabile R_d sau în poziția rezistenței de frânare R_{fr} , legată ca sarcină pentru generatorul de c.c.;
- un șunt pentru oscilografiera formei de undă a curentului i_d ;

Modul de interconectare al elementelor de circuit în cazul sarcinii active este prezentat în Fig.8.12. Imaginile montajului de laborator sunt prezentate în Fig.8.13.

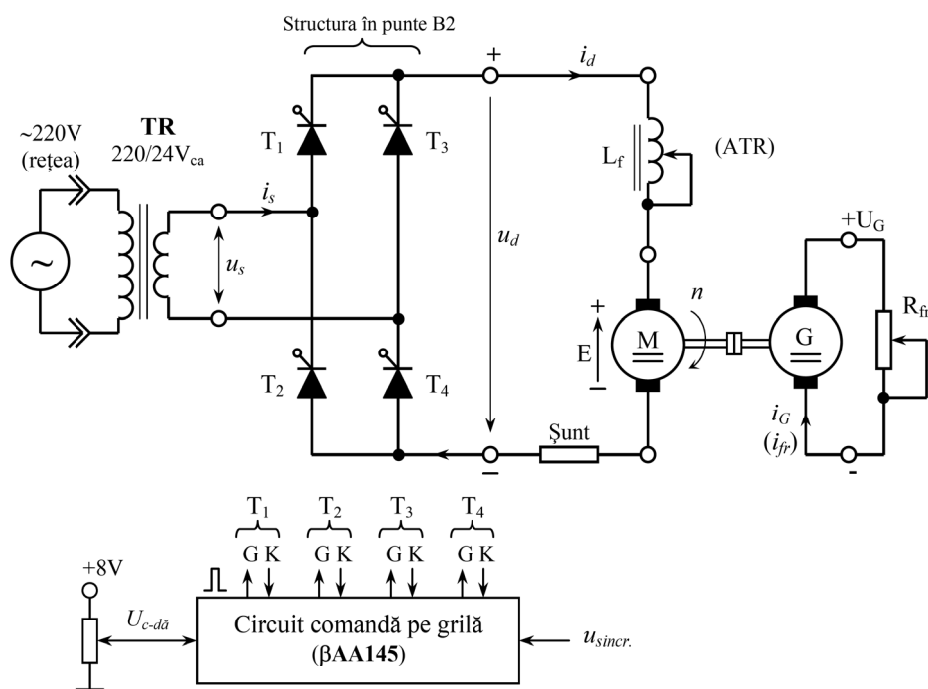


Fig. 8.12 Montajul de laborator – punte redresoare B2 cu sarcină activă $R-L-E$ (M_{cc})

Toate elementele de circuit menționate pot fi interconectate prin intermediul unor conductoare prevăzute cu banane la capete, așa cum se prezintă în imaginea din Fig.8.13. Se va utiliza un voltmetru pentru a măsura valoarea medie a tensiunii u_d și un osciloscop cu două spoturi pentru a oscilografia semnalele.

Circuitul de sarcină de tip $R-L$ poate fi obținut conectând în poziția motorului de c.c. din Fig.8.12 un reostat. Sarcina pur rezistivă se obține aducând cursorul autotransformatorului ATR în poziția zero. Deoarece circuitul de comandă și circuitul de forță sunt alimentate prin două cordoane diferite, la punerea în funcțiune trebuie avut grijă să se realizeze fazarea corectă a impulsurilor de comandă. Dacă schema nu funcționează se va inversa în priză una din fișele de alimentare.

7. Modul de lucru

1. Se vor studia aspectele teoretice cu privire la funcționarea redresorului monofazat în punte prevăzut cu un filtru de curent la ieșire: forme de undă, relația de calcul a tensiunii medii de ieșire, caracteristica de reglaj etc.
2. Se vor studia aspectele teoretice cu privire la funcționarea structurii B2 comandate în regim de curent întrerupt pentru diferite sarcini și consecințele care apar datorită instalării acestui regim;
3. Se va realiza schema din Fig.8.12, se va pune în funcțiune în regim de curent neîntrerupt (L_f mare) și se vor vizualiza formele de undă u_d și i_d pentru diferite unghiuri de comandă în regim global de redresor.
4. Se va măsura componenta continuă $U_{d\alpha}$ pentru diferite unghiuri de comandă cu ajutorul unui voltmetru analogic și se va urmări variația vitezei motorului odată cu modificarea valorii tensiunii redresate;
5. Se vor realiza schemele din figurile 8.5, 8.8 și 8.10 și se vor oscilografia formele de undă aferente fiecărei structuri prezentate (vezi figurile 8.6, 8.9, respectiv 8.11) în regim de curent întrerupt;
6. Se va observa comportamentul motorului în regim de curent întrerupt;
7. Se va evidenția creșterea tensiunii medii la ieșirea redresorului după instalarea conducției intermitente și variația tensiunii odată cu modificarea curentului de sarcină prin încărcarea diferită a generatorului cuplat mecanic cu motorul (încărcarea generatorului de c.c. se face prin scăderea rezistenței de frânare R_{fr} legate la bornele sale);
8. Se va pune în evidență oscilația ansamblului convertor-motor atunci când unghiul de comandă este coborât progresiv spre zero în regim de curent întrerupt;

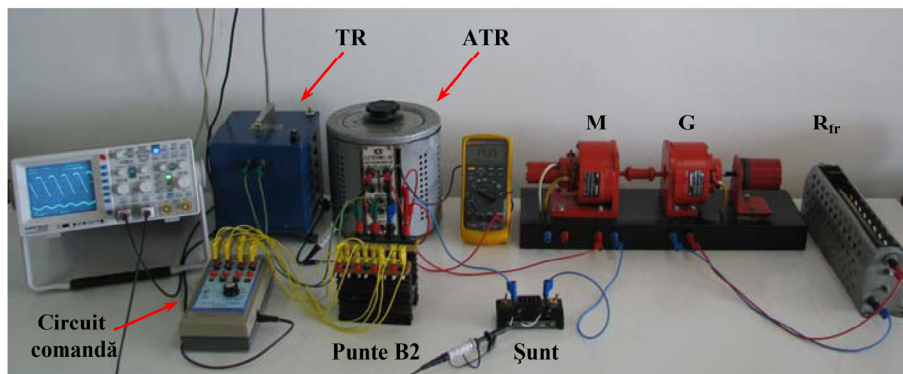


Fig. 8.13 Imaginea montajului din laborator al lucrării.