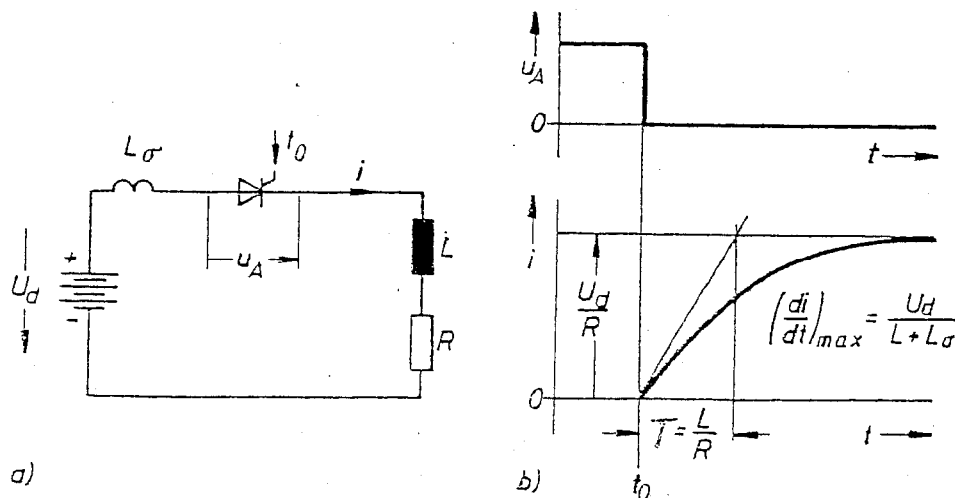


## 10 PRETVORNIKI S PRISILNO KOMUTACIJO (LASTNO VODENI PRETVORNIKI)

Do sedaj smo obravnavali omrežno vodene in bremensko vodene pretvornike. Potrebno komutacijsko napetost je pri tem zagotavljalo omrežje oziroma breme. Lastno vodeni pretvorniki za komutacijo ne potrebujejo nobenega tujega izvora izmenične napetosti. Komutacijsko napetost, ki omogoča izklop tiristorja in prehod toka v drugo tokovno vejo, pri teh pretvornikih zagotavlja običajno nek akumulator energije (npr. kondenzator), ki pripada pretvorniškemu vezju, ali pa so tokovni ventili takšni, ki jih lahko izklapljamemo preko krmilne elektrode (bipolarni trans., IGBT, GTO, MOSFET).

Lastno vodeni pretvorniki omogočajo izvedbo vseh vrst pretvorb energije in pretok le-te v obeh smereh, t.j. od izvora do porabnika in nazaj.

### 10.1 Vklapljanje enosmernega tokokroga



Slika 10.1: Vklapljanje enosmernega tokokroga: a) Vezje; b) Potek napetosti in toka

Primer vklopa enosmernega tokokroga s pomočjo tiristorja kaže slika 10.1. Poleg vezja je prikazan tudi potek napetosti in toka, če je breme ohmsko-induktivno.

Neposredno po vklopu tiristorja v času  $t_0$ , velja diferencialna enačba:

$$(L + L_{\sigma}) \frac{di}{dt} + R \cdot i = U_d$$

Rešitev te enačbe je eksponencialni časovni potek bremenskega toka s časovno konstanto

$$T = \frac{(L_{\sigma} + L)}{R}$$

in končno vrednostjo  $U_d/R$ . Maksimalna hitrost porasta toka je takoj po vklopu in znaša  $U_d/(L_{\sigma} + L)$ . V splošnem je bremenska induktivnost takšna, da to strmino omeji na dopustno vrednost za ventil. Če pa imamo opravka z ohmskim bremenom z brezinduktivnimi dovodi pa moramo z dodatnimi induktivnostmi poskrbeti, da strmino toka omejimo.

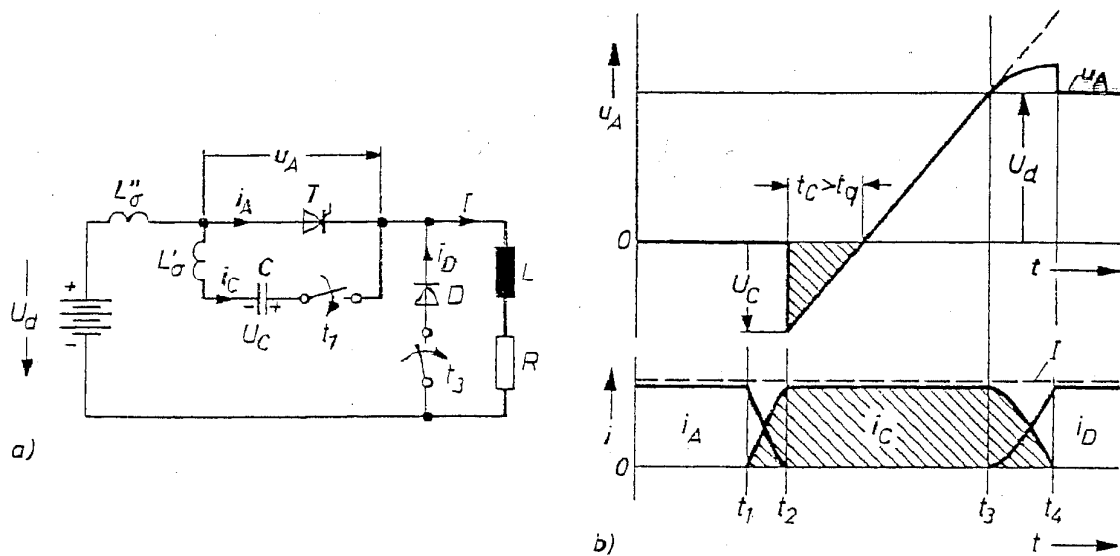
## 10.2 Izklop enosmernega tokokroga

Enosmerni tokokrog s tiristorjem lahko izklapljammo ob pomoči posebnih komutacijskih vezij, ki poskrbijo za to, da tiristorju najprej upade tok pod vrednost držalnega toka in je potem še določen čas reverzno polariziran.

Izklop s tranzistorjem v tokokrogu je enostaven. To izvedemo preko krmilne elektrode. Potek izklopa in pa probleme preklopnih izgub smo obdelali že v poglavju o tranzistorjih.

### Izklapljanje s kondenzatorjem

Primer izklapljanja tiristorja v enosmernem tokokrogu s pomočjo kondenzatorja je prikazan na sliki 10.2.



Slika 10.2: Izklapljanje s kondenzatorjem a) vezje  
b) potek toka in napetosti.

Predpostavimo, da je na kondenzatorju naboj narisane polaritete. Če v času  $t_1$  vklopimo pomožno stikalo (to je običajno izvedeno s pomožnim tiristorjem), zaradi napetostnih pogojev tok v kratkem času komutira iz tiristorja v kondenzatorsko vejo. Porast toka v kondenzatorski veji oziroma upadanje toka v tiristorju določajo stresane induktivnosti obeh vej. Največja hitrost porasta toka je:

$$\left[ \left( \frac{di}{dt} \right) \right]_{\max} = \frac{U_C}{L_{\sigma}}$$

Če je  $L_{\sigma}$  zelo majhna, potem lahko tokovna strmina ogroža pomožni tiristor, zato je potrebno to strmino omejiti z dodatnimi induktivnostmi v kondenzatorski veji.

V času  $t_2$  je prvi komutacijski korak zaključen. Zaradi velike strmine upadanja toka skozi glavni tiristor se tok ne prekine ob prehodu skozi ničlo, pač pa teče nekaj časa zaradi preostalih nosilcev naboja še v reverzni smeri in se šele nato s precejšnjo strmino prekine in pade na vrednost nič. To vemo iz obnašanja tiristorja.

Po izklopu tiristorja teče bremenski tok, ki je zaradi relativno velike  $L$  praktično nespremenjen, preko kondenzatorske veje, kar pomeni postopno prepolarizacijo kondenzatorja  $C$ . Na tiristorju je negativna napetost, dokler se kondenzator ne izprazni. Ta čas negativne napetosti  $t_c$  je varnostni čas, ki mora biti večji od časa sprostitve  $t_q$ , da tiristor zanesljivo izklopi in potem lahko prevzame zopet blokirno napetost.

Po času  $t_3$  postane napetost na kondenzatorju večja od napajalne. S tem se začne drugi komutacijski korak v katerem se bremenski tok  $I$  preseli v prostotečno diodo  $D$  (to je prikazano z vklopom stikala v času  $t_3$ ). Prehod toka se vrši do časa  $t_4$ . Od tam naprej bremenski tok upada po eksponencialni krivulji, katere potek določa značaj bremena.

$$i = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t-t_4}{L/R}}$$

Prekinitev toka skozi tiristor pomeni izklop napajalne napetosti, bremenski tok pa teče naprej skozi prostotečno diodo D.

### Izračun komutacijskega kondenzatorja

Po prekinitvi toka skozi tiristor v času  $t_2$  leži na njem za čas  $t_c$  zaporna napetost. Ta čas imenujemo varnostni čas. Pod predpostavko, da je kondenzatorski (prepolarizacijski) tok konstanten in enak bremenskemu toku, lahko čas  $t_c$  izračunamo iz enačbe:

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{i_c}{C} = \frac{\Delta u_c}{t_c} \quad \Delta u_c = U_c$$

$$t_c = \frac{CU_c}{I}$$

Od tod dobimo za vrednost kapacitivnosti C

$$C = \frac{It_c}{U_c}$$

Ob pogoju  $t_c > t_q$  dobimo potreben komutacijski kondenzator. I je pri tem maximalen enosmerni tok,  $U_c$  pa najmanjša kondenzatorska napetost.

Pri mnogih komutacijskih vezjih je napetost kondenzatorja kar enaka enosmerni napajalni napetosti  $U_d$ . Varnostni čas pa mora biti za varnostni faktor 1,3 do 1,5 večji od  $t_q$  tiristorja, ki ga želimo izklapljati.

Vidimo, da sta varnostni čas in s tem zahtevana kapacitivnost proporcionalna sprostitvenemu času. Za lastno vodene pretvornike so torej primerni hitri tiristorji (F-tiristorji ali inverterski tiristorji), katerih sprostitveni čas je krajši od 60  $\mu$ s.

### Nastavljalniki enosmernega toka

Opisano polprevodniško stikalo pa se ne uporablja le za občasen vklop in izklop enosmernega toka. Če ga periodično preklapljam z neko višjo (KHz) stikalno frekvenco, lahko na ta način spreminjamo pretok energije od nekega izvora do porabnika. Tak usmernik imenujemo nastavljalnik enosmernega toka. Stikalno frekvenco s katero prožimo glavni in pomožni tiristor pa imenujemo pulzno frekvenco  $f_p$ . Takšni nastavljalniki enosmernega toka so osnova za vse enosmerne presmerneke.

### Potek napetosti in toka

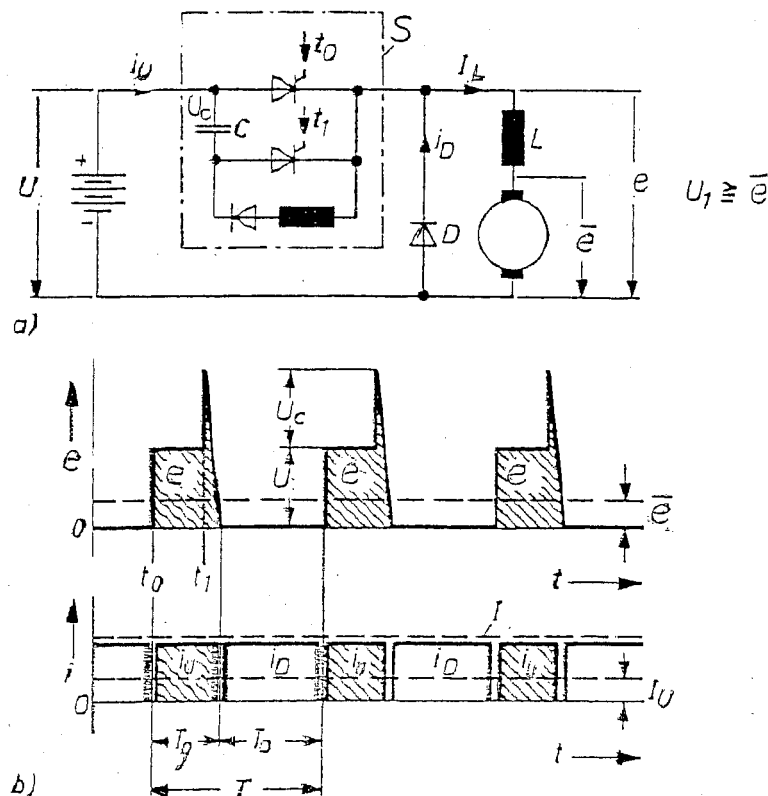
Osnovno vezje ter potek napetosti in toka pri nastavljalniku enosmernega toka je na sliki 10.3. Bremenska stran je priključena na enosmerni in konstantni napetosti preko tiristorskega stikala. Tiristorsko stikalo ima komutacijsko vezje, ki ga sestavlja komutacijski kondenzator in pomožni tiristor. Zraven je še zaporna dioda in induktivnost preko katere se pri ponovnem vklopu glavnega tiristorja kondenzator prepolarizira v stanje, da je zopet sposoben izklopiti glavni tiristor. Na bremenski strani imamo zelo veliko induktivnost  $L$  in prostotečno diodo  $D$ .

### Relativni prevajalni čas

Tako opremljen tiristor predstavlja vklopljivo in izklopljivo polprevodniško stikalo  $S$ . Ima torej enako sposobnost kot preko krmilne elektrode izklopljivi tranzistorji ali GTO.

Če to stikalo periodično vklopljamo (čas  $t_0$ ) in izklopljamo (čas  $t_1$ ), dobimo na bremenu napetostne bloke  $u_2$ , katerih višina je enaka enosmerni napajalni napetosti, širina pa času vklopljenega stanja stikala  $S T_g$ .

V trenutkih izklopa nastopijo na bremenski strani dodatne napetostne konice zaradi kondenzatorja, ker je ta ob vklopu pomožnega tiristorja vezan v serijo z napajalno napetostjo.



Slika 10.3: Nastavljalnik enosmernega toka a) vezje b) poteki napetosti in tokov

Relativni prevajalni čas ob periodičnem preklapljanju stikala S lahko definiramo z izrazom:

$$\tau_g = \frac{T_g}{T_g + T_o} = \frac{T_g}{T}$$

Srednja vrednost enosmerne napetosti na bremenu:

$$\bar{e} = \frac{1}{T} \int_0^T e(t) dt = \frac{T_g}{T_g + T_o} U$$

Pri popolnem glajenju toka ima breme vrednost toka  $I_L$ , iz vira pa tečejo tokovni prekati, katerih srednja vrednost je:

$$I_U = \frac{1}{T} \int_0^T i_U dt = \frac{T_g}{T_g + T_o} I_L$$

Če zanemarimo izgube lahko napišemo energijsko bilanco med vhodno in izhodno stranjo:

$$\frac{1}{T} \int_0^T U i_u dt = \frac{1}{T} \int_0^T e i_L dt$$

Če je induktivnost L zelo velika, teče na enosmerni strani konstantni tok  $I_E$ , potem iz zgornje enačbe dobimo:

$$\frac{U_1}{T} \int_0^T i_u dt = \frac{I_E}{T} \int_0^T e dt$$

in zato izražena s srednjimi vrednostmi:

$$U_1 I_U = \bar{e} I_L$$

Ob upoštevanju relativnega prevajalnega časa dobimo naslednje transformacijske enačbe:

$$\bar{e} = \frac{T_g}{T} U = \tau U$$

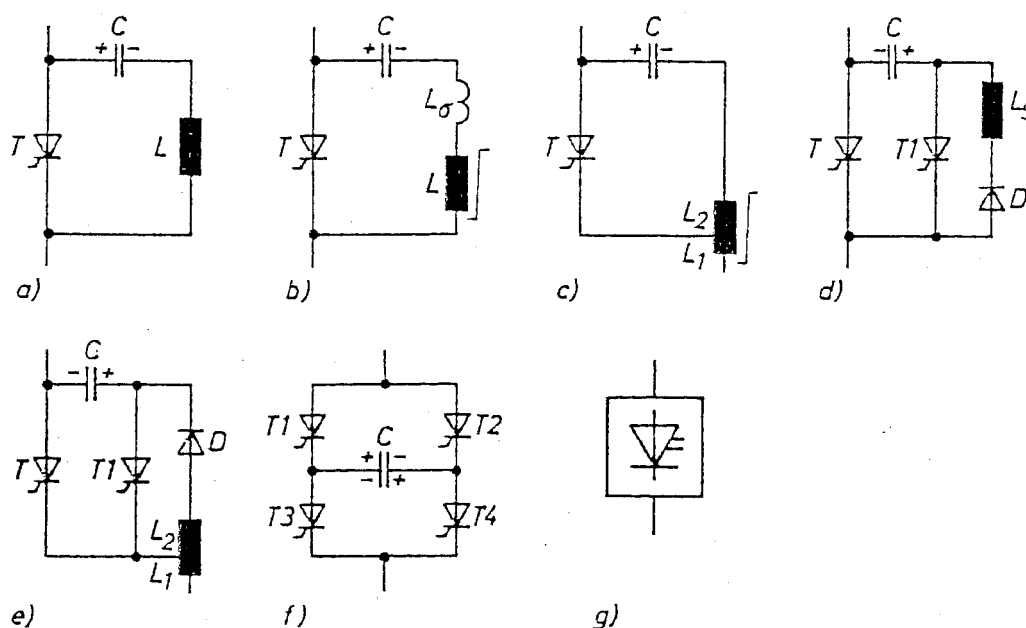
$$I_U = \frac{T_g}{T} I_L = \tau I_L$$

Te enačbe odgovarjajo enačbam za prestavno razmerje transformatorjev  $N_1/N_2$ . To razmerje je pri transformatorjih konstantno,  $\tau$  pa se pri nastavljalnikih enosmernege toka spreminja teoretično od vrednosti 0 do 1.

Pri tem gre za transformacijo tokovnih in napetostnih srednjih vrednosti. Na strani večje napetosti tečejo tokovni paketi, na drugi strani pa dobimo napetost v obliki paketov pri gladkem zveznem toku.

Zaradi tokovnih paketov iz enosmernege izvora mora biti ta podprt s kondenzatorjem.

Še nekaj primerov kondenzatorskega izklapljanja vidimo na sliki 10.4.



Slika 10.4: Različni primeri kondenzatorskega izklapljanja

Vezje a) na sliki kaže LC nihajni krog paralelno s tiristorjem. Če je kondenzator polariziran tako kot je narisano, se ob vklopu tiristorja prepolarizira in nato pri ponovni prepolarizaciji izklopi tiristor. Bremenski tok se pri tem vezju nastavlja s frekvenco vklapljanja tiristorja. Tokovni paketi so enako široki.

Vezje na sliki b) ima v nihajnem krogu še nasičeno dušilko, kar ima za posledico daljši čas prevajanja tiristorja.

V vezju c) je dušilka z odcepom, ki omogoča tokovno odvisno polnjenje kondenzatorja C.

Vezje d) smo že obravnavali. V vezju e) imamo sicer enak proces kot v vezju d). le da imamo zopet tokovno odvisno polnjenje kondenzatorja C. Pri tem moramo računati na večje potrebne zaporne napetosti tiristorjev.

Pri vezju f) prevajata bremenski tok ali  $T_1T_3$  ali  $T_2T_4$ . Z vklopom  $T_2$  prekinemo tok v  $T_1$ , z vklopom  $T_1$  pa v tiristorju  $T_2$ . Pri tem vezju vsaka prepolarizacija prekine bremenski tok. Kondenzator je pri tem obremenjen le s polovico pulzne frekvence bremenskega toka.

Na sliki f) pa imamo simbol takšnega vklopljivega in izklopljivega polprevodniškega stikala S.

## 10.3 Lastno vodeni razsmerniki

Te vrste naprav bodo podrobneje obravnavane v poglavju o direktnih pretvornikih energetske elektronike. Na tem mestu si oglejmo le nekaj primerov, ki so izvedeni s tiristorji. Njihova značilnost je, da potrebujejo posebno komutacijsko vezje s komutacijskim kondenzatorjem.

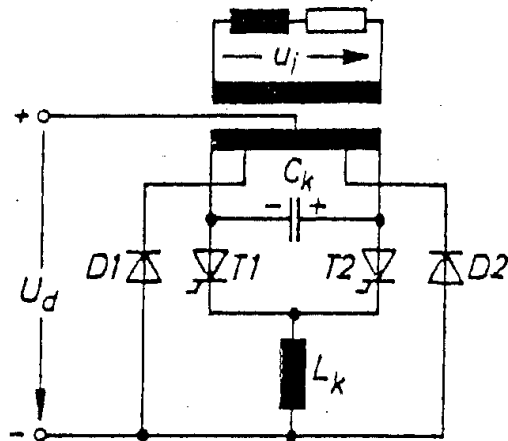
### 10.3.1 Enofazni lastno vodeni razsmerniki.

Najprej si oglejmo paralelni razsmernik v enofaznem vezju s srednjim odcepom na transformatorju. Vezje je na sliki 10.5. Komutacijski kondenzator je vezan paralelno med oba tiristorja. To vezje je predlagal Alexanderson že leta 1923. Pred tem so se uporabljala podobna vezja z mehanskimi preklopniki za pozivne naprave v telefoniji. Od kar je Petersen vpeljal še povratne diode, je to vezje sposobno napajati mešana ohmsko-induktivna ali ohmsko-kapacitivna bremena. Komutacijska dušilka je za impedančno ločenje tiristorjev od povratnih diod.

Pri ohmsko-induktivnih bremenih poteka komutacijski prehodni pojav v več korakih. Če predpostavimo, da prevaja tok tiristor  $T_1$ , potem pri vklopu tiristorja  $T_2$  kondenzator C narisane polaritete ta tok prekine. Bremenski tok teče skozi kondenzator in  $T_2$ , s čimer se kondenzator prepolarizira. Ko postane napetost na kondenzatorju večja od  $2U_d$  (srednji odcep je takrat na  $U_d$ ), komutira tok iz  $T_2$  na diodo  $D_2$ . Tok na emosmerni strani je s tem spremenil smer (predpostavljamo ohmsko induktivno breme), kar pomeni vračanje energije v enosmerni vir. Ko pa končno tudi na izmenični strani tok obrne smer, pade tok diode  $D_2$  na nič in prične naraščati skozi tiristor  $T_2$ . Naslednja komutacija se prične z vklopom  $T_1$ .

Povratni diodi  $D_1$  in  $D_2$  sta na transformatorju vezani na odcepe in ne na sponke zato, da ne more priti do krožnega toka v tokokrogu  $T_1D_1L_k$  ali  $T_2D_2L_k$ .



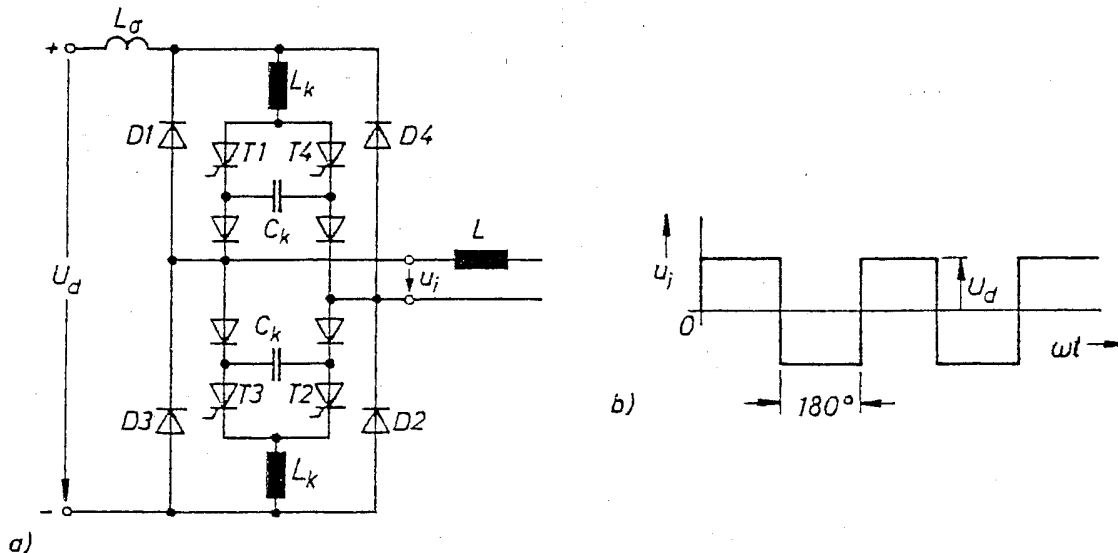


Slika 10.5: Paralelni razsmernik v enofaznem vezju s srednjim odcepom

Pri prestavnem razmerju transformatorja  $N_1/N_2=1$  dobimo amplitudno vrednost napetosti na izmenični strani, ki je pravokotne oblike,  $U_i=2U_d$ . Efektivna vrednost osnovne harmonske izmenične napetosti je:

$$U_{vi} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} U_d$$

Komutacijski kondenzator lahko pri negativni protinapetosti na izmenični strani izgubi del naboja po končani prepolarizaciji na  $2U_d$ . Da to preprečimo, vgradimo v vezje dodatne zaporne diode proti transformatorju.



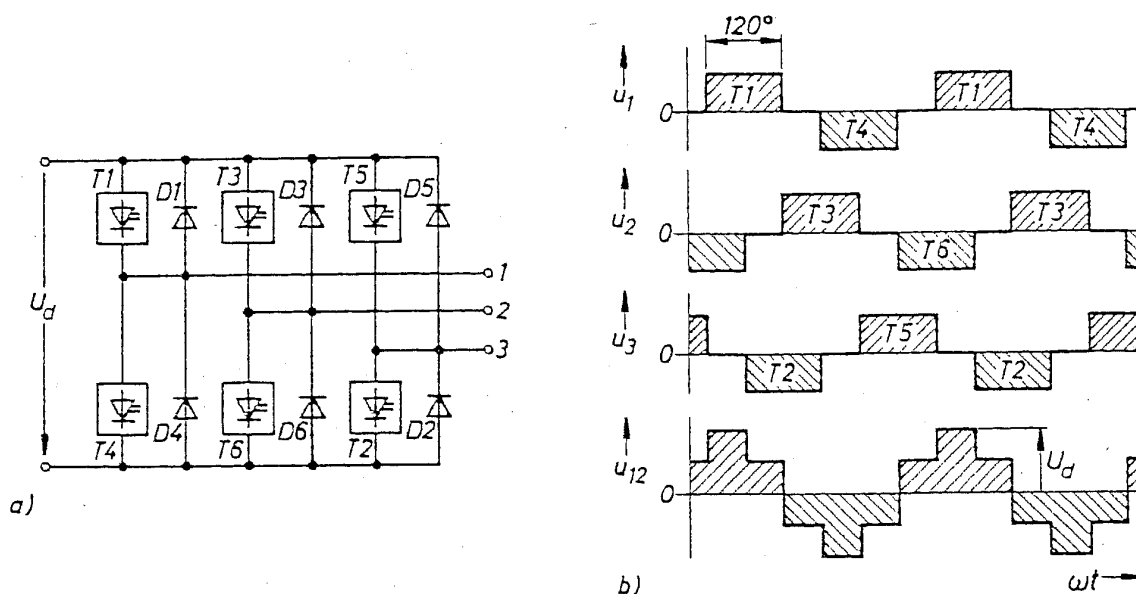
Slika 10.6: Paralelni razsmernik v enofaznem mostičnem vezju

Na sliki 10.6 imamo primer enofaznega paralelnega razsmernika v dvopulznem mostičnem vezju. Povratna dioda tudi tukaj omogoča na izmenični strani tokove, ki so fazno premaknjeni glede na napetost. Zaporne diode pa preprečujejo praznjenje kondenzatorjev. Napetost na izmenični strani je pravokotne oblike. Pri  $U_i = U_d$  je efektivna vrednost osnovne harmonske komponente

$$U_{li} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_d$$

### 10.3.2 Večfazni lastno vodeni razsmerniki

Te vrste pretvorniki so namenjeni zlasti elektromotorskim pogonom z asinhronskimi in sinhronskimi motorji. Primer takšnega pretvornika v trifaznem mostičnem vezju, ki je vklapljan z osnovno frekvenco je na sliki 10.7.

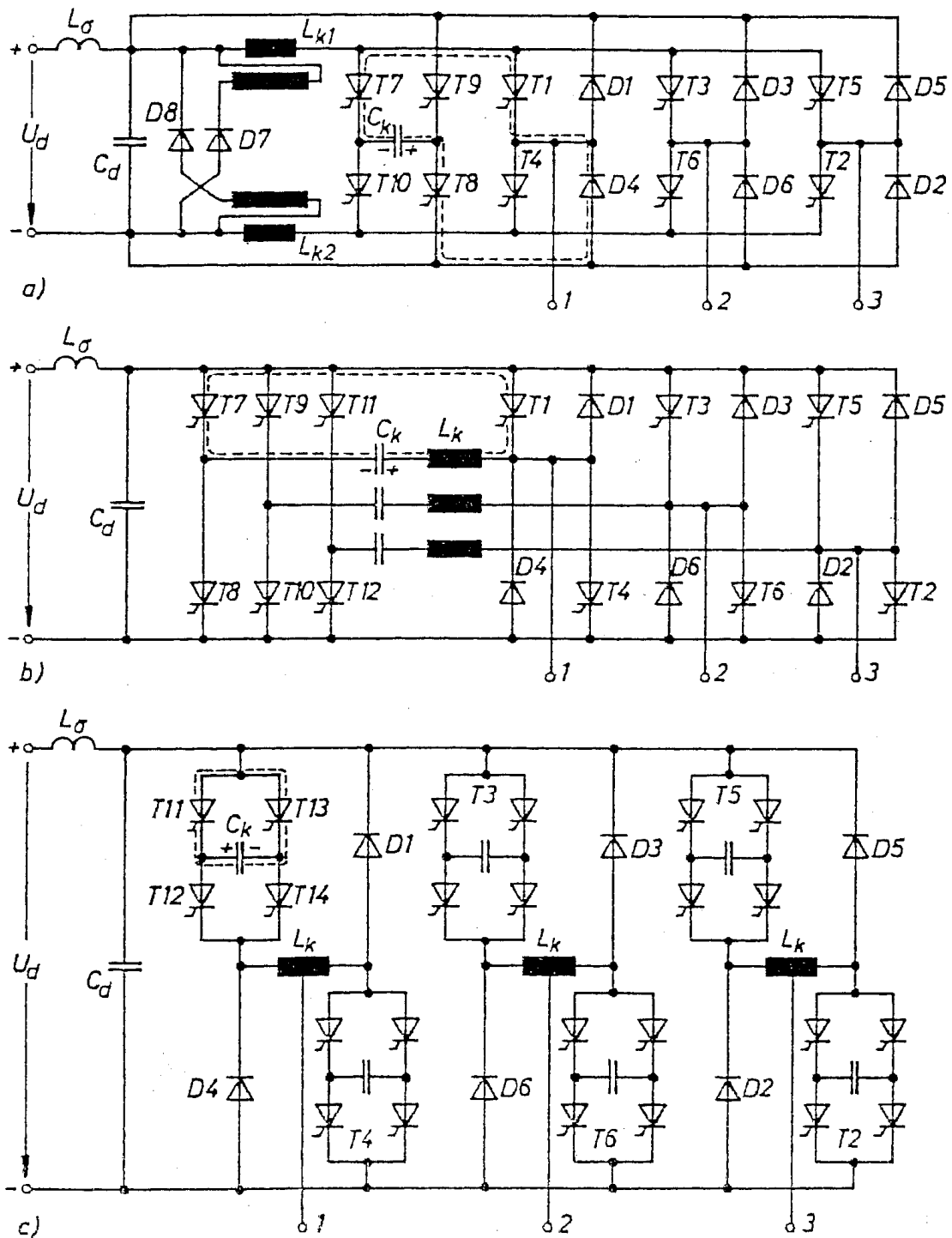


Slika 10.7: Vezje in časovni potek izhodnih napetosti pri trifaznem mostičnem razsmerniku

Izhodna napetost je trifazna simetrična kot jo kaže slika 10.7.b.

Efektivna vrednost fazne napetosti je

$$U_{li} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_d$$



Slika 10.8: Različna komutacijska vezja

- a) centralno izklapljanje
- b) fazno izklapljanje
- c) posamično izklapljanje

Efektivna vrednost osnovne harmonske komponente pa je

$$U_{li} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_d$$

Komutacijo v trifaznem razsmerniku s tiristorji lahko zagotovimo z različnimi komutacijskimi vezji.

Tako kot pri paralelnem razsmerniku, koder naslednji prevajajoči tiristor izklopi predhodnega, imamo tudi pri trifaznem razsmerniku t.i. fazno zaporedno izklapljanje.

Na sliki 10.8 pa imamo še tri primere komutacijskih vezij. Če vseh šest tiristorjev komutiramo z enim samim komutacijskim vezjem, govorimo o centralnem izklapljanju (skupno izklapljanje).

Pri faznem izklapljanju izklapljamo izmenično zgornji in spodnji tiristor vsake faze z enim komutacijskim kondenzatorjem in dvema pomožnima tiristorjema. Torej skupaj trije kondenzatorji in šest tiristorjev.

Lahko pa imamo komutacijsko vezje za vsak tiristor posebej. Tedaj govorimo o posamičnem izklapljanju.

<b>10</b>	<b>PRETVORNIKI S PRISILNO KOMUTACIJO (LASTNO VODENI PRETVORNIKI) .....</b>	<b>148</b>
10.1	Vklapljanje enosmernega tokokroga .....	148
10.2	Izklop enosmernega tokokroga.....	149
10.3	Lastno vodeni razsmerniki .....	155
10.3.1	Enofazni lastno vodeni razsmerniki .....	155
10.3.2	Večfazni lastno vodeni razsmerniki .....	157