

## CAPITOLUL 5

### INVERTOARE

#### 5.1. Probleme generale

Invertoarele sunt circuite de putere care transformă energia unei surse de curent continuu în energie de curent alternativ. Pe scurt un inverter face transformarea continuu-alternativ și se observă că face o operație inversă față de redresor.

Deoarece inverterul este alimentat de la o sursă de curent continuu, pentru a face întreruperea fluxului de energie - de fapt se întrerupe curentul sursei - este nevoie de ventile comandabile, ventile pentru care atât intrarea în conducție cât și ieșirea din conducție să poată fi făcută prin comandă, la momente de timp potrivit alese, sau de ventile semicomandabile, pentru care doar aprinderea se face prin comandă. În acest din urmă caz stingerea se asigură obișnuit, prin utilizarea unor circuite auxiliare sau prin modul de funcționare al schemei. Ca ventile semicomandabile ale invertoarelor se utilizează tiristoarele sau ventile din familia acestora (GTO, MCT, triac), iar ca ventile comandabile sunt utilizate tranzistoare bipolare sau tranzistoare cu efect de câmp, (în special tranzistoare MOS și tranzistoarele bipolare cu grilă izolată (IGBT).

Necesitatea comenzii face ca invertoarele, la fel ca redresoarele comandate, să fie formate din două părți principale:

- schema (circuitul, blocul) de forță,
- schema (circuitul, blocul) de comandă.

De obicei alimentarea circuitului de forță și alimentarea circuitului de comandă sunt separate. Mai mult, în majoritatea cazurilor este asigurată izolarea galvanică totală între circuitele de forță și comandă, fie prin transformatoare de separare a impulsurilor de comandă, fie prin cuplaj optic (optocuploare, fibră de sticlă). Scopul este de a proteja circuitul de comandă față de tensiunile mari din circuitul de forță, dar și de a asigura protecția la perturbații a circuitului de comandă.

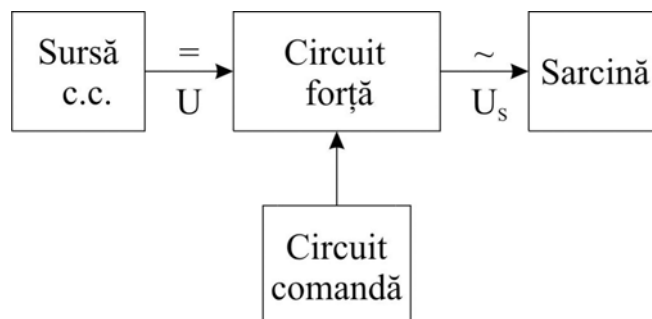


Fig. 5.1. Schema bloc a unui inverter.

Schema bloc a unui invertor în varianta cea mai întâlnită este prezentată în figura 5.1.

În capitolul acesta este prezentată partea de forță a circuitelor, un capitol separat fiind dedicat problemelor circuitelor de comandă.

## 5.2. Clasificarea invertoarelor

Există foarte multe tipuri de invertore, date de o mare varietate, atât în realizarea schemelor cât și în modul de funcționare. De aici și numeroasele criterii de clasificare a lor. Un invertor poate fi recunoscut ca aparținând unei categorii din fiecare criteriu de clasificare.

### 5.2.1. Clasificarea după varianta de schemă

Cea mai importantă clasificare, aceea după varianta de schemă, împarte invertorele în:

- monoventil;
- cu punct median la sarcină;
- cu punct median la sursă;
- punte.

#### Invertor monoventil

Invertorul monoventil are schema de forță, simplificată, prezentată în figura 5.2. împreună cu principalele forme de undă. El este compus din sursa de curent continuu, un ventil comandabil și sarcina.

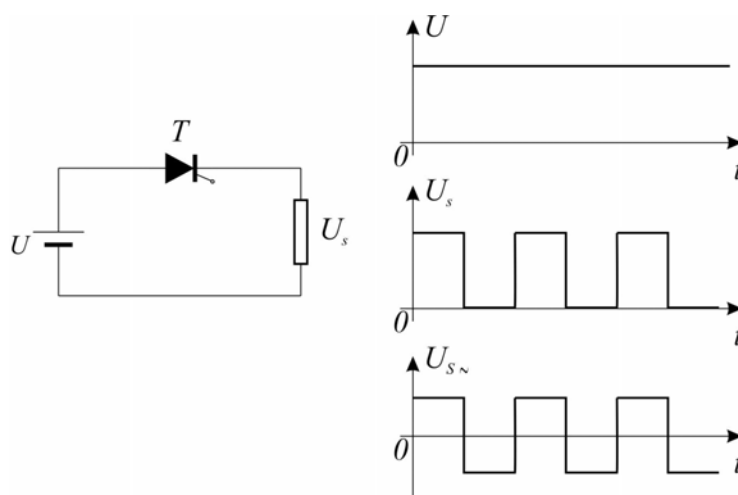


Fig. 5.2. Invertor monoventil

Principiul de funcționare este ilustrat de formele de undă. Sursa de c.c. furnizează la intrarea invertorului o tensiune continuă,  $U$ . Prin comanda alternativă a aprinderii și stingerii ventilului această tensiune este transformată pe sarcină într-o

succesiunea de impulsuri  $U_s$  care are și o importantă componentă continuă. Elemente suplimentare pot elimina această componentă continuă și tensiunea pe sarcină se transformă într-o tensiune alternativă,  $U_{s\sim}$ .

### Invertor cu punct median la sarcină

Invertorul cu punct median la sarcină are schema de forță, simplificată, prezentată în figura 5.3. Este compus din sursa de c.c., două ventile comandabile,  $T_1$  și  $T_2$  și sarcina, cuplată printr-un transformator care are în primar, partea dinspre invertor, o înfășurare formată din două secțiuni identice, înfasurate în același sens așa cum o arată semnele privind sensul înfășurării (punctul pus la capătul fiecărei înfășurări). Reamintim că punctul indică în principal că dacă un curent intră într-o înfășurare la borna notată, în celelalte se induc curenți care la rândul lor intră în borna astfel marcată, sau altfel, dacă se aplică unei înfășurări o tensiune cu un anumit semn la borna marcată, pe celelalte înfășurări apar tensiuni cu același semn la borna marcată.

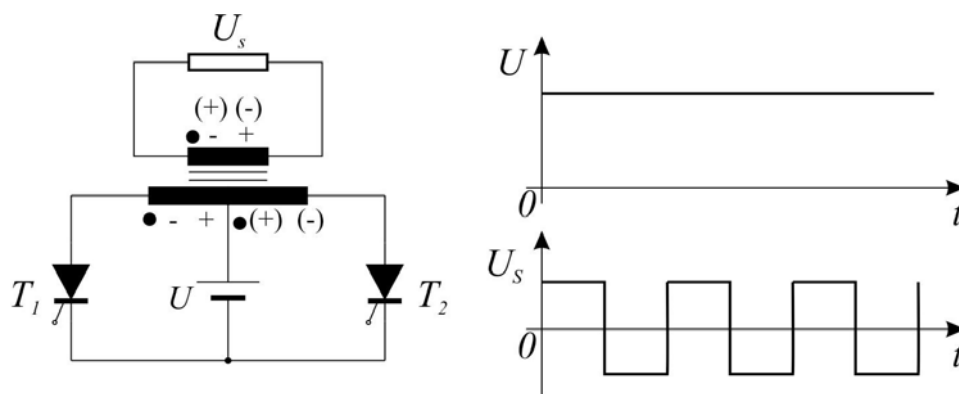


Fig. 5. 3. Invertor cu punct median la sarcină.

Principiul de funcționare este prezentat în continuare. Circuitul de comandă aprinde alternativ cele două ventile și există două perioade distincte de funcționare. Prima, în care  $T_1$  este aprins, iar  $T_2$  este stins. În această semiperioadă tensiunea sursei apare pe secțiunea corespunzătoare ventilului  $T_1$  a înfășurării primare, cu semnul plus la borna notată cu punct, minus la borna ce e legată la punctul median al înfășurării, semne marcate deasemenea pe figură. La bornele celorlalte înfășurări apar tensiuni cu semnele marcate. Astfel, pe sarcină este o tensiune pozitivă.

Circuitul de comandă sau uneori chiar tipul schemei de forță asigură ca, odată cu aprinderea celui de al doilea ventil, moment în care se intră în a doua semiperioadă de funcționare, să se producă și stingerea primului. Semiperioada a doua are  $T_2$  aprins și  $T_1$  stins.

În această semiperioadă tensiunea sursei apare pe secțiunea corespunzătoare ventilului  $T_2$  a înfășurării primare, cu semnul plus la borna notată cu punct, minus la borna ce e legată la punctul median al înfășurării, semne marcate deasemenea pe figură, între paranteze. La bornele celorlalte înfășurări apar tensiuni cu semnele marcate. Astfel, pe sarcină în a doua semiperioadă este o tensiune negativă. Se obține astfel transformarea tensiunii continue a sursei, într-o tensiune alternativă.

### Invertor cu punct median la sursă

Invertorul cu punct median la sursă are schema de forță, simplificată, prezentată în figura 5.4. Este compus din sursa de c.c., formată din două secțiuni identice conectate în serie, având un punct median, două ventile comandabile,  $T_1$  și  $T_2$  conectate de asemenea în serie și având un punct median, iar sarcina conectată între cele două puncte mediane.

Principiul de funcționare este prezentat în continuare. Circuitul de comandă aprinde alternativ cele două ventile și există două perioade distincte de funcționare. Prima, în care  $T_1$  este aprins ( $T_2$  stins). În această semiperioadă tensiunea sursei apare pe sarcină cu semnul marcat pe figură. Astfel, pe sarcină este o tensiune pozitivă.

Circuitul de comandă sau uneori chiar tipul schemei de forță asigură ca, odată cu aprinderea celui de al doilea ventil, moment în care se intră în a doua semiperioadă de funcționare, să se producă și stingerea primului. Semiperioada a doua are  $T_2$  aprins și  $T_1$  stins.

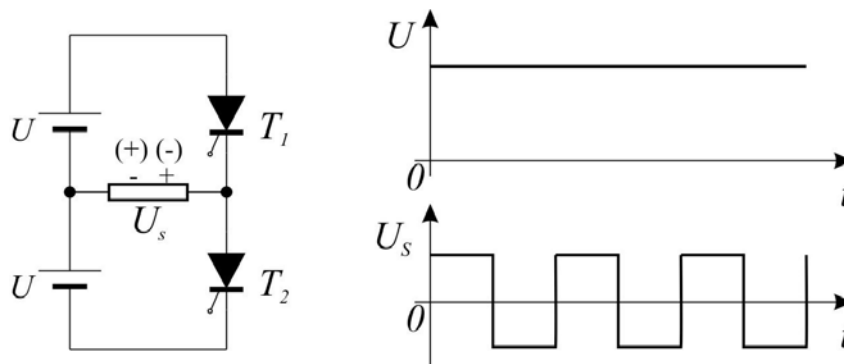


Fig. 5. 4. Invertor cu punct median la sursă.

În această semiperioadă tensiunea sursei apare pe sarcină cu semnul marcat de asemenea pe figură, între paranteze. Astfel, în a doua semiperioadă pe sarcina este o tensiune negativă. Se obține astfel transformarea tensiunii continue a sursei, într-o tensiune alternativă.

### Invertor punte

Invertorul punte are schema de forță, simplificată, prezentată în figura 5.5 și este compus din sursa de c.c. și patru ventile comandabile,  $T_1$ - $T_4$  conectate în punte. Sursa este conectată la o diagonală a punții, sarcina este conectată la a doua diagonală, conform figurii.

Principiul de funcționare este prezentat în continuare. Circuitul de comandă aprinde alternativ grupe de două ventile și există două perioade distincte de funcționare. Prima, în care  $T_1$  și  $T_4$  sunt aprinse, iar  $T_2$  și  $T_3$  sunt stinse. În această semiperioadă tensiunea sursei apare pe sarcină cu semnul marcat pe figură. Astfel, pe sarcină este o tensiune pozitivă.

Circuitul de comandă sau uneori chiar tipul schemei de forță asigură ca, odata cu aprinderea celui de al doilea grup de ventile, moment în care se intră în a doua

semiperioadă de funcționare, să se producă și stingerea primului grup. Semiperioada a doua are  $T_2$  și  $T_3$  aprinse, iar  $T_1$  și  $T_4$  sunt stinse.

În această semiperioadă tensiunea sursei apare pe sarcină cu semnul marcat deasemenea pe figură, între paranteze. Astfel, pe sarcină, în a doua semiperioadă este o tensiune negativă. Se obține astfel transformarea tensiunii continue a sursei într-o tensiune alternativă.

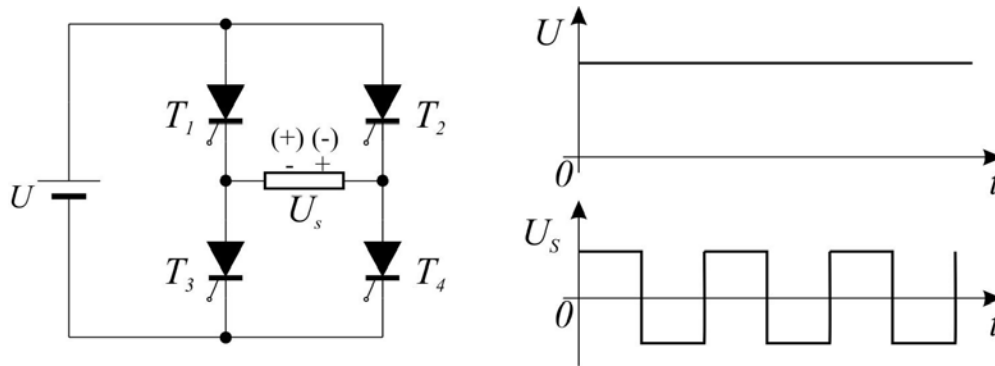


Fig. 5. 5. Invertor punte.

### 5.2.2. Clasificarea după poziția condensatorului de compensare a inductivității sarcinii

În majoritatea cazurilor din practică, sarcina are un caracter inductiv: motor, inductorul unei instalații de încălzire prin inducție, etc. Deoarece o funcționare optimă are loc pentru o sarcină compensată, se corectează caracterul inductiv al sarcinii cu ajutorul unuia sau a mai multor condensatoare. După poziția acestora invertoarele sunt:

- invertoare serie, pentru care există un singur condensator de compensare conectat în serie cu sarcina, (figura 5.6.a);
- invertoare paralel, pentru care există un singur condensator de compensare conectat în paralel cu sarcina (figura 5.6.b)
- invertoare paralel-serie, pentru care există două condensatoare de compensare conectate unul în serie cu sarcina, al doilea în paralel pe grupul astfel format (figura 3.5.c).

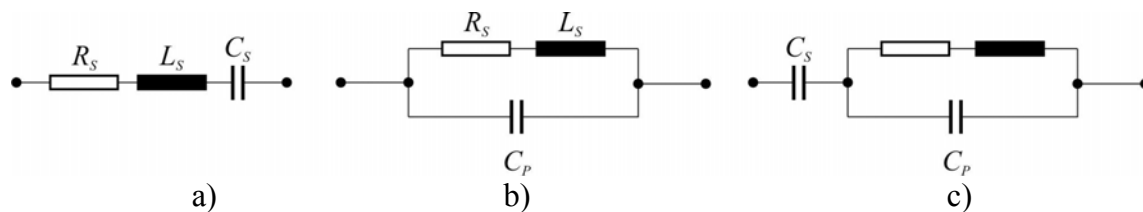


Fig. 5.6. Sarcina compensata serie, (a), paralel, (b) și serie-paralel, (c).

### 5.2.3. Clasificarea după natura sursei

O a doua clasificare, la fel de importantă, este aceea după natura sursei, care împarte invertoarele în:

- invertoare de tensiune;
- invertoare de curent.

Invertoarele de tensiune sunt alimentate direct de la o sursă de tensiune, astfel că la bornele inverterului tensiunea este constantă (figura 5.7.a). În cazul invertoarelor de curent inverterul este alimentat deasemenea de la o sursă de tensiune, dar prin intermediul unei bobine cu inductanță mare. Aceasta asigură un curent constant de alimentare a inverterului (figura 5.7.b)

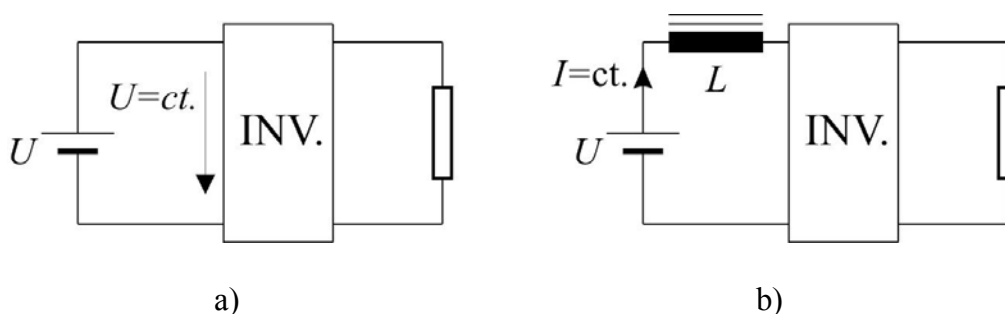


Fig. 5.7. Invertor de tensiune (a) și de curent (b).

### 5.2.4. Clasificarea după forma tensiunii pe sarcină

Forma tensiunii pe sarcină poate fi destul de diversă în cazul invertoarelor. De cele mai multe ori forma dorită este sinusoidală, îndeosebi atunci când invertoarele servesc la controlul motoarelor electrice. Alteori și o tensiune dreptunghiulară, mai ușor de obținut, este suficientă.

La puteri semnificative este cel mai eficace ca dispozitivele comandabile fie să fie de tip comutator, familia tiristorului, fie să fie utilizate într-un astfel de regim, de comutație, dacă sunt din familia tranzistorului. În acest caz o forma dreptunghiulară a tensiunii de ieșire este cel mai ușor de obținut.

O primă clasificare împarte deci invertoarele în:

- invertoare cu tensiune de ieșire sinusoidală sau cvasi-sinusoidală;
- invertoare cu tensiune de ieșire dreptunghiulară sau cvasi-dreptunghiulară.

În general invertoarele cu tensiune de ieșire sinusoidală utilizează circuite rezonante pentru a obține astfel forma dorită. Mai există o categorie aparte:

- invertoare cu tensiune de ieșire sintetică.

Tehnicile pentru obținerea unor tensiuni dreptunghiulare fiind mai la îndemână, s-au imaginat o serie de variante de invertoare, numite generic invertoare cu tensiune de ieșire sintetică, la care tensiunea de ieșire aproximează forma sinusoidală printr-o sinteză a unor succesiuni de impulsuri de formă dreptunghiulară. Câteva variante de obținere a unor astfel de tensiuni sunt prezentate în figura 5.7.

Există două metode princi-pale utilizate:

- cu modulație în amplitudine a impulsurilor (MIA), figura 5.7.a);
- cu modulație în durată sau lățime a impulsurilor (MID, tehnica cunoscută mai mult sub denumirea prescurtată din limba engleză, PWM – Pulse Width Modulation ).

În figură sunt prezentate două cazuri de tensiuni sintetice de tip PWM, una cu impulsuri de o singură polaritate pe semiperioadă, pozitive sau negative (figura 5.7.b), a doua cu impulsuri bipolare (figura 5.7.c).

În ultima vreme s-au dezvoltat tehnici complexe, care combină forme de undă dreptunghiulare cu treceri de tip sinusoidal sau aleg pentru comanda ventilelor momente critice în care pierderile de comutație în aceste ventile să fie minime pentru a mări eficacitatea inverterului.

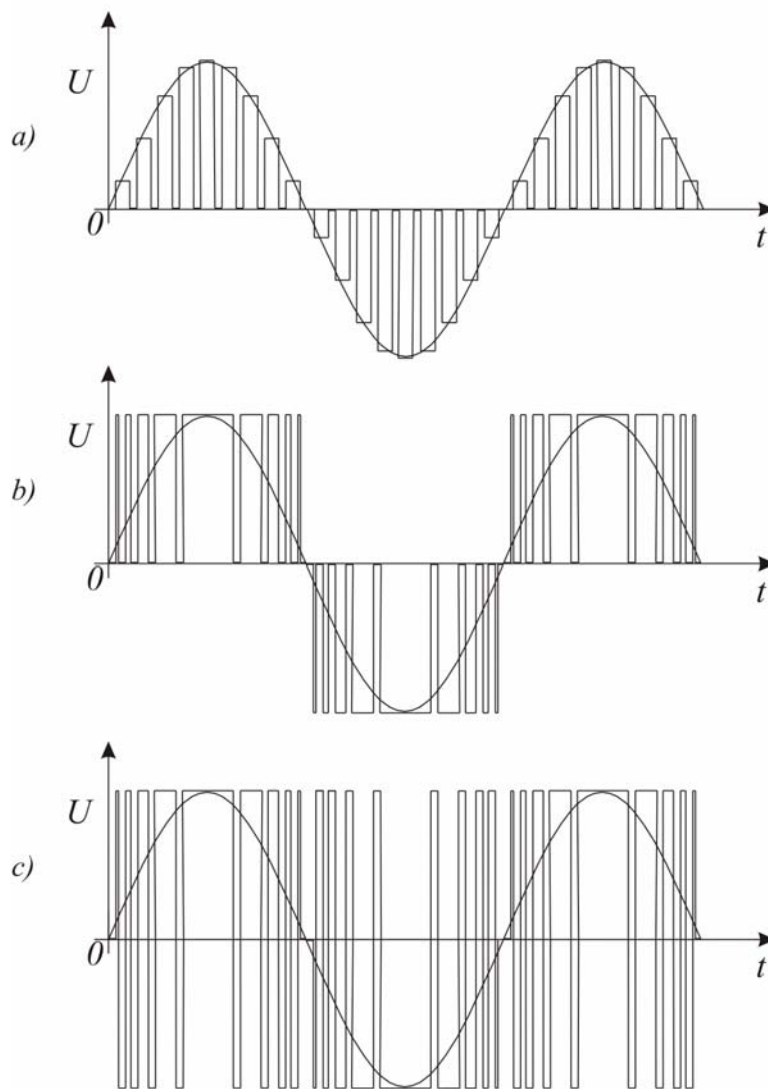


Fig. 5.7. Tensiuni de ieșire sintetice.

### 5.2.5. Criterii de apreciere a invertoarelor

Se poate deduce că numărul variantelor posibile este foarte mare dar trebuie spus că cele utilizate curent nu sunt numeroase. Este nevoie de o ordonare a criteriilor de apreciere a unei anumite scheme.

Cele mai importante sunt performanțele principale și anume puterea în sarcină și frecvența de lucru optimă și cea maximă.

Prețul raportat la performanțe este esențial și depinde de complexitatea schemei de putere, a celei de comandă și protecție, de ventilele utilizate.

Randamentul sistemului interesează de asemenea foarte mult. El este legat de pierderile pe componente, o zonă intens cercetată astăzi.

Un alt aspect important se leagă de solicitările ventilelor, statice și dinamice.

Se mai pot aminti: comportarea la variația parametrilor sarcinii sau sursei; comportarea în gol sau în scurtcircuit; gama de control a puterii și a frecvenței; forma curentului în sarcină; necesitatea unui transformator de ieșire; adaptabilitate la sistemele de utilizare existente; posibilitatea funcționării în paralel.

## 5.3. Invertoare de medie frecvență

Invertoarele se mai impart după destinație și frecvența de lucru în invertoare de medie frecvență (kHz – sute kHz) utilizate în înalțirea inductivă, iluminat fluorescent sau prelucrări neconvenționale dar și în alte multe scopuri și invertoare de frecvențe joase, de obicei trifazate, utilizate îndeosebi pentru controlul motoarelor de inducție.

Se vor prezenta întâi variantele principale pentru invertoarele de medie frecvență.

### 5.3.1. Invertoare paralel de curent

Invertoarele paralel sunt caracterizate prin prezența condensatorului de compensare a sarcinii în paralel pe sarcină și sunt obișnuit în varianta de curent (curentul continuu absorbit de la sursa de c.c. este constant), fiind folosită schema în punte (figura 5.8 a), iar la puteri mici schema cu punct median la sarcină care însă impune utilizarea unui transformator de ieșire, cu priză mediană pe primar. Schemele prezentate sunt cu tiristoare dar se folosesc și alte tipuri de ventile.

Bobina  $L$  este de valoare mare, în serie cu sursa de alimentare, pentru a menține constant curentul absorbit de la sursă. Invertorul funcționează în regim aperiodic, forma mărimilor în timp fiind prezentată în figura 5.8 b).

Avantajele invertoarelor paralel de curent :

- putere mare;
- solicitare mică în tensiune;
- gamă largă de frecvențe de lucru.



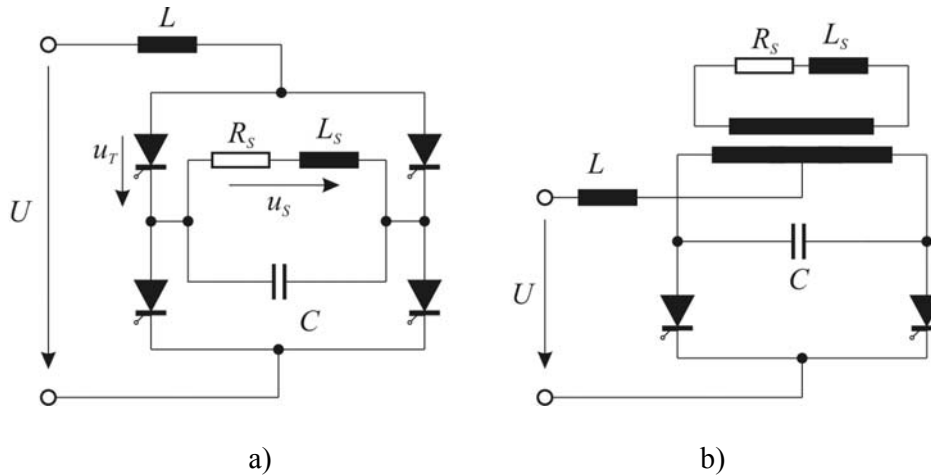


Fig. 5.8. Invertor paralel de curent.

Pornirea invertorului necesită preîncărcarea condensatorului. În apropierea regimului de funcționare în gol sau pentru sarcini puternic inductive apar supratensiuni de valori mari. Un alt dezavantaj al invertoarelor de curent este solicitarea mare a tiristoarelor la viteza de creștere a curentului,  $di/dt$ . Pentru protecție, în fiecare ramură a circuitului se introduce câte o bobină în serie cu tiristoarele. Forma curentului prin sarcină,  $i$ , devine în acest caz trapezoidală.

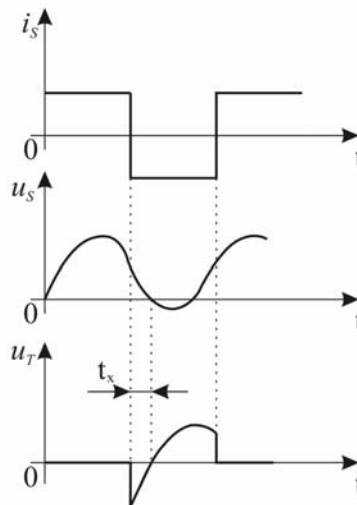


Fig. 5.9. Formele de undă pentru invertorul paralel.

O variantă utilizată mai ales în regim rezonant este invertorul serie-paralel, figura 5.10.

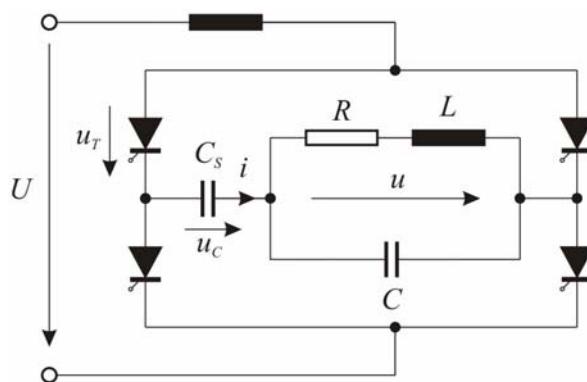


Fig. 5.10. Invertor serie-paralel.

### 5.3.2. Invertorul serie de tensiune

Invertorul serie este caracterizat prin prezența condensatorului de compensare a sarcinii în serie cu aceasta, este utilizat mai ales în varianta de tensiune și funcționează în regim oscilant. Cele mai utilizate scheme sunt prezentate în figura 5.11, varianta semipunte (a) și punte (b).

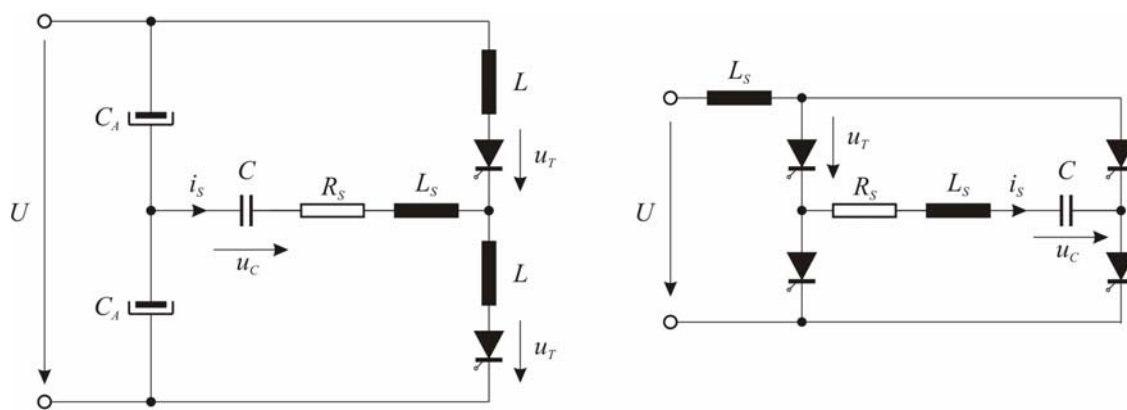


Fig. 5.11. Invertoare serie de tensiune.

Formele de undă sunt prezentate în figura 5.12. Invertoarele serie pot funcționa în regim întrerupt (cazul din figură), rezonant sau suprapus, în care intervalul de pauză,  $t_I$ , nu mai există.

Avantajele invertoarelor serie:

- frecvențe mai mari de lucru;
- pierderi mici de comutație;
- comandă și pornire simplă.

Dezavantajele:

- frecvență fixă de funcționare;
- solicitare mare în tensiune pentru ventile.

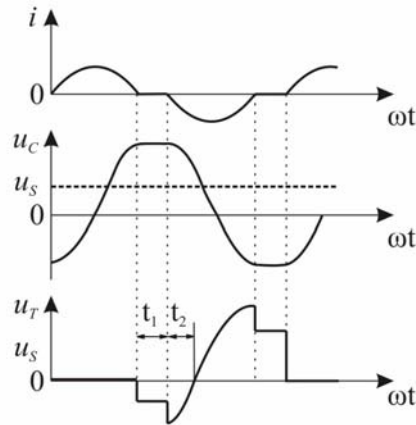


Fig. 5.12. forma mărimilor inverter serie

Se pot elimina supratensiunile pe elementele schemei dacă se utilizează diode antiparalele pe ventile, acestea devenind astfel bidirecționale. Se ajunge în acest mod la schema și formele de undă prezentate în figura 5.13. Se mai numește inverter Depenbrock și este astăzi, cu ventile moderne, cea mai utilizată schemă de inverter MF.

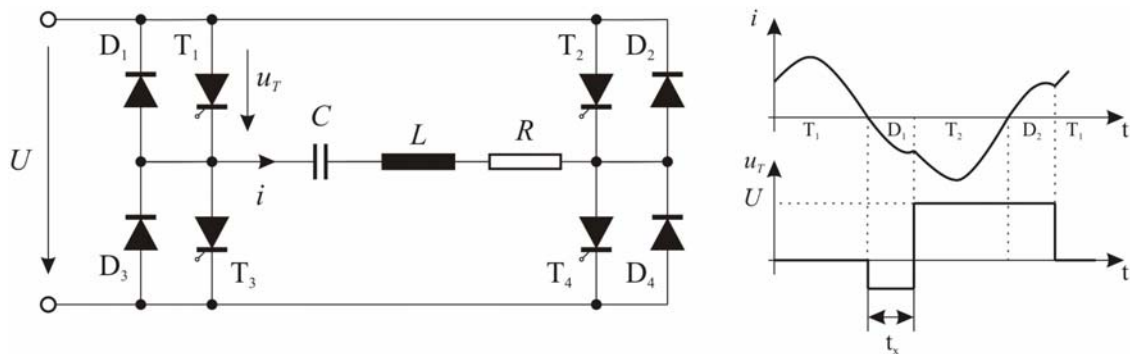


Fig. 5.13. Inverter Depenbrock.

Avantajul principal al acestei scheme este acela că tensiunile maxime pe elemente sunt limitate la valoarea tensiunii sursei de alimentare. Pierderile pe ventilele în număr dublu, produse de curenții de valoare mare în momentele de comutație, constituie punctul slab.

Alte variante de scheme cât și de moduri de funcționare, utilizate în domeniul MF, sunt prezentate în continuare.

### 5.3.3. Invertoare cu sarcina paralel

Schema simplă, nesimetrică, a acestui tip de inverter este și formele de undă sunt prezentate în figura 5.14.

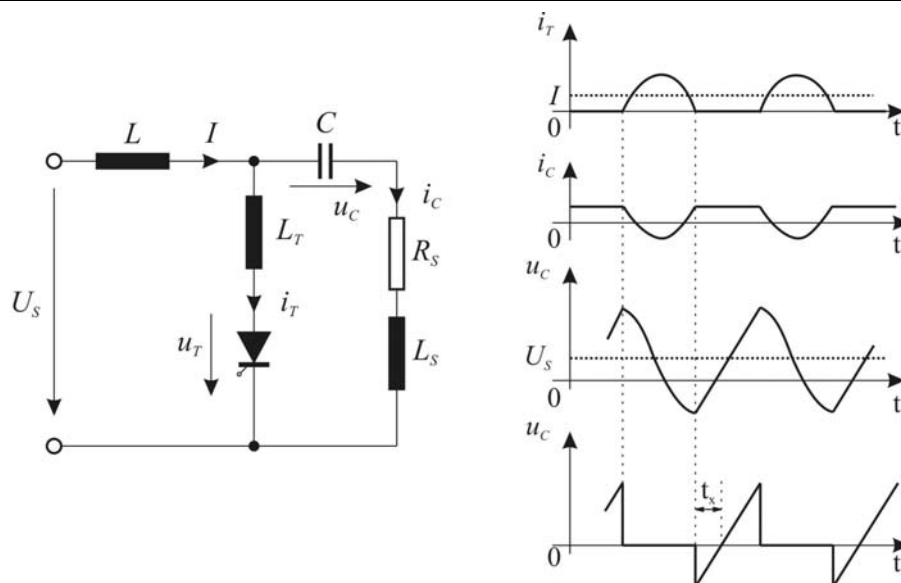


Fig. 5.14. Invertor cu sarcină paralel cu celulă de comutare și formele de undă.

Inductanța  $L$  este de valoare mare și menține aproximativ constant curentul sursei,  $I$ . Se observă că

$$i_s = i_c = I - i_T$$

și atunci, pentru intervalul de timp în care  $i_T = 0$ , tensiunea pe condensator crește liniar. O schemă din aceeași familie este prezentată în figura 5.15. Ventilul este înlocuit cu o combinație punte de ventile, având pe o diagonală condensatorul circuitului rezonant,  $C$ . Condensatorul  $C$  este de valoare mare având rol de separare. Dezavantajele acestei variante sunt curentul nesinusoidal pe sarcină și frecvența de lucru limitată când ventilele sunt tiristoare.

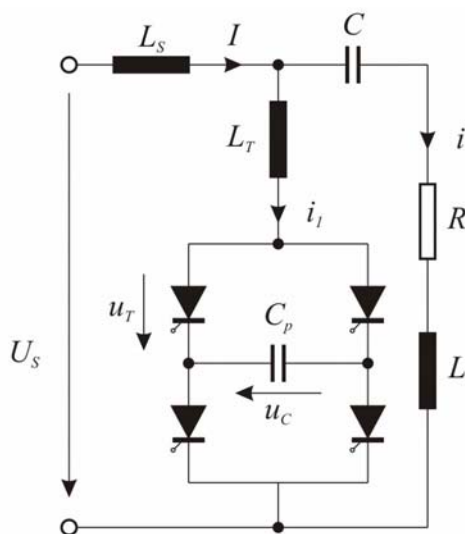


Fig. 5.15. Invertor cu celulă punte.

### 5.3.4. Invertoare multicelulare

Aceste invertoare sunt realizate pentru a îndeplini două cerințe, putere mai mare sau/și frecvență mai mare. Ele pot fi obținute prin conectarea a două sau mai multe invertoare, constituind fiecare dintre ele o celulă autonomă, pe o aceeași sarcină. Conectarea se face cu ajutorul unui transformator. Se pot construi invertoare și fără a apela la un transformator de ieșire, în acest caz sarcina se poate lega paralel cu celulele sau pe o diagonală în cazul unei structuri de celule punte.

### 5.3.5. Invertoare directe

Variantele de invertoare MF prezentate până acum sunt alimentate în majoritatea cazurilor de la surse de tensiune continuă de tip rețea - redresor. Există și altă posibilitate. Invertoarele pot fi alimentate direct de la rețea, fără circuit intermediar de curent continuu, avantajul major fiind randamentul mai mare decât al unui sistem redresor – inverter.

Schema unui astfel de inverter, alimentat direct de la rețeaua trifazată, este prezentată în figura 5.16. Elementele  $L, C$  formează un filtru ce împiedică pătrunderea în rețea a tensiunii de medie frecvență. Sarcina  $R_s, L_s$  formează cu fiecare din condensatoarele  $C_s$  un circuit oscilant ce asigură un curent cvasisinusoidal prin  $R_s$ . Ventilele sunt bidirecționale în curent, iar schemele actuale utilizează combinații antiparalele de tranzistoare cu diode serie. Un dezavantaj este circuitul de comandă pretențios.

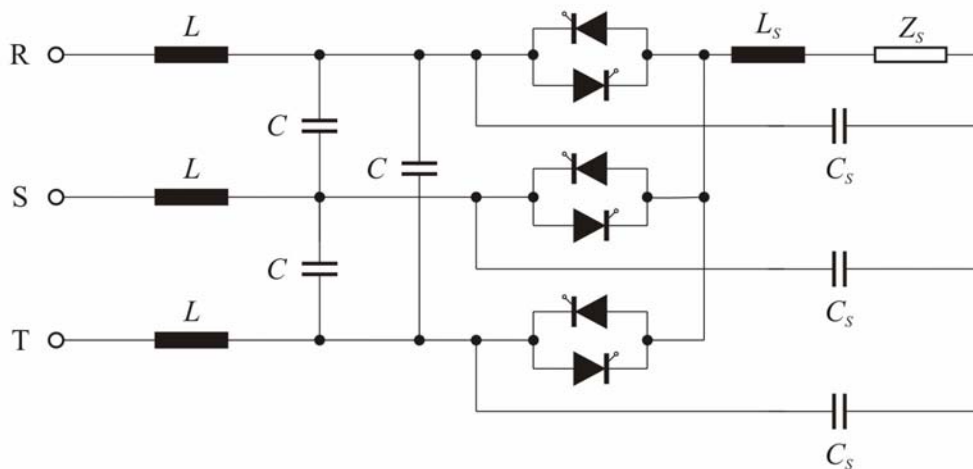


Fig. 5.16. Inverter MF direct.

### 5.3.6. Invertoare cu oscilații amortizate

Modul de lucru cu oscilații amortizate se utilizează în cazul în care factorul de calitate al sarcinii este ridicat, este nevoie de frecvențe mari și putere mică. Ideea este de a transfera putere de la sursă într-o perioadă sau semiperioadă și apoi a lăsa circuitul să oscileze singur.

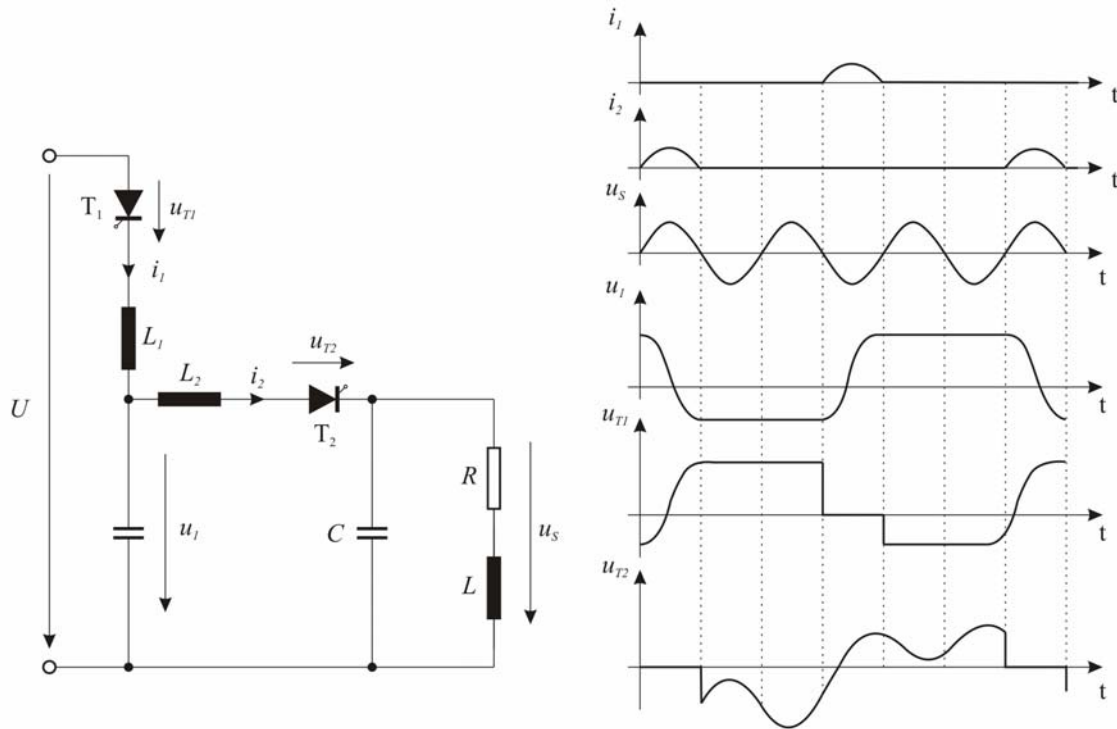


Fig. 5.17. Invertor MF direct.

Există numeroase variante de astfel de scheme. Se prezintă în figura 5.17. un invertor nesimetric cu funcționare în două trepte și principalele forme de undă. Întreținerea oscilațiilor se face o dată la trei perioade.