

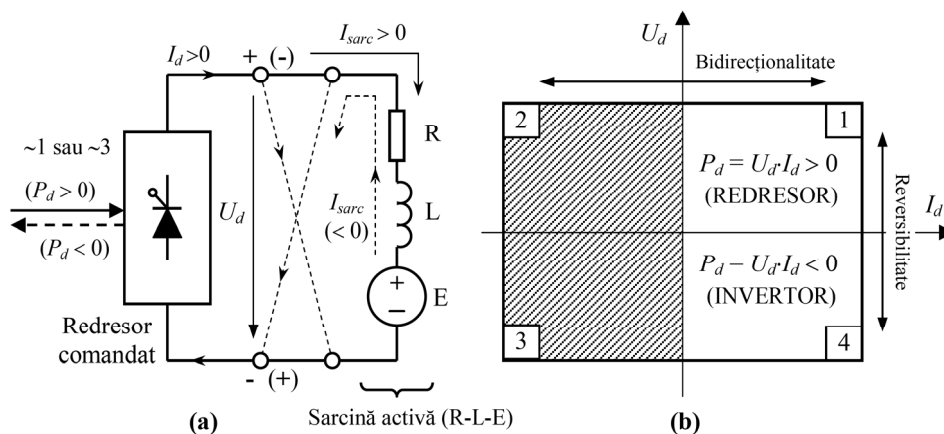
## Lucrarea 9

## FUNȚIONAREA REDRESORULUI MONOFAZAT ÎN REGIM DE INVERTOR

### 1. Introducere

Un redresor comandat obișnuit cu comutație naturală (M2, B2, M3, B6 etc.) poate funcționa doar în două cadrane ale sistemului de axe  $U_d - I_d$  (plan electric), respectiv în cadranele 1 și 4, așa cum se prezintă în Fig.9.1.

În cadranul 4 convertorul funcționează în regim de invertor, 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  $\alpha_{inv} > 90^\circ$ . 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 în poziția sursei convertorul se comportă asemenea unui receptor de energie electrică deoarece puterea  $P_d$  devine negativă:  $P_d = U_d \cdot I_d < 0$ .



**Fig. 9.1** (a) Trecerea unui redresor comandat în regim de invertor (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

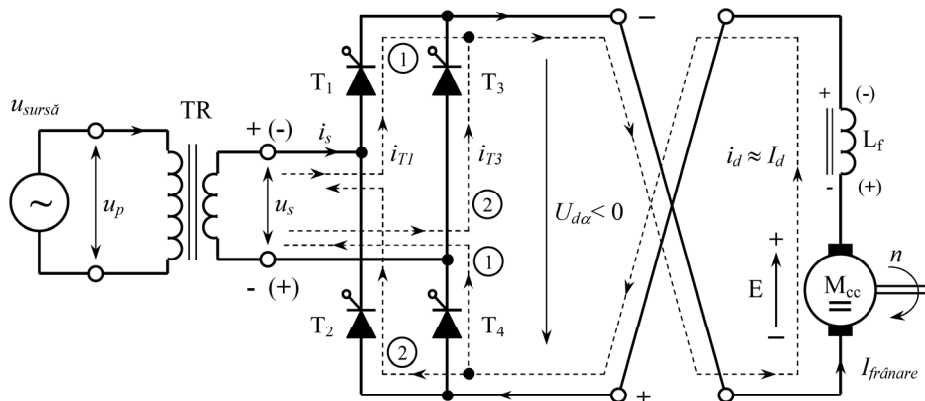
trecerea din cadrantul 1 în cadrantul 4 așa cum sugerează săgeata din Fig.9.1(b). Cu toate că, un proces de reversibilitate poate avea loc și prin trecerea din cadrantul 3 în cadrantul 2, manevra nu este posibilă deoarece funcționarea convertorului în respectivele cadrane este exclusă.

## 2. Funcționarea redresorului monofazat în regim de inverter

Pentru ca o structură redresoare comandată să poată funcționa în regim global de inverter (în cadrantul 4 al planului electric  $I_d - U_d$ ) nu este suficient doar să se modifice comanda corespunzătoare unui unghi de inverter  $\alpha_{inv}$ , cuprins în gama  $(90^\circ \div \alpha_{inv(max)})$ . Pe lângă această condiție, se impune ca tensiunea sarcinii active (E) să fie astfel conectată la bornele redresorului încât sarcina să devină sursa care întreține circulația curentului  $I_d$ , așa cum se prezintă în Fig.9.3. Astfel, convertorul trece în poziția receptorului de energie, iar tensiunea dată de unghiul de inverter  $\alpha_{inv}$ :

$$U_{d\alpha(inv)} = U_{d0} \cdot \cos \alpha_{inv} < 0 \quad (9.1)$$

fixează căderea de tensiune pe acesta. Prin intermediul ei poate fi reglată valoarea medie a curentului  $i_d$ . Tot prin trecerea convertorului în poziția receptorului poate fi explicată *polaritatea negativă a tensiunii pe acesta* care este asigurată de sarcina activă și nu de convertor ca în cazul regimului de redresor.



**Fig. 9.2** Conectarea sarcinii active la bornele redresorului monofazat în punte pentru a funcționa în regim de inverter.

În Fig.9.2 s-a prezentat ca sarcină activă un motor de c.c. Este cea mai sugestivă și răspândită aplicație în care se justifică aducerea redresorului în regim de inverter. Dacă mașina de c.c. este mai întâi alimentată de la un redresor comandat în regim de motor, așa cum se prezintă în Fig.8.1(b) (vezi Referatul 8), după care se

dorește frânarea acesteia prin aducerea convertorului în cadranul 4, trebuie efectuate următoarele operații succesive:

1. Blocarea impulsurilor de comandă sau creșterea unghiului de comandă spre valoarea de  $90^\circ$  pentru a permite anularea curentului  $I_d$  prin motor;
2. Deconectarea sarcinii active ( $M_{cc} + L_f$ ) și reconectarea acesteia invers la bornele redresorului (*contraconectare*), așa cum se prezintă în Fig.9.3, pentru a asigura polarizarea inversă a ieșirii convertorului;
3. Comanda convertorului cu un unghi  $\alpha_{inv} \in (90^\circ \div \alpha_{inv(max)})$ . Unghiul de invertor trebuie bine ales în momentul inițial ( $\alpha_{inv} = 180^\circ - \alpha_{redr}$ ) pentru a evita distrugerea tiristoarelor datorită creșterii curentului  $I_d$  peste o valoare maximă admisibilă.

În regim de invertor curentul în partea de c.c. este dat de relația:

$$I_d = \frac{E - |U_{d\alpha(inv)}|}{\sum R} = I_{fr} \quad \text{unde:} \quad (9.2)$$

- $E$  este tensiunea electromotoare (t.e.m.) proporțională cu viteza motorului  $n$ ;
- $\sum R = R_a + R_{Lf} + R_{secTR}$  este o sumă formată din rezistența indusului motorului de c.c. ( $R_a$ ), rezistența inductanței de filtrare ( $R_{Lf}$ ) și rezistența secundarului transformatorului ( $R_{secTR}$ ).

Curentul  $I_d$  dat de relația (9.2) circulă tot în sens pozitiv prin convertor (singurul sens permis de tiristoare), dar în sens invers prin motor (sensul dat de tensiunea  $E$ ) constituindu-se într-un curent de frânare pentru acesta ( $I_{frânare} < 0$ ).

Toate rezistențele din suma  $\sum R$  aparțin unor înfășurări (bobine) și au valori mici (zeciimi  $\Omega \div \Omega$ ). În consecință, trebuie avut grijă ca în primele momente după trecerea în regim de invertor numărătorul din relația (9.2) să nu fie mare pentru ca valoarea medie a curentului prin dispozitivele redresoare  $I_{disp(med)} = I_d / 2$  să nu depășească limita maximă de catalog. Dacă nu se cunoaște viteza de rotație a motorului și implicit tensiunea electromotoare  $E$  este indicat ca trecerea redresorului în regim de invertor să se facă la un unghi maxim după care să se scadă progresiv (scade  $|U_{d\alpha(inv)}|$ ) până când valoarea curentului  $I_d$  se păstrează în limite acceptabile.

Dacă motorul lucrează în regim de frânare electrică pentru oprire, turația acestuia scade în timp determinând scădere progresivă a t.e.m.  $E$ . Într-o frânare eficientă trebuie menținut curentul  $I_{frânare} = I_d$  la o valoare cât mai ridicată deoarece cuplul electromagnetic creat de motor este proporțional cu valoarea curentului prin indus. În acest scop, circuitul de comandă al convertorului trebuie completat cu un sistem de reglare care să diminueze progresiv unghiul  $\alpha_{inv}$  pe măsură ce viteza motorului scade.

Există și posibilitatea unei frânări a motorului la o viteză cvasi constantă atunci când sarcina mecanică de la arborele său prezintă un caracter potențial (ex.

coborârea unei greutăți la viteză constantă de către o macara, frânarea cu recuperare a unui autovehicul electric care coboară o pantă etc.). Într-o asemenea situație mașina electrică generează un cuplu de frânare care se opune cuplului potențial ce provoacă mișcarea pentru a nu permite creșterea vitezei peste o anumită valoare datorită greutății

În Fig.9.3 sunt prezentate formele de undă ale unui redresor monofazat bialternanță care funcționează în regim de inverter comandat cu un unghi  $\alpha_{inv} = 120^\circ$ . Privind forma de undă a tensiunii  $u_d(t)$  de la ieșirea convertorului se observă că aceasta conține porțiuni mai mari din semialternanțele negative decât porțiunile din semialternanțele pozitive. Astfel, tensiunea medie în regim de inverter rezultă negativă deoarece *Aria B* negativă are modulul mai mare decât *Aria A* pozitivă:

$$U_{d\alpha(inv)} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} u_d(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \cdot (Aria A + Aria B) = U_{d0} \cdot \cos \alpha_{inv} < 0 \quad (9.3)$$

Întreținerea curentului  $i_d(t) > 0$  pe intervalele alternanțelor negative este realizată de tensiunea sarcinii active (*E*). Pe aceste intervale puterea instantanee în partea de c.c. este negativă ceea ce corespunde unei puteri vehiculate din partea de c.c. în partea de c.a. (regim instantaneu de inverter). Deoarece intervalele corespunzătoare regimului instantaneu de inverter sunt mai mari decât cele corespunzătoare regimului instantaneu de redresor (intervalele în care  $u_d(t) > 0$ ), puterea medie în partea de c.c. este negativă și convertorul funcționează în regim global de inverter:

$$P_d = U_{d\alpha(inv)} \cdot I_d < 0 \quad (9.4)$$

*Această putere este cedată de sarcina activă sursei de c.a prin intermediul convertorului și o regăsim în partea de c.a. sub forma puterii active.*

Se demonstrează că, în partea de c.a., puterea activă corespunzătoare unui un receptor neliniar, cum este redresorul comandat, este dată de relația:

$$P = U_s I_{s1} \cdot \cos \varphi_1 \quad (9.5)$$

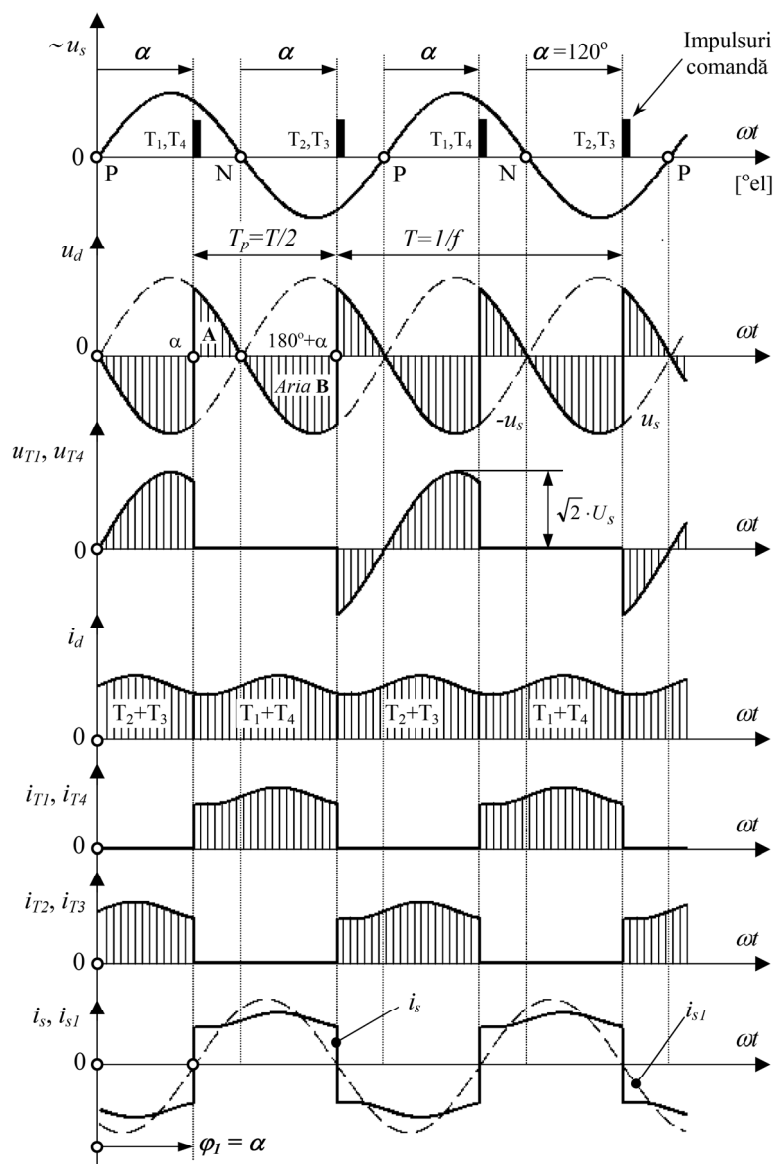
unde  $I_{s1}$  este valoarea efectivă a armonicii fundamentale a curentului și  $\varphi_1$  este defazajul dintre armonica fundamentală  $i_{s1}(t)$  a curentului  $i_s(t)$  și tensiunea alternativă  $u_s(t)$  de la intrarea redresorului, considerată sinusoidală.

Analizând diagrama  $i_{s1}(t)$  din Fig.9.3 se observă că armonica fundamentală a curentului în partea de c.a. este defazată în urma tensiunii alternative cu unghiul:

$$\varphi_1 = \alpha_{inv} > 90^\circ \quad (9.6)$$

În consecință, puterea activă în partea de c.a. devine:

$$P = U_s I_{s1} \cdot \cos \varphi_1 = U_s I_{s1} \cdot \cos \alpha_{inv} < 0 \quad (9.7)$$



**Fig. 9.3** Formele de undă corespunzătoare unui redresor monofazat în punte funcționând în regim de invertor ( $\alpha_{inv}=120^\circ$ ).

Privit din partea sursei de c.a. o putere activă negativă are semnificația unei puteri primite. Aceasta este exact puterea transferată prin convertor din partea de c.c.

Rezultă că redresorul face o conversie continuu-alternativ a energiei electrice, deci funcționează în **regim de inverter**.

În concluzie, un redresor comandat poate funcționa în două regimuri, regimul de redresor și regimul de inverter, dacă sunt îndeplinite anumite condiții. În primul rând alegerea unuia din cele două regimuri se face prin intermediul unghiului de comandă. În al doilea rând, pentru obținerea regimului de inverter trebuie ca sarcina în partea de c.c. să fie activă și legată astfel la bornele convertorului încât să favorizeze circulația curentului continuu în sens pozitiv.

Operațiile succesive executate pentru trecerea convertorului electronic de putere din regimul de redresor în regimul de inverter introduc timpi mari de întârziere care deranjează în multe aplicații. Din acest motiv în practică se recurge la soluția redresoarelor bidirecționale (cu funcționare în patru cadrane) care constau, de fapt, din două redresoare obișnuite conectate în antiparalel.

### 3. 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 cadranul 1 în cadranul 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 inverter realizează o trecere din cadranul 1 în cadranul 2 pentru sarcină deoarece se schimbă sensul curentului prin aceasta, polaritatea tensiunii la bornele ei rămânând aceeași (Fig.9.1  $\rightarrow I_{frânare} < 0$ ). 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 inverter, 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 cadranul 4 în cadranul 1, dar din punctul de vedere al motorului de c.c. avem o trecere din cadranul 2 în cadranul 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 cadranul 3 în cadranul 4. Pentru aceasta, redresorul va trece a doua oară din cadranul 1 în cadranul 4 având grijă ca înainte să se execute manevrele de

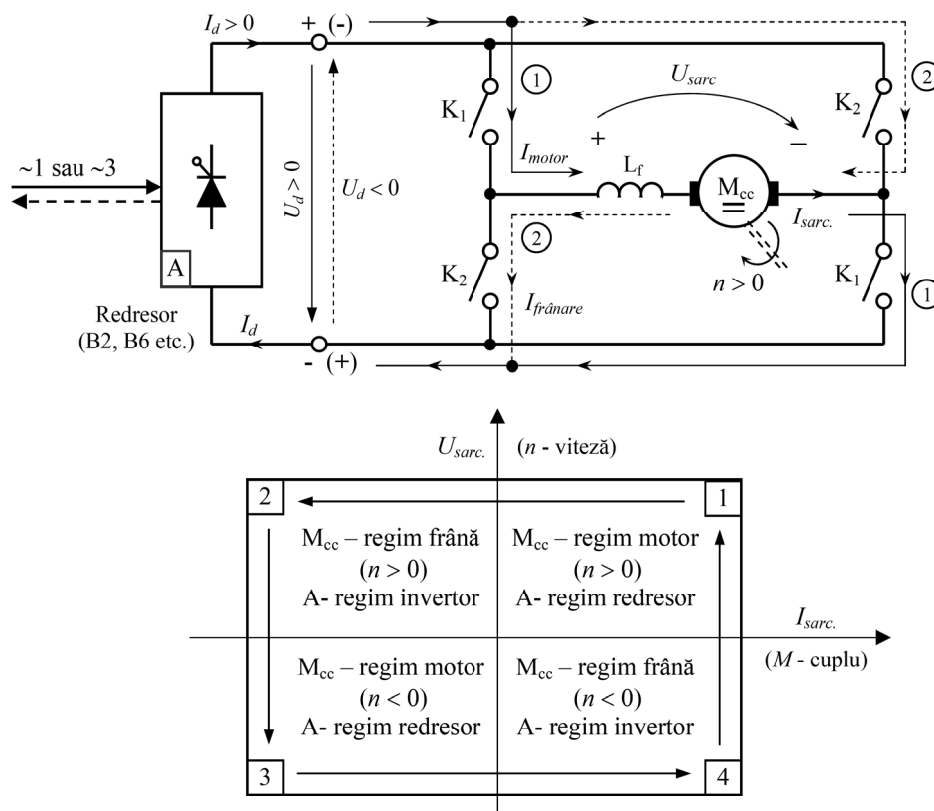
contraconectare (se revine la conexiunea inițială când sarcina funcționează în cadrantul 1) și de modificare a comenzii corespunzătoare unui unghi de invertor  $\alpha_{inv}$ . După oprirea motorului se poate trece convertorul din nou în cadrantul 1, aducând împreună cu el și sarcina activă care încheie, astfel, un ciclu complet în care a parcurs toate cele patru cadrane în sens *antiorar*, sensul normal de funcționare a unei **acționari reversibile**: rotația motorului în sens pozitiv ( $n > 0$ ) → frânarea și oprirea din sensul pozitiv de rotație → rotația 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 cadrantul 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.9.4 pentru o acționare reversibilă (acționare în patru cadrane) cu motor de c.c. ( $M_{cc}$ ). Mașina electrică funcționează ca motor în cadrantul 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.9.5 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 cadrantul 2 unde cuplul electromagnetic se va opune mișcării, trebuie executate manevrele descrise anterior. Mai întâi se creșterea unghiului de comandă de la valoarea avută în cadrantul 1 ( $\alpha_{redr}$ ) spre valoarea de  $90^\circ$  și mai departe spre valorile de invertor 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 puternic. Pentru început se va alege prin alegerea un unghi de invertor mare ( $\alpha_{inv} = 180^\circ - \alpha_{redr}$ ) în scopul evitării apariției unui curent periculos prin convertor. Urmează descreșterea unghiului de invertor spre valoarea de  $90^\circ$  odată cu descreșterea vitezei, astfel încât, curentul de frânare ( $I_{frânare}$  – traseul 2 din Fig.9.4) să nu depășească valoarea maximă acceptată și de convertor și de motor ( $I_{max}$ ):

$$I_{frânare} = I_d = \frac{E - |U_{d\alpha(inv)}|}{\sum R} \leq I_{max} \quad (9.8)$$



**Fig. 9.4** 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.

În urma operației de frânare din cadranul 2, unghiul de comandă atinge valoarea de  $90^\circ$  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):

$$I_{motor} = I_d = \frac{U_{d\alpha(redr)} - E}{\sum R} \leq I_{max} \tag{9.9}$$



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 invertor. 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 (9.9).

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.

#### 4. Montajul de laborator

În scopul studiului experimental al regimului global de invertor la un redresor monofazat în punte se va realiza montajul de laborator din Fig.9.5 a cărui imagine este prezentată în Fig.9.6. Montajul include cu aproximație aceleași elemente de circuit ca în cazul lucrării dedicate funcționării structurii monofazate în punte în regim global de redresor (vezi Referat 8). Pentru a obține sarcina activă capabilă să cedeze permanent energie invertorului se va utiliza standul deja cunoscut cu cele două mașini electrice de c.c. identice, cuplate mecanic. Astfel, sarcina activă este emulată de una din cele două mașini care, atunci când va ceda energie, va lucra în regim de generator (G), antrenată fiind de a doua mașină care va funcționa în regim de motor (M). În plus, standul mai include un traductor incremental de viteză (encoder EN) și un tahogenerator (TG), ambele cuplate mecanic tot pe axul de rotație comun a celor două mașini principale. Prin intermediul tahogeneratorului se poate măsura (monitoriza) ușor viteza de rotație ( $n$ ) cu ajutorul unui voltmetru deoarece acest traductor analogic generează o tensiune continuă proporțională cu viteza de rotație. Din motive de protecție a muncii pe circuitele de alimentare a celor două mașini de c.c., în intefăța cu rețeaua, s-a ales soluția unor transformatoare electrice (TR1, TR2) care furnizează în secundar tensiuni reduse de  $24V_{ca}$ . Primul transformator alimentează puntea studiată în regim de invertor, iar cel de-al doilea transformator alimentează, prin intermediul unui autotransformator (ATR) și a unui redresor necomandat cu diode, motorului M. Puntea cu tiristoarele  $T_1 \div T_4$  este integrată într-un modul de putere fixat pe un radiator împreună cu bornele de legătură. Circuitul de comandă al tiristoarelor realizat cu integratul de comandă UAA145 este unul din cele descrise în Lucrarea 3. Puterea celor două mașini electrice de c.c. este de 120W și nu au nevoie de excitație separată deoarece sunt realizate cu magneți permanenți. Inductanța  $L_f$  a fost realizată special pentru lucrări de laborator, are o valoare fixă, fiind prevăzută cu borne de legătură potrivite pentru cablurile standard cu banane.

Pentru experiment se va alege un regim de invertor stabilizat atunci când se realizează o frânare constantă a mașinii notată cu G la o viteză constantă. În acest scop, așa cum s-a precizat mai sus, mașina G va funcționa în regim de generator, fiind antrenată mecanic de mașina M care va funcționa în regim de motor. Alimentarea motorului este realizată prin intermediul unei punți redresoare monofazate cu diode

alimentate, la rândul ei, de la TR2 și autotransformatorul ATR. Cu ajutorul autotransformatorului poate fi modificată tensiunea continuă de alimentare a motorului, viteza acestuia  $n$  și implicit valoarea tensiunii electromotoare  $E$  a generatorului G. Astfel, se adaptează nivelul acestei tensiuni la valoarea tensiunii de inverter maxime obținute de inverter:

$$U_{d\alpha(inv)\max} = U_{d0} \cdot \cos \alpha_{inv(\max)} \approx E \quad (9.10)$$

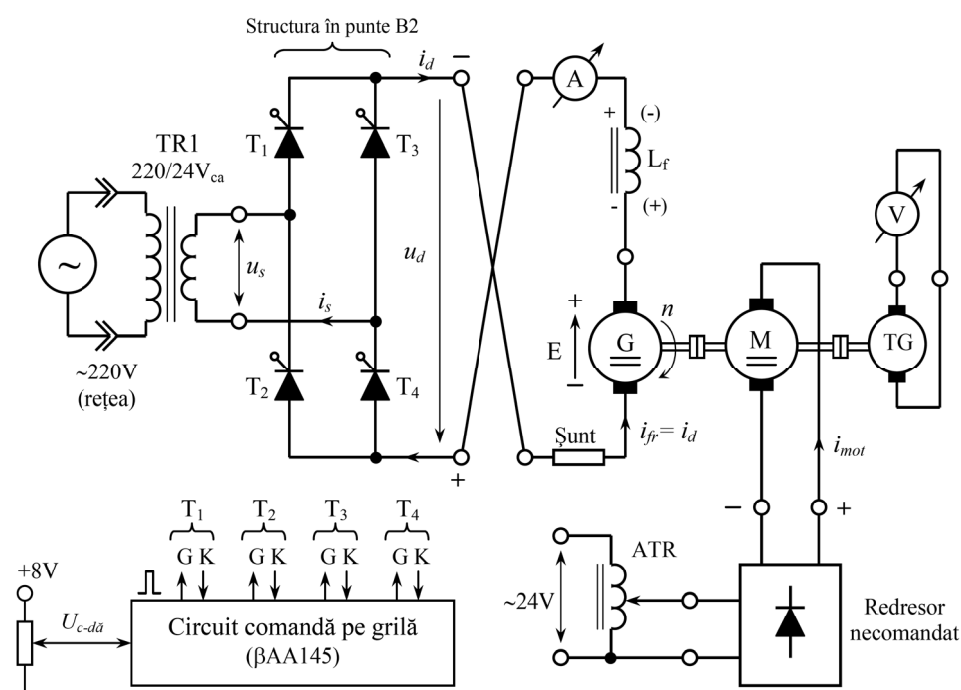


Fig. 9.5 Montajul de laborator – punte redresoare B2 în regim de inverter.

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.9.6. Se vor utiliza două voltmetre pentru a măsura valoarea medie a tensiunii  $u_d$  și a tensiunii date de tahogeneratorul TG, un ampermetru pentru măsurarea valorii medii a curentului  $i_d$  și un osciloscop cu două spoturi pentru a oscilografia semnalele.

Conform celor precizate în secțiunea 2 a prezentului referat aducerea convertorului în regim de inverter presupune precauții și efectuarea unor manevre obligatorii. În cazul lucrării de față punerea în funcțiune a lucrării presupune efectuarea următoarelor operații succesive:

- Conectarea circuitului de comandă la structura de forță a punții comandate, alimentarea acesteia și verificarea funcționării în regimul de redresor care alimentează mașina  $G$  (mașina  $M$  nu este alimentată);
- Măsurarea tensiunii continue  $U_{d0}$  cu ajutorul unui voltmetru conectat la ieșirea punții monofazate atunci când aceasta funcționează în regim de redresor cu unghiul de comandă  $\alpha = 0^\circ$  el.
- Blocarea structurii în punte și calculul tensiunii  $U_{d\alpha(inv)max}$  cu ajutorul relației (9.10) în care  $\alpha_{inv(max)} = 150^\circ$  el.
- Pornirea motorului  $M$  în sens invers sensului în care s-a rotit anterior  $G$  și ajustarea vitezei până când este îndeplinită condiția dată de relația (9.10) (tensiunea electromotoare  $E$  poate fi măsurată direct la bornele generatorului  $G$ );
- Se verifică dacă tensiunea  $E$  a generatorului  $G$  polarizează invers ieșirea structurii B2, așa cum se prezintă în Fig.8.12;
- Pornirea punții B2 în regim de invertor la un unghiul maxim  $\alpha_{inv(max)}$  după care este scăzută progresiv valoarea acestuia până când se sesizează o încărcare a generatorului printr-o scădere semnificativă a vitezei  $n$  și o creștere a  $I_d$  ( $\cong 4A$ ).

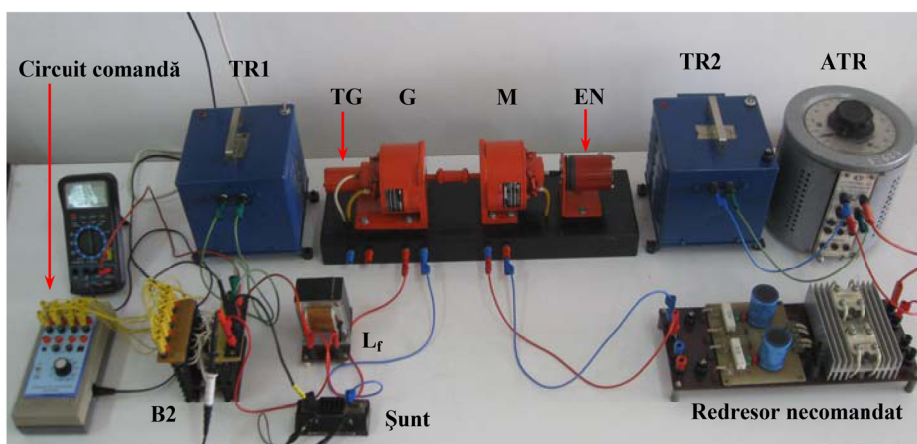


Fig. 9.6 Imaginea montajului din laborator al lucrării.

### 5. Modul de lucru

1. Se vor analiza posibilitățile de schimb energetic dintre sarcina de c.c. și sursa de c.a. prin intermediul unui redresor comandat și se va analiza corespondența dintre cadranele planului electric  $I_d - U_d$  și sensurile de circulație ale puterii electrice prin convertor;

2. Se vor studia aspectele teoretice cu privire la funcționarea structurii B2 comandate în regim global de inverter și manevrele care trebuie realizate pentru a trece funcționarea acestui convertor din regim de redresor în regim de inverter;
  3. Se va analiza modul în care, prin schimbarea conexiunii dintre mașina de c.c. și convertor (contraconectare), redresorul comandat cu comutație naturală funcționează în cadranul 4 al planului electric, iar mașina electrică în cadranul 2 al planului mecanic;
  4. Se va analiza modul în care se poate obține o acționare electrică reversibilă (funcționare în 4 cadrane) cu o mașină de c.c. cu ajutorul unui singur redresor comandat cu tiristoare;
  5. Se va realiza schema din Fig.9.7 și se va testa separat cele două părți ale acesteia comandând mai întâi structura B2 în regim de redresor, după care se va bloca redresorul și se va alimenta mașina M cu o tensiune variabilă cu ajutorul redresorului necomandat și a autotransformatorului;
  6. Se va pune în funcțiune convertorul B2 cu tiristoare în regim de inverter urmând toți pașii în ordine așa cum au menționați în secțiunea anterioară;
  7. Se vor oscilografia formele de undă ale tensiunii  $u_d$  și curentului  $i_d$  în regim de inverter și se vor compara undele obținute cu cele teoretice prezentate în Fig.9.4;
  8. Se va pune în evidență creșterea încărcării inverterului, a generatorului  $G$  și implicit a motorului  $M$  odată cu scăderea unghiului de inverter. Acest aspect poate fi cuantificat urmărind:
    - unda curentului  $i_d$  pe osciloscop (va crește componenta continuă a undei);
    - ampermetrul A care măsoară valoarea medie a curentului  $i_d$ ;
    - tensiunea tahogeneratorului care va scădea datorită faptului că mărind încărcarea motorului acesta își va scădea viteza la o aceeași tensiune de alimentare (evoluția punctului de funcționare pe caracteristica mecanică a acestuia);
  9. Se va observa că pe măsură ce unghiul de comandă tinde spre valoarea de  $90^\circ$ el. convertorul se comportă ca un element care scurtcircuitează efectiv indusul generatorului de c.c. și curentul  $I_d$  crește foarte mult;
  10. Se va sista alimentarea motorului  $M$  și se va observa cum prin scăderea unghiului de comandă sub  $90^\circ$ el. grupul de mașini electrice se va roti în sens invers față de situația anterioară.
  11. De asemenea, dacă se revine cu unghiul de comandă peste  $90^\circ$ el se va observa că structura B2 nu va putea funcționa în regim de inverter în condițiile în care mașina  $M$  nu antrenează mașina  $G$  în sens invers de rotație (manevră sinonimă cu contraconectarea).
-