

Lucrarea 15

REDRESOARE CU COMUTAȚIE NATURALĂ ȘI FUNȚIONARE ÎN PATRU CADRANE (redresoare bidirecționale)

1. Introducere

Conform celor arătate în referatele anterioare, un *redresor obișnuit comandat* (B2, M3, B6 etc.) poate funcționa doar în două cadrane ale sistemului de axe (planul electric) $U_d - I_d$, respectiv în cadranele 1 și 4 (Fig.15.1).

În cadranul 4 convertorul funcționează în regim de inverter, are polaritatea tensiunii U_d schimbată la bornele de ieșire, dar sensul curentului se păstrează pozitiv prin acesta. Tensiunea inversată este asigurată de o sarcină activă, redresorul impunând doar amplitudinea căderii de tensiune de pe acesta prin unghiul de comandă $\alpha_{inv} > 90^\circ$. Conform relației $I_d = (E - |U_{d\alpha(inv)}|) / \sum R = I_{fr}$ în acest fel se reglează curentul I_d și implicit puterea vehiculată de convertor de la sarcina activă către partea de c.a. Pentru circuitul de c.c. aflat pe poziția sursei convertorul se comportă asemeni unui receptor de energie electrică deoarece puterea P_d devine negativă: $P_d = U_d \cdot I_d < 0$.

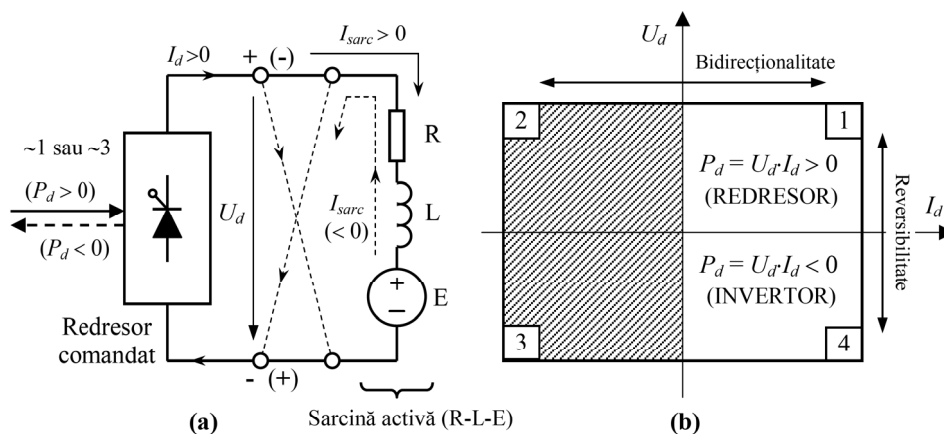


Fig. 15.1 (a) Trecerea unui redresor comandat în regim de inverter (din cadranul 1 în cadranul 4); (b) Planul electric: $U_d - I_d$.

Capacitatea convertorului electronic de putere de a inversa polaritatea tensiunii continue de la ieșire poartă denumirea de *reversibilitate* și poate avea loc prin trecerea din cadranul 1 în cadranul 4, așa cum sugerează săgeata din Fig.15.1(b). Cu

toate că, un proces de reversibilitate poate avea loc și prin trecerea din cadrantul 3 în cadrantul 2, manevra nu este posibilă deoarece funcționarea convertorului în respectivele cadrane este exclusă.

Așa cum s-a descris pe larg în referatul Lucrării 9, trecerea din regim global de redresor în regim global de invertor poate fi realizată dacă sunt executate succesiv manevre de modificare a comenzii și cuplare inversă a motorului la redresor (inversarea conexiunii sau contraconectare).

2. Funcționarea sarcinii de c.c. în patru cadrane

În majoritatea aplicațiilor care includ redresoare comandate cum ar fi acționările cu motoare de c.c., sursele de tensiune continuă reglabilă pentru alimentarea invertoarelor și a *chopper*-elor, sistemele electronice de putere dedicate interconectării surselor de energie etc. interesează în mod deosebit capacitatea redresorului de a trece din cadrantul 1 în cadrantul 2 sau, altfel spus, capacitatea acestuia de a prelua un curent în sens invers, de a fi *bidirecțional*. De fapt, manevra de inversare a conexiunii sarcinii active pentru a trece redresorul în regim de invertor realizează o trecere din cadrantul 1 în cadrantul 2 pentru sarcină deoarece se schimbă sensul curentului prin aceasta, polaritatea tensiunii la bornele ei rămânând aceeași (Fig.15.1.a $\rightarrow I_{sarc} < 0$). Pe de altă parte, redresorul își păstrează sensul curentului ($I_d > 0$), dar își schimbă polaritatea tensiunii ($U_d < 0$). Prin această manevră mecanică de *contraconectare* se face o adaptare între posibilitatea sarcinii active de a ceda energie doar prin schimbarea sensului curentului și posibilitatea redresorului de a prelua această energie doar prin schimbarea polarității tensiunii continue la ieșire.

Dacă sarcina activă posedă o cantitate limitată de energie, redresorul, funcționând în regim de invertor, o poate transfera în totalitate părții de c.a. Un exemplu sugestiv în acest sens este procesul de frânare electrică a unui motor de c.c. până la oprire. La sfârșitul acestui proces convertorul poate reveni progresiv în regim de redresor *fără să se modifice conexiunea inversată* a sarcinii. În acest caz, din punctul de vedere al redresorului avem o revenire din cadrantul 4 în cadrantul 1, dar din punctul de vedere al motorului de c.c. avem o trecere din cadrantul 2 în cadrantul 3 deoarece tensiunea își schimbă polaritatea la bornele acestuia și sensul de rotație se inversează ($n < 0$). Mai departe, se poate frâna motorul din sens invers de rotație dacă acesta trece din cadrantul 3 în cadrantul 4. Pentru aceasta, redresorul va trece a doua oară din cadrantul 1 în cadrantul 4 având grijă ca înainte să se execute manevrele de contraconectare (se revine la conexiunea inițială când sarcina funcționa în cadrantul 1) și de modificare a comenzii corespunzătoare unui unghi de invertor α_{inv} . După oprirea motorului se poate trece convertorul din nou în cadrantul 1, aducând împreună cu el și sarcina activă care încheie, astfel, un ciclu complet în care a parcurs toate cele patru cadrane în sens *antiorar*, sensul normal de funcționare a unei **acționari reversibile**: rotirea motorului în sens pozitiv ($n > 0$) \rightarrow frânarea și oprirea din sensul pozitiv de

rotație → rotirea motorului în sens negativ ($n < 0$) → frânarea și oprirea din sens negativ de rotație → accelerarea din nou în sensul pozitiv de rotație.

Din cele prezentate mai sus se observă că, dispunând de *un singur redresor cu funcționare în două cadrane*, prin manevre de inversare a conexiunilor și modificare a unghiului de comandă, sarcina poate fi trecută prin toate cele patru cadrane ale planului mecanic. Datorită operațiilor mecanice de contraconectare, într-un asemenea ciclu de funcționare a sarcinii, redresorul obișnuit cu comutație naturală parcurge de două ori ciclul de funcționare specific (drumul dus-întors între cadranul 1 și 4).

Manevra contraconectării poate fi obținută în practică cu ajutorul unor controlere mecanice sau cu ajutorul unor *contactoare de sens* (K_1, K_2), așa cum se prezintă în Fig.15.2 pentru o acționare reversibilă (acționare în patru cadrane) cu motor de c.c. (M_{cc}).

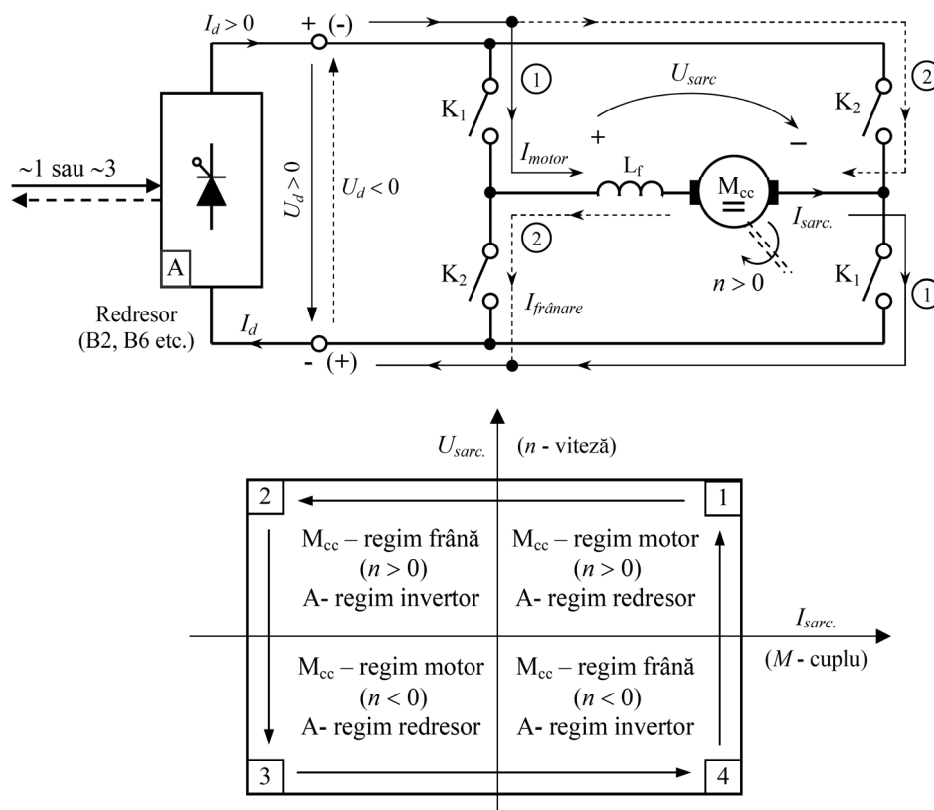


Fig. 15.2 Acționare în patru cadrane realizată cu un motor de c.c. (M_{cc}) și un redresor de două cadrane contraconectat cu ajutorul unor contactoare de sens.

Mașina electrică funcționează ca motor în cadranul 1 dacă sunt închise contactele K_1 și convertorul A funcționează în regim de redresor ($U_d > 0$). Tensiunea la bornele sarcinii (a motorului) este pozitivă ($U_{sarc.} > 0$) și îi corespunde o viteză pozitivă ($n > 0$). În schema din Fig.15.2 curentul va circula pe traseul 1 ($I_{sarc.} = I_{motor} > 0$) și va determina un cuplu electromagnetic M pozitiv, în același sens cu sensul de rotație al mașinii.

Pentru a trece motorul în regim de frânare (*generator*), în cadranul 2 unde cuplul electromagnetic se va opune mișcării, trebuie executate manevrele descrise în Lucrarea 9. Mai întâi se creșterea unghiului de comandă de la valoarea avută în cadranul 1 ($\alpha_{redr.}$) spre valoarea de 90° și mai departe spre valorile de inverter pentru a permite anularea curentului prin motor ($I_{sarc.} = 0$). În acest fel, contraconectarea, realizată prin declanșarea contactorului K_1 și anclanșarea contactorului K_2 , nu se va face în sarcină și vor fi protejate contactele acestora de apariția unui arc electric important. La început se va alege un unghi de inverter mare ($\alpha_{inv} = 180^\circ - \alpha_{redr.}$) pentru a evita apariția unui curent periculos prin convertor. Urmează descreșterea unghiului de inverter spre valoarea de 90° , odată cu descreșterea vitezei, astfel încât, curentul de frânare ($I_{frânare}$ – traseul 2 din Fig.3.62) să nu depășească valoarea maximă acceptată și de convertor și de motor (I_{max}):

$$I_{frânare} = I_d = \frac{E - |U_{d\alpha(inv)}|}{\sum R} \leq I_{max} \quad (15.1)$$

În urma operației de frânare din cadranul 2, unghiul de comandă atinge valoarea de 90° la oprirea motorului. Dacă, mai departe, este coborât sub această valoare, convertorul trece din nou în regim de redresor și mașina electrică va funcționa ca motor în cadranul 3. Combinația K_2 anclanșat și K_1 declanșat se păstrează. Trebuie avut grijă ca, în regimul dinamic de accelerare a motorului în sens invers de rotație, scăderea unghiului de comandă să fie moderată pentru a evita depășirea limitei maxime de către curentul I_{mot} (traseul 2 pentru cadranul 3):

$$I_{motor} = I_d = \frac{U_{d\alpha(redr)} - E}{\sum R} \leq I_{max} \quad (15.2)$$

Frânarea motorului din sens invers de rotație, în cadranul 4, este obținută dacă sunt urmate toate manevrele și restricțiile cerute de inversarea conexiunii (deconectare K_2 urmată de anclanșare K_1) și aducerea convertorului în regim de inverter. Trecerea sarcinii din cadranul 4 în cadranul 1 se face pe combinația K_1 anclanșat și K_2 declanșat dacă se revine în regim de redresor respectându-se condiția (15.2).

Din cele arătate mai sus rezultă că, pentru a obține o funcționare în patru cadrane a sarcinii de c.c., utilizând un singur redresor obișnuit, sunt necesare manevre mecanice, modificări ale unghiului de comandă și un control al curentului de sarcină.

Sunt aplicații unde precizia și timpul de răspuns sunt condiții principale de funcționare cum ar fi, de exemplu, servoacționările la care timpii de răspuns trebuie să fie de ordinul sutelor de milisecunde. Acești timpi trebuie să se reducă la valori de ordinul zecilor de milisecunde sau chiar milisecunde dacă redresorul alimentează *chopper-e* sau invertoare funcționând în regim de recuperare, pentru a evita străpungerea condensatorilor din componența filtrelor de tensiune. În asemenea aplicații sunt excluse manevrele mecanice de inversare a conexiunilor care introduc întârzieri de ordinul zecimilor de secundă. Soluția constă în utilizarea **redresoarelor bidirecționale** care sunt, de fapt, *un ansamblu de două redresoare obișnuite*, câte unul pentru fiecare sens al curentului. Redresorul de pe sensul pozitiv al curentului de sarcină acoperă cadranele 1 și 4 din Fig.15.2, iar redresorul de pe sensul negativ al curentului acoperă cadranele 3 și 2. Astfel, întreg sistemul electronic de putere se comportă asemeni unui singur redresor cu funcționare în toate cele patru cadrane, permițând și sarcinii de c.c. să funcționeze în patru cadrane fără manevre de contraconectare. În consecință, se poate vorbi de o funcționare a *ansamblului convertor-motor* în patru cadrane.

În funcție de cum sunt comandate cele două redresoare obișnuite din structura ansamblului bidirecțional, pot fi puse în evidență două clase mari de redresoare cu funcționare în patru cadrane:

- **Redresoare fără curent de circulație** – la care cele două redresoare componente sunt comandate separat. Astfel, când unul funcționează, fie în regim de redresor, fie în regim de inverter, celălalt este blocat și viceversa.
- **Redresoare cu curent de circulație** – la care cele două redresoare componente sunt comandate simultan cu unghiuri de comandă diferite (unul ca redresor și celălalt ca inverter), astfel încât să se respecte regula de legare a surselor de c.c. în paralel referitor la tensiunile medii.

La rândul lor, redresoarele bidirecționale cu curent de circulație pot fi împărțite în două categorii, în funcție de modalitatea în care sunt alimentate:

- ✓ **Schema (montajul, structura) antiparalel** – la care cele două redresoare componente se alimentează de la aceeași sursă de c.a. sau transformator;
- ✓ **Schema (montajul, structura) cruce** – la care cele două redresoare componente se alimentează de la surse de c.a. diferite, cum ar fi două transformatoare sau două secundare ale aceluiași transformator.

3. Redresoare cu funcționare în patru cadrane fără curent de circulație

Structura bidirecțională fără curent de circulație este realizată prin conectarea în antiparalel a două redresoare obișnuite, notate cu A și B, așa cum se prezintă în Fig.15.3. Sarcina activă (M_{cc}) este legată la bornele comune ale acestora. Lipsa curentului de circulație vehiculat între cele două redresoare componente se datorează faptului că acestea vor lucra pe rând și întotdeauna unul din ele va fi blocat. Astfel, curentul este obligat să circule doar în bucla formată din convertorul aflat în funcțiune și sarcină.

Dacă acest din urmă convertor este comandat în regim de redresor, curentul de sarcină are semnificația unui curent de motor ($I_{sarc.} = I_{motor}$), iar dacă este comandat în regim de inverter curentul de sarcină are semnificația unui curent de frânare ($I_{sarc.} = I_{frânare}$). În Fig.15.3 sunt figurați cei doi curenți numai pentru funcționarea redresorului bidirecțional în cadranele 1 și 2 (traseele 1 și 2).

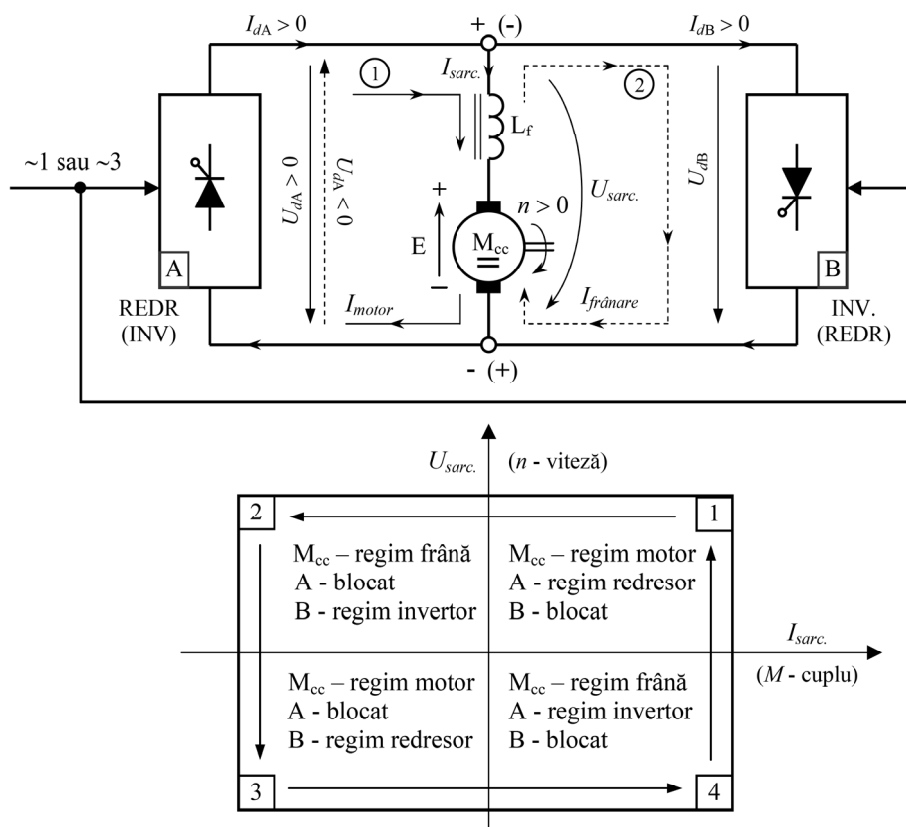


Fig. 15.3 Redresor cu funcționare în patru cadrane fără curent de circulație.

În **cadranul 1** este comandat convertorul A în regim de redresor cu unghiul $\alpha_{A(\text{redr})} < 90^\circ$, asigurând o tensiune continuă pozitivă pe sarcină:

$$U_{dA} = U_{sarc.} = U_{d0} \cdot \cos \alpha_{A(\text{redr})} = E + (\sum R) \cdot I_{sarc.} > 0 \quad (15.3)$$

unde: $E = k_e \cdot \Phi_{ex} \cdot n$ – este tensiunea electromotoare a mașinii de c.c.

$\sum R = R_L + R_a + \dots$ – este suma rezistențelor de pe traseul curentului $I_{sarc.}$
(a inductanței de filtrare L_{fs} a indusului motorului etc.)

$I_{sarc.} = I_{dA} = I_{motor}$ – este curentul de sarcină asigurat de convertorul A.

Corespunzător unghiului de comandă α_{redr} convertorul A funcționează în punctul A_1 de pe caracteristica de reglaj proprie $U_{dA} = f(\alpha)$, așa cum se prezintă în Fig.15.4. În același timp convertorul B este blocat. Mașina de c.c. funcționează în regim de motor având sensul pozitiv de rotație pentru care tensiunea electromotoare este, de asemenea, pozitivă ($n > 0 \Rightarrow E > 0$) cu polaritatea din Fig.15.3.

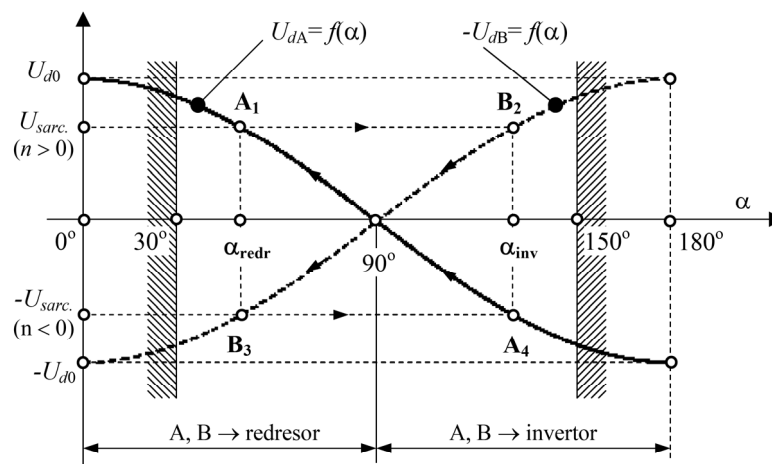


Fig. 15.4 Modificarea comenzii la un redresor bidirecțional fără curent de circulație în scopul parcurgerii celor patru cadrane pe traseul $A_1 \rightarrow B_2 \rightarrow B_3 \rightarrow A_4 \rightarrow A_1$.

Pentru a frâna motorul în **cadranul 2** trebuie schimbat sensul curentului de sarcină, corespunzător traseului 2 al curentului $I_{frânare}$ din Fig.15.3, blocând funcționarea convertorului A și aducând convertorul B în regim de inverter. Trecerea redresorului bidirecțional din punctul A_1 de funcționare în punctul B_2 reprezentat în Fig.15.4, nu poate fi realizată printr-o singură manevră. În acest scop, trebuie executate următoarele operații succesive:

- 1) Anularea curentului mediu prin motor ($I_{motor} = 0$) prin creșterea rapidă a unghiului $\alpha_{A(\text{redr})}$ spre valoarea de 90° ;

- 2) Blocarea redresorului A după ce curentul de sarcină a atins valoarea zero;
- 3) Așteptarea unui timp (*timp mort*) până când toate tiristoarele redresorului A se blochează ferm;
- 4) Comanda convertorului B în regim de inverter cu un unghi de comandă care la început trebuie să respecte condiția $(180^\circ - \alpha_{A(\text{redtr})}) \leq \alpha_{B(\text{inv})} \leq 150^\circ$.

Sunt câteva observații de făcut în legătură cu operațiile de mai sus. În primul rând, anularea curentului I_{motor} are loc imediat ce tensiunea medie U_{dA} devine mai mică decât tensiunea electromotoare E . Pe măsură ce curentul de sarcină scade și atinge pragul I^* se instalează regimul de curent întrerupt care debutează cu un salt crescător al tensiunii medii de la ieșirea redresorului. Acest fenomen nu deranjează dacă unghiul de comandă continuă să crească până la anularea curentului.

A doua observație este legată de necesitatea introducerii unei pauze între blocarea redresorului și amorsarea inverterului. Aceasta este necesară pentru a evita deschiderea inverterului înainte ca redresorul să fie blocat ferm, situație care ar conduce la apariția unui curent de circulație periculos datorită lipsei unui element de circuit cu rol de limitare între cele două convertoare. După blocarea impulsurilor de comandă, ultimele tiristoare comandate din structura redresorului vor continua să conducă până ce întreaga energie acumulată în inductanțele de sarcină (inductanța de filtrare, inductanța motorului etc.) va fi recuperată. În plus, trebuie luat în considerare și timpul t_q necesar tiristoarelor pentru ca acestea să își capete capacitatea de blocare directă. Ținând cont de toate aceste aspecte, rezultă necesitatea unui timp mort de ordinul zecilor de milisecunde. O asemenea valoare afectează semnificativ viteza de trecere a redresorului bidirecțional dintr-un cadran în altul.

A treia observație se referă la valoarea unghiului de comandă $\alpha_{B(\text{inv})}$ necesar convertorului B pentru a debuta în regim de inverter. Acesta trebuie ales, astfel încât valoarea curentului de frânare să respecte inegalitatea din expresia (15.1). Când nu se cunoaște t.e.m. E (viteza motorului) se poate alege o valoare inițială pe baza relației:

$$\alpha_{B(\text{inv})} = 180^\circ - \alpha_{A(\text{redtr})} \quad (15.4)$$

Raționamentul se bazează pe faptul că, înaintea frânării, redresorul A alimentea motorul cu o tensiune dată de relația (15.3) în care $U_{dA} > E$. Comandând pentru început convertorul B cu un unghi dat de egalitatea din (15.1) se ajunge în situația în care $E < |U_{d\alpha(\text{inv})}| \Rightarrow I_{\text{frânare}} = 0$. Pornind de la această valoare inițială se va scădea unghiul $\alpha_{B(\text{inv})}$ spre 90° , până ce $E > |U_{d\alpha(\text{inv})}|$ și curentul de frânare atinge o valoare acceptabilă. Sunt aplicații în care circuitul de comandă nu poate implementa la debutul procesului de frânare relația (15.4). Într-un asemenea caz, este de preferat să se aleagă pentru început unghiul maxim de inverter, de obicei 150° , după care să fie scăzut progresiv până ce apare curentul de frânare dorit.

Trecerea ansamblului convertor-motor din cadranul 2 în **cadranul 3** poate fi realizată dacă se scade progresiv unghiul de comandă α_B al convertorului B de la valori de inverter la valori de redresor. În Fig.15.4 punctul de funcționare va evolua din B_2 în B_3 pe caracteristica de reglaj inversată $-U_{dB} = f(\alpha)$ văzută în acest fel datorită conectării redresorului B în antiparalel cu A. Scăderea progresivă a unghiului de comandă este necesară datorită modificării în mod continuu a tensiunii electromotoare pe durata regimului dinamic de inversare a sensului de rotație, de la valori pozitive la valori negative.

Din motive de productivitate este de preferat ca schimbarea sensului de rotație al motorului să se facă în timpul cel mai scurt, ceea ce înseamnă menținerea cuplului electromagnetic cât mai apropiat de valoarea maximă posibilă pe întreaga durată a regimului tranzitoriu de reversare. Acest deziderat poate fi obținut practic doar prin utilizarea unei scheme de comandă și control prevăzută cu o buclă de reglare a curentului. Pe lângă reacția după curentul de sarcină, o schemă performantă de control automat va include și o reacție după viteza de rotație a motorului. Disponând de informațiile de curent (cuplu) și viteză (tensiune) structura de control „știe” în orice moment în care cadran se află ansamblul convertor-motor și ce manevre trebuie executate automat pentru a trece acest ansamblu dintr-un cadran în altul atunci când acest lucru este cerut de o structură de comandă ierarhic superioară. Pe durata inversării sensului de rotație, regulatorul de curent va scădea controlat unghiul de comandă al convertorului B pentru a respecta condiția (15.1) atunci când $\alpha_B = \alpha_{B(\text{inv})} > 90^\circ$ (regim de inverter) și condiția (15.2) când $\alpha_B = \alpha_{B(\text{redr})} < 90^\circ$ (regim de redresor).

În cadranul 3 mașina electrică funcționează în regim de motor la viteză negativă (tensiune negativă), iar curentul de sarcină ($I_{\text{motor}} < 0$) circulă pe traseul 2 din Fig.15.3. Puterea electrică este pozitivă la nivelul motorului și are semnificația unei puteri consumate pentru a fi transformată în lucru mecanic. Aceasta este asigurată de convertorul B care funcționează în regim de redresor.

Pentru a frâna motorul în **cadranul 4** se va bloca funcționarea convertorului B după care va fi comandat convertorul A în regim de inverter. Curentul de frânare corespunzător sensului invers de rotație este pozitiv ($I_{\text{frânare}} > 0$) și va circula pe traseul 1 din Fig.15.3. Saltul din punctul B_3 în punctul A_4 de funcționare, reprezentat în Fig.15.4, se va face urmărind aceleași operații și condiții descrise pe larg în cazul trecerii din cadranul 1 în cadranul 2 al ansamblului convertor – motor.

Trecerea din cadranul 1 în cadranul 4 poate fi realizată asemănător cu trecerea din cadranul 2 în cadranul 3. Deosebirea constă în faptul că scăderea progresivă a unghiului de comandă are loc la convertorul A care va trece din regim de inverter în regim de redresor. Punctul de funcționare va evolua din A_4 în A_1 pe caracteristica de reglaj $U_{dA} = f(\alpha)$ din Fig.15.4.

Pe baza celor discutate mai sus, se poate afirma că *redresoarele cu funcționare în patru cadrane fără curent de circulație* se remarcă prin:

- simplitatea schemei de forță;
- complexitatea schemei de comandă și a algoritmului de control pentru a executa strict toate operațiile de trecere dintr-un cadran în altul și a regla curentul pe durata regimurilor tranzitorii.

În consecință, ***redresorul bidirecțional fără curent de circulație este indicat a fi utilizat la puteri mari*** deoarece în costul total al convertorului ponderea structurii de forță este mult mai mare decât cea a schemei de comandă și control. ***La puteri mai mici sunt preferate redresoarele bidirecționale cu curent de circulație.***

4. Redresoare cu funcționare în patru cadrane și curent de circulație

Și acest tip de redresor bidirecțional conține două redresoare obișnuite comandate, A și B, conectate în antiparalel – Fig.15.5. Spre deosebire de topologia redresorului bidirecțional fără curent de circulație, între cele două convertoare componente sunt intercalate două sau patru ***inductanțe de limitare*** (L_{lim}) în funcție de modul de alimentare a redresorului, schema în cruce, respectiv schema antiparalel. Rolul inductanțelor este de a limita *curentul sau curenții de circulație* care iau naștere între convertoarele A și B ca o consecință a faptului că ambele structuri sunt în funcțiune, una ca redresor și cealaltă ca invertor.

Prin comanda simultană a celor două convertoare componente este eliminat timpul mort necesar pentru blocarea fermă a convertorului care a funcționat și activarea celuilalt. Rezultă de aici că, ***redresorul cu funcționare în patru cadrane cu curent de circulație este mai rapid decât cel fără curent de circulație*** atunci când se dorește trecerea dintr-un cadran în altul. În plus, schema de comandă și control devine mai simplă deoarece nu mai este necesară evaluarea permanentă a variabilelor pentru a vedea în ce cadran se află ansamblul convertor – motor și nu mai sunt necesare toate manevrele, descrise în paragraful anterior, pentru a trece dintr-un cadran în altul. Pe de altă parte, structura de forță devine mai scumpă datorită elementelor de circuit suplimentare L_{lim} . Luând în considerare toate aceste aspecte se poate reafirma că, ***redresoarele cu funcționare în patru cadrane și curent de circulație sunt preferate în aplicații de medie și mică putere (kW ÷ zeci kW).***

Prezența convertoarelor A și B într-o buclă de circuit impune reguli stricte de comandă atunci când cele două structuri funcționează simultan, în scopul diminuării la minim a puterii electrice vehiculate între ele. Aceasta nu este o putere utilă deoarece ocolește circuitul de sarcină și încarcă suplimentar convertoarele. Eliminarea ei în totalitate este imposibilă, întrucât prin unghiul de comandă se poate interveni doar asupra valorii medii a tensiunii dintre convertoare. Având în vedere că unul din convertoare este comandat în regim de redresor și celălalt în regim de invertor, apar diferențe între tensiunile instantanee de la ieșirea acestora, diferențe care determină apariția curentului de circulație. În lipsa unor elemente cu rol de limitare, acesta ar putea atinge valori de scurt circuit punând în pericol tiristoarele convertoarelor.

Pentru a reduce la minim curentul de circulație, tensiunea medie a convertorului A trebuie să fie egală și în opoziție în buclă cu tensiunea medie a convertorului B:

$$\begin{aligned} U_{dA} = -U_{dB} &\Leftrightarrow U_{d0} \cdot \cos \alpha_A = -U_{d0} \cdot \cos \alpha_B \Leftrightarrow \cos \alpha_A + \cos \alpha_B = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \alpha_A + \alpha_B = 180^\circ \end{aligned} \quad (15.5)$$

Relația (15.5) confirmă că unul din convertoare funcționează în regim de redresor și celălalt funcționează în regim de inverter. De exemplu, dacă $\alpha_A = \alpha_{\text{redr}} < 90^\circ$ atunci $\alpha_B = 180^\circ - \alpha_A = \alpha_{\text{inv}} > 90^\circ$.

a) **Schema (montajul) antiparalel**

Specific montajului antiparalel la un redresor cu funcționare în patru cadrane și curent de circulație este faptul că alimentarea convertoarelor componente A și B se face de la o aceeași sursă de tensiune alternativă, monofazată sau trifazată, așa cum se prezintă în Fig.15.5. Dacă cele două convertoare A și B sunt redresoare obișnuite cu punct median (M_2, M_3) poate fi pus în evidență un singur curent de circulație care circulă în bucla formată din acestea. Pentru Fig.15.5 poate fi scris:

$$i_{c1}(t) = i_{c2}(t) = i_c(t) \quad (15.6)$$

Acest curent de circulație este o consecință a diferențelor de potențial (tensiune de circulație $\rightarrow u_c$) care apar atunci când în structura celor două convertoare conduc tiristoare de pe faze diferite. În acest fel, la borna comună de alimentare a sarcinii sunt comutate simultan tensiuni diferite care ar provoca un scurt circuit dacă nu ar fi prezente inductanțele de limitare. Pentru a exemplifica cele afirmate, în Fig.15.6 se prezintă o schemă antiparalel constituită din două convertoare trifazate cu punct median – M3.

Se observă că un redresor cu funcționare în patru cadrane la care cele două convertoare componente sunt structuri cu punct median formează, de fapt, o punte complet comandată. Deosebirile față de convertorul obișnuit (unidirecțional) în punte constau în modul cum se leagă sarcina activă (între punctul median dintre cele două inductanțe de limitare și punctul median al transformatorului) precum și în modul diferit în care sunt comandate cele două părți ale punții (una cu unghi de redresor și cealaltă cu unghi de inverter). Figura 15.6 prezentat situația în care M_{3A} este comandat în regim de redresor și M_{3B} în regim de inverter.

Dacă ansamblul convertor – motor funcționează în cadranul 1, convertorul M_{3A} este un **redresor încărcat** deoarece asigură, așa cum se prezintă în Fig.15.6, curentul de sarcină I_{sarc} de pe traseul 1. Totodată, susține și curentul de circulație i_c care apare între structura M_{3A} și M_{3B} întotdeauna cu sensul corespunzător traseului 2. Aplicând Kirchhoff se poate scrie:

$$i_{dA}(t) = i_{sarc}(t) + i_c(t) = I_{sarc} + i_c(t) \quad (15.7)$$

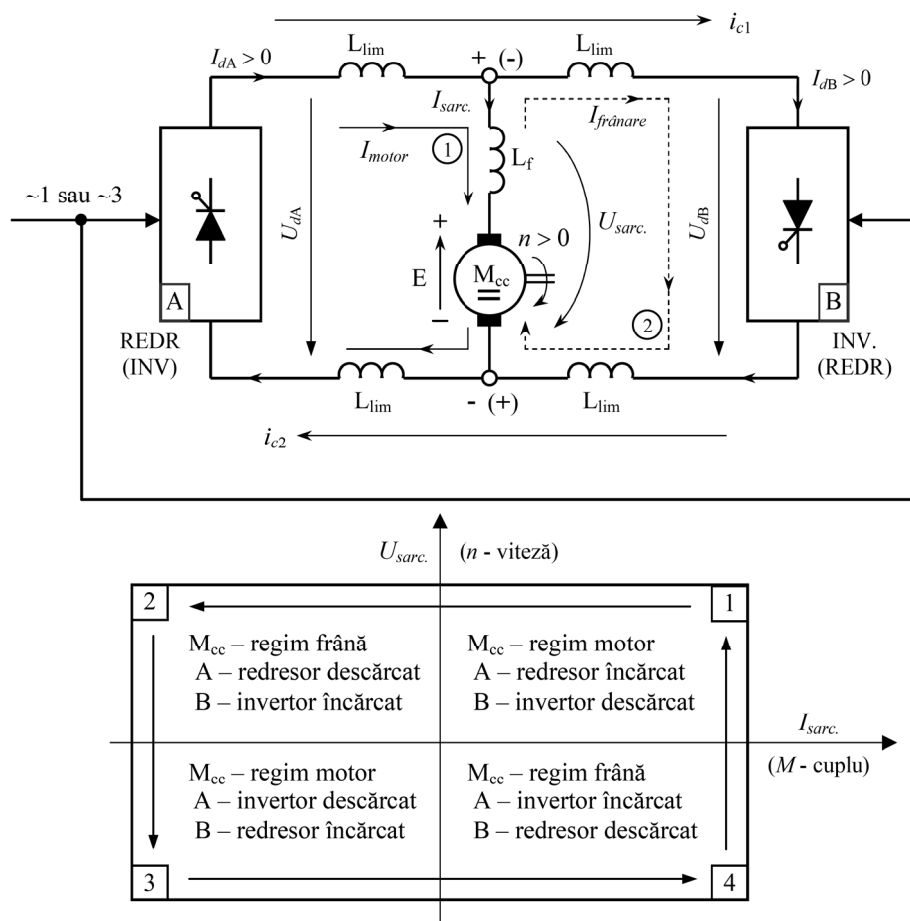


Fig. 15.5 Redresor cu funcționare în patru cadrane și curent de circulație – schema antiparalel.

În relația (15.7) s-a considerat curentul de sarcină bine filtrat, motiv pentru care s-a aproximat valoarea instantanee cu valoarea medie: $i_{sarc.}(t) \approx I_{sarc.}$

Tot în cadranul 1 convertorul M_{3B} este un **inverter descărcat** deoarece vehiculează numai curentul de circulație:

$$i_{dB}(t) = i_c(t) \tag{15.8}$$

Curentul i_c conține o componentă continuă I_c deoarece are numai un singur sens. Se recomandă ca inductanțele de limitare L_{lim} să fie astfel dimensionate, încât valoarea maximă a I_c să nu depășească 10% din valoarea nominală a curentului de sarcină. Având în vedere această valoare limitată este justificată denumirea de *convertor descărcat* atunci când acesta vehiculează doar curentul de circulație. În

funcție de valoarea inductanței L_{lim} și de unghiurile de comandă, curentul de circulație poate fi *neîntrerupt* (*permanent*) sau *întrerupt*. În Fig.15.6 este prezentat traseul curentului de circulație pentru combinația de tiristoare aflată în conducție (T_1, T_5).

Pentru a avea o imagine asupra funcționării schemei antiparalel cu redresoare M3, în Fig.15.7 sunt prezentate formele de undă aferente atunci când M_{3A} este comandat ca redresor cu un unghi $\alpha_A = \alpha_{redr} = 30^\circ$ și M_{3B} este comandat ca inverter cu un unghi $\alpha_B = 180^\circ - \alpha_A = \alpha_{inv} = 150^\circ$, iar curentul de circulație este întrerupt.

Din Fig.15.6 rezultă că tensiunea instantanee de circulație u_c este o combinație dintre tensiunile de ieșire instantanee ale celor două convertoare M_{3A} și M_{3B} pe intervalul în care există curent de circulație:

$$u_c(t) = u_{dA}(t) - u_{dB}(t) \tag{15.9}$$

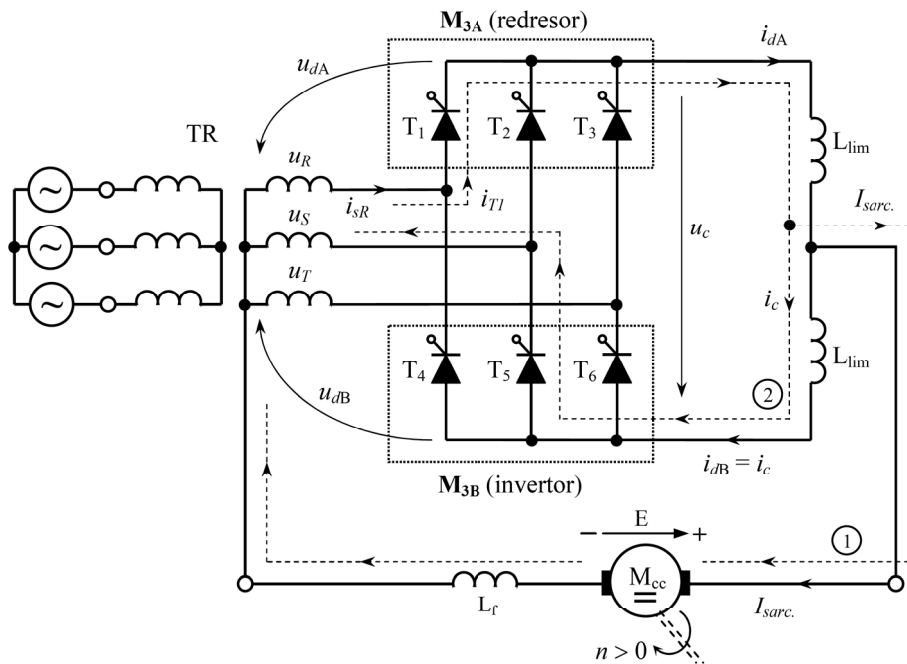


Fig. 15.6 Redresor bidirecțional cu curent de circulație – schema antiparalel constituită din două structuri trifazate M_{3A} și M_{3B} .

Relația (15.9) este implementată în Fig.15.7 unde sunt trasate pe aceeași diagramă tensiunile u_{dA} și $(-u_{dB})$, iar în diagrama următoare forma de undă rezultantă a tensiunii u_c . În gama de comandă $[30^\circ \div 60^\circ]$ pentru redresor și $[120^\circ \div 150^\circ]$ pentru inverter tensiunea de circulație conține trei pulsuri identice într-o perioadă a tensiunii de alimentare. Pulsurile prezintă salturi în momentul comutației tiristoarelor și lățimea lor este în funcție de valoarea unghiurilor de comandă.

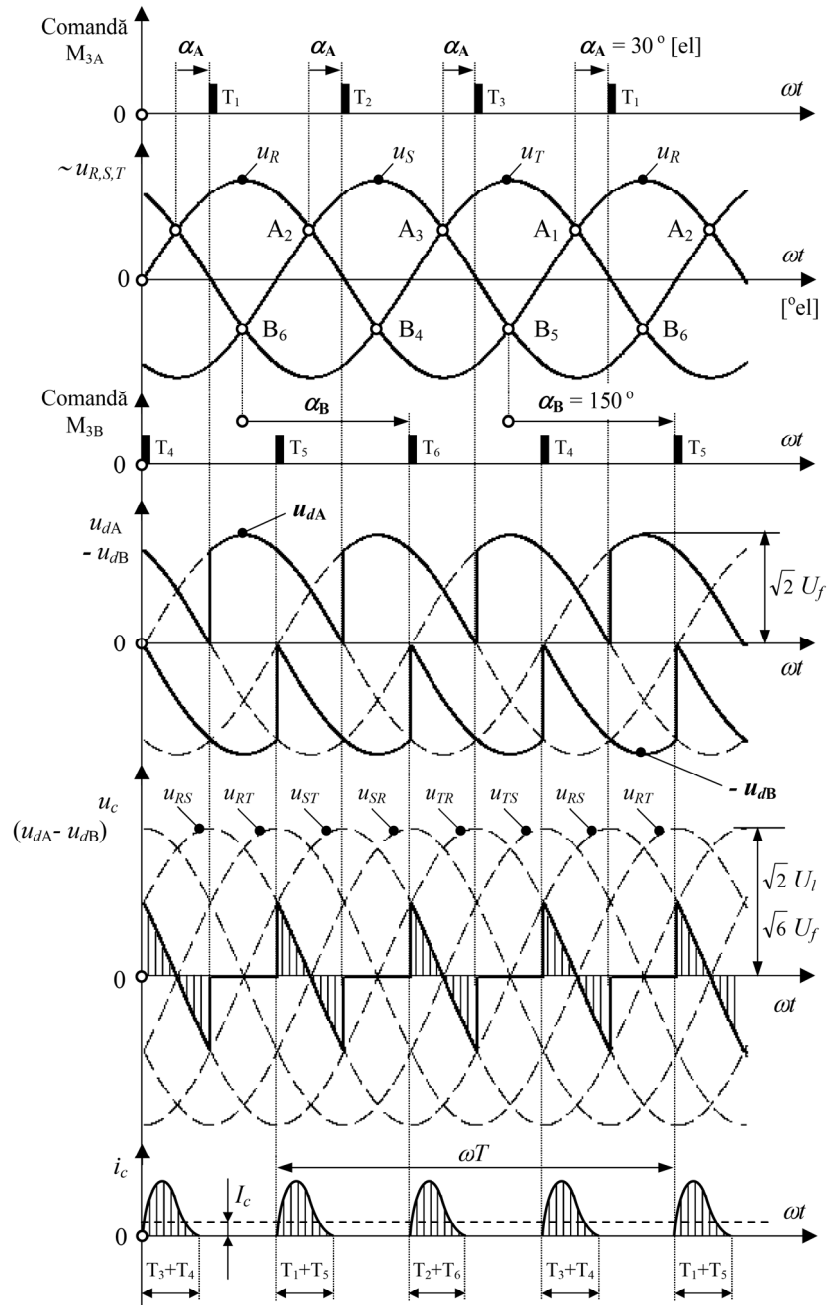


Fig. 15.7 Formele de undă ale tensiunii și curentului de circulație (curent întrerupt) corespunzătoare unui montaj antiparalel ($M_{3A} + M_{3B} \rightarrow \alpha_A = 30^\circ, \alpha_B = 150^\circ$).

Pe intervalele dintre pulsuri tensiunea de circulație ia valoarea zero. Aceste intervale se micșorează pe măsură ce unghiul de redresor și unghiul de invertor evoluează spre 90° . Atunci când comanda celor două convertoare M_{3A} și M_{3B} se face cu $\alpha_{\text{redr}} \in [60^\circ \div 90^\circ]$ și $\alpha_{\text{inv}} \in [90^\circ \div 120^\circ]$, tensiunea de circulație va conține șase pulsuri, trei de amplitudine mai mare și trei de amplitudine mai mică.

Curentul de circulație este determinat doar de partea pozitivă a pulsului tensiunii u_c . Prelungirea lui și pe durata negativă a acestuia se datorează energiei acumulate în inductanțele de limitare. Evident că, amplitudinea pulsurilor din forma de undă a curentului de circulație depinde de amplitudinea tensiunii u_c , care la rândul ei depinde de unghiurile de comandă, aspect ilustrat în Fig.15.7.

Dacă inductanțele L_{lim} sunt suficient de mari există posibilitatea ca pe anumite intervale de comandă curentul i_c să fie neîntrerupt (permanent). Acesta este un efect benefic al prezenței curentului de circulație deoarece menține ambele convertoare într-o conducție continuă (regim de curent neîntrerupt), indiferent de valoarea curentului de sarcină. Totodată, prezența curentului de circulație menține convertorul descărcat într-o stare activă, funcțională, pentru a fi pregătit în orice moment de a prelua curentul de sarcină (de motor sau de frână).

Referitor la valoarea inductanțelor de limitare, în practică pot fi abordate două strategii:

- Calcularea unei valori minime suficiente pentru a limita curentul de circulație, atât în ceea ce privește valoarea sa medie, cât și în ceea ce privește valoarea sa de vârf în situația cea mai defavorabilă (unghiul de comandă la care amplitudinea pulsurilor tensiunii u_c este maximă). Dacă valoarea rezultată L_{lim} este insuficientă pentru a realiza și o filtrare eficientă a curentului de sarcină se adaugă o inductanță de filtrare (L_f) pe ramura sarcinii, așa cum se prezintă în Fig.15.6.
- Calcularea unei valori acoperitoare, atât pentru limitarea curentului de circulație, cât și pentru filtrarea curentului de sarcină. În acest caz se renunță la inductanța L_f de pe ramura sarcinii.

Alegerea uncia dintre cele două variante se face în urma unui calcul economic pentru a vedea care este mai ieftină. Nu trebuie neglijat nici criteriul gabariturii sau a masei echipamentului în cele două situații posibile.

Dacă se preferă varianta a doua se impune un număr de două inductanțe de filtrare deoarece acestea trebuie să niveleze curentul de sarcină care, în funcție de cadranul în care funcționează ansamblul convertor-motor, este dat fie de convertorul M_{3A} , fie de M_{3B} . În cazul primei variante este necesar un număr de două inductanțe de limitare, deoarece inductanța L_{lim} parcursă de curentul de sarcină poate intra în saturație, rămânând pentru limitarea curentului de circulație cealaltă inductanță.

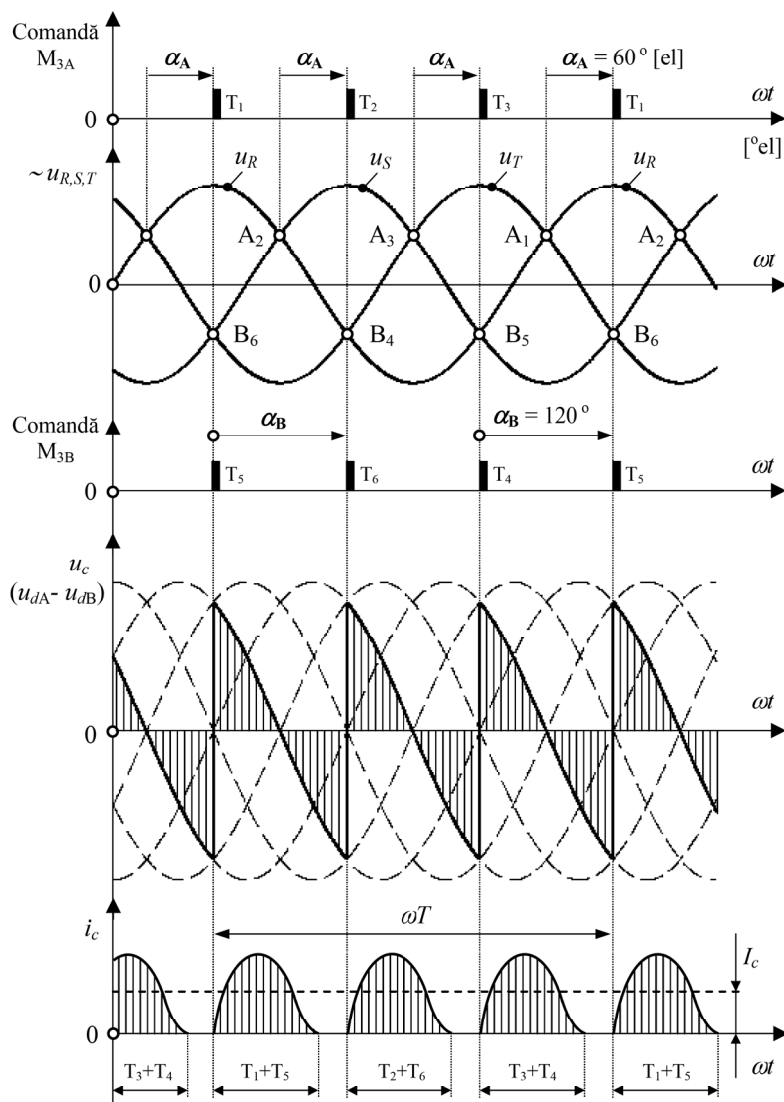


Fig. 15.8 Formele de undă corespunzătoare unui montaj antiparalel realizat cu două convertoare trifazate M_{3A} și M_{3B} comandate cu $\alpha_A = 60^\circ$ și $\alpha_B = 120^\circ$.

În cazul schemei antiparalel realizată cu două convertoare în punte apar doi curenți de circulație (i_{c1} , i_{c2}) atât în varianta monofazată, cât și în varianta trifazată. Deoarece redresoarele cu comutație naturală și funcționare în patru cadrane sunt utilizate în general la puteri de peste 1kW, în continuare se va trata doar varianta trifazată. Astfel, în Fig.15.9 se prezintă o schemă antiparalel cu două punți trifazate

B_{6A} și B_{6B} . Semnalele sunt reprezentate pentru cazul în care ansamblul convertor-motor funcționează în cadranul 1 unde convertorul B_{6A} este comandat ca redresor încărcat și preia, atât curentul de sarcină, cât și curenții de circulație. Convertorul B_{6B} funcționează în regim de inverter descărcat și preia doar curenții de circulație i_{c1} , i_{c2} . Traseele 1 și 2 a celor doi curenți sunt reprezentate pentru următoarea combinație a tiristoarelor în conducție:

- pentru B_{6A} tiristorul superior din brațul punții corespunzător fazei R împreună cu tiristorul inferior din brațul corespunzător fazei T ;
- pentru B_{6B} tiristorul superior din brațul punții corespunzător fazei S împreună cu tiristorul inferior din brațul corespunzător fazei R ;

În funcție de unghiurile de comandă, pot fi puse în evidență alte două sau cinci asemenea combinații. Formele de undă ale tensiunilor u_c care determină curenții i_{c1} , i_{c2} sunt identice cu cele prezentate în Fig.15.7 și 15.8 în aceleași condiții. Evident că și la acest tip de redresor cu funcționare în patru cadrane valoarea curenților de circulație este dependentă de valorile unghiurilor de comandă α_A și α_B .

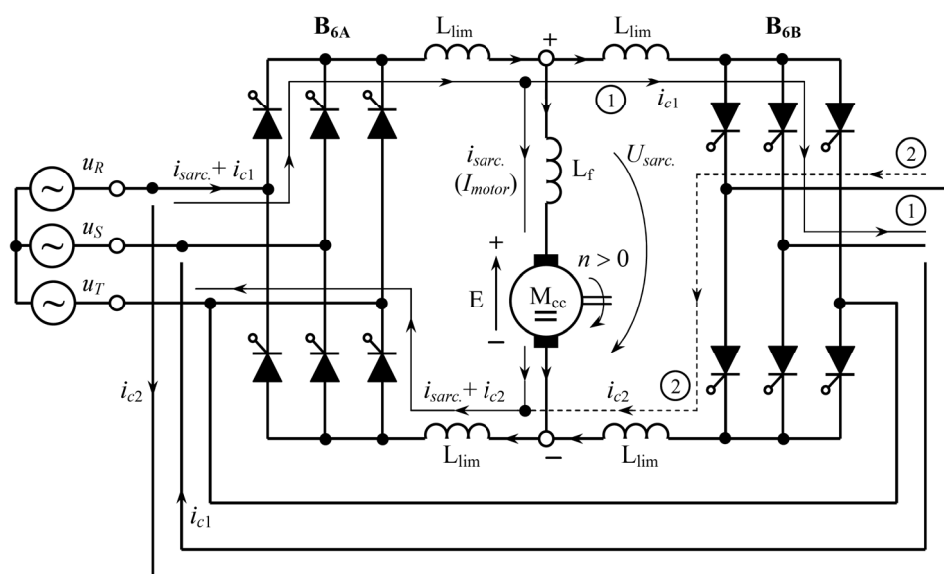


Fig. 15.9 Redresor bidirecțional cu curent de circulație – schema antiparalel cu două structuri trifazate în punte B_{6A} și B_{6B} .

Datorită apariției celor doi curenți de circulație sunt necesare patru inductanțe de limitare, două pentru i_{c1} și două pentru i_{c2} , poziționate ca în Fig.15.6. Conform celor menționate anterior, motivul pentru care sunt utilizate câte două inductanțe pe calea unui singur curent de circulație constă în posibilitatea saturării unuia din cele două atunci când aceasta este parcursă de curentul de sarcină.

Dacă inductanțele de limitare sunt dimensionate și ca inductanțe de filtrare, fără a fi în pericol de saturație chiar și la curentul de sarcină cel mai mare, din cele cinci inductanțe figurate în Fig.15.9 pot rămâne numai două. În schemă acestea trebuie să fie plasate câte una pe fiecare traseu al curenților de circulație și în fiecare buclă formată din convertoare și sarcina activă, așa cum se prezintă în Fig.15.10.

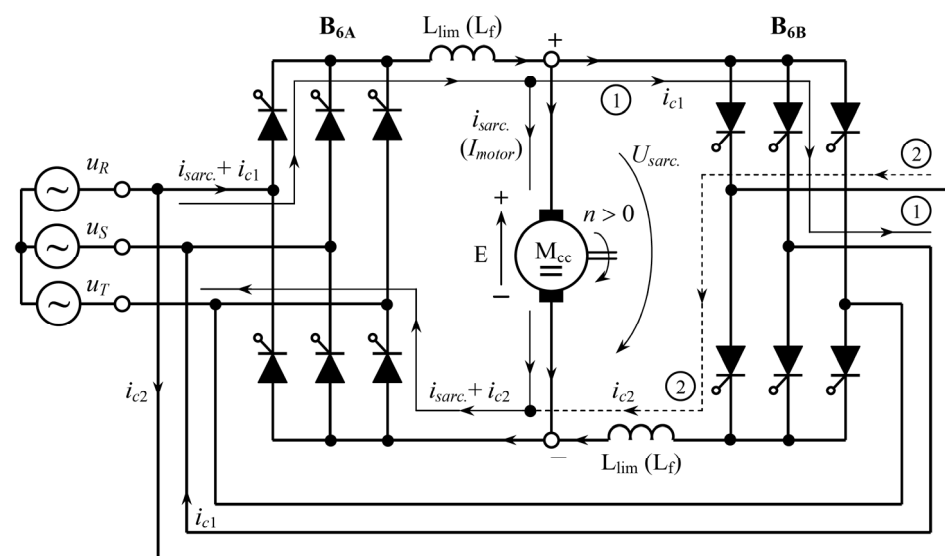


Fig. 15.10 Utilizarea inductanțelor de limitare (L_{lim}) și ca inductanțe de filtrare (L_f) la schema antiparalel cu două convertoare în punte (B_{6A} și B_{6B}).

Trecerea ansamblului convertor-motor dintr-un cadran în altul, în cazul utilizării unui redresor de patru cadrane cu curent de circulație, este simplă deoarece se impune doar modificarea comenzii și limitarea curentului de sarcină în regimurile dinamice de accelerare sau frânare. În acest scop, se păstrează doar funcția de reglare automată a curentului din toate funcțiile sistemului de control dedicat redresorului anterior, fără curent de circulație.

Pentru modificarea comenzii regulile sunt simple, după cum urmează:

- Atunci când se dorește trecerea din cadranul 1 în cadranul 2 sau din cadranul 3 în cadranul 4 (M_{cc} din regim de motor în regim de generator), se modifică unghiurile α_A și α_B în sensul apropierii de valoarea 90° el. În consecință, tensiunea electromotoare E devine mai mare decât valoarea medie a tensiunii de redresor și a tensiunii de inverter. Astfel, convertorul care funcționează în regim de redresor se descarcă (nu mai preia curentul de sarcină cu semnificația unui curent de motor) și se încarcă acel convertor comandat în regim de inverter (preia curentul de frânare) – vezi Fig.15.5.

sursele de c.a., convertoarele și barele de c.c. Fiind un curent de circulație unic, sunt necesare doar două inductanțe de limitare, poziționate ca în Fig.15.11. Acesta poate fi un avantaj al schemei în cruce în cazul în care pentru adaptarea tensiunilor se impune un transformator de alimentare, deoarece cheltuielile pentru adăugarea a unui secundar în plus pot fi mult mai mici decât prețul a două inductanțe de limitare, fiecare cu un circuit magnetic propriu. Se reduce, de asemenea, gabaritul și masa sistemului electronic de putere.

Pentru a ilustra traseul pe care îl urmează curentul de circulație la o schemă cruce, în Fig.15.12 se prezintă un sistem bidirecțional realizat cu două structuri trifazate în punte B_{6A} și B_{6B} . Acestea sunt alimentate de la un transformator trifazat (TR), prevăzut cu două secundare identice separate galvanic.

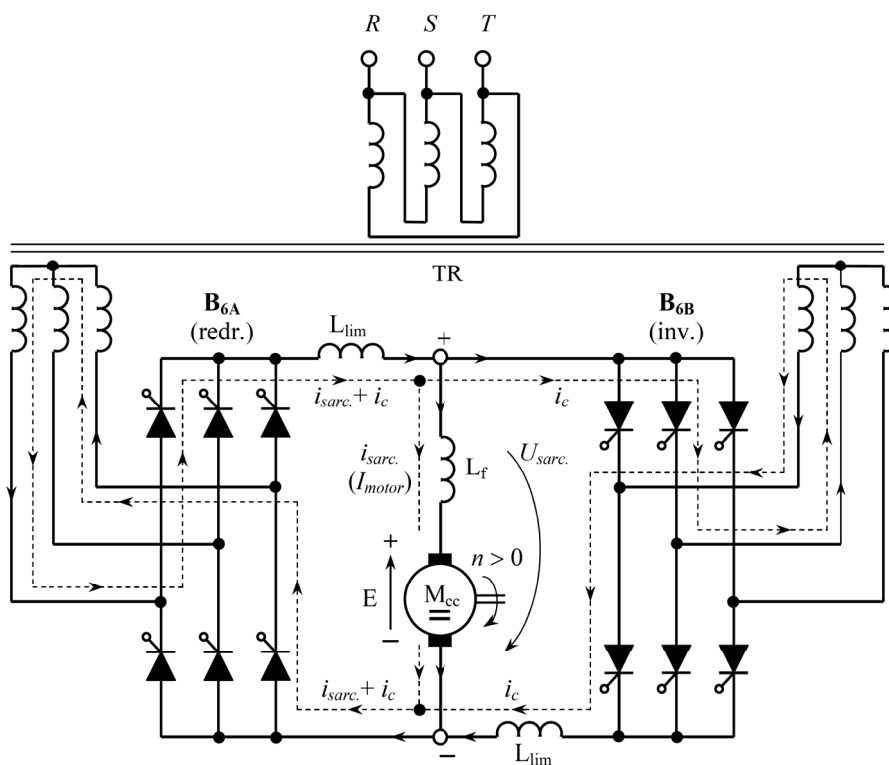


Fig. 15.12 Redresor cu funcționare în patru cadrane și curent de circulație – schema în cruce cu două structuri trifazate în punte B_{6A} și B_{6B} .

În figură sunt prezentate semnalele tot pentru situația în care ansamblul convertor–motor se află în cadranul I, unde B_{6A} funcționează ca redresor încărcat preluând curentul de sarcină și curentul de circulație, iar B_{6B} funcționează ca invertor descărcat preluând doar curentul de circulație i_c .

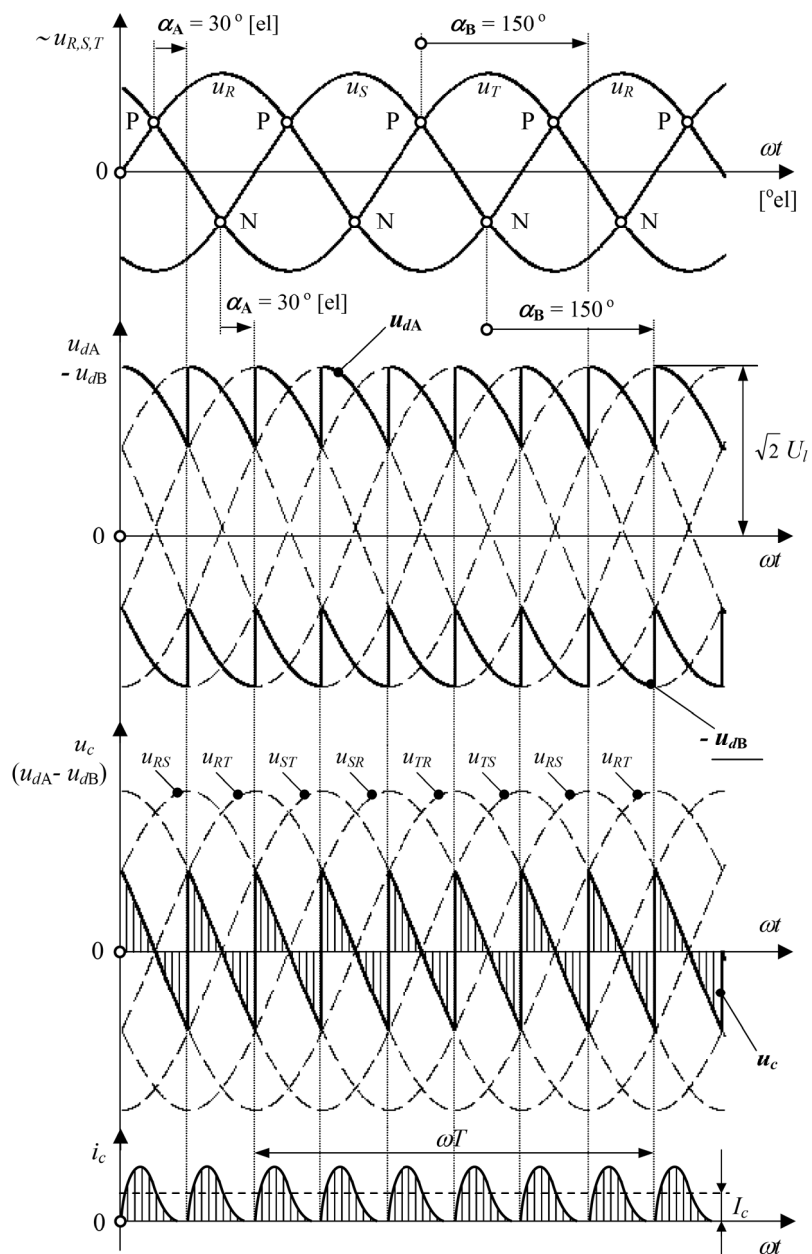


Fig. 15.13 Formele de undă ale tensiunii și curentului de circulație (curent întrerupt) corespunzătoare unui montaj în cruce ($B_{6A} + B_{6B} \rightarrow \alpha_A = 30^\circ, \alpha_B = 150^\circ$).

Pentru comparație, în Fig.15.12 traseul unicului curent de circulație i_c este surprins în cazul aceleiași combinații de tiristoare aflate în conducție, ca și la montajul antiparalel. De asemenea, curentul de circulație este prezentat tot în varianta curentului discontinuu (întrerupt) –vezi Fig.15.13.

În Fig.15.13 sunt prezentate formele de undă atunci când cele două convertoare B_{6A} și B_{6B} sunt comandate la limită, cu $\alpha_A = 30^\circ$ și $\alpha_B = 150^\circ$. În această situație amplitudinea pulsurilor tensiunii u_c este minimă și curentul i_c este cel mai mic. Dacă în etapa de proiectare a inductanțelor de limitare nu a fost impusă menținerea unei conducții continue prin ele, este posibil ca atunci când α_A și α_B iau valori apropiate de extremitatea intervalului recomandat de comandă $[30^\circ \div 150^\circ]$, curentul de circulație să fie discontinuu (întrerupt), așa cum s-a arătat în figura de mai sus.

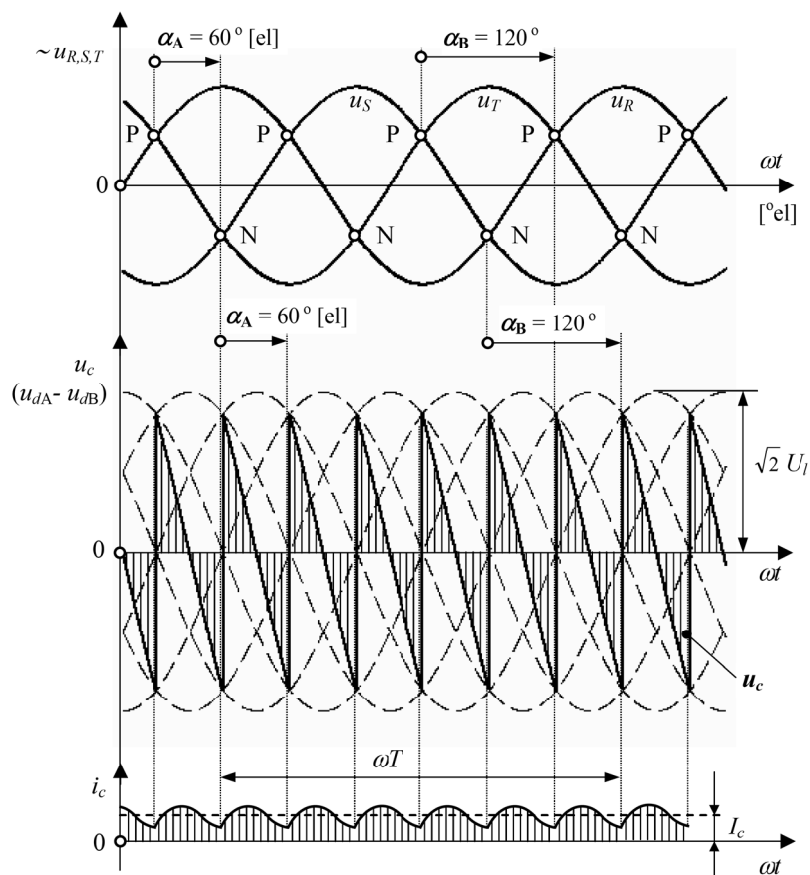


Fig. 15.14 Formele de undă ale tensiunii și curentului de circulație (neîntrerupt) corespunzătoare unui montaj în cruce ($B_{6A} + B_{6B} \rightarrow \alpha_A = 60^\circ$, $\alpha_B = 120^\circ$).

Pe măsură ce unghiurile de comandă evoluează din sensuri opuse spre mijlocul gamei de comandă (90°), amplitudinea pulsurilor tensiunii u_c crește, determinând creșterea valorii medii a curentului de circulație I_c . În funcție de mărimea inductanțelor L_{lim} la un moment dat se poate ajunge în punctul în care acest curent nu se mai întrerupe. Figura 15.14 prezintă formele de undă pentru unghiurile de comandă $\alpha_A=60^\circ$ și $\alpha_B=120^\circ$, unde s-a considerat că unda curentului de circulație este continuă (permanentă). Efectul benefic al acestui regim a fost descris anterior, în cazul schemei antiparalel (este exclusă apariția regimului de curent întrerupt la convertorul încărcat, chiar dacă valoarea curentului de sarcină tinde spre zero).

Spre deosebire de schema antiparalel, la schema în cruce, indiferent de unghiurile de comandă, forma de undă a tensiunii u_c , și implicit a curentului de circulație i_c , prezintă șase pulsuri identice într-o perioadă a tensiunii de alimentare – vezi Fig.15.13 și Fig.15.14. Este un amănunt care conduce la menținerea unui curent de circulație neîntrerupt cu ajutorul unor inductanțe de limitare mai mici.

Modificarea comenzii și măsurile de control ale curentului, necesare pentru ca ansamblul convertor–motor să parcurgă cele patru cadrane, sunt identice cu cele descrise la schema antiparalel.

5. Montajele de laborator

Se vor studia redresoarele cu funcționare în patru cadrane și curent de circulație pe două standuri de laborator după cum urmează:

- un stand care implementează **schema antiparalel din Fig.15.9**, stand realizat în jurul unui redresor bidirecțional industrial (CMTREM380 – fabricat de *Electrotehnica București*) cu ajutorul a două punți trifazate B_{6A} și B_{6B} ;
- un stand care implementează **schema în cruce din Fig.15.11** în care cele două convertoare componente A și B sunt redresoare trifazate cu punct median M3.

Cele două standuri sunt prevăzute cu facilități pentru măsurarea și oscilografiera formelor de undă ale diferitelor variabile cum ar fi: u_{dA} , u_{dB} , u_c , $u_{sarc.}$, i_c , $i_{sarc.}$. În acest sens s-au prevăzut borne conectate la diferite puncte de măsură, respectiv șunturi pentru oscilografierea formelor de undă ale curenților.

Se vor utiliza voltmetre pentru măsurarea valorilor medii ale tensiunilor și ampermetre pentru măsurarea curenților. Formele de undă ale tensiunilor și curenților vor fi oscilografiate cu ajutorul unui osciloscop cu două spoturi.

Tensiunile care alimentează cele două scheme sunt obținute prin intermediul unor transformatoare trifazate cu un singur secundar în cazul primului stand și cu două secundare în cazul celui de-al doilea stand. Motoarele de c.c. alimentate au următoarele date nominale: $U_n=110V_{cc}$, $P_n=1,7kW$, $n_n=1500$ rot/min.

Comanda simultană a unghiurilor de comandă pentru celor două convertoare componente A și B se face prin intermediul unui potențiomtru. Condiția dată de relația (15.5) este implementată automat de schema de comandă. Trebuie avut grijă ca de fiecare dată când se pune în funcțiune instalația de laborator potențiomtrul de comandă să fie astfel poziționat încât să fie realizată condiția:

$$\alpha_B = \alpha_A = 90^\circ$$

pentru ca motorul de c.c. să nu fie alimentat brusc cu o tensiune ridicată.

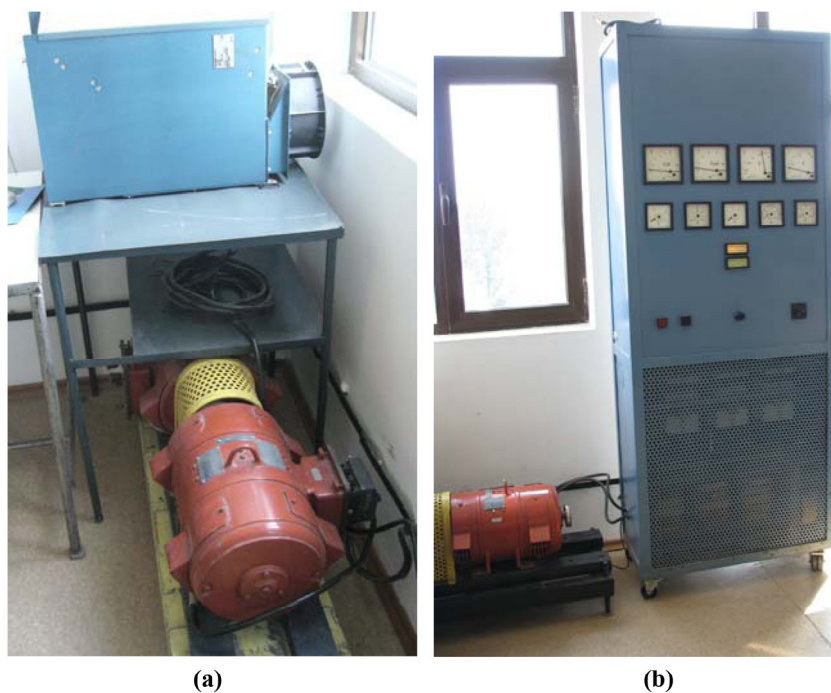


Fig. 15.15 Imaginea standului de laborator cu redresoarele bidirecționale ce implementează:
 (a) schema antiparalel – convertorul CMTREM380 realizat de *Electrotehnica*, București;
 (b) schema cruce – convertor realizat de prof.dr.ing. Mircea Paul Diaconescu.

4. Modul de lucru

1. Se vor studia aspectele teoretice cu privire la funcționarea sarcinii de c.c. în patru cadrane;
2. Se va analiza modul în care, cu ajutorul unui redresor obișnuit cu tiristoare și cu ajutorul unor contactoare de sens, poate fi obținută o acționare în patru cadrane;

3. Se va analiza modul în care poate fi obținut un redresor cu funcționare în patru cadrane (redresor bidirecțional) cu ajutorul a două redresoare obișnuite legate în antiparalel;
4. Se vor studia aspectele teoretice cu privire la funcționarea redresoarelor bidirecționale fără curent de circulație;
5. Se vor studia aspectele teoretice cu privire la funcționarea redresoarelor bidirecționale cu curent de circulație – schema antiparalel;
6. Se vor studia aspectele teoretice cu privire la funcționarea redresoarelor bidirecționale cu curent de circulație – schema în cruce;
7. Se va pune în funcțiune primul stand de laborator care implementează schema antiparalel din Fig.15.9 și prin modificarea comenzii se va observa posibilitatea rotirii în ambele sensuri ale motorului de c.c.;
8. Pe durata unui ciclu de funcționare (trecerea ansamblului convertor–motor prin toate cele patru cadrane) se va măsura tensiunea medie de la nivelul sarcinii ($U_{sarc.}$) și curentul continuu prin aceasta $I_{sarc.}$, respectiv tensiunea și curentul continuu dat de unul din cele două convertoare (ex. U_{dA} , I_{dA});
9. Se vor oscilografia formele de undă a tensiunii u_{dA} , și a curentului i_{dA} . Pentru un sens de rotație în cadranul 1 curentul dat de convertorul A va conține și curentul de sarcină și curentul de circulație ($i_{dA} = i_{sarc.} + i_c$), iar pentru celălalt sens de rotație în cadranul 3 curentul de circulație va conține numai curentul de circulație ($i_{dA} = i_c$);
10. Se va pune în funcțiune al doilea stand de laborator care implementează schema în cruce din Fig.15.11 și prin modificarea comenzii se va observa posibilitatea rotirii în ambele sensuri ale motorului de c.c.;
11. La fel ca în cazul primului stand se vor măsura valorile medii ale tensiunilor și curenților, respectiv se vor oscilografia formele de undă menționate mai sus. Se vor discuta rezultatele obținute și se vor evidenția diferențele între cele două scheme testate.