

## Cap.5. REDRESOARE TRIFAZATE

### 5.1. Redresoare trifazate necomandate

Intr-o serie de domenii de utilizare, energia de curent continuu are pondere mai mare decât energia de curent alternativ: electrochimie, electroliza, încărcarea acumulatorilor, tracțiune electrica etc. Redresorul realizează transformarea energiei de curent alternativ in energie de curent continuu. Energia electrica se transmite de la rețeaua de curent alternativ la receptorul de curent continuu

Instalațiile mari consumatoare de curent continuu utilizează in special redresoare trifazate, care prezintă o serie de avantaje fata de cele monofazate: încărcarea rețelei de alimentare este mai uniforma, reducându-se interferențele la funcționarea cu alte echipamente conectate la aceeași rețea; tensiunea redresata este mai neteda, ceea ce determina eventuala utilizare a unor filtre de netezire mai simple, factorul de utilizare al transformatorului de alimentare este mai mare, obtinandu-se pentru o putere redresata data o reducere a gabaritului si prețului de cost.

Structura circuitelor energetice ale redresorului depinde de sursa de energie si de natura receptoarelor alimentate.

In acest context, redresoarele trifazate pot fi clasificate in funcție de dispozitivele de redresare utilizate, in:

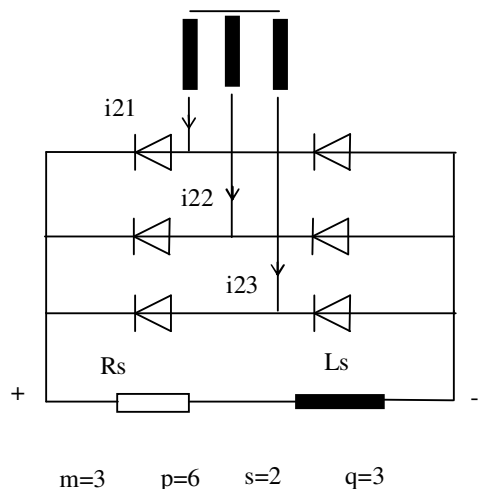
- necomandate (cu diode), care au tensiunea de ieșire fixa;
- comandate (cu tiristoare), cu tensiunea de ieșire reglabila.

Schemele de redresare pot fi realizate: cu punct median (scheme cu un tact) si in punte (scheme cu doua tacte).

Alimentarea circuitelor de redresare poate fi realizata cu sau fara transformator, direct de la rețea. Utilizarea transformatorului in circuitul energetic al redresorului permite multiplicarea numărului  $m$  de faze secundare in scopul realizării unor performante superioare fata de cele corespunzătoare la trei faze ( $m=3$ ). Primarul transformatorului poate fi conectat atât in stea, cat si in triunghi. Pentru a reduce dezechilibrul de excitație se folosește conexiunea in triunghi, evitându-se astfel deformarea tensiunii in secundar.

### Conexiunea in punte

Reprezintă in fapt, inserierea a doua scheme de redresare identice, cu punct median alimentate de la aceeași sursa de energie. Fiecare faza din secundar conduce in intervalul unei perioade de doua ori si este parcursa de curent in ambele sensuri.



In figura este reprezentata schema de redresare in punte trifazata. Infasarile primare nu au fost reprezentate, transformatorul de alimentare putând avea orice conexiune in primar.

Unghiul de conducție al dispozitivelor redresoare este  $2\pi/3$ . Întotdeauna conduc simultan doua diode, care au potențialul cel mai pozitiv al anodului și respectiv cel mai negativ al catodului, în intervalul considerat. Pentru un redresor trifazat în punte

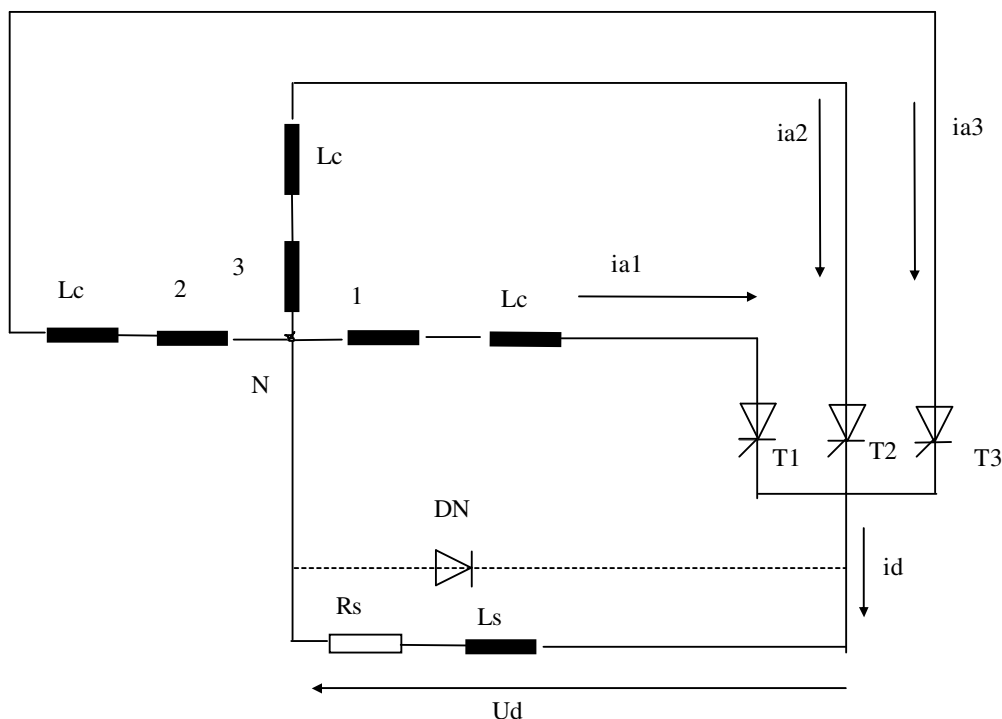
$$U_{dpo}=2*U_{do}=2*1,17*U_2=2,34*U_2$$

Conexiunile în punte nu au dezechilibru de curent continuu pe partea secundară deoarece există circulație alternativă de curent. Din același motiv factorul de utilizare al transformatorului crește. Schemele de redresare în punte mai au avantajul că pot fi alimentate direct de la rețea, însă în acest caz circuitul de c.c. nu mai este izolat galvanic.

## 5.2. Redresoare trifazate comandate

Reglajul tensiunii redresate se poate realiza în mod continuu de la zero până la valoarea maximă utilizând controlul în fază al elementelor redresoare comandabile (tiristoare). Acest mod de reglare se realizează aproape fără pierderi de putere activă. În schimb pot apărea limitări în aplicarea metodei, produse de creșterea ondulației tensiunii de ieșire, precum și de creșterea consumului de putere reactivă absorbită din rețea, deci de micșorarea factorului de putere odată cu mărirea unghiului de comandă. În principiu, scheme de redresoare comandate se pot obține prin înlocuirea diodelor cu tiristoare în circuitele prezentate anterior.

În figura este prezentat un **redresor trifazat comandat, cu punct median**, cu sarcină RL.



Pe partea de curent alternativ caracteristicile redresorului comandat nu diferă în general de cele ale unui redresor necomandat întrucât curenții în primar nu și modifică structura, ci se decalază numai cu unghiul de comandă  $\alpha$ .

### Regimul de funcționare fără întreruperi de curent

Când  $L_c=0$  și  $L_s=\infty$  tiristoarele sunt succesiv în conducție; fiecare tiristor amorsează atunci când este polarizat în sens direct și când are aplicat semnalul de comandă pe poarta, la un unghi  $\alpha$  (are ca referință momentele de comutație naturală, la egalitatea a două tensiuni pozitive pe fază). Deoarece inductanța de filtraj  $L_s$  este considerată de valoare infinită, circulația de curent prin tiristorul aflat în conducție se menține până la momentul comenzii următorului tiristor, chiar dacă

tensiunea fazei respective devine in acest interval negativa. Aceasta se datorează generării unei tensiuni de autoinducție de polaritate opusa tensiunii redresate si care, însumata cu tensiunea fazei care conduce, asigura circulația neîntrerupta a curentului prin sarcina. Valoarea unghiului de comanda  $\alpha$  se numește unghi critic si este:  $\alpha_{crit}=\pi/2-\pi/m$ .

Daca se conectează o dioda in paralel cu sarcina la ieșirea redresorului comandat (este desenata punctat in figura), porțiunile negative pot fi blocate, obtinandu-se imbunatatirea unor parametri de redresare (ondulațiile tensiunii redresate si puterea reactiva consumata sunt mai scăzute la aceeași valoare medie,  $U_{d\alpha}$ ). Dioda menține tensiunea nula din momentul anularii tensiunii fazei aflate in conducție pana când se comanda faza următoare. Deschiderea si menținerea in conducție a acestei diode de nul (DN) pe porțiunea negativa se datorează procesului de autoinducție din inductanța  $L_s$ . Curentul prin sarcina se închide in acest interval prin DN, tiristoarele fiind blocate. In cazul deconectării instantanee a alimentarii, DN asigura protecția tiristoarelor la supratensiune, fapt important in circuitele cu sarcina pronunțat inductiva.

Valoarea medie a tensiunii redresate se modifica in cazul conectării DN:

$$U_{d\alpha}=3*U_2/\sqrt{2}*[1-\sin(\alpha-\pi/m)]$$

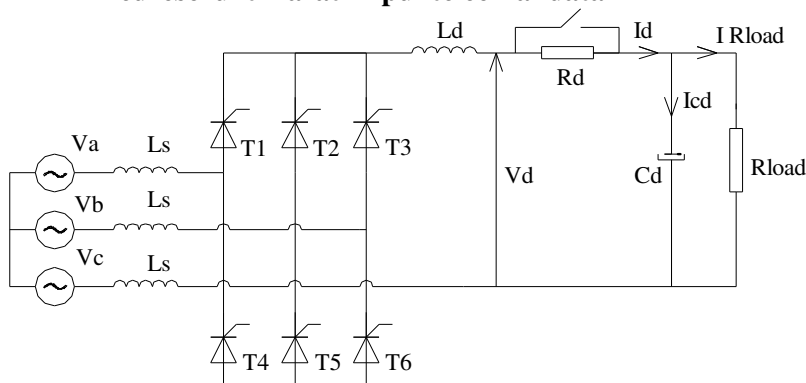
Când  $L_c \neq 0$ ,  $L_s = \infty$ , prezenta inductantelor de comutație  $L_c$ , determina apariția intervalului de comutație  $\gamma$  in care conduc simultan doua faze succesive, la sfarsitul procesului de comutare ramanand in conducție faza care a fost comandata. Forma de unda a tensiunii redresate se constituie in acest caz din semisuma tensiunilor fazelor succesive prezente in comutație si din tensiunea fazei comandate.

### Regimul de inverter

In regim de inverter fluxul de energie este orientat spre rețeaua de c.a. In cazul ideal al redresorului comandat, analizând relația:  $U_{d\alpha}=U_{do}*\cos \alpha$ , rezulta ca tensiunea redresata devine negativa in ipoteza ca exista o sursa de energie care sa mentina curentul pentru  $\alpha > \pi/2$ . In circuitul de sarcina este necesara introducerea unei tensiuni electromotoare, întrucât prezenta unor valori medii negative ar condiționa un curent de circulație invers prin dispozitivele de redresare unidirecționale, fapt evident nerealizabil in funcționare. Daca convertorul debitează pe rețeaua de c.a. comutația este dirijata in acest caz pe rețea si transmisia de energie se face pe frecventa acesteia. Dispariția tensiunii rețelei determina întreruperea comutației întrucât tensiunile din ramurile tiristoarelor devin nule, iar sursa de tensiune continua s-ar afla practic in scurtcircuit.

Funcționarea unui redresor in regim de inverter este posibila numai in cazul in care valoarea instantanee negativa a tensiunii redresate devine mai mare in valoare absoluta decât tensiunea electromotoare, ceea ce se realizează prin prezenta in circuitul sarcinii a unei inductanțe de netezire si prin eliminarea unui posibil regim de dioda de nul. Cazul tipic in care redresorul functioneaza ca inverter este regimul de frânare cu recuperare de energie, la un motor de c.c. aflat in circuitul de sarcina.

### Redresorul trifazat in punte comandata



Ipooteze: a)  $L_s=0$  deci avem curent neîntrerupt; b)  $I_d=i_d=ct$

$$\alpha = 0 \Rightarrow V_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} * V_{LL} = 1.35V_{LL}$$

$$\alpha \neq 0 \Rightarrow V_{d\alpha} = V_{d0} - \frac{A\alpha}{\pi/3}; A\alpha = \int_0^\alpha V_{d0}d(\omega\alpha) = \int_0^\alpha \sqrt{2}V_{LL}\sin \omega\alpha d(\omega\alpha)$$

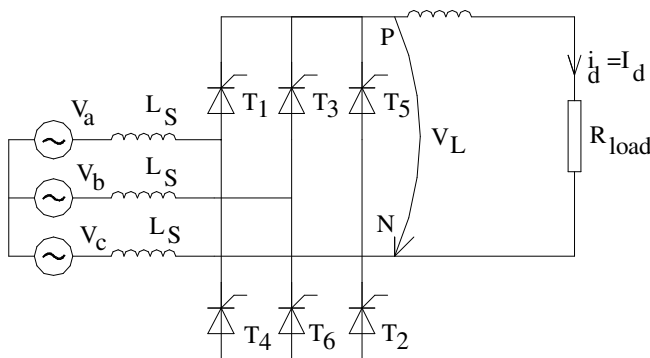
$$V_{d\alpha} = V_{d0} - \frac{A\alpha}{\pi/3}$$

$$V_{d\alpha} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos \alpha = 1.35 V_{LL} \cos \alpha$$

$$\text{pt } \alpha \in (0, 90) \Rightarrow V_d \in (0, 1.35V_{LL})$$

La aceste redresoare  $V_{d\alpha} = 1.35 V_{LL} \cos \alpha$  . Se poate varia  $\alpha \in [0, 90] \Rightarrow V_{d\alpha} \in [\min, \max]$

Pentru  $\alpha \in [90, 180]$  avem regim de invertor.



### 5.3. Redresoare cu parametri energetici ridicați

#### Factorul de putere al redresoarelor comandate

În cazul redresoarelor comandate cu comutație naturală curentul de linie din rețeaua de alimentare este defazat în raport cu tensiunea de fază corespunzătoare cu un unghi egal cu unghiul de comandă  $\alpha$  al tiristoarelor și în același mod se deplasează și fundamentală acestuia, astfel ca aceste convertoare absorb de la rețea și o putere reactivă  $Q_1$ .

Ținând seama că redresoarele, fie comandate fie necomandate, generează o putere deformantă  $D_1$  în rețea, expresia puterii aparente totale are forma:

$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D_1^2}$  , în care  $P_1$  reprezintă puterea activă consumată de la rețea, corespunzătoare fundamentalei curentului de linie.

Factorul de putere total al instalației redresor comandat - consumator este dat de relația:

$$\lambda = P_1 / S_1 = P_1 / \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D_1^2} = v \cdot \cos \phi_1$$

în care:  $v = I_1 / \sqrt{I_1^2 + I_{(2)}^2 + I_{(3)}^2 + \dots + I_{(n)}^2 + \dots}$  reprezintă factorul de deformare a unei curentului de linie (sau conținutul în fundamentală), iar  $\cos \phi_1$  - factorul de putere corespunzător fundamentalei.

La creșterea unghiului de comandă  $\alpha$  se modifică și factorul de putere  $\lambda$ , datorită creșterii puterilor reactive absorbite și deformanta generată în rețea.

Sunt cunoscute multe scheme de redresoare comandate. Puntea trifazată total comandată permite obținerea unei game largi de variație a tensiunii continue la ieșire, fiind simplă și oferind cea mai bună utilizare pentru tiristoare și transformatorul de racordare la rețea, în comparație cu celelalte scheme de redresoare trifazate și hexafazate. Ea prezintă însă și unele dezavantaje. Conduce la înrautărea factorului de putere în punctul de racordare la rețea. Factorul de putere scade la creșterea unghiului de comandă al tiristoarelor și produce o pronunțată deformare a curbei curentului de alimentare de la o formă sinusoidală. Armonicile de curent produse dau naștere la cupluri parazite în mașinile electrice, măresc pierderile în instalații, deformează indicațiile aparatelor de măsură și

control, introduc perturbații în rețelele de telecomunicații, scad capacitatea de transport a liniilor electrice și pot determina supratensiuni de rezonanță.

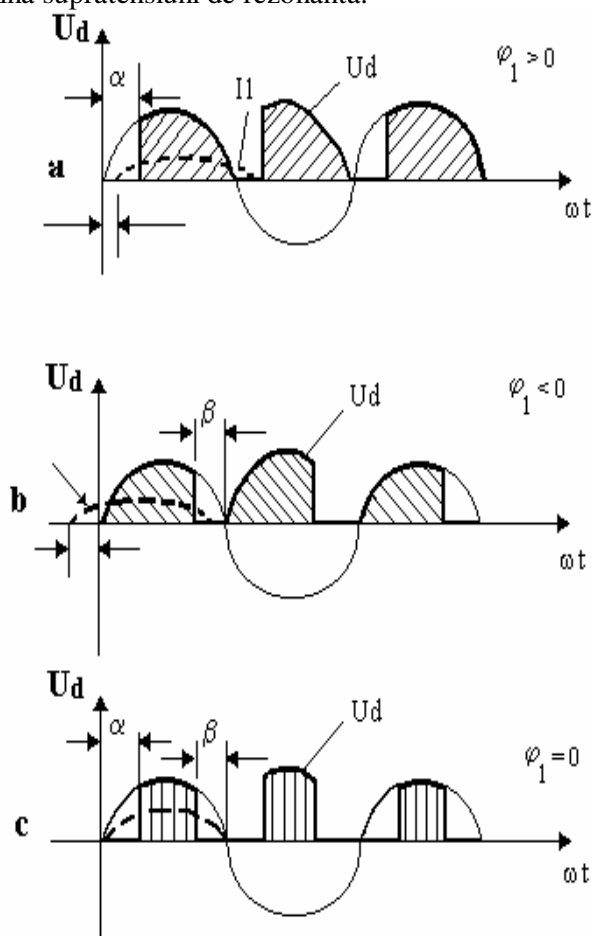


Fig.1. Forme de undă pentru tensiunea redresată la redresoare:  
 a. - cu comutație naturală și putere reactivă absorbită din rețea;  
 b. - cu comutație forțată și putere reactivă cedată în rețea;  
 c. - cu comutație forțată și putere reactivă nulă.

S-au conceput diferite scheme de redresoare hexafazate care să aibă factorul de putere mult mai ridicat: redresorul cu comandă nesimetrică, schema cu două redresoare în serie dintre care unul poate lucra în regim de invertor, etc. În acest fel, puterea reactivă maximă solicitată se poate reduce la jumătate în comparație cu redresorul trifazat în punte.

Se folosesc și mijloace exterioare instalației de redresare pentru compensarea puterii reactive și deformante cum sunt compensatoarele sincrone speciale, bateriile de condensatoare și instalațiile de filtrare ale armonicilor superioare, acestea din urmă producând și putere reactivă. De asemenea, s-au realizat instalații de compensare cu baterii de condensatoare, inductanțe și tiristoare pentru îmbunătățirea factorului de putere total în rețelele de alimentare în care se produc fluctuații rapide ale puterii reactive. Toate aceste instalații necesită cheltuieli mari pentru investiții și nu pot compensa total puterile reactive și deformante din cauza fluctuațiilor rapide ale acestora.

Fluctuațiile de putere produc simultan fluctuații ale tensiunii de alimentare. Experimental se pot trasa curbele de limitare ale fluctuației de tensiune în funcție de frecvența orară a șocurilor de putere. De exemplu, în cazul acționărilor electrice prevăzute cu redresoare comandate cu o frecvență a șocurilor principale cuprinsă între 500 și 1 000 pe oră, ar rezulta ca fluctuația maximă de tensiune să nu depășească 1%. Această condiție este de multe ori greu de îndeplinit, din cauza fluctuațiilor mari de putere reactivă.

## 5.4. Efectele armonicilor produse de convertoare

### 5.4.1. Efectele armonicilor

În sistemele de acționari electrice moderne, deși tensiunea de alimentare are o formă practic sinusoidală, curba curentului este deformată și se poate descompune în armonici, datorită unor convertoare statice generatoare de armonici superioare cum sunt redresoarele necomandate sau comandate și convertoarele de frecvență directe sau indirecte.

Prezența armonicilor de curent în înfășurările mașinilor electrice de c.c. sau c.a., alimentate de la convertoare statice, conduce la producerea de pierderi suplimentare în înfășurări prin efect Joule și în circuitul magnetic prin histerezis și curenți turbionari, precum și la apariția de cupluri asincrone și pendulare datorită interacțiunii armonicilor fluxului și curentului rotoric.

Armonicile superioare ale curentului produse de convertoare statice vor circula în rețeaua de alimentare, provocând pierderi suplimentare datorită efectului pelicular și perturbații importante în rețelele de comunicații.

O consecință imediată a circulației armonicilor curentului în sistemul de alimentare este apariția armonicilor de tensiune în acest sistem, care sunt proporționale cu impedanța sistemului la frecvența armonicii și se pot propaga în întregul sistem, alimentând alți consumatori.

Aceste armonici de tensiune pot distruge condensatoarele montate pentru îmbunătățirea factorului de putere, prin supraîncărcarea lor cu curenți de frecvență superioară fundamentalei. De asemenea, ele pot provoca funcționarea defectuoasă a instalațiilor de comandă, automatizare și iluminat fluorescent.

Deoarece frecvența armonicilor de curent și de tensiune în sistemele de alimentare au efecte negative, se impune limitarea lor la valori admisibile cu ajutorul dispozitivelor de filtrare.

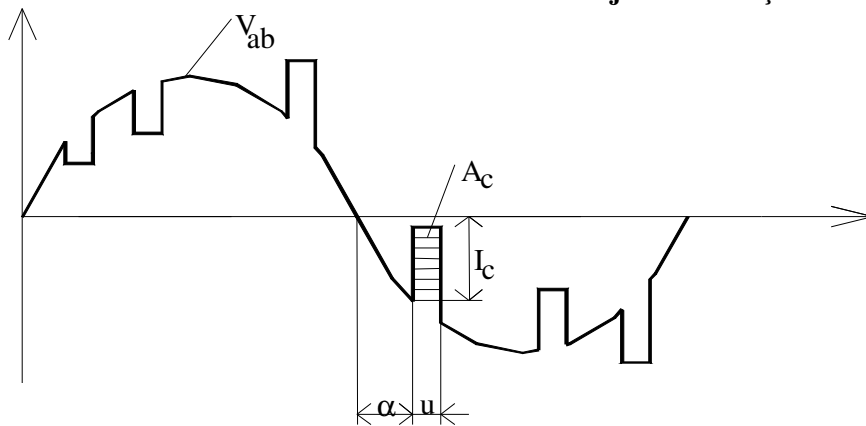
### 5.4.2. Condiții de racord la rețeaua trifazată a redresoarelor comandate cu tiristoare care alimentează motoare de curent continuu, având în vedere regimul deformant

Deși există numeroase analize teoretice referitoare la efectul deformant al redresoarelor comandate cu tiristoare asupra tensiunii rețelei de alimentare, precizarea prin norme a unor condiții de racord aplicabile în practică este într-o fază incipientă.

În scopul unei prezentări unitare și cât mai clare se vor explica în continuare fenomenele de bază, se vor interpreta recomandările existente și se vor face propuneri referitoare la condițiile de racord la rețea și măsurile ce trebuie luate în acest sens.

#### 5.4.2.1. Scurta prezentare a efectului deformant

##### 5.4.2.1.1. Consumator unic. Armonici injectate în rețea



Fenomenul de crestături se datorează fenomenului de conducție simultană a 2 faze.

Pentru un redresor comandat în stea trifazată se va lua în considerare procesul de comutare a curentului de pe un tiristor pe tiristorul următoarei faze în situația unei sarcini puternic

inductive (curentul de sarcină  $I_d$  practic constant). Tiristorul de pe faza următoare continuă să conducă un interval de timp  $u/\omega$  (unde  $u$  reprezintă “unghiul de suprapunere” a conducției celor două tiristoare) din cauza caracterului inductiv a circuitului de comutare.

În intervalul de suprapunere  $u$ , fazele rețelei sunt scurtcircuitate datorită conducției simultane a tiristoarelor de pe aceste faze și potențialul comun al acestor tiristoare devine egal cu potențialul

mediu (semisuma) al potențialelor fazelor care comuta, iar tensiunea între fazele respective la intrarea în steaua de tiristoare devine nula. Apar deci deformări puternice pe forma de undă a tensiunilor la intrarea redresorului comandat cu tiristoare.

#### 5.4.2.1.2. Ansamblu de consumatori

Dacă alți receptori s-ar conecta pe rețeaua la care este conectat și un redresor comandat cu tiristoare, acestora li s-ar aplica o tensiune puternic deformată, ceea ce ar putea perturba funcționarea lor. Astfel în cazul altui redresor cu tiristoare s-ar putea ca aprinderea tiristoarelor să fie împiedicată dacă durata impulsului de aprindere nu depășește durata corespunzătoare unghiului de suprapunere.

Din acest motiv, în cazul unei alimentări comune, redresoarele cu tiristoare nu se racordează direct la bornele comune de distribuție, ci prin intermediul unor bobine de rețea sau transformatoare, a căror inductanță echivalentă de scurtcircuit s-a notat cu  $L_{bt}$ . Inductanța  $L_{bt}$  îndeplinește în ansamblu următoarele funcțiuni:

- reduce amplitudinea variațiilor de tensiune la barele de racord în intervalele de comutare, pe care le latește în schimb; aceasta are ca efect micșorarea în ansamblu a armonicilor de curent, dar în principal a celor de ordin ridicat;

- reduce panta de creștere a curentului  $di/dt$  în intervalele de comutare și împreună cu circuitele RC de protecție reduce și panta de creștere a tensiunii pe tiristoare  $du/dt$ ;

- reduce amplitudinea curentului de scurtcircuit, ceea ce permite limitarea vârfului de curent de către siguranța ultrarapidă la o valoare admisă de tiristor (dacă bobina de rețea este pe miez de fier, aceasta se saturează în acest regim, inductanța bobinei reducându-se la o fracțiune redusă din cea nominală, reducerea fiind cu atât mai pronunțată, cu cât întrefierul este mai mic).

Vom examina acum situația sarcinilor capacitive. Nu se recomandă conectarea directă a unor condensatoare pentru îmbunătățirea factorului de putere, întrucât pot intra în rezonanță cu inductanțele ale sistemului pe frecvențe ale armonicilor de curent, injectate de redresoarele cu tiristoare în rețea. Din acest motiv, condensatoarele se inseriază cu inductanțe, și circuitele rezonante (filtrele) astfel formate se acordează pe frecvențele armonicilor generate de redresoarele cu tiristoare: 5, 7, 11 și 13. În circuitele de joasă tensiune se prevede de obicei doar filtrul pentru armonica 5.

În ansamblu filtrele de armonici:

- scurtcircuitează armonicile pe care sunt acordate, înlăturându-le din componenta formei de undă a tensiunii de pe bare;

- constituie circuite inductive la frecvențe ridicate (condensatoarele prezintă reactanțe mici în comparație cu bobinele), care suntează inductanța sursei, reducând inductanța echivalentă a acesteia și reducând astfel variațiile mari ale tensiunii la comutare;

- constituie circuite capacitive la frecvențe joase, contribuind la îmbunătățirea factorului de putere a instalației;

- introduc în mod nedorit frecvențe de rezonanță în intervalul dintre frecvențele de acord, ceea ce prezintă un pericol doar în cazul unor nesimetrii pronunțate între unghiurile de comandă ale tiristoarelor unui redresor.

#### 5.4.2.2. Prescripții și recomandări referitoare la armonici

Conținutul global de armonici (factorul de distorsiune) nu trebuie să depășească 10%. Fiecare din armonicile 5, 7, 11 și 13 nu trebuie să depășească 5% din valoarea fundamentalei. Depășirea acestor valori nu este admisă de motoarele asincrone și sincrone racordate la aceleași bare cu redresoarele cu tiristoare. Dacă neglijăm armonicile de ordin superior și dacă fiecare din armonicile menționate ar reprezenta 5% din valoarea fundamentalei, rezulta tocmai factorul de distorsiune admis de 10%.