

Referenți științifici:

Prof. univ. dr. ing. Mircea DOBRICEANU – Universitatea din Craiova

Șef lucrări dr. ing. Mihăiță LINCĂ – Universitatea din Craiova

Copyright © 2022 Universitaria

Toate drepturile sunt rezervate Editurii Universitaria Craiova

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României

BITOLEANU, ALEXANDRU

Convertoare statice de putere : manual universitar pentru învățământ cu frecvență redusă : anul III / Alexandru Bitoleanu, Mihaela Popescu. - Craiova : Universitaria, 2022

2 vol.

ISBN 978-606-14-1816-9

Partea 2. - 2022. - Conține bibliografie. - ISBN 978-606-14-1817-6

I. Popescu, Mihaela

CONVERTOARE STATICE DE PUTERE II

INTRODUCERE

Motto:
„Țara nu se poate ridica decât prin ingineri.”

„În frustrările și durerile trecutului, prezentului și viitorului neamului nostru, inginerii au fost, sunt și vor fi cei care dau viață și energie țării. Cât timp acest popor român a ascultat și sprijinit inginerii, țara a prosperat și răzbit. Ei, inginerii, sunt cei care pregătesc vremurile de azi și de mâine.”

(I. G. DUCA)

„Ca inginer, fie că ești senior sau junior, adică student, trebuie să te gândești permanent la protecție și randament.”

(MICHELLE ROSENBERG)

Cursul de CONVERTOARE STATICE DE PUTERE se adresează, ca și disciplină de domeniu, tuturor studenților din domeniul de licență Inginerie Electrică de la Facultatea de Inginerie Electrică.

Pentru studenții de la programul de studiu Electromecanică, cursul este prevăzut în anul III și este repartizat pe ambele semestre sub denumirile de Convertoare statice de putere I (în semestrul 5) și respectiv, Convertoare statice de putere II (în semestrul 6).

În planul de învățământ, Disciplina de domeniu „Convertoare statice de putere II” este prevăzută, săptămânal, cu 2 ore de curs, 2 ore de laborator și 1 oră de proiect și se finalizează cu examen și acordarea a 5 puncte credit.

Forma actuală este o reeditare a manualului CONVERTOARE STATICE II, ISBN 978-606-14-1175-7, publicat în anul 2017, la care s-a adăugat unitatea de învățare nr. 11.

Obiectivele disciplinei sunt de a aduce studenților cunoștințe de bază privind:

1. Cunoașterea construcției și funcționării convertoarelor statice ca-ca și cc-cc;
2. Însușirea unor elemente de proiectare.

Apreciem că, după parcurgerea și obținerea celor 5 puncte credit, studenții vor dobândi competențe structurate pe două categorii.

1. Cunoștințe teoretice (ce trebuie să cunoască):

- să cunoască principiile generale de funcționare și caracteristicile statice de funcționare ale convertoarelor statice ca-ca și cc-cc;
- să descrie matematic particularitățile de funcționare ale convertoarelor statice ca-ca și cc-cc;

- să cunoască principiile de comandă ale convertoarelor statice ca-ca și cc-cc.

2. Deprinderi și abilități practice (ce știe să facă):

- sa pună în funcțiune un convertor static clasic;
- să aleagă un convertor static pentru o aplicație dată;
- sa identifice un defect simplu într-un convertor static;
- sa remedieze defecte simple într-un convertor static.

Prezentul manual este structurat pe 10 unități de învățare și prezintă modulele precizate în Fișa disciplinei, respectiv:

Variatoare de tensiune alternativă – U1;

Cicloconvertoare – U2;

Variatoare de tensiune continuă - U3, U4 și U5;

Principiul de realizare a convertoarelor statice indirecte de tensiune și frecvență și invertoare monofazate cu modulație în amplitudine – U6;

Invertoare cu modulație în amplitudine (de tensiune și de curent) – U7 și U8;

Invertoare de tensiune cu modulație în durată – U9 și U10;

Convertoare matriceale – U11.

În înțelegerea și aprofundarea problematicii convertoarelor statice de putere, studenții pot utiliza, pe lângă prezentul manual, și bibliografia specificată la finalul fiecărei unități de învățare, dar și aplicația software e-LEE (eLearning Tolls for Electrical Engineering) disponibilă pe site-ul departamentului de Electromecanică, Mediu și Informatică Aplicată.

Nu în ultimul rând, foarte utile în dobândirea competențelor vizate sunt lucrările de laborator care se desfășoară în laboratorul disciplinei pe baza unor platforme puse la dispoziția studenților la începutul fiecărui semestru și accesibile on-line pe site-ul departamentului. Evaluarea se face pe tot parcursul semestrului, începând cu a doua ședință de laborator, iar în ultima ședință are loc evaluarea finală.

Orele de proiect se derulează în prezența și sub supravegherea nemijlocită a cadrului didactic titular al aplicației și urmăresc aprofundarea informațiilor conținute de manual, prin exerciții simple de proiectare. Această activitate se încheie cu evaluare prin susținerea proiectului.

Nota finală acordată după susținerea examenului se calculează ca medie ponderată a răspunsurilor la examen (60%), a activității de la laborator (20%) și a activității și modului de realizare și susținere a proiectului (20%).

Manualul conține experiența autorilor, didactică și inginerescă și se dorește a porni, de fiecare dată, de la argumentarea matematică a fenomenelor și finalizarea prin orientarea spre implementarea practică, ca obiectiv final al oricărui demers ingineresc.

Nu în ultimul rând, materialul prezentat conține contribuții ale membrilor colectivului pe care autorul principal l-a format de-a lungul anilor, ca și fondator al cursului modern de convertoare statice de putere la Facultatea de Inginerie Electrică din Craiova. Constituie bucurie și împlinire să îi numim, în ordinea în care au îmbrățișat profesia nobilă de dascăl în învățământul superior, pe: prof. dr. ing. Sergiu Ivanov, prof. dr. ing. Mihaela Popescu, ș.l. dr. ing. Mihăiță Lincă și ș.l. dr. ing. Vlad Suru.

Studentilor noștri, ca și tuturor acelorora care vor folosi acest manual, le recomandăm să se aplece asupra conținutului cu încredere și răbdare, să se înarmeze cu elementare cunoștințe de matematică, electrotehnică și electronică și cu convingerea că autorii și-au dorit ca relațiile matematice să nu fie un scop, ci un mijloc, și că relațiile reținute fără logică și rupte de fenomenul fizic nu valorează „doi bani”.

Noi am făcut o jumătate de drum și numai dacă și Voi, utilizatorii acestui manual, veți face jumătatea rămasă, ne veți oferi satisfacția de a fi contribuit la formarea Voastră în minunata profesie de „*creator de bunuri materiale*” – profesia de **Inginer**.

Prof. dr. ing. Alexandru Bitoleanu

Prof. dr. ing. Mihaela Popescu

„Cred că suprema bogăție a omului este caracterul său; nu bogăția, puterea sau poziția sa.

Cred într-un atot înțelept și atot iubitorul Dumnezeu, indiferent ce nume poartă El; și că cea mai mare realizare a omului, cea mai mare fericire și cea mai deplină mulțumire este ca el să se împacă cu propriile sale dorințe. ”

(CREZUL LUI ROCKEFELLER)

Unitatea de învățare nr. 1

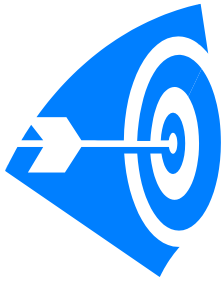
CONVERTOARE STATICE C.A.- C.A. CU COMUTAȚIE NATURALĂ

Cuprins	Pagina
Obiectivele unității de învățare nr. 1	10
1.1. Variatoare de tensiune alternativă (VTA)	10
1.1.1. Variatoare monofazate	11
1.1.1.1. Principiul, schema de principiu	11
1.1.1. 2. Cazul unei sarcini rezistive	11
Test de autoevaluare 1.1	13
1.1.1.3. Cazul unei sarcini pur inductive	14
1.1.1.4. Cazul unei sarcini rezistiv – inductive	14
Test de autoevaluare 1.2	18
1.1.1.5. Mărimi caracteristice	18
Test de autoevaluare 1.3	22
1.1.2. Variatoare trifazate	22
Lucrare de verificare – unitatea de învățare nr. 1	27
Concluzii	28
Bibliografie – unitatea de învățare nr. 1	28



OBIECTIVELE unității de învățare nr. 1

Principalele obiective ale Unității de învățare nr. 1 sunt:



- Cunoașterea principiului de funcționare și a schemelor variatoarelor de tensiune alternativă
- Cunoașterea principiului de funcționare și a schemelor cicloconvertoarelor
- Cunoașterea modului de implementare a comenzii în fază

1.1 Variatoare de tensiune alternativă (VTA)



Variatoarele de tensiune alternativă sunt conversoare statice care transformă energia de c.a. tot în energie de c.a., iar prin comandă se poate modifica valoarea efectivă a tensiunii furnizate.

Acestea funcționează în comutație naturală, deoarece curentul prin fiecare element semiconductor se anulează, în mod natural, la trecerea prin zero a acestuia.



Din reprezentarea ca obiect orientat (fig. 1.1) un VTA este alimentat cu o tensiune sinusoidală de valoare efectivă U și frecvență f constante și furnizează la ieșire o tensiune alternativă formată din segmente de sinusoidă ale tensiunii de alimentare, a cărei valoare efectivă poate fi modificată prin comandă și a cărei frecvență este constantă și egală cu a tensiunii de alimentare.

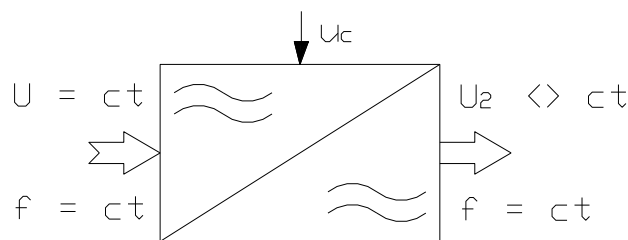


Fig. 1.1 Reprezentarea VTA ca și element orientat

Principiul de comandă al VTA este principiul comenzii în fază (ca și la redresoare), respectiv tiristoarele din componența sa sunt comandate cu un unghi de întârziere reglabil α , măsurat din punctul comutației naturale a tiristorului respectiv. Din punct de vedere al conexiunii, VTA se montează în serie, între sursa de alimentare și sarcină.

1.1.1. Variatoare monofazate

VTA monofazate sunt alimentate de la o sursă de tensiune sinusoidală monofazată și își găsesc aplicabilitate în instalațiile reglabile de iluminat, în echipamente electrocasnice (fiare de călcat) și la pornirea motoarelor monofazate de c.a.

1.1.1.1. Principiul, schema de principiu

Un VTA monofazat este constituit dintr-un ansamblu bidirecțional (două tiristoare conectate în antiparalel sau un triac), montat între sursa de tensiune alternativă și sarcină (fig. 1.2). Dispozitivul de comandă DC asigură impulsuri de comandă, defazate cu π radiani între ele, care se distribuie alternativ celor două tiristoare. Aceste impulsuri sunt întârziate, cu unghiul α față de momentul trecerii prin zero a celor două semialternanțe, deoarece, fiind o schemă monofazată, punctele comutației naturale ale celor două tiristoare coincid cu trecerile prin „zero” ale tensiunii de alimentare. Momentele blocării tiristoarelor depind numai de caracterul și parametrii sarcinii.

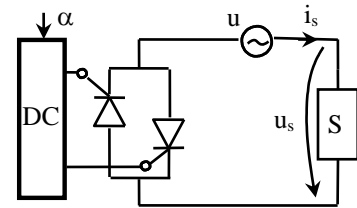


Fig. 1.2 Schema de principiu a unui VTA monofazat, cu tiristoare

Pentru analiza care urmează, se fac următoarele ipoteze:

- sursa de tensiune u este ideală și furnizează o tensiune sinusoidală de forma

$$u = \sqrt{2}U_1 \sin \omega t, \quad (1,1)$$

în care U_1 este valoarea efectivă, iar ω pulsația acesteia;

- tiristoarele se comportă ca și întrerupătoare ideale (se neglijează comutația, căderea de tensiune în stare de conducție și curentul rezidual în stare blocată).



Se subliniază că, datorită conexiunii în antiparalel a celor două tiristoare, în funcționarea VTA apare o particularitate importantă. Astfel, când un tiristor este în conducție, căderea de tensiune de pe el (1,5V-3V) polarizează celălalt tiristor în sens invers. În consecință, acesta nu poate intra în conducție. Consecința cea mai importantă a acestui fapt este că, la VTA, regimul de curent întrerupt (intervale de timp când curentul prin sarcină este nul) este inevitabil.

1.1.1.2. Cazul unei sarcini rezistive

Considerând o sarcină pur rezistivă, și ținând seama că tiristorul T_1 poate intra în conducție pe alternanța pozitivă, la momentul $\omega t = \alpha$, iar T_2 pe alternanța negativă la momentul $\omega t = \pi + \alpha$, expresiile tensiunii și curentului vor fi:

$$u_s = \begin{cases} u & T_1 = 1 \cup T_2 = 1 \\ 0 & T_1 = 0 \cap T_2 = 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

$$i_s = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}U_1}{R} \sin\omega t & \text{pt. } \omega t \in [\alpha, \pi] \cup [\pi + \alpha, 2\pi] \\ 0 & \text{pt. } \omega t \in [0, \pi] \cup [\pi, \pi + \alpha] \end{cases} \quad (1.3)$$



Intervalele de conducție ale celor două tiristoare se obțin ținând seama că fiecare intră în conducție în momentul comenzii și se blochează natural la anularea curentului ce le străbate. Astfel, anulând expresia curentului se obține $\sin\omega t = 0$, adică $\omega t = \pi$ și 2π . Rezultă că T_1 conduce în prima perioadă pe intervalul (α, π) iar T_2 pe intervalul $(\pi, 2\pi)$.

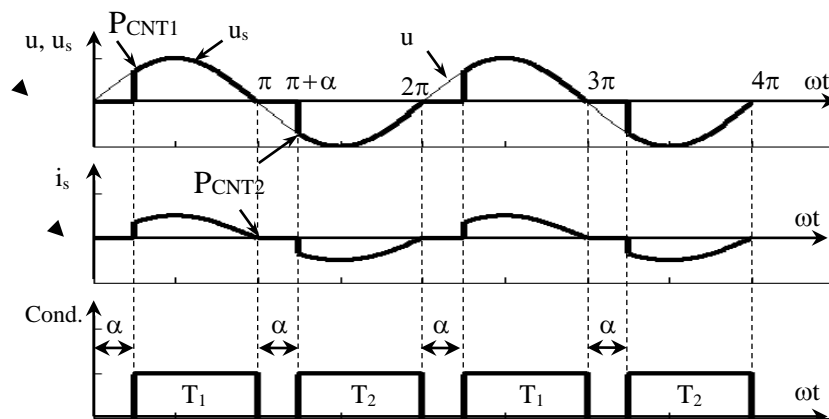


Fig.1.3 Formele de undă și intervalele de conducție ale tiristoarelor, pentru un VTA monofazat, cu sarcină pur rezistivă

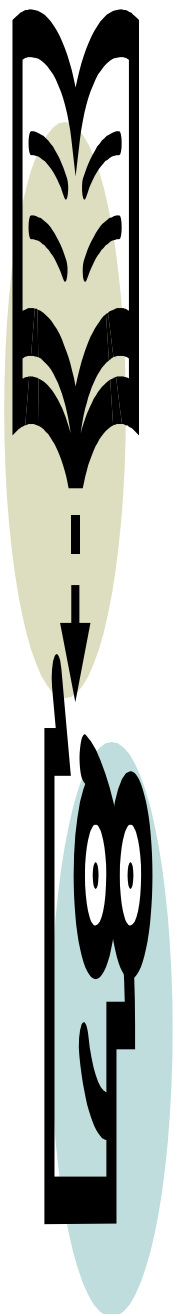
Formele de undă obținute pe baza relațiilor (1.2) și (1.3) sunt reprezentate în fig. 1.3.

În figura 1.3 s-au marcat punctele de comutație naturală ale celor două tiristoare ($PCNT1$ și $PCNT2$).

Ordine în care se obțin formele de undă este:

1. Se reprezintă cele trei sisteme de axe;
2. Se reprezintă tensiunea de alimentare;
3. Se identifică punctele de comutație naturală și se măsoară un unghi dorit $\alpha \in (0, \pi)$;
4. Se marchează intervalele de conducție ale celor două tiristoare, în sistemul de axe cel mai de jos;
5. În sistemul de axe al lui u_s , se identifică porțiunile de sinusoidă care coincid cu intervalele de conducție; acestea reprezintă forma de undă a tensiunii de ieșire;
6. În sistemul de axe al lui i_s , se reprezintă curentul de sarcină care este și curentul prin sursă.





De reținut !

- Variatoarele de tensiune alternativă sunt conversoare statice care transformă energia de c.a. tot în energie de c.a., iar prin comandă se poate modifica valoarea efectivă a tensiunii furnizate.
- VTA este alimentat cu o tensiune sinusoidală de valoare efectivă U și frecvență f constante și furnizează la ieșire o tensiune alternativă formată din segmente de sinusoidă ale tensiunii de alimentare, a cărei valoare efectivă poate fi modificată prin comandă și a cărei frecvență este constantă și egală cu a tensiunii de alimentare.
- Principiul de comandă al VTA este principiul comenzii în fază (ca și la redresoare), respectiv tiristoarele din componența sa sunt comandate cu un unghi de întârziere reglabil α , măsurat din punctul comutației naturale a tiristorului respectiv. Din punct de vedere al conexiunii, VTA se montează în serie, între sursa de alimentare și sarcină.
- Se subliniază că, datorită conexiunii în antiparalel a celor două tiristoare, în funcționarea VTA apare o particularitate importantă. Astfel, când un tiristor este în conducție, căderea de tensiune de pe el (1,5V-3V) polarizează celălalt tiristor în sens invers. În consecință, acesta nu poate intra în conducție. Consecința cea mai importantă a acestui fapt este că la VTA regimul de curent întrerupt (intervale de timp când curentul prin sarcină este nul) este inevitabil.
- Formele de undă și intervalele de conducție ale tiristoarelor, pentru un VTA monofazat, cu sarcină pur rezistivă.



Test de autoevaluare 1.1

1. Definiți variatoarele de tensiune alternativă d.p.d.v. energetic.
2. Precizați cu ce fel de tensiune este alimentat VTA și din ce este formată tensiunea de ieșire; ce se modifică prin comandă?
3. Precizați și detaliați principiul de comandă al VTA.
4. Explicați de ce un tiristor al VTA nu intră în conducție dacă perechea lui este în conducție.
5. Reprezentați formele de undă și intervalele de conducție ale tiristoarelor, pentru un VTA monofazat cu sarcină pur rezistivă.

1.1.1.3. Cazul unei sarcini pur inductive

În această situație, se va ține seama că, un tiristor nu poate fi introdus în conducție atât timp cât celălalt este în conducție, acesta din urmă polarizându-l pe primul în sens invers.

Pentru $\omega t > \alpha$, aplicând teorema a II-a a lui Kirchhoff pe ochiul format, se obține

$$\sqrt{2}U \sin \omega t = L \frac{di_s}{dt}, \text{ din care, prin integrare, rezultă}$$

$$i_s = \int_{\alpha}^{\omega t} \frac{\sqrt{2}U}{\omega L} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (1.4)$$

Curentul se va anula dacă

$$\cos \alpha - \cos \omega t = 0, \text{ respectiv,}$$

$$2 \sin \frac{\omega t + \alpha}{2} \sin \frac{\alpha - \omega t}{2} = 0. \quad (1.5)$$

Din această condiție, se determină momentul anulării curentului,

$$\omega t = 2\pi - \alpha \quad (1.6)$$

Deoarece durata maximă de conducție a unui tiristor este π radiani, relația (1.6) furnizează valoarea unghiului de comandă minim (α_{\min}) punând condiția de conducție maximă

$$2\pi - \alpha - \alpha = \pi.$$

Se obține $\alpha_{\min} = \frac{\pi}{2}$, pentru care există permanent curent prin sarcină.

În același timp, deoarece $\alpha_{\max} = \pi$ (după care, T_1 este polarizat în sens invers), se deduce intervalul de variație a lui α ,

$$\alpha \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi \right]. \quad (1.7)$$

Pentru $\alpha > \pi/2$, ținând seama că i_s se anulează la momentul $2\pi - \alpha$, se obține regim de curent întrerupt pentru $\omega t \in [2\pi - \alpha, \pi + \alpha]$ (fig.1.4).

Construcția formelor de undă se face similar ca în cazul sarcinii rezistive.



De reținut !

- În cazul sarcinii pur inductive, unghiul minim de comandă este $\pi/2$.
- Intervalul de variație a unghiului de comandă se reduce la $\alpha \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi \right]$.
- Curentul prin sarcină este format din pulsuri sinusoidale centrate pe punctele de trecere prin zero ale tensiunii de alimentare.

1.1.1.4. Cazul unei sarcini rezistiv - inductive

În această situație, sarcina este caracterizată de rezistența R și inductivitatea L , înseriate.

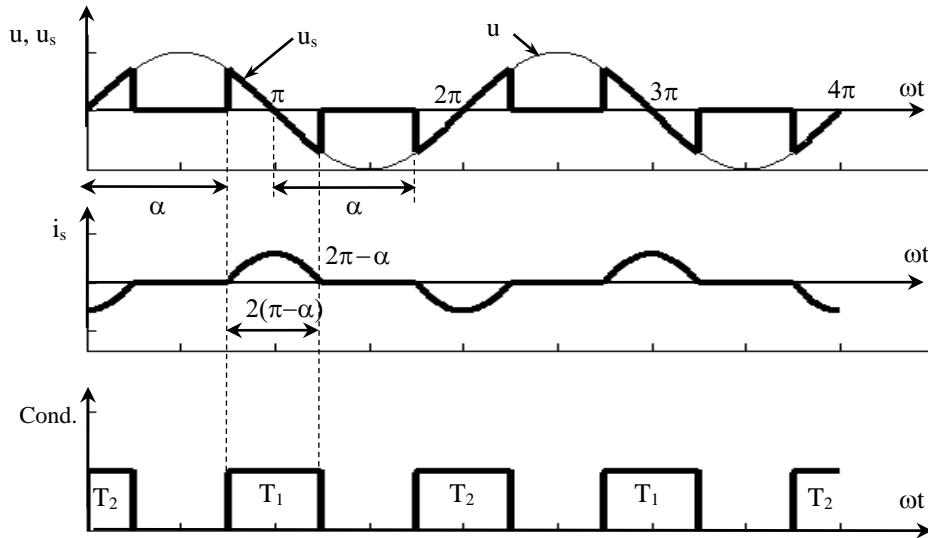


Fig.1.4 Formele de undă și intervalele de conducție ale tiristoarelor, pentru un VTA monofazat, cu sarcină pur inductivă

Comanda fiind simetrică, este suficient să se studieze funcționarea în timpul unei semiperioade. Teorema a II- a a lui Kirchhoff, aplicată pentru $\omega t \geq \alpha$ (intervalul de conducție al lui T_1), conduce la

$$Ri_s + L \frac{di_s}{dt} = \sqrt{2}U \sin \omega t .$$

Prin împărțire la R , ecuația diferențială ia forma

$$T \frac{di_s}{dt} + i_s = \frac{\sqrt{2}U}{R} \sin \omega t , \quad (1.8)$$

unde $T = L/R$ este constanta electromagnetică a circuitului.

Ecuația diferențială neomogenă (1.8) are o soluție care conține două componente:

$$-i_{s0} = Ce^{\frac{-t}{T}} , \text{ soluție a ecuației omogene (termen exponențial amortizat);}$$

$$-i_{sp} = \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\omega t - \varphi) , \text{ soluție particulară a ecuației neomogene (curent sinusoidal corespunzător regimului staționar), în care, } \varphi = \arctg \omega T \text{ este defazajul introdus de circuitul respectiv.}$$

Soluția generală este

$$i_s = i_{s0} + i_{sp} = Ce^{\frac{-t}{T}} + \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\omega t - \varphi) . \quad (1.9)$$

Constanta C se determină din condiția inițială $i_s(\alpha)=0$. Se obține astfel

$$C = \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} e^{\frac{\alpha}{\omega T}} \sin(\alpha - \varphi)$$

Revenind în (1.9) se obține expresia finală a curentului,

$$i_s = \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left[\sin(\omega t - \varphi) - e^{-\frac{1}{\omega T}(\omega t - \alpha)} \sin(\alpha - \varphi) \right]. \quad (1.10)$$

Fiecare tiristor conduce până la momentul t_1 de anulare a curentului i_s , care poate fi determinat din condiția

$$\sin(\omega t_1 - \varphi) - e^{-\frac{1}{\omega T}(\omega t_1 - \alpha)} \sin(\alpha - \varphi) = 0. \quad (1.11)$$

În funcție de semnul diferenței $(\alpha - \varphi)$, se disting mai multe cazuri.

a) $\varphi \leq \alpha \leq \pi$

În acest caz, $\sin(\alpha - \varphi) \geq 0$ și ecuația (1.11) arată că $\sin(\omega t_1 - \varphi) \geq 0$, deci $\omega t_1 \leq \pi + \varphi \leq \pi + \alpha$. Se obține că, momentul t_1 al blocării lui T_1 este anterior momentului $(\pi + \alpha)/\omega$ al intrării în conducție a lui T_2 .

Formele de undă (fig. 1.5), evidențiază că:

- pentru $\alpha = \varphi$, fiecare tiristor conduce câte o semiperioadă și VTA funcționează cu undă plină; această situație constituie limita regimului de curent întrerupt;
- pentru $\alpha > \varphi$, VTA funcționează în regim de curent întrerupt.



În concluzie, inductivitatea sarcinii determină reducerea intervalului de variație a unghiului de comandă α la $[\varphi, \pi]$, în vederea reglării valorii efective a tensiunii pe sarcină de la maximul său la zero.

b) $\alpha < \varphi$

Cu această condiție, ținând seama de ecuația (1.11), $\sin(\omega t_1 - \varphi) < 0$, deci $\omega t_1 > \pi + \varphi >$

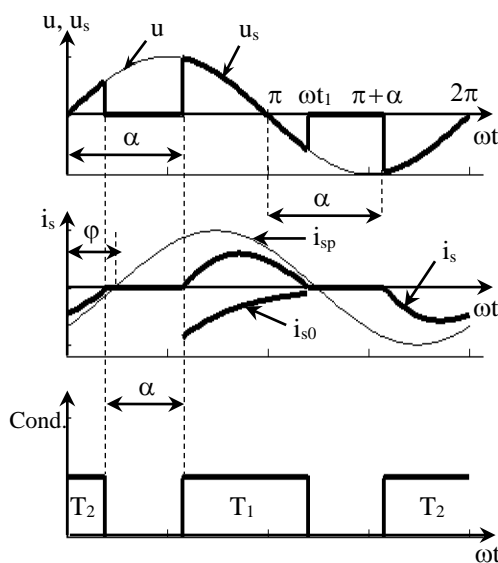


Fig. 1.5 Formele de undă corespunzătoare unui VTA monofazat, cu sarcină R-L, pentru cazul $\alpha > \varphi$

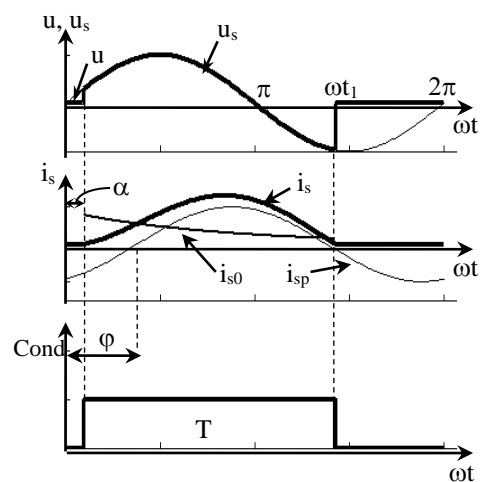


Fig. 1.6 Formele de undă corespunzătoare unui VTA monofazat, cu sarcină R-L, pentru cazul $\alpha < \varphi$ și comandă prin impulsuri unice de scurtă durată