

Lucrarea 16

SURSE DE TENSIUNE CONTINUĂ PENTRU ALIMENTAREA CONVERTOARELOR

1. Introducere

Sunt multe sarcini de c.c. care cer o tensiune de alimentare bine filtrată, cu un factor de formă cât mai bun. O categorie aparte de asemenea sarcini o reprezintă convertoarele electronice de putere care fac conversia continuu-continuu (variatoarele de tensiune continuă) și cele care fac conversia continuu-alternativ (invertoarele).

Deoarece sursa principală de energie electrică o constituie rețeaua de c.a. se impune utilizarea *redresoarelor* pentru a obține tensiunea continuă la intrarea convertoarelor amintite. Având în vedere simplitatea și prețul mic sunt preferate redresoarele necomandate cu diode. Soluția devine și mai atractivă dacă se redresează direct tensiunea rețelei cu ajutorul unor structuri în punte fără a mai utiliza un transformator de rețea. În acest fel, este eliminat un element de circuit care încarcă sistemul electronic de putere, atât din punct de vedere al gabaritului, cât și din punct de vedere al prețului. Acest avantaj este în parte atenuat de prețul ridicat al filtrului de tensiune folosit în această variantă și de influențele negative pe care redresoarele cu diode le au asupra rețelei de alimentare.

În general, echipamentele electronice de putere care furnizează tensiuni continue filtrate, fixe sau reglabile, stabilizate sau nestabilizate, cu sau fără separare galvanică, poartă denumirea de *surse de c.c.* sau *surse de tensiune continuă*. Anumite aspecte legate de aceste surse cu putere scăzută au fost deja tratate în referatul Lucrării 10 dedicat redresorului monofazat în punte prevăzut cu filtru de tensiune la ieșire.

2. Structura surselor de c.c. cu redresoare

Structura unei surse de c.c. care include un redresor și un filtru de tensiune este prezentată în Fig.16.1.

Redresorul poate fi:

- redresor necomandat cu diode;
- redresor comandat cu tiristoare, unidirecțional sau bidirecțional;
- redresor PWM funcționând în comutație forțată.

Filtrul de tensiune este de obicei capacitiv format dintr-o baterie de condensatoare polarizate identice, legate serie/paralel.

Condensatoarele trebuie să fie performante pentru a putea lucra la frecvența de comutație ridicată a convertoarelor alimentate de sursă, în sensul reducerii pierderilor și a avea un răspuns rapid în curent. Ultima caracteristică se traduce prin necesitatea creșterii curentului cu o pantă mare la bornele condensatoarelor atunci când sarcina din aval o cere. Acest deziderat poate fi obținut dacă schema echivalentă a fiecărui condensator prezintă o constantă de timp cât mai mică. Atât reducerea pierderilor, cât și reducerea constantei de timp se obțin prin utilizarea unor condensatoare cu o rezistență echivalentă serie foarte mică (*Low Equivalent Series Resistance - ESR*).

Prin legarea în serie se evită străpungerea condensatoarelor dacă tensiunea continuă U_d este mai mare sau apropiată de valoarea nominală a acestora. Se cunoaște că prin gruparea în serie capacitatea echivalentă a ansamblului este egală cu capacitatea fiecărui condensator împărțită la n , unde n este numărul de condensatoare din grup. Datorită scăderii capacității prin legarea în serie și datorită faptului că se dorește o capacitate a filtrului cât mai mare se vor lega în paralel cât mai multe ramuri de condensatoare conectate în serie. Numărul acestor ramuri este limitat de costul maxim alocat pentru filtru (condensatoarele electrolitice de tensiune mare sunt scumpe) și spațiul avut la dispoziție.

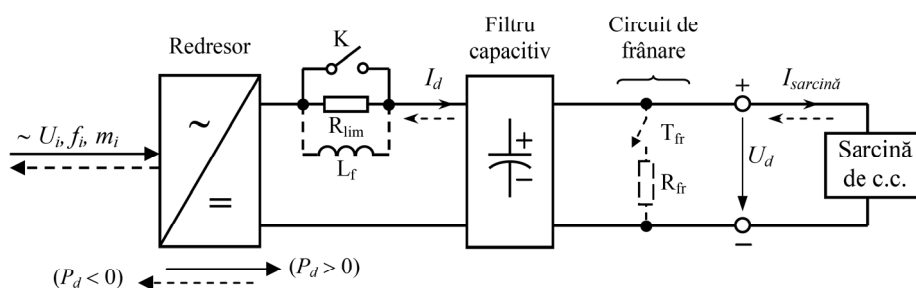


Fig. 16.1 Structura unei surse de c.c. cu redresor și filtru de tensiune la ieșire.

Trebuie precizat că, la punerea sub tensiune a redresorului, filtrul capacitiv este descărcat și în primul moment curentul de încărcare al condensatoarelor este foarte mare. Pentru a nu pune în pericol dispozitivele semiconductoare de putere din redresor se recurge la soluții de limitare a curentului de regim tranzitoriu prin:

- utilizarea unei rezistențe de limitare R_{lim} între redresor și filtrul capacitiv, rezistență scurtcircuitată de către contactele unui contactor K sau de către un tiristor atunci când nivelul tensiunii U_d atinge o valoare minimă;
- utilizarea unei inductanțe de filtrare L_f în locul rezistenței de limitare, inductanță care împreună cu bateria de condensatoare formează un filtru trecejos de tip $L-C$.

Așa cum se mai precizat în Lucrarea 10, cu toate că este mai scumpă, are un gabarit și o masă mai mare, varianta filtrului $L-C$ ajută la diminuarea perturbațiilor introduse în rețea de redresor. De asemenea, este soluția care permite utilizarea unui redresor comandat în structura sursei pentru aplicații în care se dorește o reglare a tensiunii U_d între anumite limite.

De foarte mare importanță, atunci când se proiectează o sursă de tensiune continuă, este tipul sarcinii de c.c. Dacă aceasta este activă și pe anumite intervale de timp funcționează în regim de cedare a energiei, determinând o circulație a puterii în sens invers, trebuie luate măsuri ca energia recuperată să fie evacuată de la nivelul bateriei de condensatoare.

Într-un asemenea regim curentul de sarcină își schimbă sensul ($I_{sarcină} < 0$) iar sarcinile electrice sunt preluate de condensatoare. În timpi foarte scurți (msec.) tensiunea U_d de pe barele de c.c. poate depăși o limită ce ar conduce la străpungerea anumitor condensatoare din structura bateriei de filtrare. Pentru a evita acest fenomen tensiunea U_d este monitorizată și se poate recurge la:

- utilizarea unui circuit de frânare al cărui tranzistor T_{fr} va introduce rapid în paralel cu filtrul capacitiv rezistența R_{fr} în scopul disipării prin căldură a energiei recuperate de la sarcină;
- utilizarea unui redresor bidirecțional care poate funcționa și în cadranul 2 unde va prelua energia de la sarcina activă pentru a o trimite înapoi spre sursa de c.a. ($I_d < 0 \Rightarrow P_d < 0$). Pentru această soluție trebuie făcut un calcul economic care să justifice prin energia recuperată în timp investiția mai scumpă în redresorul bidirecțional.

Redresorul necomandat (cu diode) este ales dacă nu se pune problema unui reglaj al tensiunii continue la ieșire și dacă nu se dorește recuperarea energiei de la sarcină spre sursa de c.a. În acest caz filtrul poate fi de tip capacitiv sau de tip $L-C$. Se poate alege varianta unui redresor monofazat dacă puterea sarcinii este relativ scăzută (sub 1kW) și pretențiile de filtrare a tensiunii nu sunt mari sau varianta unui redresor trifazat dacă sarcina de c.c. este de putere mai ridicată.

Redresoarele comandate (cu tiristoare) sunt utilizate cu filtre $L-C$ de tensiune, fie în variantă unidirecțională, fie în variantă bidirecțională, dacă sarcina impune un reglaj sau o stabilizare a tensiunii continue la intrare. Trebuie precizat că reglajul se poate face în limite mici dacă redresorul funcționează în regim de curent întrerupt sau în limite mai largi pentru un curent de sarcină suficient de mare care aduce redresorul în regimul conducției continue (permanente).

Redresorul poate fi alimentat direct de la rețeaua de distribuție a energiei electrice dacă amplitudinea tensiunii continue obținute corespunde cerințelor sarcinii sau poate fi alimentat prin intermediul unui transformator dacă se dorește o adaptare a tensiunilor.

3. Redresorul trifazat în punte (B6) prevăzut cu filtru de tensiune la ieșire

Pentru realizarea surselor de tensiune continuă cu puteri relativ mari (kW÷sute kW) se folosesc, de obicei, redresoare trifazate în punte, prevăzute cu filtre de tensiune la ieșire. Dacă tensiunea redresată trebuie să fie nereglabilă se folosesc punți cu diode prevăzute cu filtre capacitive sau filtre $L-C$, iar dacă tensiunea redresată trebuie să fie reglabilă într-o limită restrânsă se vor utiliza punți comandate cu tiristoare prevăzute cu filtre $L-C$ la ieșire.

*Utilizarea structurii **trifazate** în punte se remarcă prin încărcarea simetrică a rețelei de distribuție a energiei electrice și printr-o diminuare a filtrului de tensiune față de varianta monofazată, datorită mărimii reduse și a frecvenței ridicate ($6 \times f$) a pulsurilor din forma de undă a tensiunii instantanee redresate.*

Redresorul poate fi alimentat direct de la rețea (Fig.16.2.a) dacă amplitudinea tensiunii continue obținute corespunde cerințelor sarcinii sau poate fi alimentat prin intermediul unui transformator (Fig.16.2.b) dacă se dorește o adaptare a tensiunilor.

a) Analiza redresorului necomandat prevăzut cu filtru de tensiune la ieșire

În Fig.16.2 este prezentat un redresor trifazat în punte cu diode și filtre de tensiune, alimentat în cele două variante prezentate mai sus. Figura 16.2(a) prezintă numai inductanțele sursei de c.a. - L_s - fără a mai reprezenta rezistențele R_s care pot fi neglijate. Pentru o analiză simplificată a redresorului se consideră capacitatea C_f suficient de mare astfel încât tensiunea de ieșire să fie bine filtrată:

$$u_d(t) \approx U_d = \text{const.} \quad (16.1)$$

Deoarece capacitatea C_f stochează energie în timpul funcționării, aceasta este văzută de redresor ca o sarcină activă cu tensiunea proprie U_d . Spre deosebire de redresorul cu filtru inductiv, în cazul utilizării unui filtru de tensiune format exclusiv, din capacitatea C_f pe traseul curentului i_d nu se află o inductanță importantă care să mențină conducția permanentă a curentului prin redresor și din acest motiv convertorul funcționează în regim de curent întrerupt. În plus, pe intervalele în care tensiunile de linie $u_l(t) > U_d$ elementele de circuit care limitează curentul de încărcare al bateriei de condensatoare sunt:

- Impedanța liniei de alimentare ($2R_s + 2\omega L_s$) dacă redresorul este conectat direct la rețea;
 - Impedanța liniei plus impedanța transformatorului raportată la secundar, dacă redresorul este alimentat prin intermediul unui transformator de rețea.
-

Funcționarea redresorului în regim de curent întrerupt

Regimul de curent întrerupt (conducția discontinuă sau intermitentă) la redresorul trifazat necomandat cu filtru capacitiv poate să apară în cazul utilizării unui filtru de tip C sau în cazul utilizării unui filtru $L-C$ dacă sarcina scade sub o anumită valoare ($I_{sarcină} < I_d^*$). În Fig.16.3 sunt prezentate formele de undă corespunzătoare acestui regim în cazul structurii din Fig.16.2(a) cu filtrul de tensiune L_f-C_f .

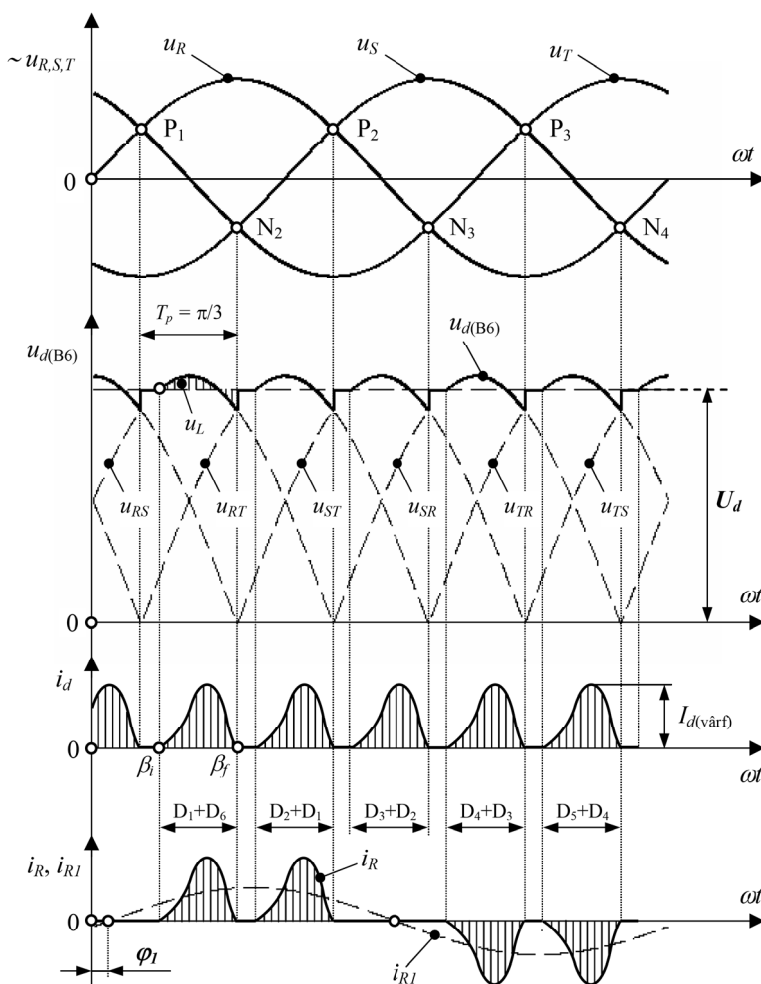


Fig. 16.3 Formele de undă pentru un redresor trifazat în punte necomandată cu filtru de tensiune la ieșire – conducția discontinuă.

În condițiile neglijării inductanței L_s sau dacă valoarea acesteia se include în valoarea inductanței L_f , forma de undă a tensiunii instantanee la ieșirea punții trifazate - $u_{d(B6)}$ - este prezentată în diagrama a doua din figură. Se observă că, în regimul de curent întrerupt al redresorului, intrarea în conducție a celor 6 perechi de diode (D_1+D_6 , D_2+D_1 , D_3+D_2 , D_4+D_3 , D_5+D_4 , D_6+D_5) are loc atunci când tensiunile de linie figurate sunt mai mari decât tensiunea U_d considerată constantă $\rightarrow u_l(t) > U_d$.

Pentru originea fixată ca în Fig.16.3 tensiunea de linie u_{RS} este dată de relația:

$$u_{RS}(t) = \sqrt{2}U_l \cdot \sin(\omega t + \pi / 6) \quad (16.2)$$

După momentul $\omega t = \beta_i$ curentul i_d începe să circule prin redresor și ecuația de echilibru a tensiunilor, într-o formă aproximativă, devine:

$$u_L(t) \approx u_{RS}(t) - U_d \quad (16.3)$$

unde $u_L(t)$ este căderea de tensiune pe inductanța $L=L_f+2L_s$. Căderea de tensiune pe rezistența sursei și a liniei a fost neglijată. Forma de undă a tensiunii $u_L(t)$ este prezentată hașurat în Fig.16.3 considerând axa absciselor pe nivelul tensiunii U_d .

Știind că $u_L(t) = L \cdot \frac{di_d(t)}{dt}$ se obține ecuația diferențială cu ajutorul căreia poate fi calculată expresia curentului $i_d(t)$ și determina forma de undă a acestuia:

$$\frac{di_d(t)}{dt} = \frac{1}{L} \cdot [\sqrt{2} \cdot U_l \sin(\omega t + \pi / 6) - U_d] \quad (16.4)$$

Pe intervalul în care $u_{RS}(t) > U_d$ tensiunea $u_L(t) > 0$ și curentul $i_d(t)$ este crescător ($\frac{di_d(t)}{dt} > 0$). În momentul în care $u_{RS}(t)$ egalează din nou U_d , $\frac{di_d(t)}{dt} = 0$ și curentul i_d atinge un maxim după care urmează un interval în care acesta descrește ($\frac{di_d(t)}{dt} < 0$).

În ultimul interval $u_{RS}(t) < U_d$ și tensiunea U_d are tendința să blocheze diodele aflate în conducție. Totuși, curentul i_d circulă în continuare pe seama energiei acumulate de inductanța L în primul interval de timp. Deoarece energia acumulată de aceasta este redusă, circulația curentului i_d după momentul în care $u_{RS}(t) = U_d$ este limitat și apare conducția discontinuă (întreruptă). Fenomenele se petrec identic pentru fiecare tensiune de linie din cele 6 combinații prezentate în figură.

Limitele intervalului în care circulă curentul i_d , respectiv unghiul inițial β_i și unghiul final β_f , pot fi calculate dacă se cunosc valorile U_d , U_l și L_f conform algoritmului prezentat în Lucrarea 10.

Trebuie precizat că în regim de curent întrerupt nu are loc procesul comutației naturale și de fiecare dată cele 6 perechi de diode preiau conducția curentului $i_d(t)$ de la zero.

Curentul $i_d(t)$ asigură încărcarea bateriei de condensatoare cu energia consumată în intervalul în care acesta se întrerupe și totodată susține curentul $I_{sarcină}$:

$$i_d(t) = i_C(t) + I_{sarcină} \quad (16.5)$$

Într-un ciclu de funcționare (T_p) curentul i_C circulă în ambele sensuri. Acest curent alternativ (nesinusoidal) determină în realitate variații ale tensiunii de la bornele filtrului capacitiv (peste valoarea medie U_d se suprapune o componentă alternativă). Pentru un regim stabilizat de funcționare ($I_{sarcină} = \text{const.}$) valoarea medie a curentului prin filtrul capacitiv al redresorului este zero ($I_C = 0$), afirmație demonstrată în Lucrarea 10. În consecință:

$$I_d = I_{sarcină} \quad (16.6)$$

Relația (16.6) evidențiază faptul că valoarea medie a curentului i_d este egală întotdeauna cu valoarea curentului de sarcină sau, altfel spus, componenta continuă a curentului i_d circulă prin sarcina de c.c., iar componenta alternativă circulă prin filtrul capacitiv.

Conform celor demonstrate în referatul Lucrării 13 și în cazul punții trifazate prevăzute cu filtru de tensiune la ieșire care funcționează în regim de curent întrerupt tensiunea medie redresată este dependentă de curentul de sarcină:

$$U_d = f(I_{sarcină})$$

Astfel, pe măsură ce curentul de sarcină scade, tensiunea de ieșire crește spre valoarea de vârf a tensiunii de linie (vezi Fig.16.4):

$$I_{sarcină} \rightarrow 0 \Rightarrow U_d \rightarrow U_{l(\max)} = \sqrt{2} \cdot U_l = 1,41 \cdot U_l \quad (16.7)$$

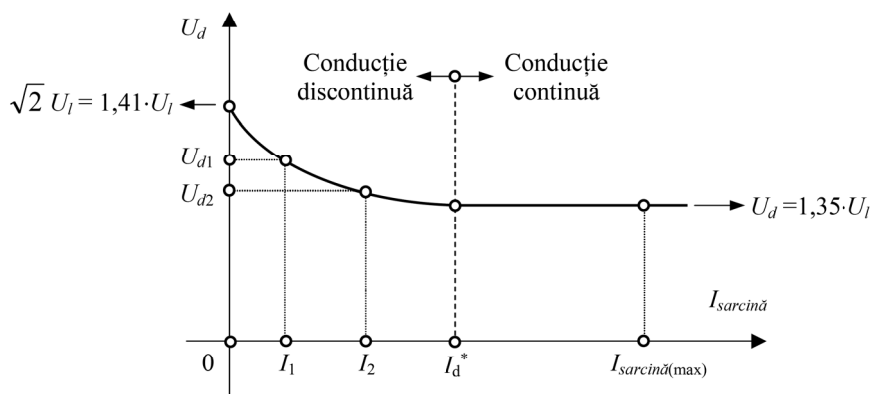


Fig. 16.4 Caracteristica de sarcină $U_d = f(I_{sarcină})$ pentru un redresor trifazat în punte necomandată prevăzut cu filtru $L-C$ la ieșire.

Pentru trasarea graficului $U_d = f(I_{sarcina})$ se va utiliza relația (10.16) din Lucrarea 10 în care U_s se va înlocui cu valoarea efectivă a tensiunii de linie U_l , iar L_s cu valoarea inductanței L . Algoritmul de trasare este același cu cel descris în paragraful menționat și constă în aflarea absciselor unor puncte ale căror ordonate se aleg progresiv descrescătoare, începând cu valoarea maximă $\sqrt{2} \cdot U_l$ și continuând cu $U_{d1} > U_{d2} > U_{d3} > \dots$ etc.

Alura graficului $U_d = f(I_{sarcina})$ este prezentată în Fig.16.4. Se observă că, pentru un curent de sarcină mai mare decât valoarea de graniță I_d^* , redresorul necomandat cu filtru $L-C$ funcționează în regim de curent neîntrerupt (conducție continuă sau permanentă) în care nu mai avem o variație a tensiunii U_d cu sarcina. De asemenea, trebuie subliniat că, în comparație cu redresorul monofazat, *la redresorul trifazat variația tensiunii continue filtrate în regim de curent întrerupt are loc între două limite foarte apropiate* ($1,35U_l \div 1,41U_l$).

Funcționarea redresorului în regim de curent neîntrerupt

Conducția continuă sau permanentă poate fi obținută dacă redresorul trifazat necomandat utilizează un filtru $L-C$ și dacă sarcina conectată la ieșire nu scade sub o anumită valoare ($I_{sarcina} > I_d^*$). Menținerea redresorului într-o conducție continuă este foarte importantă deoarece se obțin două avantaje importante în comparație cu regimul de curent întrerupt:

- independența tensiunii medii redresate față de $I_{sarcina}$;
- menținerea factorului de putere la o valoare ridicată.

În Fig.16.5 sunt prezentate formele de undă corespunzătoare acestui regim în cazul structurii din Fig.16.2(a) cu filtrul de tensiune L_f-C_f . Se observă că tensiunea instantanee redresată după puntea trifazată $u_{d(B6)}$ are aceeași formă de undă ca în cazul redresorului trifazat în punte cu diode, prevăzut cu filtru de curent la ieșire (vezi Lucrarea 13 → Fig.13.2). În consecință, este valabilă și relația 13.4 de calcul a tensiunii medii:

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_l = 1,35 \cdot U_l \approx 2,34 \cdot U_f$$

Analizând diagrama curentului $i_d = i_L$ din Fig.16.5 se constată că acesta nu se întrerupe și prezintă ușoare ondulații chiar dacă inductanța L_f produce un efect de filtrare a acestuia. În regim stabilizat ($I_{sarcina} = \text{const.}$) valoarea curentului i_L de la începutul perioadei T_p va fi egală cu valoarea de la sfârșitul perioadei:

$$i_d(\omega t)|_{\omega t=0} = i_d(\omega t)|_{\omega t=\omega T_c} = I_{d(\min)} \quad (16.8)$$

$$\text{\textcircled{S}tiind c\textcircled{a} : } \quad u_L(\omega t) = L_f \cdot \frac{di_d(\omega t)}{dt} \quad \Rightarrow \quad di_d(\omega t) = \frac{1}{\omega L_f} \cdot u_L(\omega t) \cdot d(\omega t) \quad (16.9)$$

și integrând pe intervalul $[0 \div \omega T_p]$ se obține:

$$\int_0^{\omega T_p} di_d(\omega t) = \frac{1}{\omega L_f} \cdot \int_0^{\omega T_p} u_L(\omega t) \cdot d(\omega t) \Leftrightarrow I_{d(\min)} - I_{d(\min)} = \frac{1}{\omega L_f} \cdot \int_0^{\omega T_p} u_L(\omega t) \cdot d(\omega t) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \int_0^{\omega T_p} u_L(\omega t) \cdot d(\omega t) = 0 \quad (16.10)$$

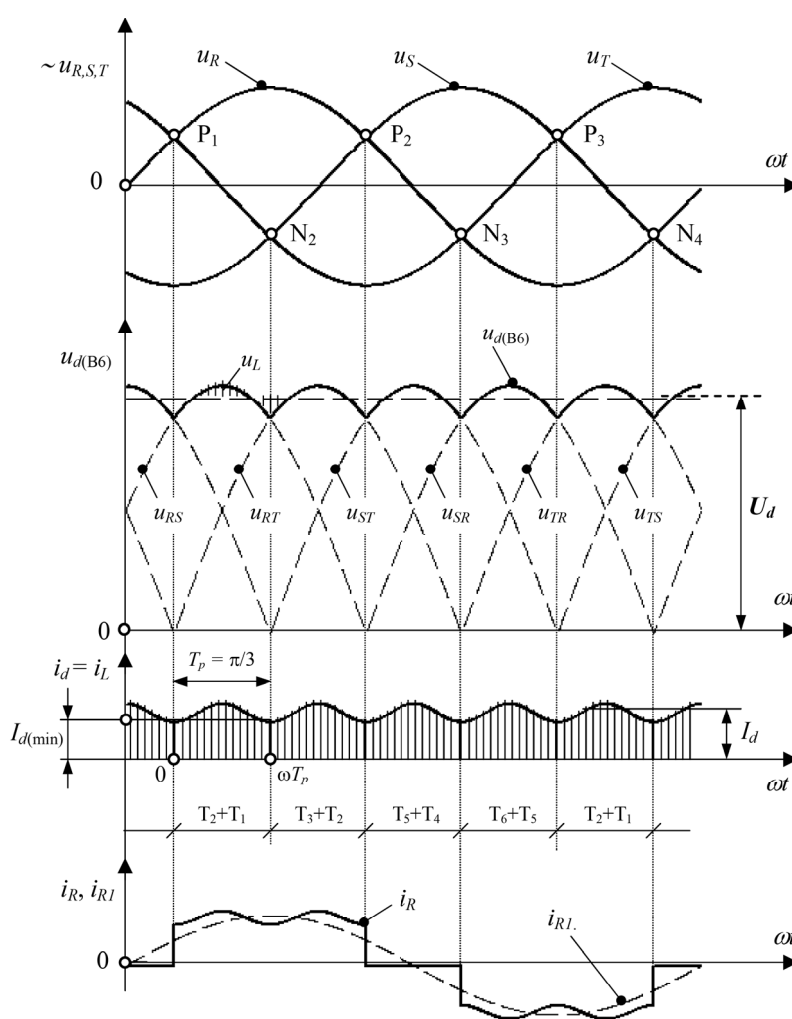


Fig. 16.5 Formele de undă pentru un redresor trifazat în punte necomandată cu filtru de tensiune la ieșire – *conducția continuă*.

Relația (16.10) sugerează că într-un ciclu de funcționare (T_p) căderea de tensiune medie pe filtru $L-C$ este zero și în consecință tensiunea continuă de la ieșirea sursei este:

$$U_d = U_{d(B6)} = U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_l = 1,35 \cdot U_l \quad (16.11)$$

și nu depinde de curentul de sarcină în cazul conducerii continue.

Perturbații introduse în rețeaua de alimentare

Dacă se analizează unda curentului de fază (i_R) absorbit de la rețea de redresorul trifazat în punte necomandată prevăzută cu filtru de tensiune la ieșire (Fig.16.3 și Fig.16.5) se constată că forma de undă a acestuia în regim de curent întrerupt se îndepărtează mult de forma sinusoidală față de cazul conducerii continue. De asemenea, în regim de curent întrerupt apare un mic defazaj $\varphi_1 > 0$ între armonica fundamentală a curentului de fază (i_{R1}) și unda tensiunii a fazei respective (u_R). În consecință, factorul de putere al redresorului B6 pentru *conducția discontinuă* (intermitentă) este scăzut putând ajunge la o *valoare limită inferioară* de

$$k_{\min} = PF_{\min} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cdot \cos \varphi_1 = 0.5 \quad (16.12)$$

Cea mai mare contribuție la deteriorarea acestuia o are ponderea ridicată a armonicilor de curent și mai puțin defazajul armonicilor fundamentale a curentului, deoarece:

$$\cos \varphi_1 \approx 0,98 \quad (16.13)$$

Un efect benefic asupra factorului de putere îl are prezența inductanței L_f (utilizarea unui filtru $L-C$) și menținerea *conducerii continue* prin acesta. În acest caz pentru un curent de sarcină apropiat de valoarea nominală și o inductanță bine dimensionată factorul de putere poate atinge *limita superioară* de:

$$k_{\max} = PF_{\max} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cdot \cos 0^\circ = 0.955 \quad (16.14)$$

Pentru a evita regimul de curent întrerupt și a maximiza factorul de putere, inductanța de filtrare din structura filtrului $L-C$ se va calcula în funcție de curentul de sarcină minim ($I_{sarcina(\min)}$) care poate să apară în timpul funcționării. Literatura de specialitate recomandă următoarea relație de calcul pentru inductanța de filtrare cea mai mică care poate fi utilizată în structura filtrului $L-C$:

$$L_{f(\min)} = \frac{0,013 \cdot U_l}{\omega \cdot I_{sarcina(\min)}} \quad (16.15)$$

b) Analiza redresorului comandat prevăzut cu filtru de tensiune la ieșire

Utilizarea redresorului trifazat în punte comandată asociat la ieșire cu un filtru de tensiune capacitiv este preferată în aceleași tipuri de aplicații descrise în Lucrarea 10 dedicată redresorului monofazat comandat prevăzut cu filtru de tensiune. Spre deosebire de varianta structurii monofazate, prin alegerea unei punți trifazate se beneficiază de avantajele menționate anterior pe care structura trifazată le are față de cea monofazată. În plus, prin utilizarea unui filtru $L-C$ bine dimensionat poate fi menținută funcționarea redresorului în regim de curent neîntrerupt chiar și la curenți de sarcină mici ceea ce permite un reglaj, controlat exclusiv prin unghiul de comandă, al tensiunii filtrate de la ieșire. Acesta este un avantaj deosebit pe care puntea trifazată îl are asupra punții monofazate în acest tip de aplicații. În cazul *punții monofazate*, chiar dacă inductanța din componența filtrului $L-C$ este cu mult mai mare, datorită frecvenței scăzute a pulsurilor tensiunii redresate, funcționarea redresorului se cantonează cu precădere în regimul de curent întrerupt și tensiunea continuă depinde, pe lângă unghiul de comandă și de curentul de sarcină. Pe de altă parte, în aceste condiții gama de reglaj a tensiunii este limitată, aspect discutat și argumentat în referatul Lucrării 10. De asemenea, regimul de curent întrerupt limitează unghiul de comandă la un minim, situație care impune utilizarea unor impulsuri de comandă cu lățime mare (vezi Lucrarea 10).

Schema punții trifazate comandate prevăzute cu un filtru $L-C$ la ieșire este prezentată în Fig.16.6 în varianta alimentării direct de la rețea. Se poate utiliza și varianta alimentării prin intermediul unui transformator dacă se dorește o mai bună adaptare a tensiunilor.

Așa cum s-a precizat mai sus, toate neajunsurile referitoare la varianta redresorului monofazat sunt excluse cu desăvârșire dacă inductanța L_f a filtrului $L-C$ din Fig.16.6 este bine dimensionată astfel încât, pentru un curent de sarcină $I_{sarcină} > I_d^*$ prin inductanță să avem o conducție continuă (permanentă). În acest caz funcționarea redresorului și formele de undă sunt cele prezentate în Lucrarea 13, respectiv în Fig.13.3 corespunzătoare punții trifazate comandate cu filtru de curent la ieșire. Pentru o corespondență clară diagrama tensiunii u_d din Fig.13.3 corespunde tensiunii notate cu $u_{d(B6)}$ în Fig.16.5.

În condițiile unei tensiuni pulsatorii de forma $u_d = u_{d(B6)}$ aplicate filtrului $L-C$ interesează dacă valoarea medie a acestei tensiuni este egală cu valoarea U_d de la ieșirea filtrului de tensiune. Afirmatia a fost demonstrată în Lucrarea 10 și în secțiunea anterioară (vezi relația 16.10) unde se arată că valoarea medie a tensiunii pe inductanța filtrului este nulă. Astfel, tensiunea continuă filtrată de la ieșirea filtrului poate fi controlată prin intermediul unghiului de comandă α , fiind dată de relația (13.8) din Lucrarea 13:

$$U_d = U_{d\alpha} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_l \cdot \cos \alpha = U_{d0} \cdot \cos \alpha$$

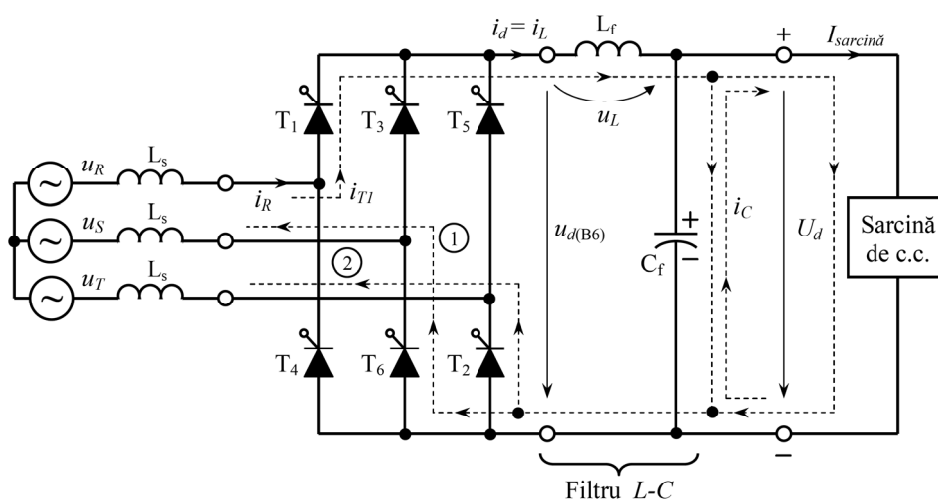


Fig. 16.6 Redresor trifazat în punte comandată prevăzut cu filtru de tensiune $L-C$ la ieșire.

Chiar dacă filtrul $L-C$ este bine dimensionat, există, totuși, o valoare de prag a curentului de sarcină I^* sub care, dacă scade, redresorul trece în regim de curent întrerupt (conducție discontinuă sau intermitentă prin L_f) cu toate consecințele cunoscute. Având în vedere limitările privind gabaritul, masa și prețul filtrului $L-C$, valoarea de prag I^* se ia cât mai ridicată. Dacă se apreciază că în timpul funcționării $I_{sarcină} < I^*$, se vor lua măsuri ca redresorul să poată funcționa și în regim de curent întrerupt. O primă măsură vizează schema de comandă, aspect discutat în Lucrarea 10.

Și acest tip de sursă poluează rețeaua de alimentare. Factorul de putere este mai scăzut în cazul redresorului comandat în comparație cu redresorul necomandat deoarece apare defazajul φ_1 dintre armonica fundamentală a curentului de fază și unda tensiunii fazei corespunzătoare ca o consecință a unghiului de comandă α .

4. Montajul de laborator

Studiul experimental al funcționării unei surse de tensiune continuă concepută special pentru alimentarea *chopper*-elor și a invertoarelor se va face pe o instalație realizată, din motive didactice, în construcție deschisă, așa cum se prezintă în Fig.16.9. Deoarece s-a dorit o sursă care să alimenteze convertoare cu puteri peste 1kW s-a utilizat ca redresor o punte trifazată capabilă să susțină aceste puteri. De asemenea, deoarece sursa este utilizată în diferite experimente de laborator la care tensiunile continue pot fi

mult diferite ca valoare s-a ales varianta acestei punți cu diode alimentate prin intermediul unui autotransformator trifazat. Structura sursei corespunde cu cea prezentată în Fig.16.1, iar schema acesteia integrată în montajul lucrării este prezentată în Fig.16.7. În laboratorul de Electronică de putere au mai fost realizate și alte surse pentru alimentarea *chopper*-elor și a invertoarelor PWM, fie cu redresoare monofazate, fie cu redresoare trifazate (vezi Fig.16.10). Din motive practice și de protecția muncii acestea au fost concepute în construcție închisă.

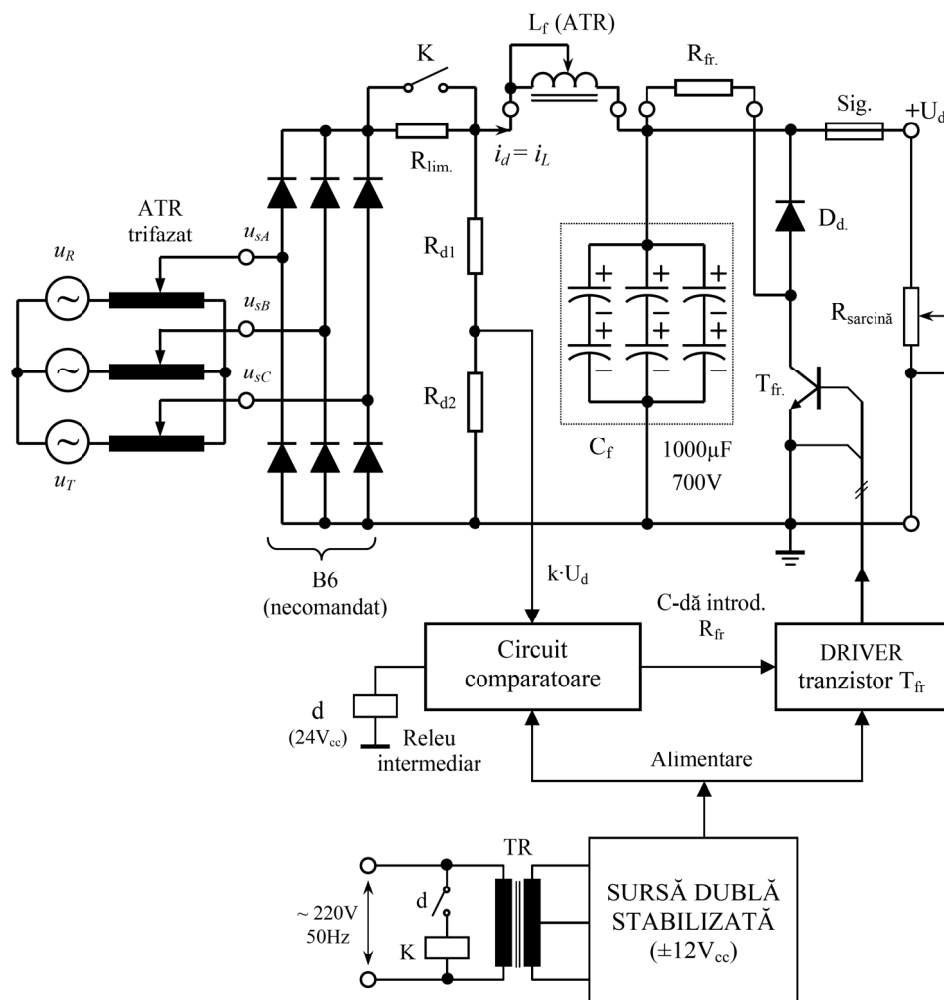


Fig. 16.7 Montajul de laborator al sursei pentru alimentarea *chopper*-elor și a invertoarelor.

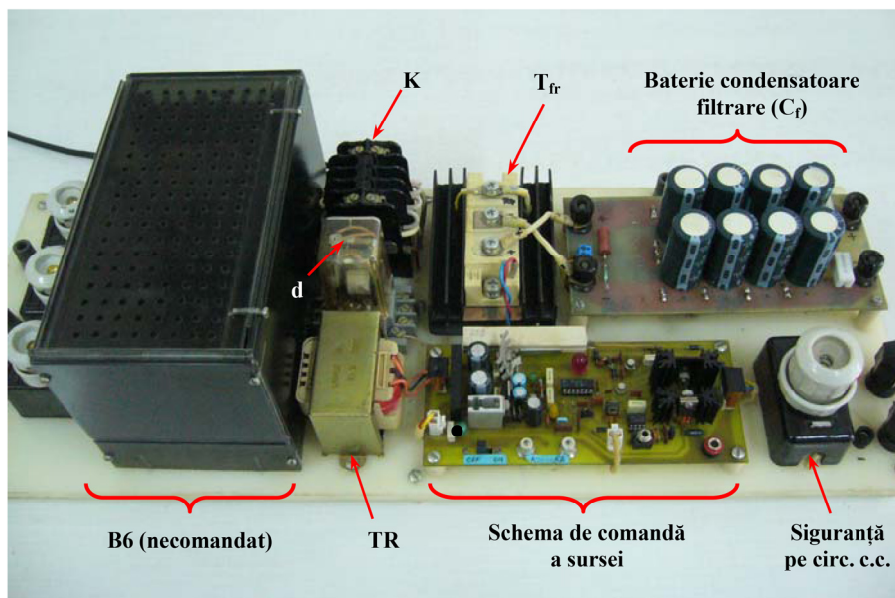


Fig. 16.8 Imaginca sursei pentru alimentarea *chopper*-clor și a invertoarelor.

Ca prim element al montajului din Fig.16.7 poate fi remarcat redresorul trifazat necomandat (B6). Tensiunea de la ieșirea acestuia este filtrată cu ajutorul unui filtru capacitiv important format dintr-o baterie de condensatoare (1000 μ F, 700V). Pentru a evita un curent de șoc prin diodele redresorului la punerea sub tensiune a sursei, atunci când filtrul capacitiv este descărcat, între redresor și bateria de condensatoare s-a prevăzut o rezistență de limitare R_{lim} . Rezistența vă rămâne în circuit până când tensiunea U_d atinge un anumit prag fixat cu ajutorul unui potențiomtru în schema electronică de comandă. Atunci când tensiunea va depăși pragul menționat un comparator va bascula și va comanda releul intermediar d (tip RI-13, $U_{bobina}=24V_{cc}$). Acesta mai departe, printr-un contact normal deschis, va alimenta bobina contactorului K cu o tensiune de 220V_{ca}. Prin anclanșarea contactorului contactele sale normal deschise (legate în paralel) vor scurtcircuita rezistența R_{lim} . Pentru monitorizarea tensiunii U_d este preluat un semnal $k \cdot U_d$ ($k \ll 1$) din schema de forță, proporțional cu aceasta, de pe rezistența R_{d2} a divizorului rezistiv $R_{d1}-R_{d2}$. În paralel cu fiecare capacitate din bateria de condensatoare s-au prevăzut rezistențe de echilibrare a tensiunilor. Totodată, rezistențele au rolul de a descărca condensatoarele după decuplarea sursei de la rețeaua de alimentare.

Deoarece sursa de tensiune continuă poate alimenta și convertoare cu funcționare în 4 cadrane există situații în care are loc un transfer energetic în sens invers prin convertorul alimentat de sursă. În consecință, energia recuperată, preluată de capacitatea de filtrare, va conduce la creșterea tensiunii în circuitul intermediar de

c.c., mai exact la bornele condensatoarelor. Pentru a evita distrugerea acestora prin străpungere s-a prevăzut un circuit format dintr-un tranzistor bipolar de putere T_{fr} (triplu Darlington Semikron – SK50DB12D 50A, 1200V) care, atunci când tensiunea va depăși valoarea maximă admisă, va introduce în circuitul intermediar de c.c. rezistența de frânare R_{fr} .

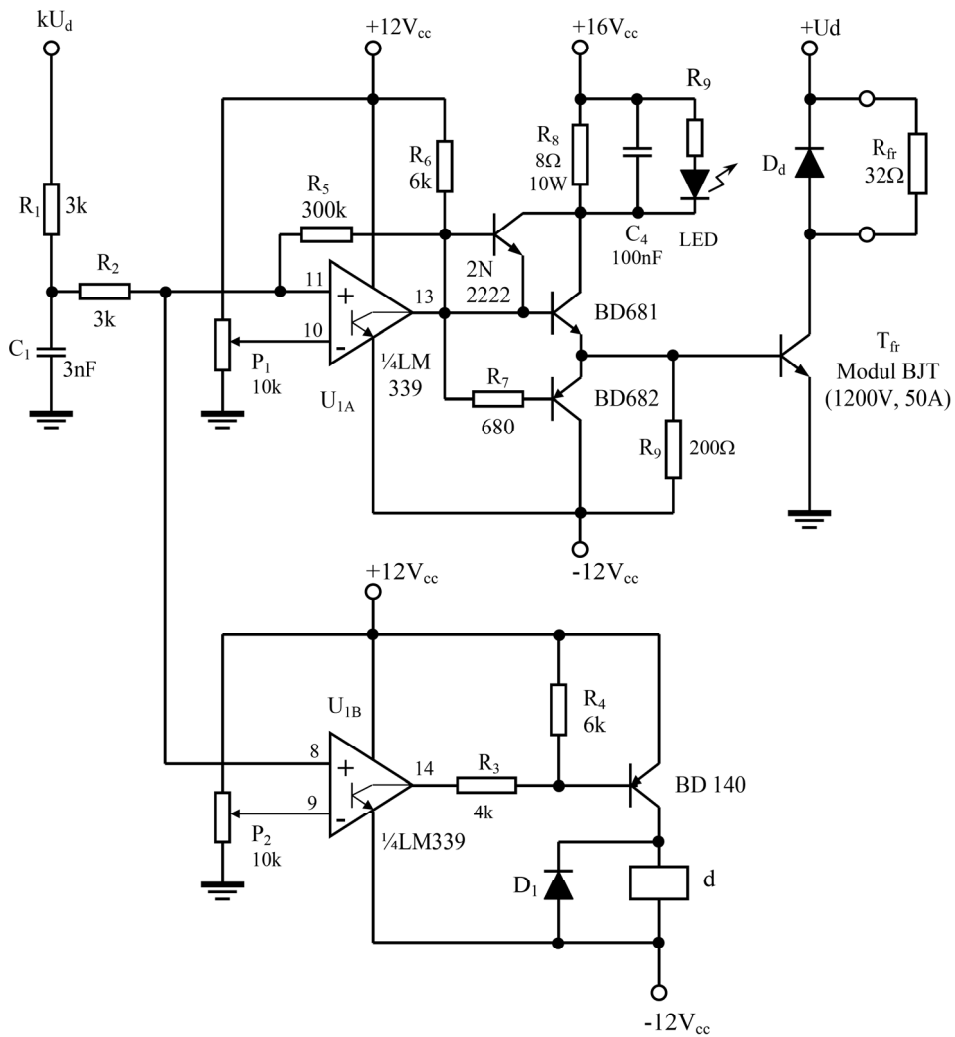


Fig. 16.9 Schema de comandă a sursei de tensiune continuă.

Deschiderea tranzistorului T_{fr} va fi hotărâtă de un alt comparator pe ale cărui intrări vor fi aplicate semnalul $k \cdot U_d$ și semnalul de referință corespunzător valorii maxime admise pentru tensiunea U_d . Datorită faptului că sunt comandate în curent și datorită factorului de amplificare scăzut, tranzistoarele bipolare de putere, au nevoie de un circuit de comandă capabil să injecteze un curent relativ mare în bază. Astfel, schema de comandă a sursei conține, pe lângă circuitele comparatoarelor, a căror rol a fost descris mai sus și *driver*-ul pentru tranzistorul bipolar tratat în Lucrarea 4.

Întreaga schemă de comandă este alimentată de la o sursă stabilizată de mică putere, alimentată la rândul ei separat prin intermediul unui transformator monofazat (TR). Tensiunile de $\pm 12V$ sunt obținute cu ajutorul a două stabilizatoare în 3 puncte 7812 pentru $+12V$, respectiv 7912 pentru $-12V$. Deoarece etajul final al *driver*-ului necesită un curent mare, de aproximativ 2A, alimentarea acestuia se realizează cu tensiunea pozitivă ($+16V$) dinaintea stabilizatorului integrat.

Schema de comandă a sursei de tensiune continuă

Schema de comandă a sursei de curent continuu este prezentată în Fig.16.9. Se pot remarca cele două comparatoare LM339 cu rolul de a detecta pe rând pragurile tensiunii U_d la care trebuie scurcircuitată rezistența de limitare $R_{lim} (U_{1B})$ și la care trebuie introdusă rezistența de frânare $R_{fr} (U_{1A})$. Atunci când potențialul de pe intrarea neinversoare a comparatorului (pinul 11) depășește valoarea de referință dată de potențiometrul P_1 (aplicată pe intrarea inversoare – pinul 10) acesta va bloca tranzistorul intern *open collector* și potențialul de la ieșirea comparatorului va crește determinând deschiderea tranzistoarelor 2N2222 și BD681 legate în structură Darlington. Acestea, la rândul lor, vor comanda tranzistorul bipolar de putere T_{fr} care intrând în conducție va lega rezistența de frânare în paralel cu bateria de condensatoare. Blocarea tranzistorului T_{fr} se realizează prin bascularea comparatorului U_{1A} și deschiderea tranzistorului intern al acestuia. Astfel, va intra în conducție tranzistorul BD682 care va polariza cu un potențial negativ joncțiunile B-E ale T_{fr} , determinând o blocare rapidă a acestuia. Reacția după tensiunea continuă ($k \cdot U_d$) este trecută printr-un filtru rece-jos format din $R_1 - C_1 - R_2$ pentru a rejecta eventualele perturbații. LED-ul legat în paralel cu rezistența de bază R_8 va semnaliza intervalele în care este introdusă în circuit rezistența de frânare (intervalele în care lucrează T_{fr}).

Alte elementele de circuit, din afara platformei sursei, necesare pentru realizarea montajului de laborator din Fig.16.7 sunt:

- un autotransformator trifazat pentru alimentarea montajului cu o tensiune trifazată variabilă;
- un autotransformator monofazat (ATR) în poziția inductanței L_f din componența filtrului de tensiune $L-C$;
- un reostat în poziția rezistenței de sarcină ($R_{sarcină}$) reglabile;

- un reostat în poziția rezistenței de frânare (R_{ff}) fixe;
- un șunt pentru oscilografiera formelor de undă ale curenților i_d și i_R ;

Toate elementele de circuit exterioare platformei experimentale pot fi interconectate prin intermediul conductoarelor prevăzute cu banane la capete. Se va utiliza un voltmetru pentru a măsura valoarea U_d a tensiunii filtrate și un osciloscop cu două spoturi pentru a oscilografia semnalele u_d , $u_{d(B6)}$, i_d și i_R .

5. Modul de lucru

1. Pornind de la definiția sursei de c.c. se va analiza schema bloc a unui asemenea echipament, precum și posibilitățile de implementare practică a fiecărui bloc component;
 2. Se vor studia aspectele teoretice cu privire la funcționarea punții trifazate cu diode în combinație cu filtrul capacitiv, respectiv capacitiv-inductiv: formele de undă a curentului i_d și a tensiunii $u_{d(B6)}$, calculul tensiunii U_d , caracteristica de sarcină, fenomenul de poluare armonică, factorul de putere etc.
 3. Se vor studia aspectele teoretice cu privire la posibilitatea funcționării structurii B6 cu tiristoare în combinație cu filtrul $L-C$: conducția continuă, conducția discontinuă, posibilitățile de reglaj ale tensiunii filtrate de la ieșire etc.;
 4. Se va realiza montajul experimental din Fig.16.7, se va alimenta schema de comandă și autotransformatorul trifazat aflat în primă fază cu poziția cursorului la zero. Se va crește tensiunea trifazată de alimentare prin deplasarea în sens orar a cursorului și se va pune în evidență pragurile tensiunii U_d la care lucrează contactorul K și la care este introdusă rezistența de frânare;
 5. Se vor vizualiza formele de undă u_d , i_d și i_R pentru diferite sarcini în condițiile unui filtru capacitiv (fără L_f – cursorul autotransformatorului în poziția zero). Se va observa accentuarea riplului tensiunii u_d și scăderea valorii medii U_d la ieșirea sursei odată cu micșorarea rezistenței de sarcină (creșterea $I_{sarcină}$);
 6. Se va introduce inductanța de filtrare L_f prin intermediul autotransformatorului, se va evalua efectul valorii acesteia asupra formelor de undă ale curenților i_d și i_R , respectiv asupra factorului de vârf și asupra factorului de putere, în condițiile unui filtru $L-C$;
 7. Pentru un anumit curent de sarcină se va crește inductanța de filtrare L_f până ce dispare conducția întreruptă prin aceasta. Se vor interpreta formele de undă ale curenților i_d și i_R , respectiv influența asupra factorului de putere, în condițiile conducției continue prin L_f .
-



Fig. 16.10 Variante de alte surse din Laboratorul de Electronică de putere realizate pentru alimentarea *chopper*-elor și a invertoarelor PWM.