

## 7 TUJE VODENI PRETVORNIKI

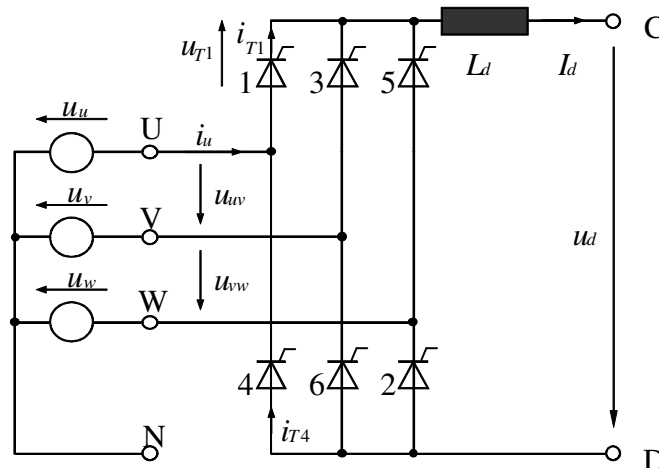
Pod tem naslovom bomo obravnavali pretvornike, ki kot stikalne elemente uporabljajo tiristorje, za takt delovanja in komutacijo pa skrbi bodisi

- omrežje – omrežno vodeni pretvorniki ali
- breme – bremensko vodeni pretvorniki.

### 7.1 Omrežno vodeni pretvorniki

Delovanje tuje vodenih pretvornikov si bomo razložili na primeru trifaznega mostičnega vezja. Vezje je prikazano na sl.7.1. Pred analizo delovanja privzemimo nekaj predpostavk, ki nam bodo delo olajšale:

- v vezju so idealni tiristorji,
- tok na enosmerni strani je popolnoma gladek  $L_d = \infty$ ,  $I_d = \text{konst.}$ ,
- trifazni vir napetosti je idealen brez notranjih upornosti.

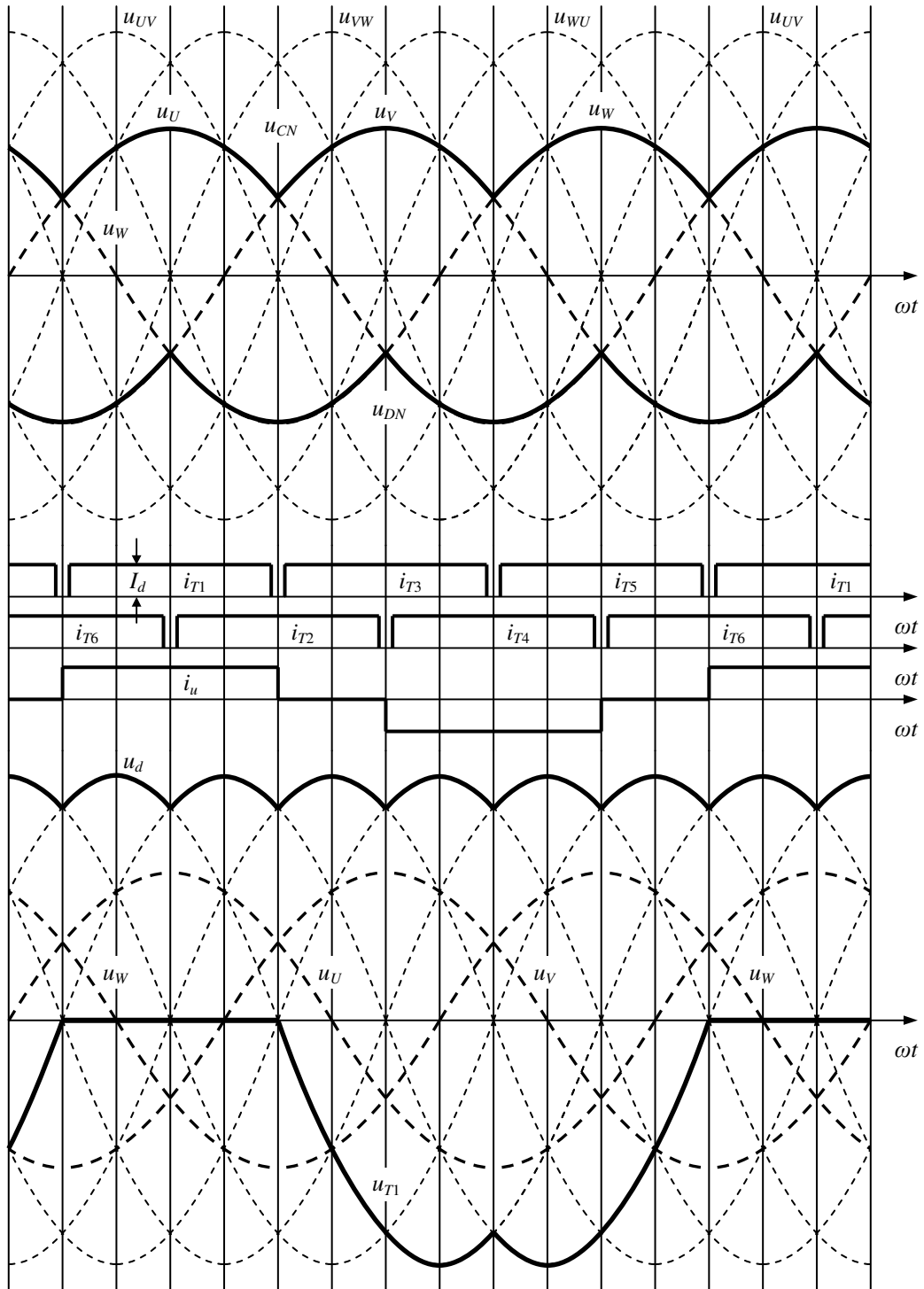


Slika 7.1: Trifazno mostično vezje

Tok  $I_d$  na enosmerni strani prevaja zgornja tiristorska grupa (1,3,5) tako, da vsak tiristor pri kotu proženja  $\alpha = 0$  prevaja interval  $2\pi/3$  periode in sicer takrat, ko je napetost na pripadajoči fazi višja od sosednjih.

Za zgornjo tiristorsko grupo je to:

Tiristor 1	$\pi/6 < \omega t < 5\pi/6$	$u_{CN} = u_U$
Tiristor 3	$5\pi/6 < \omega t < 9\pi/6$	$u_{CN} = u_V$
Tiristor 5	$9\pi/6 < \omega t < (2\pi+\pi/6)$	$u_{CN} = u_W$



Slika 7.2: Časovni potek električnih veličin s sl.7.1

Časovni potek električnih veličin s sl.7.1 je na sl.7.2. Slika se prične pri prehodu napetosti faze  $u_U$  skozi nič.

Napetost  $U_{CN}$ , ki predstavlja potencialno razliko med točko C in N je sestavljena iz vsakokratne najvišje fazne napetosti omrežja.

Za spodnjo tiristorsko grupo velja podobno, le da prevaja vsakokrat tisti tiristor, katerega napetost je trenutno najnižja. Prehodi toka iz enega tiristorja na drugega so glede na zgornjo grupo premaknjeni za  $\pi/3$ .

Tabela:

Tiristor 2	$3\pi/6 < \omega < 7\pi/6$	$u_{DN} = u_W$
Tiristor 4	$7\pi/6 < \omega < 11\pi/6$	$u_{DN} = u_U$
Tiristor 6	$11\pi/6 < \omega < (2\pi+3\pi/6)$	$u_{DN} = u_V$

Na sliki 7.2 je to prikazano s tiristorskimi tokovi. Kot primer je prikazan tudi tok ene faze omrežja

$$i_U = i_{T1} - i_{T4}$$

Takšna oblika toka je možna ob predpostavljenih idealnih razmerah (brez induktivnosti na izmenični strani). Enosmerno napetost  $u_d$  dobimo med sponkama C in D. Njeno trenutno vrednost lahko določimo po sliki 7.1, kjer so razvidna stanja obeh tiristorskih grup in sicer glede na trenutno vrednost napetosti  $u_{CN}$  in  $u_{DN}$

$$u_d = u_{CD} = u_{CN} - u_{DN}$$

kar predstavlja vsakokratno največjo trenutno medfazno napetost.

Na sliki 7.2 je ta sestavljena iz odsekov sinusoide medfaznih napetosti, ki se menjajo v intervalih  $\pi/3$ . Na sliki 7.2 vidimo tudi primer napetosti enega tiristorja in sicer  $u_{T1}$ . Na osnovi idealiziranih predpostavk velja:

v intervalu, ko prevaja $i_{T1} = I_d$	$u_{T1} = 0$
v intervalu, ko prevaja $i_{T3} = I_d$	$u_{T1} = u_{UV}$
v intervalu, ko prevaja $i_{T5} = I_d$	$u_{T1} = -u_{WV}$

V šestpulznem mostičnem vezju se izmenjujejo v prevajanju toka tiristorji zgoraj 1,3,5 in spodaj 2,4,6. Takšno grupo, ki si izmenjuje enosmerni tok med seboj imenujemo **komutacijsko grupo**. S komutacijskim številom  $q$  označujemo število komutacij v eni ventilski grupi. V primeru šestpulznega mostičnega vezja znaša komutacijsko število  $q = 3$ .

Ker obe komutacijski grupi komutirata s časovnim zamikom, se spreminja topologija vezja vsakih  $\pi/3$ . Število neistočasnih komutacij v času ene periode izmenične napetosti znaša v tem primeru 6. To število imenujemo **pulzno število**, ki se uporablja za oznako vezja. Vezje na sliki 7.1 je torej šestpulzno mostično vezje.

V šestpulznem mostičnem vezju sta, gledano iz enosmerne strani, dve komutacijski grupi, ki sta vezani v serijo. V splošnem označujemo **število komutacijskih grup, ki ne komutirajo istočasno** s črko  $s$ .

Obstajajo tudi vezja, katerih grupe so vezane paralelno. Število teh označujemo s črko  $r$ . Pulzno število nekega usmernika lahko izračunamo iz komutacijskega števila  $q$ , števila  $v$  v serijo vezanih grup  $s$  in števila **paralelnih grup**  $r$ :

$$p = q \cdot s \cdot r$$

Aritmetično srednjo vrednost usmerjene napetosti lahko ob upoštevanju predpostavljenih idealnih razmer (idealni tiristor, simetrična sinusna trifazna napetost, idealen prehod toka med ventili) izračunamo z integracijo preko enega intervala. Izhodišče postavimo na sredino opazovanega intervala, katerega napetost sledi enačbi:

$$u_{UV} = \sqrt{2}U \cos \omega t$$

Pri krmilnem kotu  $\alpha = 0$  je srednja vrednost napetosti na izhodu šestpulznega mostičnega vezja:

$$U_{di} = \frac{1}{\pi/3} \cdot \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2}U \cos \omega t \cdot d\omega t \qquad U_{di} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2}U = 1,35 \cdot U$$

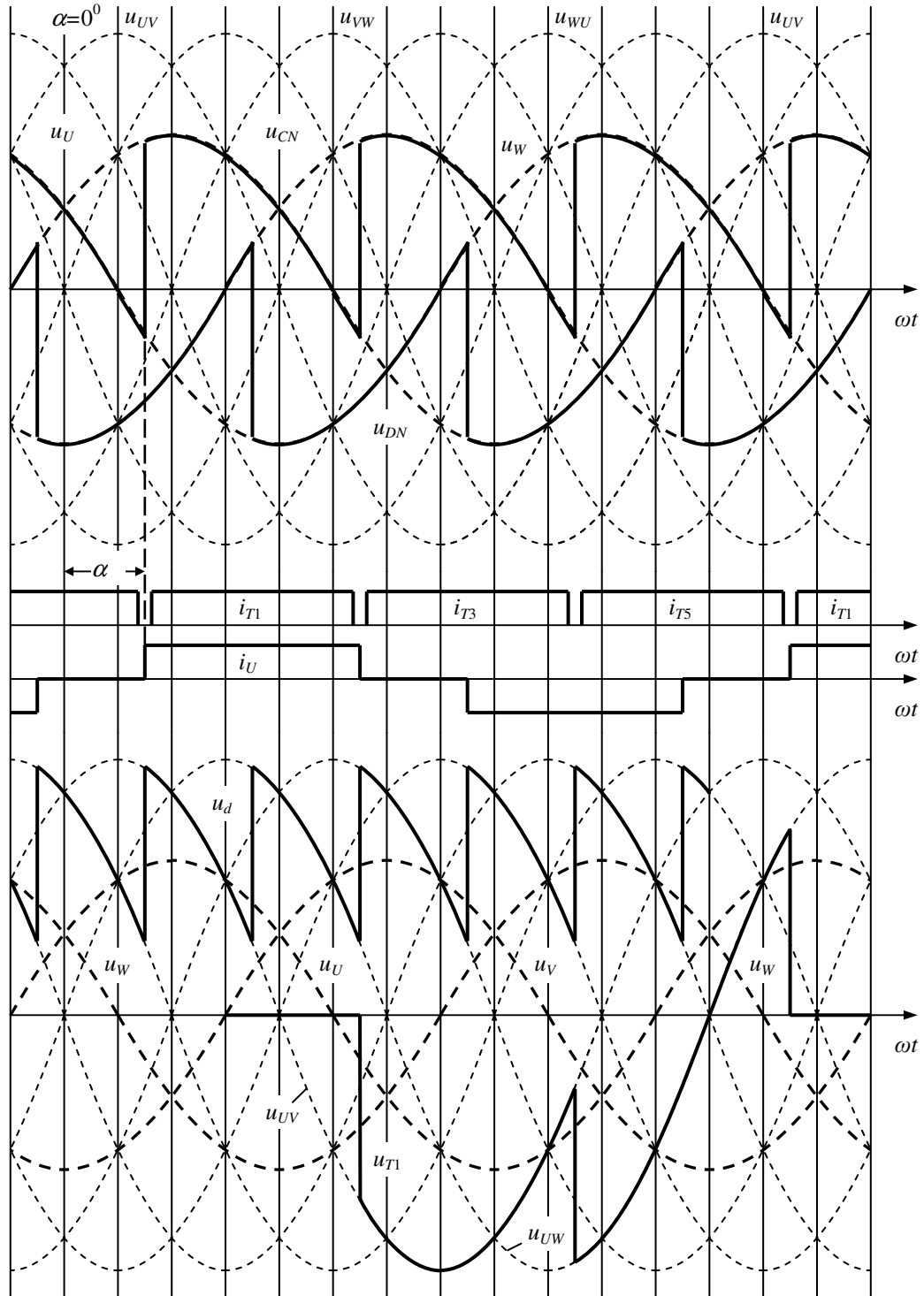
$U$  je pri tem efektivna vrednost medfazne napetosti trifaznega sistema.

Če v vezju s slike 7.1 krmilni kot  $\alpha$  spreminjamo, lahko vplivamo na aritmetično srednjo vrednost usmerjene napetosti. Lastnost tiristorja, da lahko v prevodni smeri blokira napetost in vklopi šele pri neki krmilni napetosti na prožilni elektrodi G, nam omogoča zakasnitev prehoda toka iz enega ventila na drugega. Če bi imeli v vezju diode, se to zgodi takrat, ko fazna napetost prevajajoče diode postane nižja od tiste, ki prevzame tok. Temu trenutku imenujemo **trenutek naravne komutacije**. Tiristor pa lahko vklopimo kadarkoli od tega trenutka dalje, če ima med anodo in katodo pozitivno napetost.

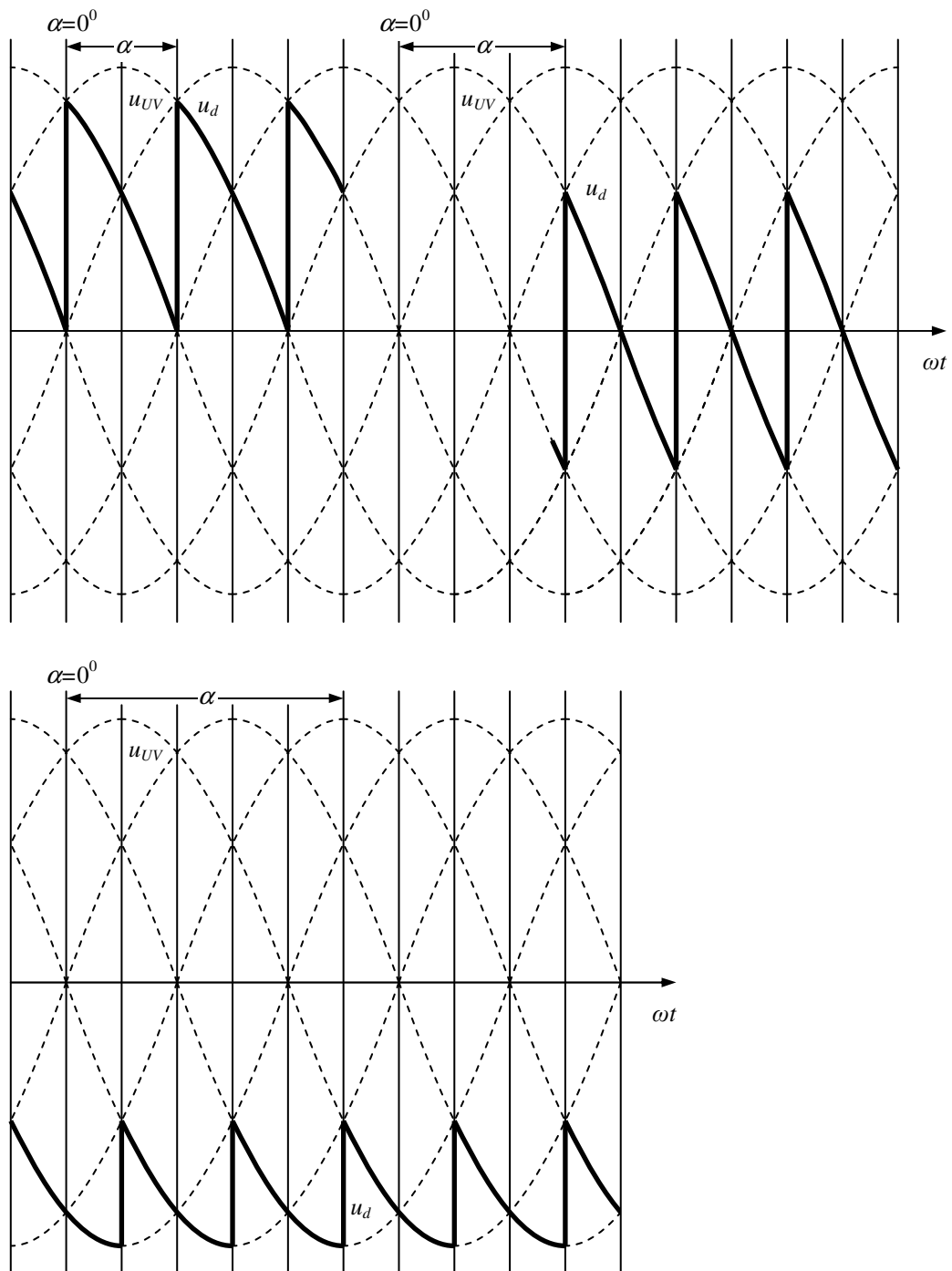
Delovanje tega načina krmiljenja izhodne usmerjene napetosti, ki ga imenujemo **fazno krmiljenje**, je razloženo na sliki 7.3. Tiristorje prožimo vsakokrat za kot  $\alpha$  premaknjeno glede na kot naravne komutacije ( $\alpha = 0$ ), kar je primer, če so v vezju diode. Ker je prehod toka še vedno idealen (brez zakasnitve) in je tok  $I_d = \text{konst.}$ , tokovi  $i_{T1}$ ,  $i_{T3}$ ,  $i_{T5}$  obdržijo enako obliko. V primerjavi z diodnim vezjem so premaknjeni za kot  $\alpha$ . Enako velja tudi za omrežni tok, ki je za kot  $\alpha$  premaknjen proti omrežni napetosti.

Usmerjena napetost se sestoji iz  $\pi/3$  dolgih odsekov medfazne napetosti. Prav tako so tudi ti odseki v primerjavi z diodnim vezjem premaknjeni za kot  $\alpha$ . Kako izgleda napetost na tiristorju za ta primer krmilnega kota pa kaže časovni potek napetosti  $U_{T1}$ .

Na sliki 7.4 vidimo obliko usmerjene napetosti še za tri primere krmilnega kota  $\alpha$ . Pri tem še vedno velja, da je tok  $I_d$  popolnoma zglajen.



Slika 7.3: Časovni poteki napetosti in tokov za fazno krmiljenje šestpulznega mostičnega vezja

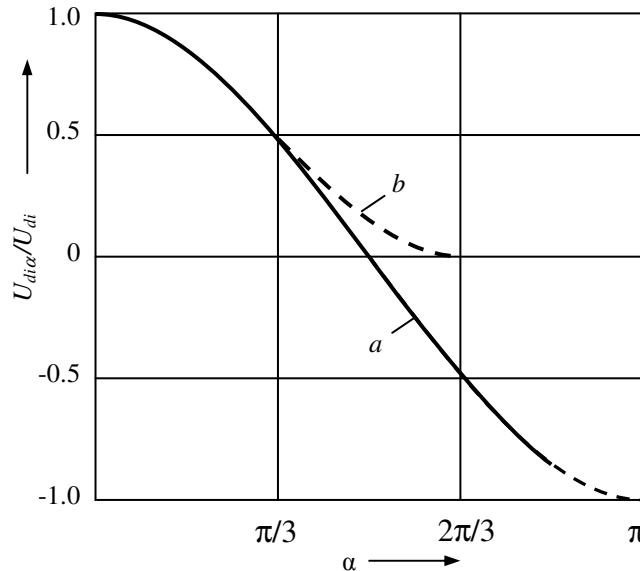


Slika 7.4: Časovni poteki usmerjene napetosti  $u_d$  pri različnih krmilnih kotih  $\alpha$

Aritmetično srednjo vrednost usmerjene napetosti pri nekem **krmilnem kotu**  $\alpha$  lahko izračunamo z integracijo enega intervala:

$$U_{di\alpha} = \frac{1}{\pi/3} \int_{-(\pi/6)+\alpha}^{+(\pi/6)+\alpha} \sqrt{2}U \cos \omega t \cdot d\omega t = \frac{3}{\pi} \sqrt{2}U \cos \alpha = U_{di} \cos \alpha$$

Odvisnost aritmetične srednje vrednosti usmerjene napetosti pri faznem krmiljenju v odvisnosti od kota  $\alpha$   $U_{di\alpha}$  je prikazana na sliki 7.5.



Slika 7.5: Krmilna karakteristika: a) induktivno breme, b) ohmsko breme

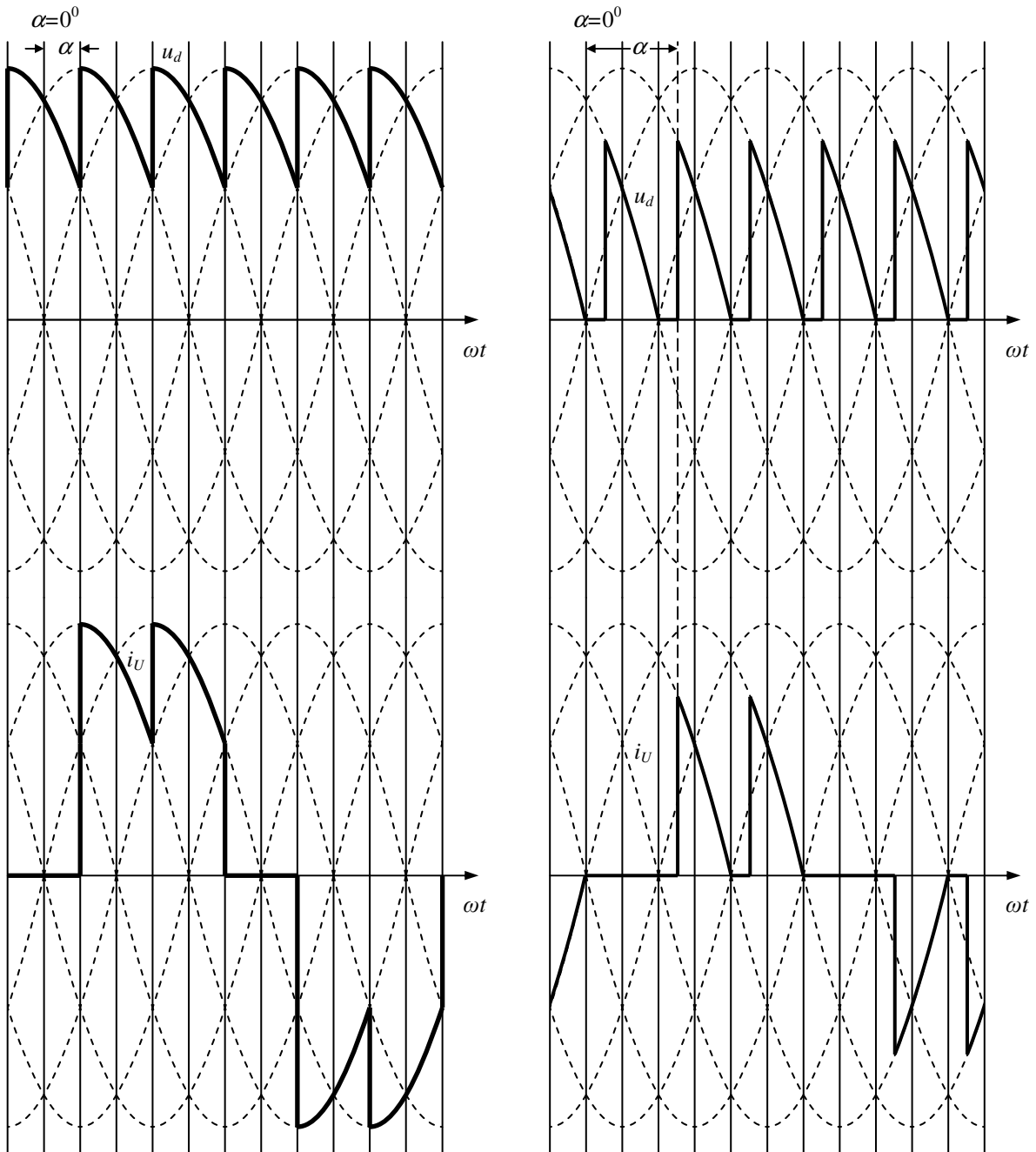
Vidimo, da je največja izhodna enosmerna napetost pri krmilnem kotu  $\alpha = 0$ , t.j. v primeru naravne komutacije, kar velja tudi za vezje, ki ima namesto tiristorjev diode. Zgornji izraz smo izpeljali ob predpostavki, da imamo idealen prehod toka iz ene veje na drugo, popolnoma zglajen enosmerni tok, simetričen trifazni sistem napetosti in simetrično krmiljenje tiristorjev.

Pri krmilnem kotu  $\alpha > \pi/2$  postane  $U_{di\alpha}$  negativna. Ker se smer toka ni spremenila pomeni, da se je spremenila smer pretoka energije. To je možno le, če je na enosmerni strani priključen nek vir enosmerne napetosti. Lahko rečemo, da dela obravnavano vezje za krmilne kote  $\alpha < \pi/2$  kot usmernik, za kote  $\alpha > \pi/2$  pa kot razsmernik.

Če imamo na enosmerni strani čisto ohmsko breme, potem so časovni poteki toka  $i_d$  in napetosti  $u_d$  enaki. Tok  $i_d$  ni glajen. To vidimo na sl. 7.6 za dva primera krmilnih kotov.

Za kot  $\alpha > \pi/3$  tok  $i_d$  ni več zvezen. Rečemo tudi, da je tok trgan. Isto velja tudi za tok na omrežni strani, kar vidimo na oscilogramu toka  $i_u$ .

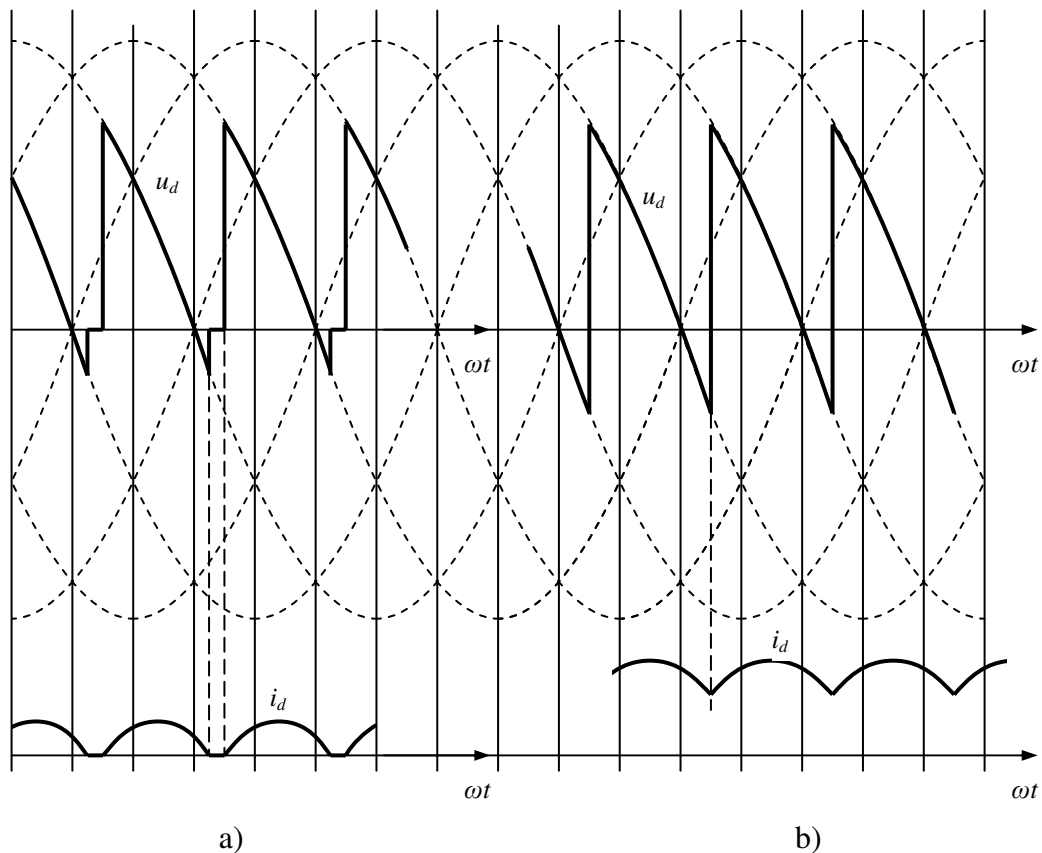
Na sliki 7.7 pa imamo nek vmesni primer, ko tok ni popolnoma zglajen. Slika 7.7a kaže oscilogram napetosti za primer, ko je induktivnost tako majhna, da je tok trgan, slika 7.7b pa primer, ko je induktivnost v enosmernem tokokrogu že tolikšna, da je tok zvezen. Ali je tok zvezen ali trgan je zelo pomembno v reguliranih elektromotorskih pogonih, saj tam trgan tok zahteva čisto drugačne regulacijsko tehnične prijeme kot pa zvezen tok.



Slika 7.6: Enosmerna napetost  $u_d$  in omrežni tok pri ohmskem bremenu

Na sliki 7.5 je prikazana tudi krmilna karakteristika  $U_{di\alpha} = f(\alpha)$  za primer čisto ohmskega bremena. Za obravnavano trifazno mostično vezje vidimo, da lahko po principu faznega krmiljenja spreminjamo izhodno napetost od maksimalne vrednosti do vrednosti nič s spremembo krmilnega kota od  $\alpha = 0$  do  $\alpha = 2\pi/3$ .



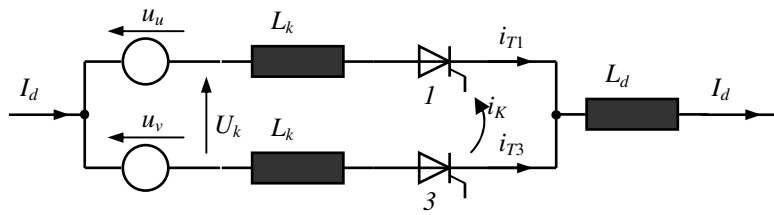


Slika 7.7: Časovni poteki  $u_d$  in  $I_d$  pri nepopolnem glajenju

## 7.2 Komutacija pri šestpulznem mostičnem vezju

Do sedaj smo obravnavali šestpulzno mostično vezje idealno, kar je pomenilo trenutni prehod toka iz enega na drugi ventil. Tokovi ventilov so imeli obliko pravokotnih blokov. Zaradi notranjih impedanc omrežja ali usmerniškega transformatorja pa v praktičnih razmerah ni tako. Realno stanje bomo prikazali z upoštevanjem induktivnosti v tokovnih vejah med katerimi pride do izmenjave toka t.j. komutacije. Ohmske upornosti so praktično zanemarljive.

Komutacijski proces bomo pojasnili na osnovi nadomestne sheme na sliki 7.8, ki zajema obravnavane tokokroge. V komutacijski induktivnosti  $L_K$  so združene vse induktivnosti ene veje. Ker je komutacijski čas zelo kratek, bomo zopet predpostavili, da je enosmeren tok v obravnavanem časovnem intervalu  $I_d = \text{konst.}$  Napetost  $u_V - u_U = u_K$  imenujemo komutacijsko napetost, saj je to napetost, ki vpliva na potek komutacije.



Slika 7.8: Nadomestna shema za izračun komutacije

Najprej si oglejmo potek komutacije pri kotu naravne komutacije ( $\alpha = 0$ ). Za komutacijsko napetost, katere potek vidimo na sliki 7.9, velja:

$$u_K = \sqrt{2}U_K \sin \omega t$$

Prehod toka s tiristorja 1 na tiristor 3 lahko za kot  $\alpha = 0$  opišemo z naslednjo enačbo:

$$u_K + L_K \frac{di_{T1}}{dt} - L_K \frac{di_{T3}}{dt} = 0$$

$$i_{T1} + i_{T3} - I_D = 0$$

z začetnimi pogoji:  $t = t_0 = 0$ ;  $i_{T1} = I_D$ ;  $i_{T3} = 0$

Ker velja:

$$-\frac{di_{T1}}{dt} = \frac{di_{T3}}{dt} = \frac{di_K}{dt} \quad i_K - \text{komutacijski tok}$$

lahko napišemo:

$$u_K = 2L_K \frac{di_K}{dt} = \sqrt{2}U_K \sin \omega t$$

Od tod je:

$$i_K = \frac{\sqrt{2}U_K}{2\omega L_K} \cdot \int_0^{\omega t} \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{\sqrt{2}U_K}{2\omega L_K} (1 - \cos \omega t)$$

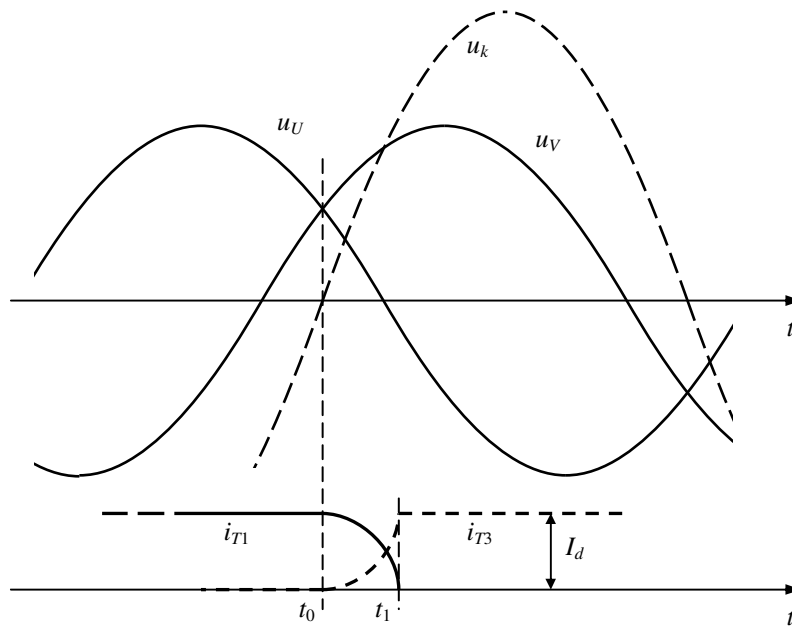
Tok tiristorja T<sub>3</sub>, ki prevzema tok, je kar enak toku  $i_K$ :

$$i_{T3} = \frac{\sqrt{2}U_K}{2\omega L_K} (1 - \cos \omega t)$$

$$i_{T1} = I_d - i_{T3} = \frac{\sqrt{2}U_K}{2\omega L_K}(\cos \omega t - 1) + I_d$$

Enačbi veljata, dokler je  $i_{T1} \geq 0$ . Ko postane  $i_{T1} = 0$  in s tem  $i_{T3} = I_d$ , je komutacijski proces končan. Na sliki 7.9 je prikazan časovni potek obeh tokov in napetostne razmere za opisan primer. Vidimo, da je komutacija trajala od časa  $t_0$  do  $t_1$ . V tem času sta prevajala tok oba tiristorja, zato ta čas imenujemo **čas prekrivanja**  $t_u$ , pripadajoč kot pa kot prekrivanja  $u$ .

$$u = \omega t_u = \omega(t_1 - t_0)$$



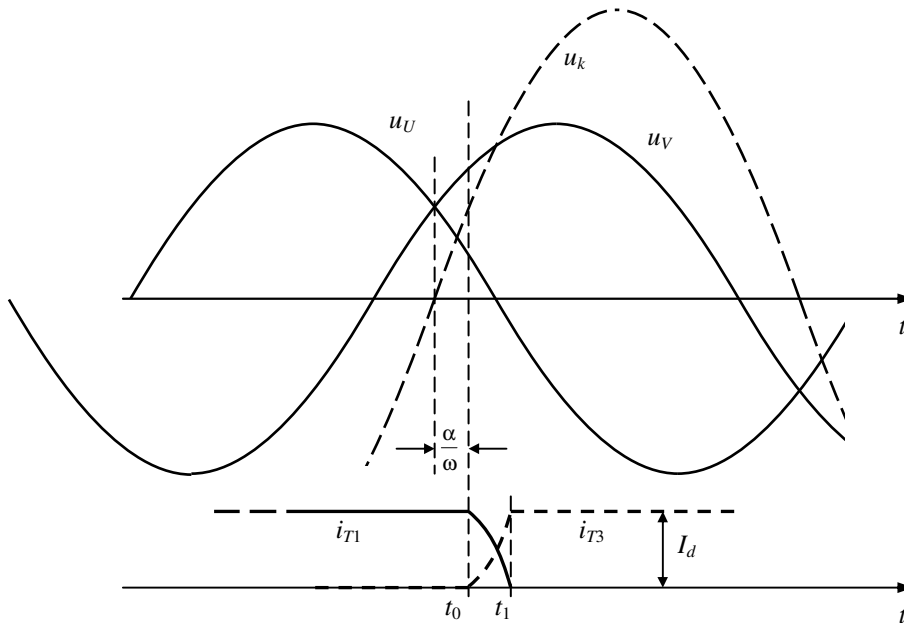
Slika 7.9: Časovni potek tokov in napetosti v komutacijskem krogu pri kotu  $\alpha = 0$

S prestavitvijo integracijskih mej pri izrazu za  $i_K$  od  $\alpha$  do  $(\alpha + \omega t)$  dobimo rešitvi za tokova obeh tiristorjev:

$$i_{T3} = \frac{\sqrt{2}U_K}{2\omega L_K}(\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha))$$

$$i_{T1} = \frac{\sqrt{2}U_K}{2\omega L_K}(\cos(\omega t + \alpha) - \cos \alpha) + I_d$$

Časovni potek veličin za ta primer je na sliki 7.10.



Slika 7.10: Časovni poteki tokov in napetosti med komutacijo pri krmilnem kotu  $\alpha$  različnem od nič

Na sliki 7.11 lahko vidimo komutacijske razmere pri različnih krmilnih kotih. Tok  $i_{K0}$  na sliki je tok, ki bi ga poganjala napetost  $u_K$  v komutacijskem tokokrogu, če v njem ne bi bilo ventilov. Pri vsakem krmilnem kotu imamo drugačno obliko časovnega poteka komutacijskega toka, saj se komutacijski proces vrši pod drugačnimi napetostnimi pogoji, ki so razvidni v zgornjem delu slike. V času komutacije se ena komutacijska induktivnost izprazni, druga pa napolni, za kar je potrebna pri vseh krmilnih kotih  $\alpha$  enaka napetostno časovna ploskev (šrafirano). To velja, če je  $I_d = \text{konst.}$

Na kot prekrivanja oziroma čas komutacije vplivajo komutacijski parametri:  $\omega$ ,  $U_K$ ,  $L_K$  in delovna parametra: krmilni kot  $\alpha$  in enosmerni tok  $I_d$ .

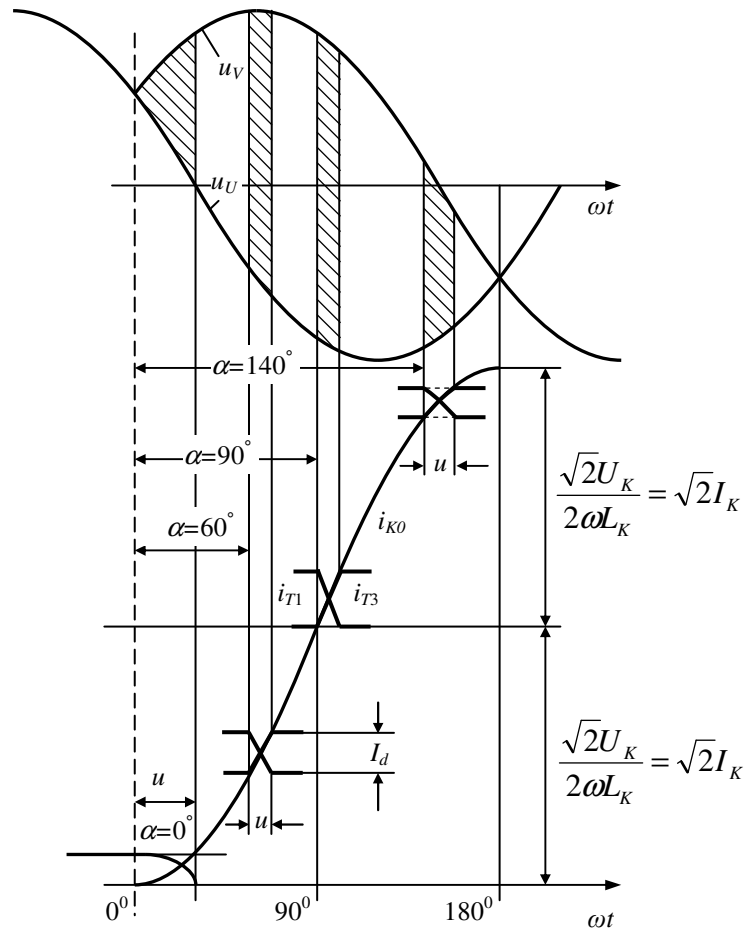
Kot prekrivanja  $u$  lahko izračunamo iz izraza za  $i_{T1}$ , ko ta doseže vrednost nič. Čas prekrivanja je  $\omega t = u$ . Iz enačbe

$$\frac{\sqrt{2}U_K}{2\omega L_K} \cdot (\cos(u + \alpha) - \cos \alpha) + I_d = 0 \quad \text{dobimo:}$$

$$\cos(\alpha + u) = \cos \alpha - \frac{2I_d \omega L_K}{\sqrt{2}U_K} = \cos \alpha - \frac{I_d}{\sqrt{2}I_K}; \quad I_K = \frac{U_K}{2\omega L_K} \quad \text{trajen kratkostični tok (efektivna vrednost)}$$

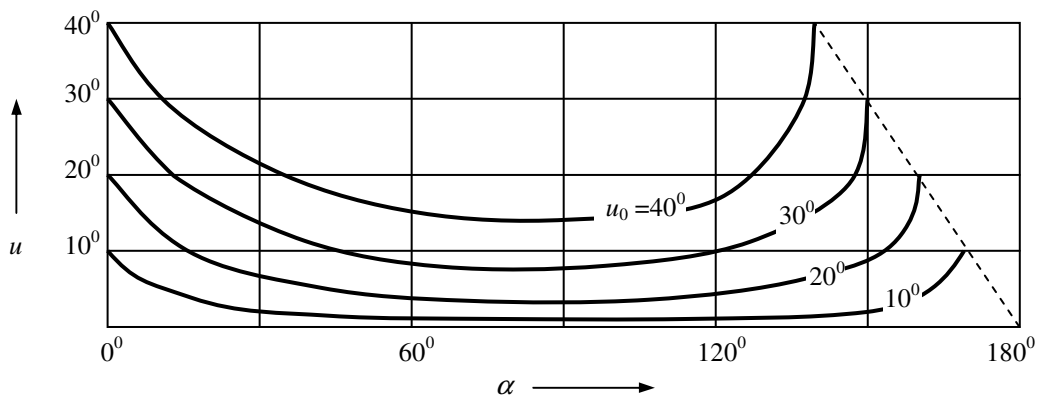
Lahko izračunamo tudi kot prekrivanja  $u_0$ , ki velja za kot  $\alpha = 0$ , t.j. za kot pri naravni komutaciji ali kot tudi rečemo začetni kot prekrivanja.

$$\cos u_0 = 1 - \frac{2\omega L_K I_d}{\sqrt{2}U_K} = 1 - \frac{I_d}{\sqrt{2}I_K}$$



Slika 7.11: Komutacijski prehodni pojavi pri različnih krmilnih kotih

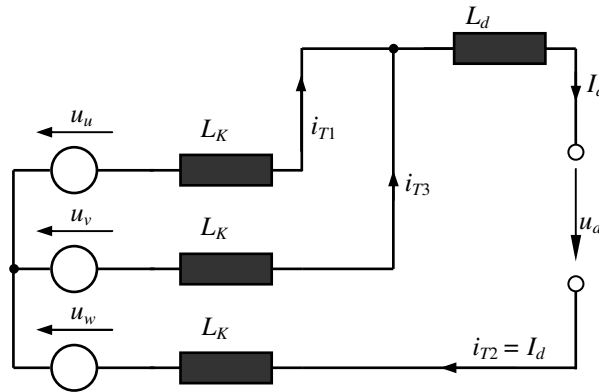
Na sliki 7.12 imamo prikazano odvisnost kota prekrivanja od krmilnega kota, pri čemer je parameter začetni kot prekrivanja  $u_0$ .



Slika 7.12: Kot prekrivanja v odvisnosti od krmilnega kota  $\alpha$

Zaradi prekrivanja ne moremo krmiliti izhodne napetosti dlje kot do črtkane črte na sliki. Če pri tem upoštevamo še potreben čas sprostitve tiristorja, ki ga ta potrebuje, da lahko zopet blokira napetost v prevodni smeri, vidimo, da se krmilno območje še bolj omeji.

V času prekrivanja, torej med komutacijskim prehodnim pojavom, izhodna enosmerna napetost ni več takšna kot v idealnih razmerah. Za izračun njenega časovnega poteka med prekrivanjem se poslužimo nadomestne sheme na sl. 7.13. Slika predstavlja aktivne tokokroge med prehajanjem toka iz ventila 1 na ventil 3 v šestpulznem mostičnem vezju. Narisane so samo povezave v katerih so prevajajoči ventili.



Slika 7.13: Nadomestna shema med prekrivanjem ventilskih tokov  $i_{T1}$  in  $i_{T3}$

Če velja:

$$i_{T1} + i_{T3} = I_d = \text{konst.} \quad \text{potem je:}$$

$$u_d + u_w - u_u + L_K \frac{di_{T1}}{dt} = 0$$

$$u_d + u_w - u_v + L_K \frac{di_{T3}}{dt} = 0$$

Če privzamemo, da je

$$u_w - u_u = u_{wu}$$

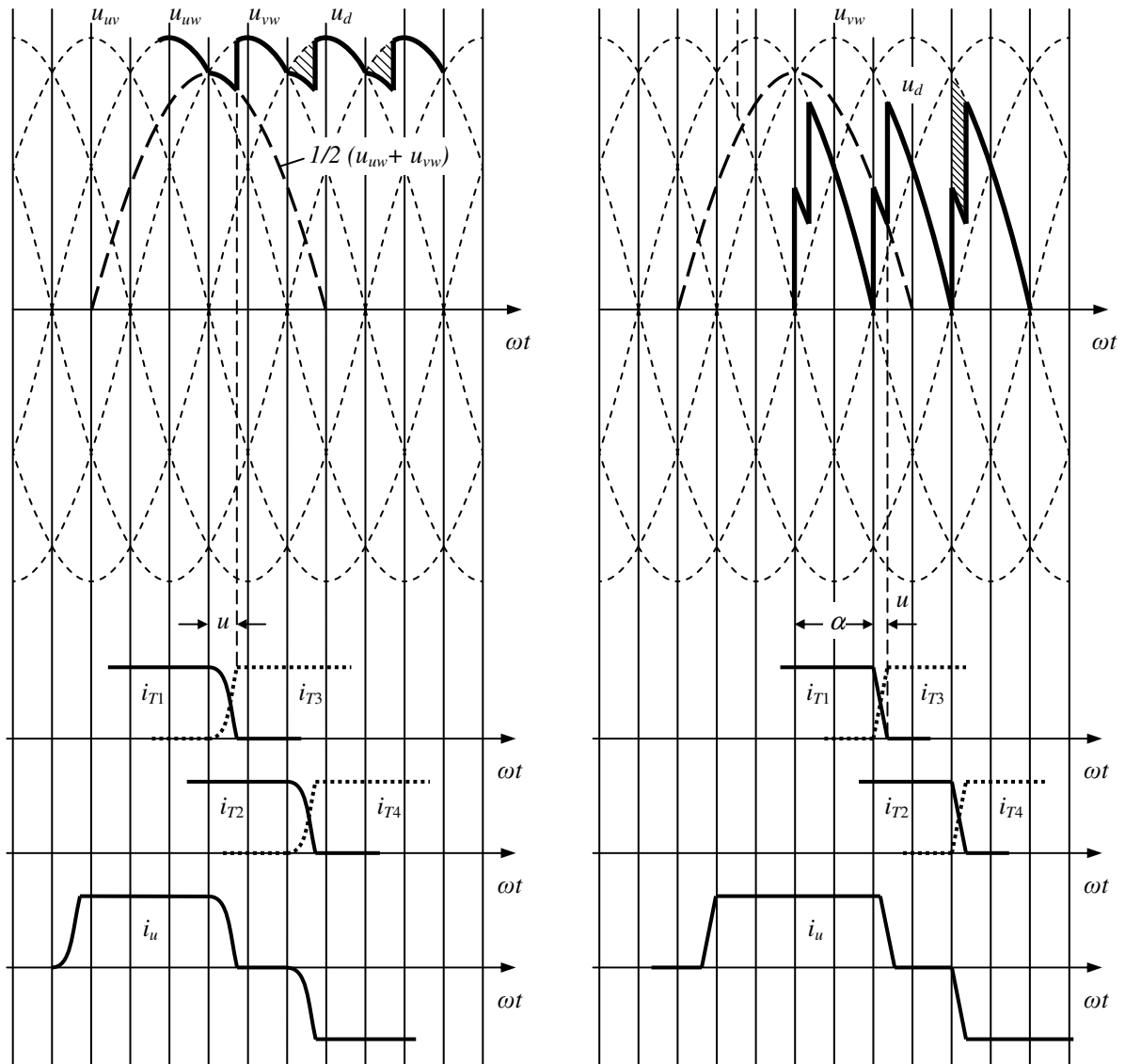
$$u_{uw} = -u_{wu}$$

dobimo iz zgornjih enačb časovni potek enosmerne napetosti med prekrivanjem.

$$u_d = \frac{1}{2}(u_{uw} + u_{vw}) \quad \text{ali} \quad u_d = u_{vw} - L_K \frac{di_{T3}}{dt}$$

Na tej osnovi so narisani oscilogrami na sliki 7.14.

$$u_d = \frac{1}{2}(u_{uw} + u_{vw})$$



Slika 7.14: Časovni potek napetosti  $u_d$  ob upoštevanju prekrivanja  $u$  pri krmilnih kotih  $\alpha = 0^\circ$  in  $\alpha = 60^\circ$

Izven časa prekrivanja je potek enosmerne napetosti podoben kot v idealnih razmerah. Slika kaže razmere pri dveh krmilnih kotih in sicer pri  $\alpha = 0^\circ$  in  $\alpha = 60^\circ$ .

Odstopanje od idealne usmerjene napetosti je posledica komutacijskih induktivnosti. Ohmske upornosti smo zanemarili z zavedanjem, da bi njihovo upoštevanje našo analizo precej otežilo, pri tem pa bi rezultat zelo malo odstopal od izračunanega.

### 7.3 Bremenska karakteristika

Idealna enosmerna napetost usmernika  $U_{di}$ , ki smo jo pri različnih krmilnih kotih imenovali  $U_{di\alpha}$  je napetost, ki bi jo imel usmernik na izhodnih sponkah v idealnih razmerah v praznem teku. V realnih razmerah pa kot smo videli, komutacija ni trenutna, opravka imamo z ohmskimi upornostmi in ventili imajo tudi neko pragovno napetost neodvisno od velikosti toka.

### 7.4 Induktivni padec napetosti

Ta padec napetosti povzročijo induktivnosti  $L_K$  v komutacijskem krogu. V komutacijskem krogu nahajajoče se induktivnosti omejujejo tokovne strmine komutacijskih tokov in s tem ščitijo ventile pred prevelikim  $di/dt$ . Velikost tega padca napetosti bomo izračunali s pomočjo slike 7.14. V času prekrivanja prevajata dve fazi istočasno tako, da ovojnica usmerjene napetosti ne gre po trenutno najvišji medfazni napetosti, ampak po njuni srednji vrednosti. Iz slike je lepo razvidna napetostno-časovna ploskev, ki se pri vsaki komutaciji izgubi (črtkana ploskev).

Za komutacijski krog velja enačba:

$$u_K - 2L_K \cdot \frac{di_{T3}}{dt} = 0$$

Tok  $i_{T3}$  se med komutacijo spremeni za vrednost  $I_d$ . Zato velja.

$$\int_0^{t_u} u_K dt = 2L_K \int_0^{I_d} di_{T3}$$

Napetostno-časovna ploskev ob eni komutaciji je induktivni padec napetosti

$$\frac{1}{2} \int_0^{t_u} u_K dt = L_K I_K \quad [\text{Vs}]$$

Šrafirana ploskev se izgubi pri vsaki komutaciji torej  $s \cdot q$  krat v vsaki periodi izmenične napetosti.

V časovni enoti nastopi  $f \cdot s \cdot q$  komutacij. Pri tem pomeni  $f$  omrežno frekvenco,  $s$  faktor, ki je odvisen od vezja (število v serijo vezanih komutacijskih grup) in  $q$  število komutacij ene komutacijske grupe. S tem je induktivni enosmerni padec napetosti:



$$D_x = f s q L_K I_d$$

Izražen relativno proti  $U_{di}$ :

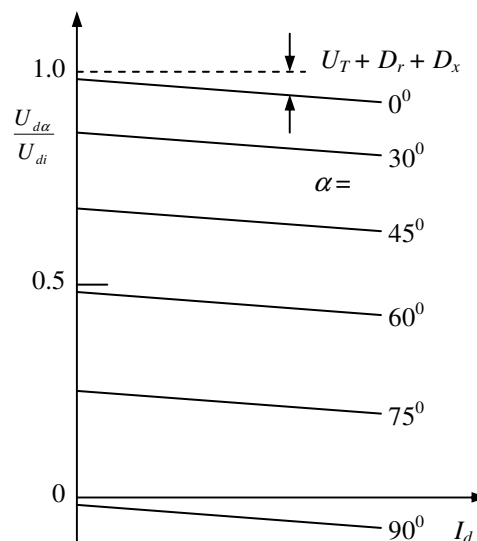
$$d_x = \frac{D_x}{U_{di}}$$

Ohmski padec napetosti zaradi ohmskih upornosti v komutacijskih vezjih  $D_r$  je običajno precej manjši od  $D_x$  in ga v splošnem lahko zanemarimo. Pragovna napetost ventilov znaša od 1 do 3 V.

Pri živosrebrnih usmernikih je to napetost obloka, ki znaša  $20 \div 50$  V, kar pa ni več zanemarljivo.

Pragovna napetost tiristorjev in diod pa pri nizkonapetostnih usmernikih (galvana) močno vpliva na izkoristek, zato se tam nikoli ne uporabljajo vezave z več ventili v seriji.

Bremenska karakteristika usmernika je prikazana na sliki 7.15. Pragovna napetost ventilov je upoštevana kot konstantna napetost neodvisna od obremenitve.



Slika 7.15: Bremenska karakteristika usmernika

Induktivni in ohmski padec napetosti  $D_x$  in  $D_r$  pa sta linearno odvisna od bremenskega toka.

## 7.5 Čas sprostitve in rezervni kot

Poglejmo si na tem mestu skrajni možni doseg v razsmerniškem področju ob upoštevanju kota prekrivanja in časa sprostitve vklopljivega tiristorja. Potem, ko tiristorski tok postane nič, mora biti tiristor najmanj za čas sprostitve  $t_q$  reverzno polariziran, da potem lahko blokira napetost v prevodni smeri.

Za nazorno razlago si poglejmo napetost na tiristorju  $T_1$  pri krmilnem kotu  $\alpha = 150^\circ$ , seveda za primer šestpulznega mostičnega vezja.

Zunaj časa prekrivanja velja naslednje:

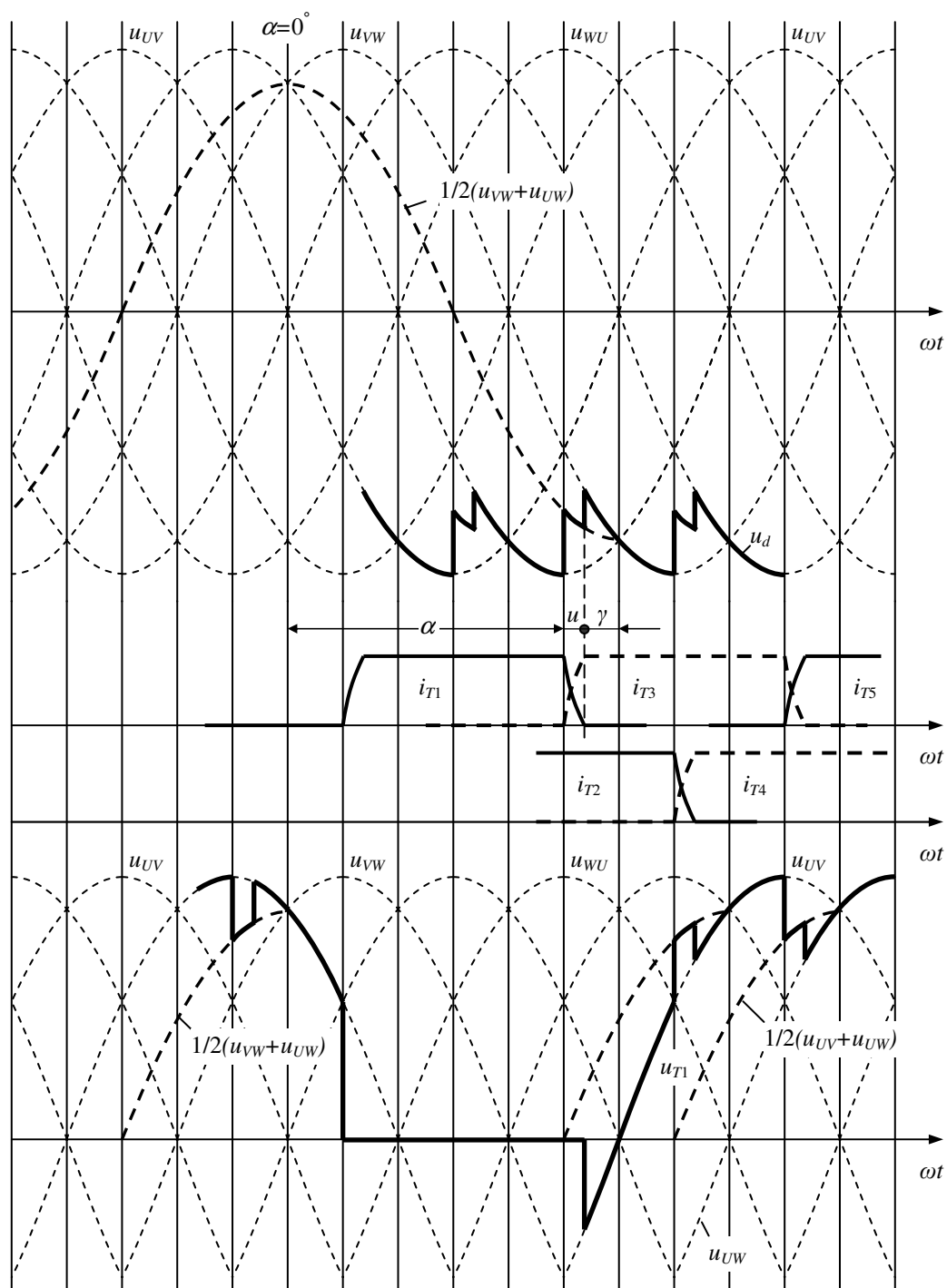
v intervalu, ko je  $i_{T3} = I_d$

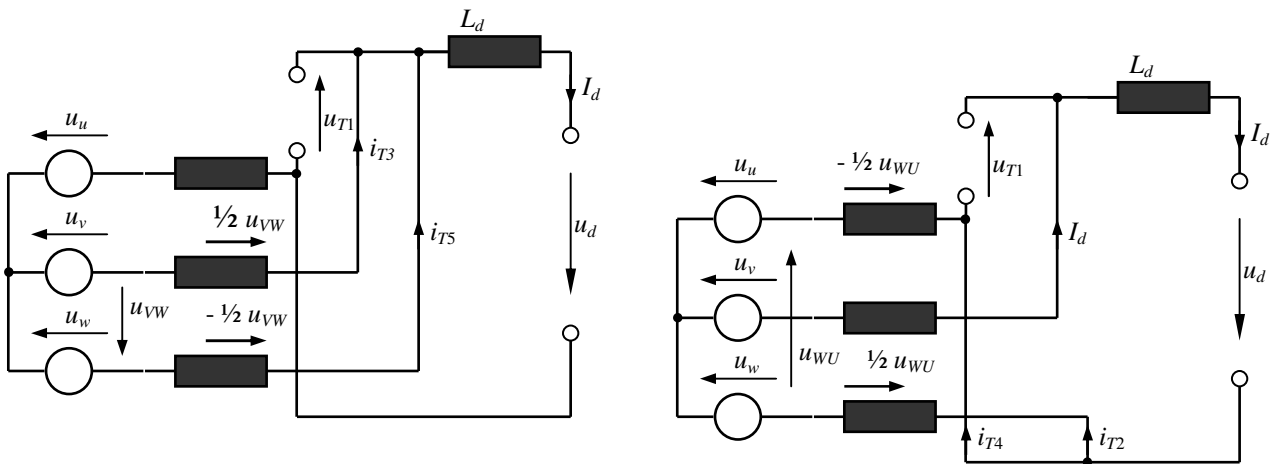
$$u_{T1} = u_{UV}$$

v intervalu, ko je  $i_{T5} = I_d$

$$u_{T1} = -u_{WU}$$

Napetost na tiristorju  $T_1$  je torej pri vsakem krmilnem kotu sestavljena iz odsekov teh napetosti. Za  $\alpha = 150^\circ$  je prikazan časovni potek napetosti izven časa prekrivanja na sliki 7.16. Med intervalom prekrivanja moramo upoštevati vsakokratno nadomestno shemo. Obe shemi sta podani na sl. 7.17.

Slika 7.16: Usmerjena napetost  $u_d$  in napetost na tiristorju  $u_{T1}$  pri  $\alpha = 150^\circ$



Slika 7.17: Nadomestni shemi med prekrivanjem: a)  $i_{T3}$  in  $i_{T5}$ , b)  $i_{T2}$  in  $i_{T4}$

V intervalu, ko se prekrivata tiristorja 3-5 (slika 7.17a) velja:

$$u_{T1} - u_{UV} - \frac{1}{2} u_{VW} = 0$$

$$u_{T1} - u_{UW} + \frac{1}{2} u_{VW} = 0$$

$$2u_{T1} = u_{UV} + u_{UW}$$

$$u_{T1} = \frac{1}{2}(u_{UV} + u_{UW})$$

Ta krivulja je narisana v sliki 7.16.

V času, ko se prekrivata tiristorja 2-4, pa velja (sl. 7.17b):

$$u_{T1} - u_{UV} - \frac{1}{2} u_{WU} = 0$$

$$u_{T1} - u_{WU} + \frac{1}{2} u_{WU} = 0$$

$$u_{T1} = \frac{1}{2}(u_{UV} + u_{WV})$$

Na enak način dobimo tudi izraz za primer prekrivanja 4-6:

$$u_{T1} = \frac{1}{2}(u_{UW} + u_{VW})$$

Ti časovni poteki napetosti na  $T_1$  med prekrivanjem so narisani na sliki 7.16. Na tej sliki je kot  $\gamma$  označen kot ugasni kot. Pogoji za zanesljiv prehod toka iz tiristorja  $T_1$  na  $T_3$  je, da je rezervni čas  $t_s$  do skrajnega razsmerniškega režima večji kot je čas sprostitve  $t_q$ . Kotu  $\gamma$  odgovarja v časovnem merilu rezervni čas.

$$\gamma = \omega t_s > \omega t_q$$

Na tej sliki tudi vidimo, da je maksimalni krmilni kot  $\alpha_{max}$  v razsmerniškem področju omejen dodatno še s kotom prekrivanja  $u$ .

$$\alpha_{max} = \pi - (\gamma + u)$$

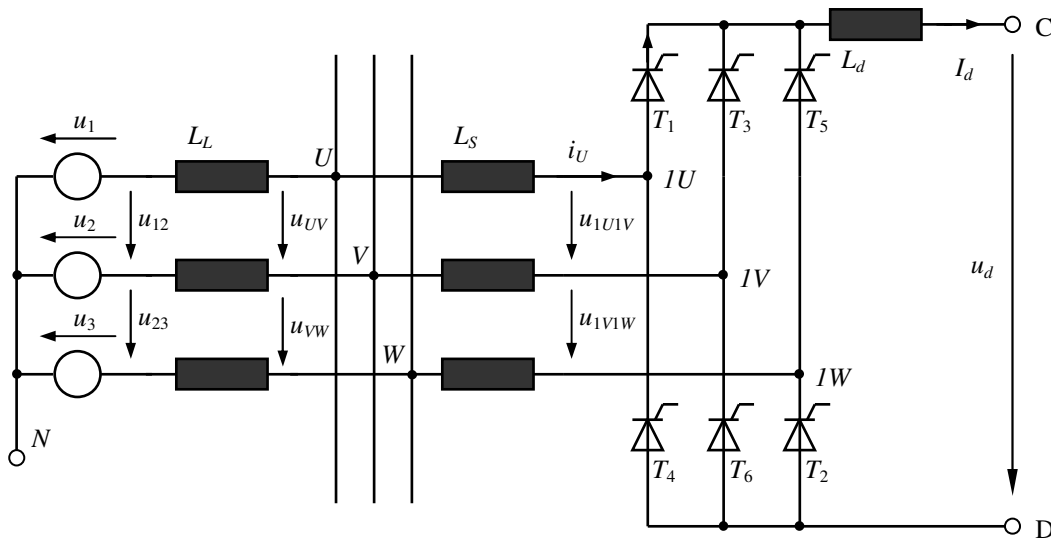
Če bi torej bil krmilni kot  $\alpha > \alpha_{max}$ , potem tiristor ob nastopu pozitivne napetosti še ne bi bil sposoben to napetost blokirati. Ostal bi v prevodnem stanju in pretvornik bi v razsmerniškem režimu "prevesil", kar bi pomenilo direkten kratek stik med omrežjem in aktivnim bremenom (v kratkostičnem je vsota napetosti delujoče faze in napetosti bremena – generatorja).

## 7.6 Napetostni vdori zaradi komutacije

Do sedaj smo obravnavali omrežno napetost kot idealni sinusni vir brez notranjih upornosti. Če želimo analizirati vpliv prekrivanja med komutacijo na omrežje, moramo vzeti le to kot realno z notranjimi impedancami. To bomo sedaj predstavili kot idealen vir s serijskimi induktivnostmi, kar pomeni za različne namene zadosten praktičen približek dejanskemu stanju. Slika 7.18 kaže šestpulzno mostično vezje, ki je priključeno na omrežje preko induktivnosti  $L_S$ . Omrežje pa predstavljajo idealni viri z napetostmi  $u_1, u_2, u_3$  in omrežne induktivnosti  $L_L$ . Priključne sponke usmerniškega vezja U, V, W označujejo omrežne priključne sponke, na katere so lahko priključeni drugi porabniki. 1U, 1V, 1W so sponke na tiristorjih.

Analizirali bomo napetosti  $u_{1U1V}$  in  $u_{UV}$ . Še naprej naj velja idealizirana predpostavka, da je usmerjeni tok popolnoma gladek in velja v intervalih izven prekrivanja, da je:

$$u_{1U1V} = u_{UV} = u_{12}$$



Slika 7.18: Šestpulzno vazje priključeno na omrežje preko  $L_S$

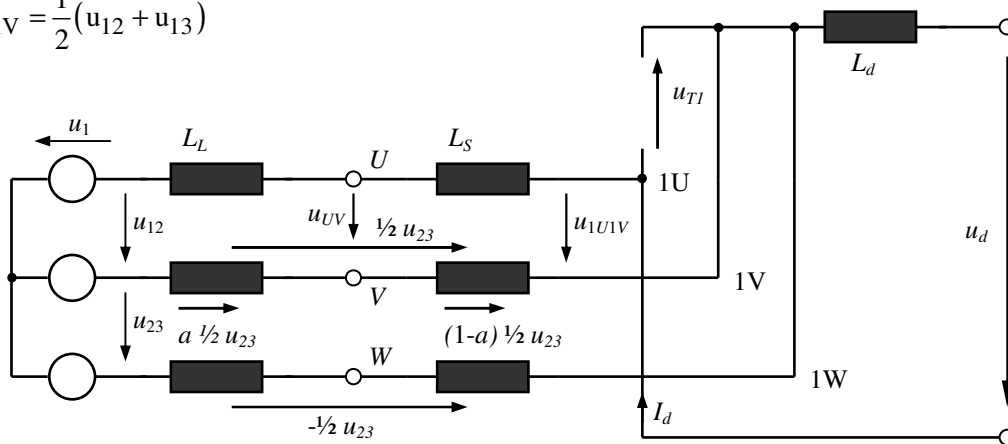
Prav tako so med prekrivanjem 1-3 kot tudi med 4-6 sponke 1U in 1V kratko sklenjene:

$$u_{1U1V} = 0$$

Med ostalimi intervali prekrivanja bomo lahko določili napetost  $u_{1U1V}$  s pomočjo nadomestne sheme. Iz slike 7.19, ki kaže nadomestno shemo za interval prekrivanja 3-5, dobimo ob upoštevanju enačb za vsako od obeh vej, ki komutirata:

$$u_{1U1V} - \frac{1}{2}u_{23} - u_{12} = 0 \qquad u_{1U1V} + \frac{1}{2}u_{23} - u_{13} = 0$$

$$u_{1U1V} = \frac{1}{2}(u_{12} + u_{13})$$



Slika 7.19: Nadomestna shema med prekrivanjem tokov  $i_{T3}$  in  $i_{T5}$

Enako napetost med sponkama 1U in 1V dobimo tudi pri prekrivanju 6-2, saj to stanje popisujeta enaki enačbi.

Za intervale prekrivanja 5-1 in 2-4 dobimo enačbi:

$$u_{1U1V} - \frac{1}{2}u_{13} - u_{12} = 0 \quad u_{1U1V} + \frac{1}{2}u_{13} + u_{23} = 0$$


---

$$u_{1U1V} = \frac{1}{2}(u_{12} + u_{23})$$

Časovni potek napetosti na sponkah ventilov je prikazan na sliki 7.20a. V času ene periode vidimo šest karakterističnih napetostnih udorov, ki so posledica komutacij. V dveh intervalih pade napetost na ventilu na vrednost nič. Sprememba napetosti v ostalih intervalih zavisi od krmilnega kota.

Iz slike 7.20 lahko razberemo, da so vdori največji pri krmilnem kotu  $\alpha = 90^\circ$ . Širina napetostnih vdorov je enotna in je enaka času prekrivanja.

Napetosti na sponkah U, V, W zavisijo od razmerja induktivnosti  $L_S$  in  $L_L$  saj predstavljata delilnik napetosti. V časovnem intervalu prekrivanja imamo v seriji vezane štiri induktivnosti. Komutacijska napetost se deli v njihovem razmerju.

Med prekrivanjem 1-3 in 4-6 dobimo:

$$u_{12} - a \frac{1}{2}u_{12} - u_{UV} - a \frac{1}{2}u_{12} = 0$$

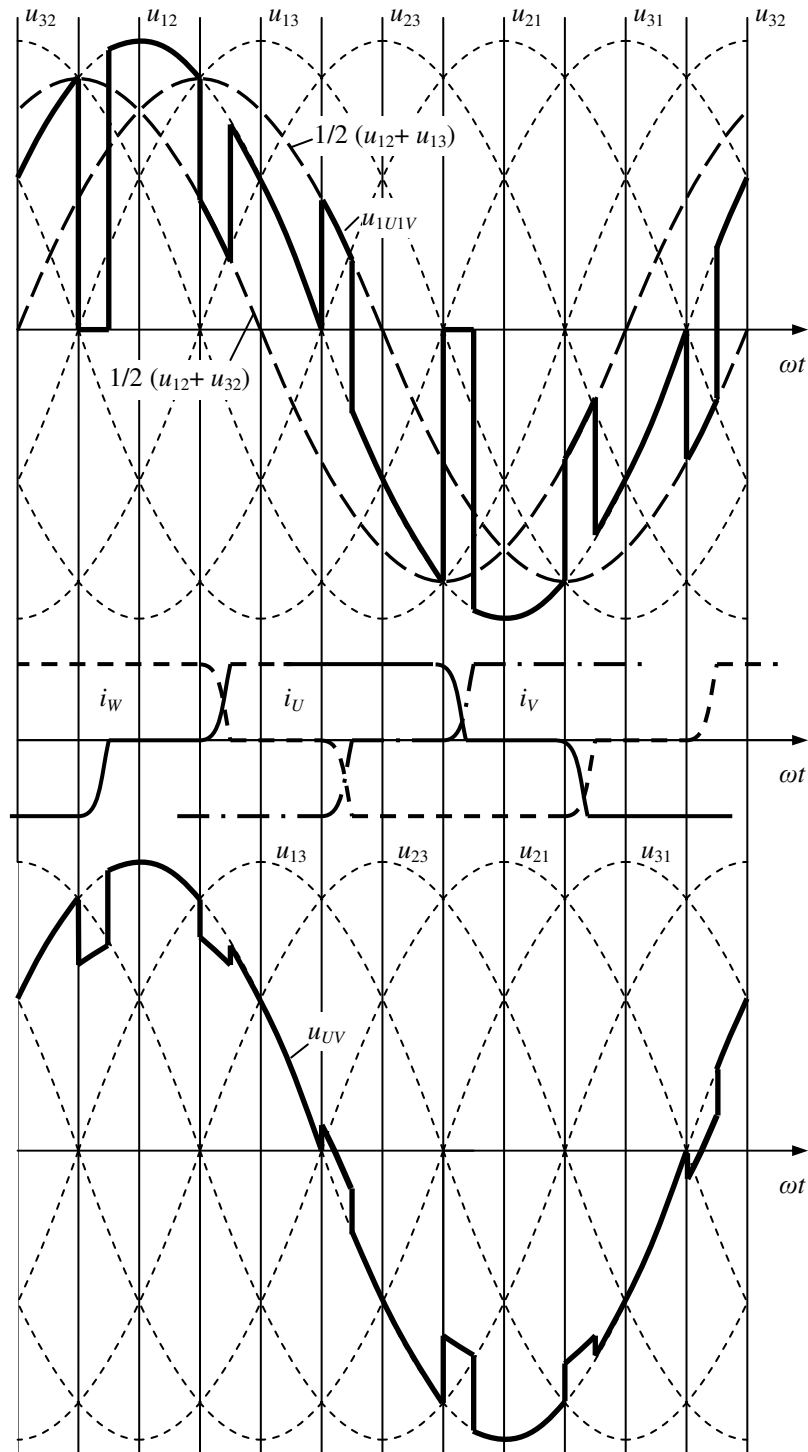
$$u_{UV} = u_{12} - a \cdot u_{12}$$

Pri tem je

$$a = \frac{L_L}{L_L + L_S}$$

Za interval s prekrivanjem 3-5 dobimo (sl.7.19)

$$u_{UV} - a \frac{1}{2}u_{23} - u_{12} = 0 \quad u_{UV} = u_{12} + a \frac{1}{2}u_{23}$$



Slika 7.20: Časovni poteki izmeničnih napetosti: a) na tiristorjih, b) na omrežnih sponkah



V sliki 7.20b je prikazan oscilogram napetosti  $u_{UV}$  za razmerje  $\frac{L_L}{L_S} = \frac{1}{3}$ .

Različnost obeh oscilogramov  $u_{1UV}$  in  $u_{UV}$  je prepričljiva. Tako deformirana napetost na sponkah omrežja ima zelo negativne posledice, saj je ta glavni vir motenj, ki jih takšni krmiljeni usmerniki povzročajo na omrežju.

## 7.7 Krmilna jalova moč

Jalova moč zaradi faznega krmiljenja ali krmilna jalova moč je posledica faznega premika toka pri posamezni fazi, kot je to za idealizirane razmere prikazano na sl. 7.3. Pod izrazom idealizirane razmere mislimo predvsem na predpostavko, da je enosmerni tok popolnoma gladek. Iz slike lahko vidimo, da sta pri polnem izkrmiljenju t.j. pri  $\alpha = 0$ , omrežna napetost in osnovna harmonska komponenta toka v fazi. Jalova moč osnovne harmonske komponente je torej nič.

S faznim krmiljenjem se za krmilni kot  $\alpha$  premaknejo toki skozi tiristorje in s tem tudi omrežni toki.

Velja:

$$\varphi_1 = \alpha \quad \text{in} \quad \cos \varphi_1 = \cos \alpha$$

Pri popolnoma zglajenem toku je navidezna moč osnovne harmonske komponente

$$S_1 = U_{di} \cdot I_d$$

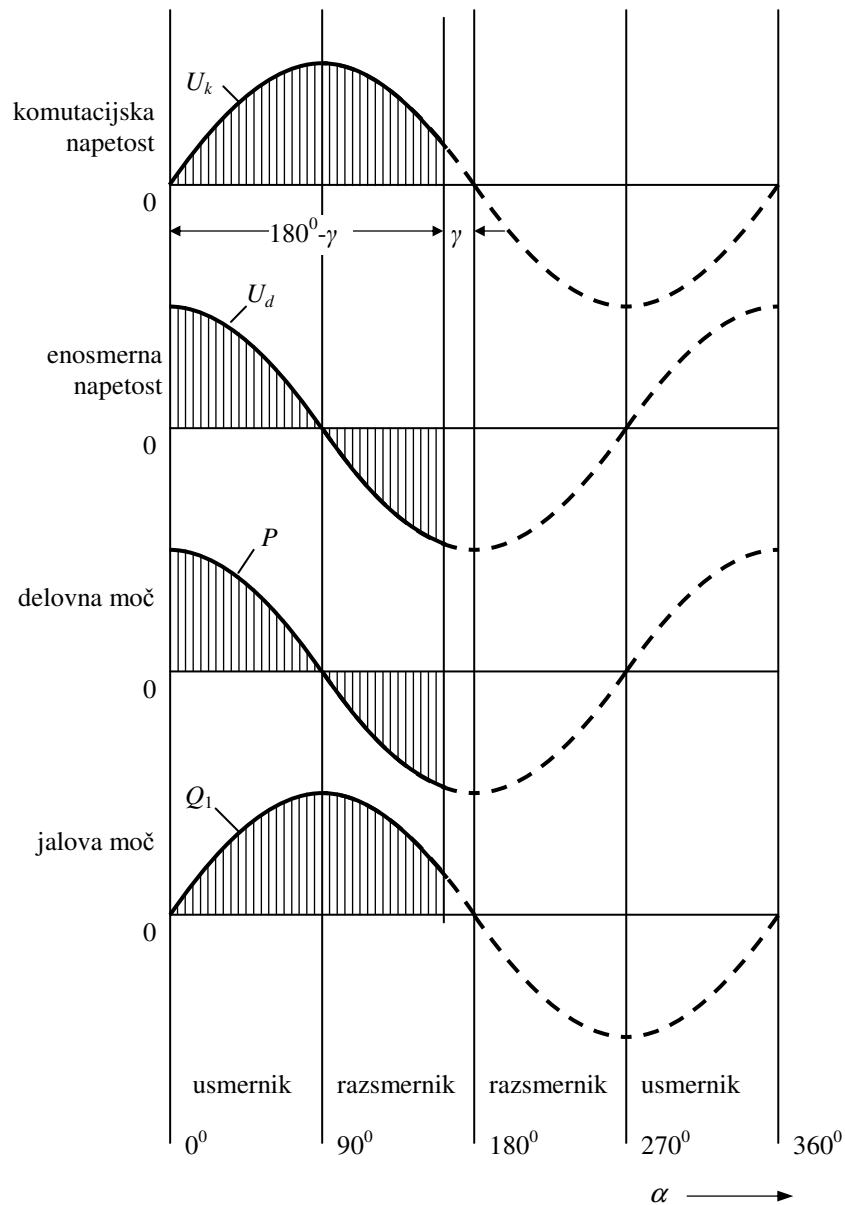
Delovna moč je enaka delovni moči osnovne harmonske komponente

$$P = P_1 = U_{di} \cdot I_d \cdot \cos \alpha = U_{di} \cdot I_d \cdot \cos \alpha$$

in jalova moč osnovne harmonske komponente je

$$Q_1 = U_{di} \cdot I_d \cdot \sin \alpha$$

Iz teh enačb vidimo, da je faktor premika  $\cos \varphi_1$  enak cosinusu krmilnega kota  $\alpha$  oziroma fazni zasuk osnovne harmonske komponente toka enak krmilnemu kotu  $\alpha$ . Te razmere so značilne za polprevodniške pretvornike z naravno komutacijo (omrežno vodene pretvornike).



Slika 7.21: Krmilno območje omrežno vodenega pretvornika

Razmere v odvisnosti od krmilnega kota  $\alpha$  so prikazane na sliki 7.21. Naravna komutacija je možna le v območju od  $\alpha = 0$  do  $\alpha = 180^\circ - \gamma$ , če ne upoštevamo prekrivanja. Osnovna harmonska jalova moč  $Q_1$  je v tem območju induktivna. Pretvornik se obnaša kot induktivnost na omrežju. Področje kapacitivne jalove moči je dosegljivo le s prisilno komutacijo.

Iz časovnega poteka tokov (sl. 7.14) lahko vidimo, da je omrežni tok zaradi prekrivanja  $u$  med komutacijo še dodatno premaknjen v induktivni smeri. Komutacijska jalova moč se dodatno prišteje h krmilni jalovi moči.

Če predpostavimo, da se amplituda omrežnega toka zaradi prekrivanja ne spremeni, potem lahko razmere opišemo takole:

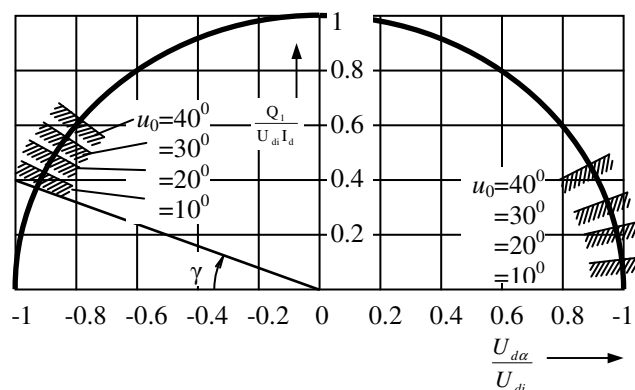
$$P = P_1 = U_{di} I_{di} \left( \cos \alpha - \frac{D_X}{U_{di}} \right)$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \approx \frac{U_{di} I_d \left( \cos \alpha - \frac{D_X}{U_{di}} \right)}{U_{di} I_d} = \cos \alpha - \frac{D_X}{U_{di}}$$

$$\frac{D_X}{U_{di}} = d_x \quad - \text{relativni induktivni padeč napetosti zaradi prekrivanja u}$$

## 7.8 Karakteristika jalove moči

Grafični prikaz jalove moči ob upoštevanju enačb za  $Q_1$  in  $P_1$  je polkrog na sliki 7.22. Tudi ob upoštevanju prekrivanja je približno polkrog, krmilno območje pa se nekoliko omeji. Začetno prekrivanje  $u_o$  povzroči induktivno jalovo moč že pri krmilnem kotu  $\alpha = 0$ . Ugasni kot  $\gamma$  pa omejuje obratovanje pretvornika v skrajnem razsmerniškem režimu.



Slika 7.22: Jalova moč v odvisnosti od enosmerne napetosti

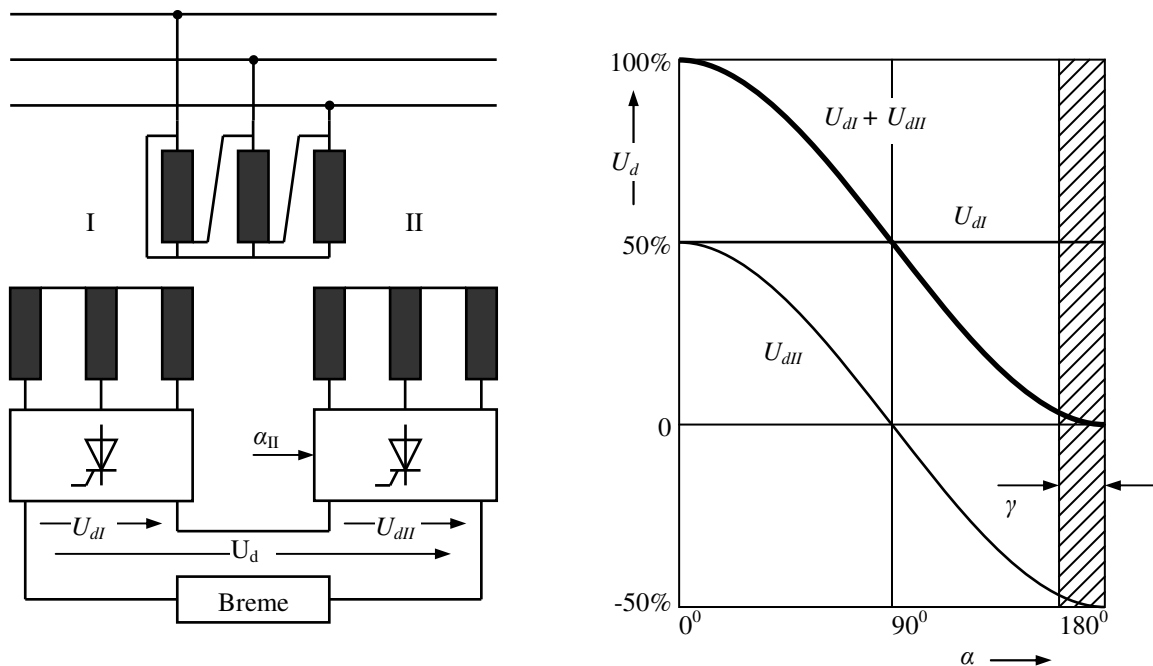
Ker jalova energija le dodatno obremenjuje omrežje, transformator in ventile, nič pa ne pripomore k prenešeni moči je nezaželena in škodljiva. V želji po zmanjšanju krmilne jalove moči so raziskovalci razvili različna vezja in principe, ki zagotavljajo manjšo porabo jalove energije za specifična področja uporabe. Najpomembnejša so:

- zaporedno krmiljenje
- nesimetrično krmiljenje
- vezja z ničelno diodo
- transformator z odcepi
- prisilna komutacija

## 7.9 Zaporedno krmiljenje

Na sliki 7.23 imamo v serijo vezana dva enaka pretvornika. Možnost krmiljenja je od +100% do skoraj -100%. Če upoštevamo idealne razmere (gladek tok, brez prekrivanja), potem imamo pri krmilnih kotih obeh pretvornikov  $90^\circ$ , ko je izhodna napetost enaka 0 ( $U_{d\alpha 1} = U_{d\alpha 2} = 0$ ), največjo jalovo moč. Njena vrednost je:

$$Q = U_d I_d = (U_{d\alpha 1} + U_{d\alpha 2}) I_d$$

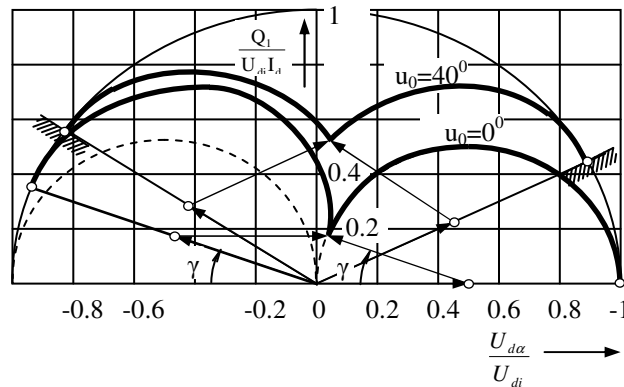


Slika 7.23: Zaporedno vezana pretvornika

Toka na primarni strani se sofazno seštevata v skupni tok, saj sta oba pretvornika gledano s strani omrežja vezana vzporedno. Glede na napetost je to čisti jalovi tok. Lahko pa dosežemo, da je usmerjena napetost  $U_d = 0$  na tak način, da enega od obeh pretvornikov krmilimo z  $\alpha_1 = 0^\circ$ , drugega pa z  $\alpha_2 = 180^\circ$ , saj sta tedaj napetosti obeh

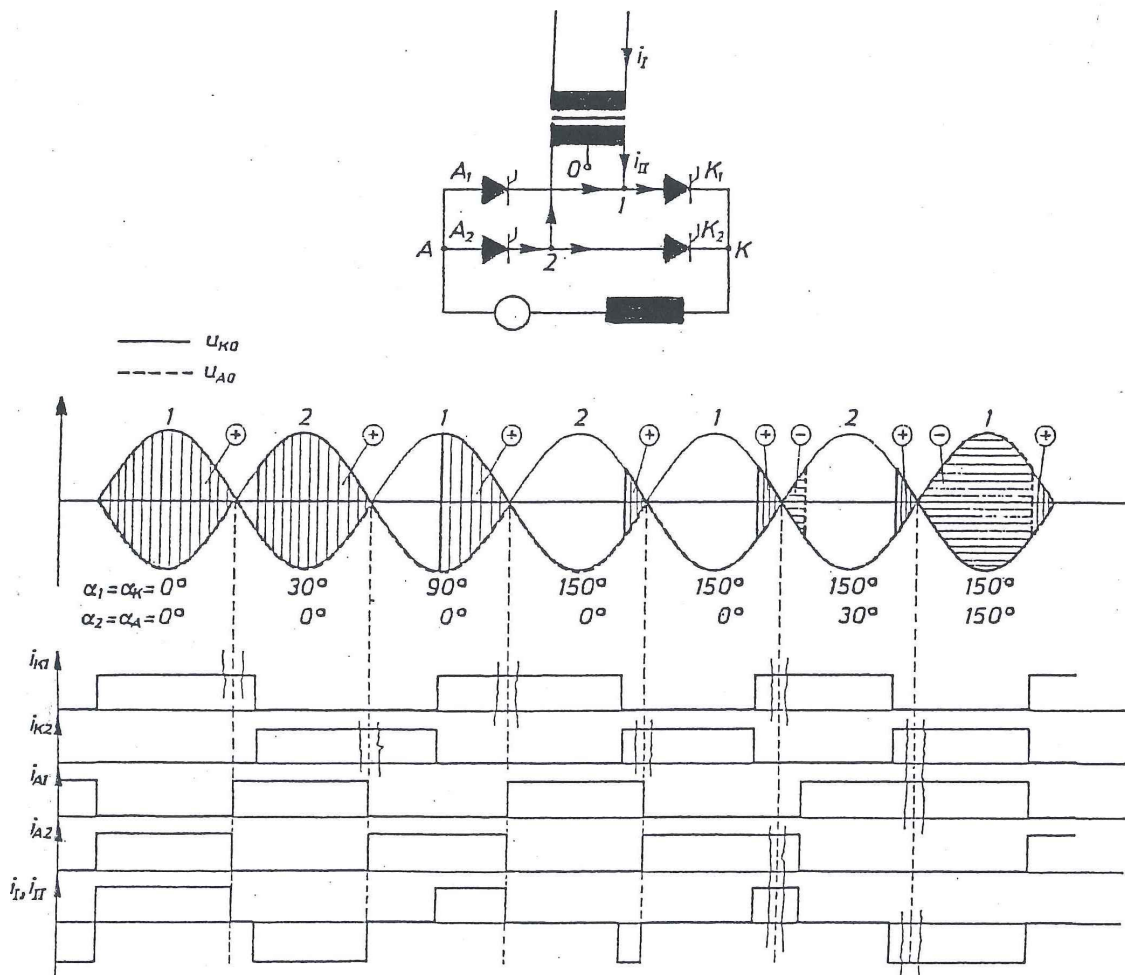
pretvornikov enaki in nasprotno usmerjeni. Tokovni blok prvega pretvornika na primarni strani je z omrežno napetostjo v fazi, tokovni blok drugega pretvornika pa v protifazi. Jalova moč kakor tudi navidezna moč sta v tem idealnem primeru enaki nič.

Zaradi rezervnega časa, ki ga ventil potrebuje za zanesljiv izklop v razsmerniškem področju, krmilni kot  $180^\circ$  ni dosegljiv. Če pri tem upoštevamo še prekrivanje med komutacijo, vidimo, da imamo v realnih razmerah pri obeh pretvornikih vedno prisotno neko minimalno jalovo energijo. Na sliki 7.24 je podana odvisnost jalove moči  $Q$  od enosmerne  $U_{d\alpha}I_d$  za dva začetna kota prekrivanja in sicer  $0^\circ$  in  $40^\circ$  obakrat pri enakem ugasnem kotu.



Slika 7.24: Jalova moč  $Q$  v odvisnosti od  $U_{d\alpha}I_d$  za kota prekrivanja  $0^\circ$  in  $40^\circ$

Serijska vezava dveh usmernikov po sliki 7.23 sicer močno izboljša razmere glede porabe jalove energije v celotnem krmilnem področju od usmerniškega do razsmerniškega režima delovanja. Vendar pa zaradi napetostne obremenitve ventilov ni najbolj gospodarna. Je pa ta način zelo primeren tam, koder imamo že v principu opravka s serijsko vezavo dveh delnih usmernikov. To so mostična vezja. Če pri enofaznem mostičnem vezju krmilimo anodno ventilsko grupo s krmilnim kotom  $\alpha_1$ , katodno ventilsko grupo pa s krmilnim kotom  $\alpha_2$ , potem dosežemo enak efekt, kot pri serijski vezavi dveh ločenih usmernikov, le da seštevanje dveh tokovnih paketov pri mostičnem vezju nastopi že na sekundarni strani (pri serijski vezavi dveh ločenih usmernikov z ločenimi sekundarnimi navitji pride do prekrivanja toka šele na primarni strani). Analiza delovanja vezja pokaže, da pri takšnem načinu krmiljenja dveh ventilskih grup, ko sta istočasno prožena  $A_1$  in  $K_2$  enosmerni tok teče v prostem teku mimo transformatorja in sploh ne obremenjuje sekundarnega navitja. Za nekaj primerov krmilnih kotov je to prikazano na sliki 7.25.



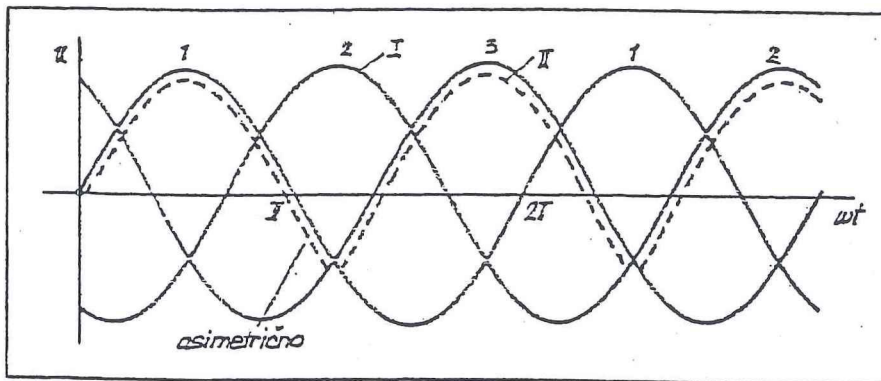
Slika 7.25

Izračun navidezne, delovne in jalove moči, kakor tudi izračun višjih harmonskih komponent poteka enako, kakor za vsak delni pretvornik. Enako velja tudi za približni izračun faktorja delavnosti toka osnovne harmonske komponente preko oddane enosmerne moči. Za idealne razmere velja:

$$U_{di\alpha_{cel}} = \frac{1}{2} U_{di} \cos \alpha_1 + \frac{1}{2} U_{di} \cos \alpha_2$$

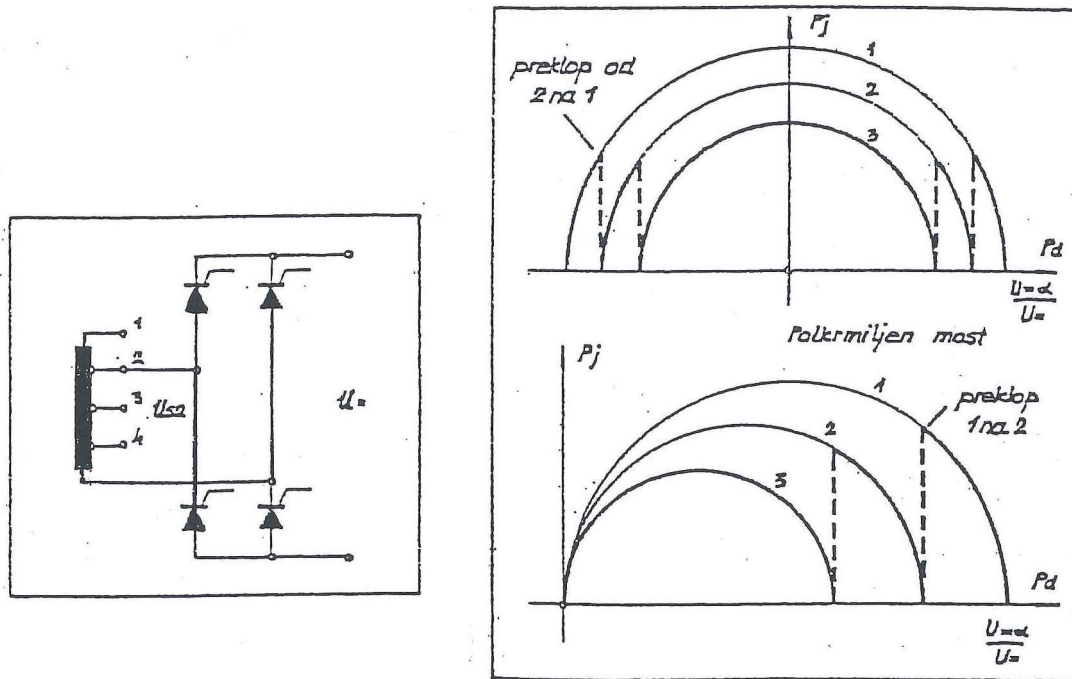
Za trifazno mostično vezje veljajo enaki zaključki, le pri višjih harmonskih komponentah toka se razmere poslabšajo.

Nesimetrično krmiljenje je ena od možnosti kako zmanjšati jalovo krmilno moč. Vendar pa je zaradi velike popačitve toka na izmenični strani (neenakomarna tokovna obremenitev faz) praktično prepovedana. To velja posebej še s stališča EMI.



Slika 7.26: Asimetrično krmiljenje

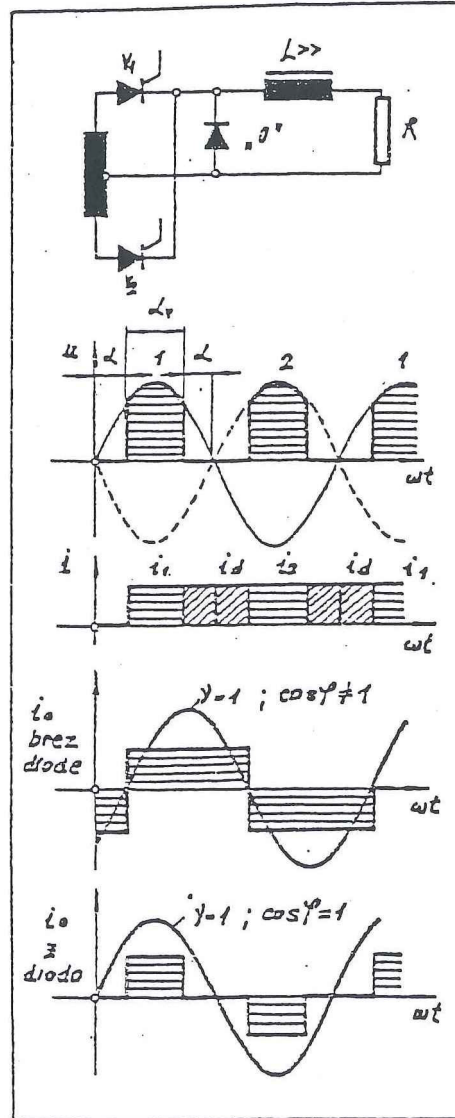
Transformator z odcepi (slika 7.27) je ena od možnosti, da se lahko držimo območja omejitve krmilnih kotov, vendar pa je preklopnik na transformatorju kritično mesto. Uporabno je le za zelo počasne sisteme.



Slika 7.27: Transformator z odcepi in njegov krmilni diagram



Prisilna komutacija (slika 7.28) je dobra rešitev, vendar pa je ob uporabi tiristorjev komplicirana in draga. Ta način je možen s tranzistorji. Moderni pogoni niso več enosmerni zato lahko rečemo, da je ta princip sicer možen, se pa ne uporablja.

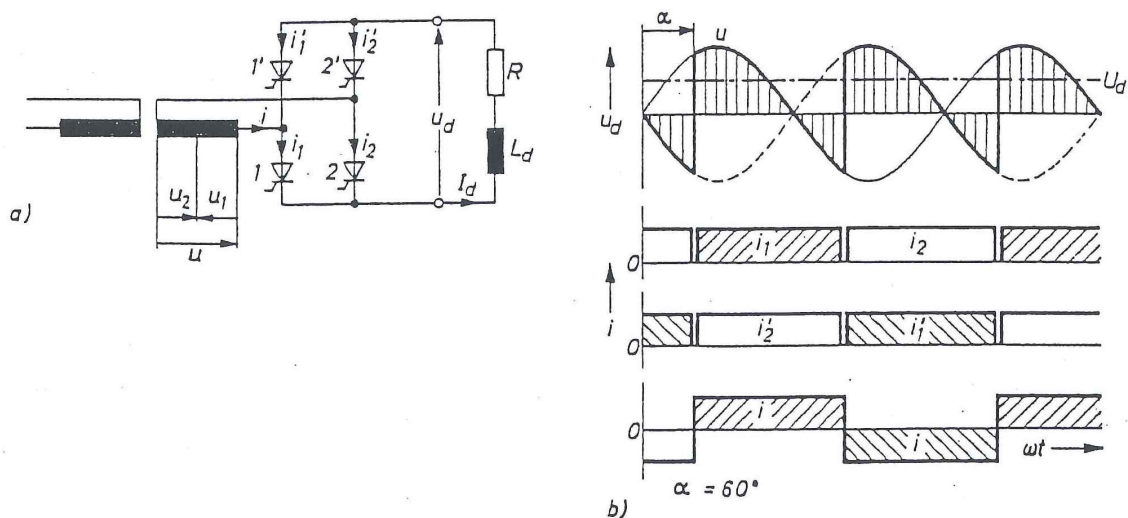


Slika 7.28: Prisilna komutacija

## 7.10 Polkrmiljena vezja

Mostična vezja, ki smo jih obravnavali do sedaj so lahko delovala v usmerniškem načinu in smo jih imenovali polnokrmiljena vezja. Če pa nam zadostuje le usmerniški način, ki omogoča le eno smer pretakanja energije, lahko v eni ventilski grupi uporabimo namesto tiristorjev diode. Poseben pomen imajo takšna polkrmiljena vezja zaradi manjše porabe jalove energije saj se obnašajo enako kot zaporedno krmiljena polno krmiljena vezja v usmerniškem režimu. Prednost pa je tudi v ceni, saj potrebujemo le polovico krmiljivih elementov.

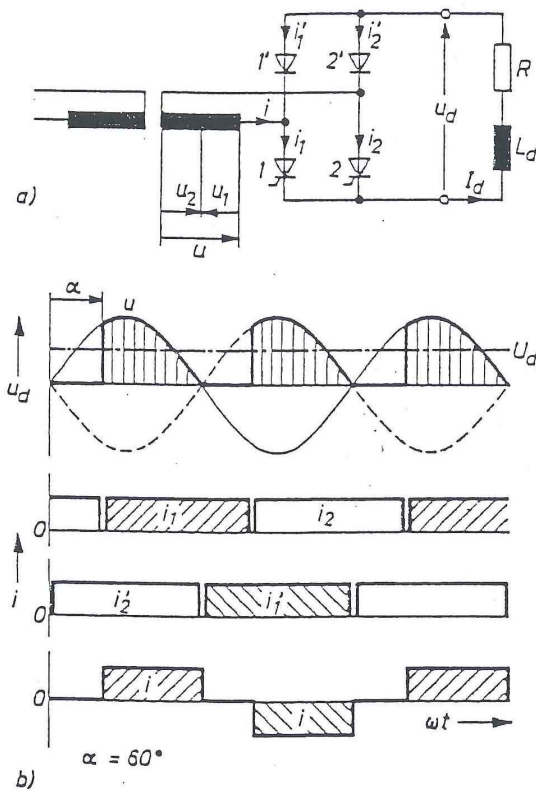
Delovanje si pogledimo na dvopulzno mostičnem vezju, ki ga polnokrmiljenega kaže slika 7.29.



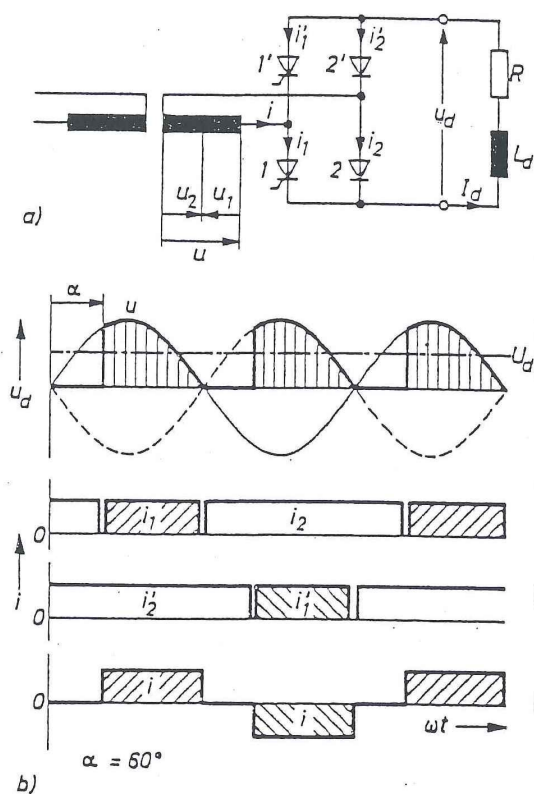
Slika 7.29: Dvopulzno mostično vezje

Na sliki vidimo vezje ter oscilogramе napetosti in tokov za primer zglajenega enosmernega toka. Ventili prevajajo  $180^\circ$  široke tokovne bloke, ki se pri faznem krmiljenju premikajo s krmilnim kotom  $\alpha$ .

Na naslednjih dveh slikah (7.30 in 7.31) pa vidimo obe možni varianti polkrmiljenih enofaznih mostičev s pripadajočimi oscilogrami. Enkrat imamo nekrmljiva ventila – diodi v ventilski grupi, drugič pa v ventilski veji. Prvo se imenuje simetrično polkrmiljeno vezje, drugo pa nesimetrično polkrmiljeno vezje. Na izmenični strani so oscilogrami tokov enaki, le pri asimetrično krmiljenem vezju na sliki 7.30 so diode tokovno bolj obremenjene, saj se z večanjem krmilnega kota  $\alpha$  večja razmerje časov prevajanja toka diod in tiristorjev.

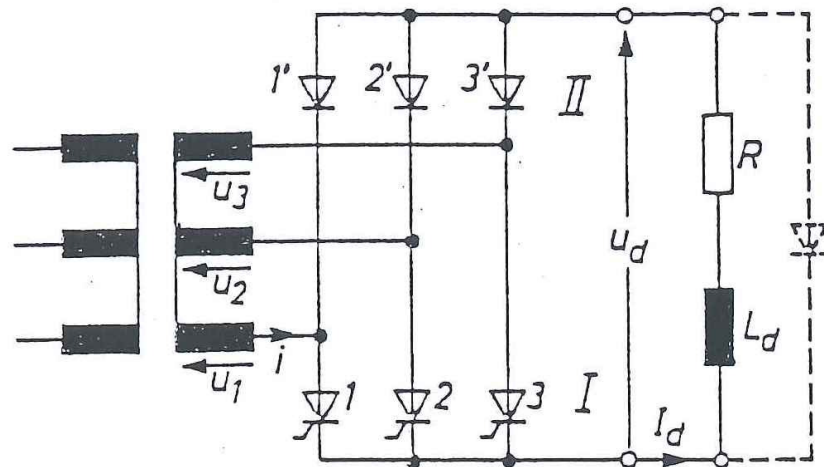


Slika 7.30



Slika 7.31

Tudi pri večfaznih pretvornikih so možna polkrmiljena vezja. Primer trifaznega je prikazan na sliki 7.32. Tam so ventili zgornjega delnega pretvornika 1', 2' in 3' diode. Vezje se obnaša tako, kot dva v serijo vezana usmernika, od katerih eden dela s krmilnim kotom  $0^\circ$ , drugi pa s poljubnim kotom  $0^\circ$  do  $180^\circ$ , če ne upoštevamo prekrivanja in izklopnega kota  $\gamma$ . Popolnoma odprto vezje je šestpulsno, od krmilnega kota  $60^\circ$  naprej pa je tripulsno, kar pogojuje drugo harmonsko komponento v omrežnem toku. Na bremenski strani ima to vezje običajno še dodatno prostotečno diodo.



Slika 7.32: Trifazno polkrmiljeno mostično vezje

## 7.11 Krmljivost

Razjasnimo si nekaj pojmov, ki smo jih srečali v zvezi s pretvorniki na omrežju, katerih sestavni deli so tiristorji in diode.

Vezje (pretvornik), ki ima v močnostnem delu le diode se imenuje »nekrmljivo« ali nekrmiljeno vezje. Črka, ki tovrstne naprave označuje je »U«. Ta oznaka se velikokrat kar izpušča.

Za polno krmljivo (krmiljeno) vezje, ki je označeno s črko »C« velja vezje, ki vsebuje samo tiristorje, t.j. krmeljive elemente.

Za polkrmljivo (polkrmiljeno) vezje pa se uporablja črka »H« in označuje vezje, ki vsebuje polovico krmljivih in polovico nekrmljivih ventilov.

Polkrmiljeno mostično vezje lahko krmilimo na negativni ali pozitivni strani enosmerne izhodne napetosti. Glede na to kateri pol predstavljajo tiristorji imajo le-ti lahko skupno katodo ali skupno anodo. Zato je dodatna oznaka teh vezij poleg H še oznaka  $A_1$  ali  $K_1$  torej HA (skupna anoda) in HK (skupna katoda).

Dvopulzno polkrmiljeno mostično vezje je lahko, kot smo omenili (sl.7.30), tudi asimetrično krmiljeno, če ima tiristorja v ventilski veji namesto v ventilski grupi. Za takšna vezja se uporablja lahko oznaka »HZ«. To vezje se uporablja n.pr. pri izmenično napajanih lokomotivah tja do moči 10 MW, zanimivo pa je bilo tudi pri manjših močeh za napajanje vzbujanj ali kotve pri enosmernih pogonih.

## 7.12 Višje harmonske komponente enosmerne napetosti in izmeničnega toka

Zaradi stikalnega delovanja polprevodniških ventilov povzročajo pretvorniki višje harmonske komponente napetosti in toka na strani omrežja, kakor tudi na enosmerni strani. Želja je čisti sinusni tok na omrežni strani in gladek enosmerni tok na enosmerni strani. To lahko dosežemo le z dodatnimi filtrskimi kondenzatorji in dušilkami, ki so sposobne akumulirati električno in magnetno energijo.

Ob idealnih razmerah, t.j. sinusna omrežna napetost in gladek enosmerni tok, lahko superponirane izmenične napetosti na enosmerni strani in višjeharmonske komponente tokov na izmenični strani enostavno izračunamo preko harmonske analize:

Usmerjena napetost polno izkrmiljenega usmernika ima v območju od  $-\frac{\pi}{2}$  do  $+\frac{\pi}{2}$  časovni potek po enačbi:

$$u_d = \hat{U}_s \cos \omega t$$

zato vsebuje samo cosinusne člene:

$$U_d = U_{di} + \sum U_v \sqrt{2} \cos v \omega t$$

$v = n \cdot p$        $n = 1, 2, 3, \dots$       red višje harmonske komponente napetosti na enosmerni strani

$U_v \cdot \sqrt{2}$       amplituda višje harmonske komponente napetosti na enosmerni strani

$$U_v \sqrt{2} = U_S \sqrt{2} \frac{p}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{p}}^{+\frac{\pi}{p}} \cos \omega t \cos v \omega t \, d\omega t = U_{di} \frac{2}{v^2 - 1}$$

$$U_v = \frac{\sqrt{2}}{v^2 - 1} \cdot U_{di}$$

Velikost nastopajoče višje harmonske komponente napetosti na enosmerni strani je odvisna zgolj od reda le-te in ne od pulznega števila pretvorniškega vezja. Pri določenem številu pulzov  $p$  nastopajo le tisti  $v$ , ki so deljivi s številom pulzov. Za nekatere vrednosti  $p$  podaja razmere naslednja tabela.

Tabela 7.1: Red in velikost višjih harmonskih komponent

Red višje harmonske $v$	Frekvenca $v$ . harmonska $v \cdot 50$ [Hz]	Velikost višjih harm.komponent $U_n/U_0$			
		$p = 2$	$p = 3$	$p = 6$	$p = 12$
1	50	-	-	-	-
2	100	47,2	-	-	-
3	150	-	17,7	-	-
4	200	9,42	-	-	-
5	250	-	-	-	-
6	300	4,05	4,05	4,05	-
7	350	-	-	-	-
8	400	2,25	-	-	-
9	450	-	1,77	-	-
10	500	1,43	-	-	-
11	550	-	-	-	-
12	600	0,99	0,99	0,99	0,99
13	650	-	-	-	-
14	700	0,73	-	-	-
15	750	-	0,63	-	-
16	800	0,56	-	-	-
17	850	-	-	-	-
18	900	0,44	0,44	0,44	-
19	950	-	-	-	-
20	1000	0,36	-	-	-
21	1050	-	0,32	-	-
22	1100	0,29	-	-	-
23	1150	-	-	-	-
24	1200	0,25	0,25	0,25	0,25

V omrežnem toku dobimo na neko višjo harmonsko komponento napetosti na enosmerni strani po dve sosednji višji harmonski toka

$$v = n \cdot p \pm 1 \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

katere efektivna vrednost je:

$$I_{vi} = \frac{1}{v} I_{li}$$

$I_{li}$  – efektivna vrednost osnovne harmonske idealnega omrežnega toka.

Idealni omrežni tok ima efektivno vrednost

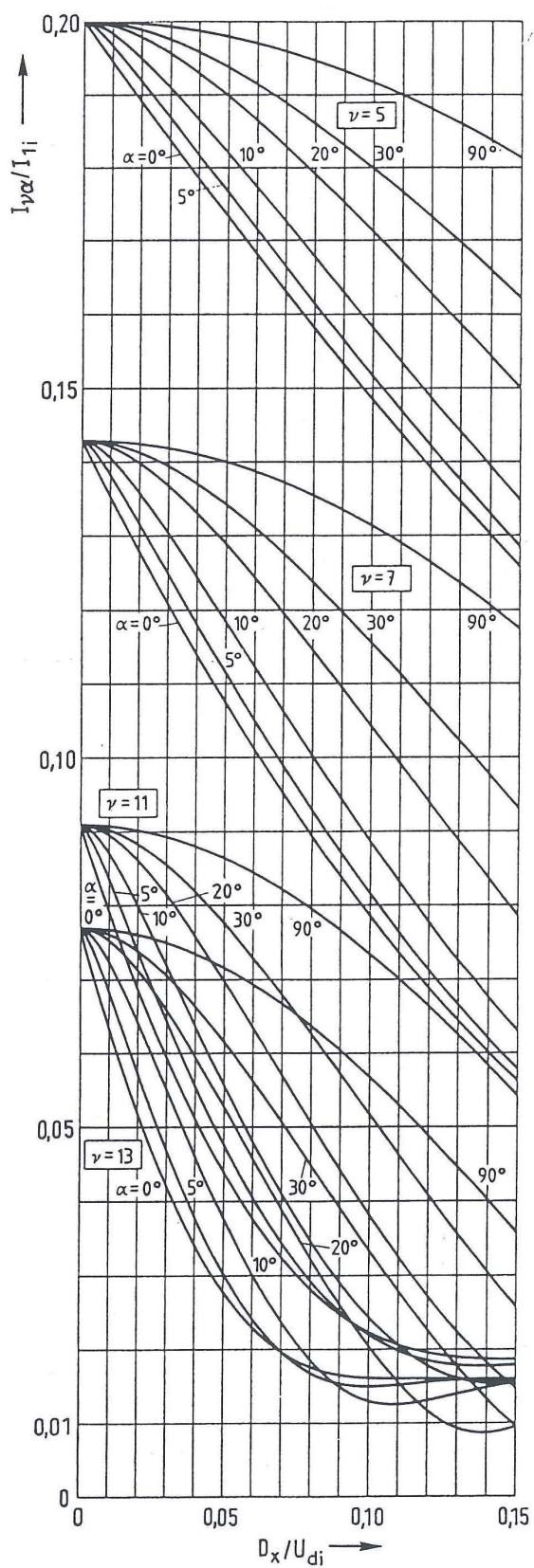
$$I_{Li} = \sqrt{I_{li}^2 + \sum I_{vi}^2} = I_{li} \sqrt{1 + \sum \frac{1}{v^2}}$$

V splošnem lahko rečemo, da je velikost višjih harmonskih komponent v omrežnem toku odvisna od krmilnega kota in od relativnega induktivnega padca napetosti  $d_x$ .

Slabše glajen tok na enosmerni strani pogojuje drugačne amplitude višjih harmonskih komponent v izmeničnem toku (slika 7.33 in 7.34)

Zaključek razmišljanja o višjih harmonskih komponentah:

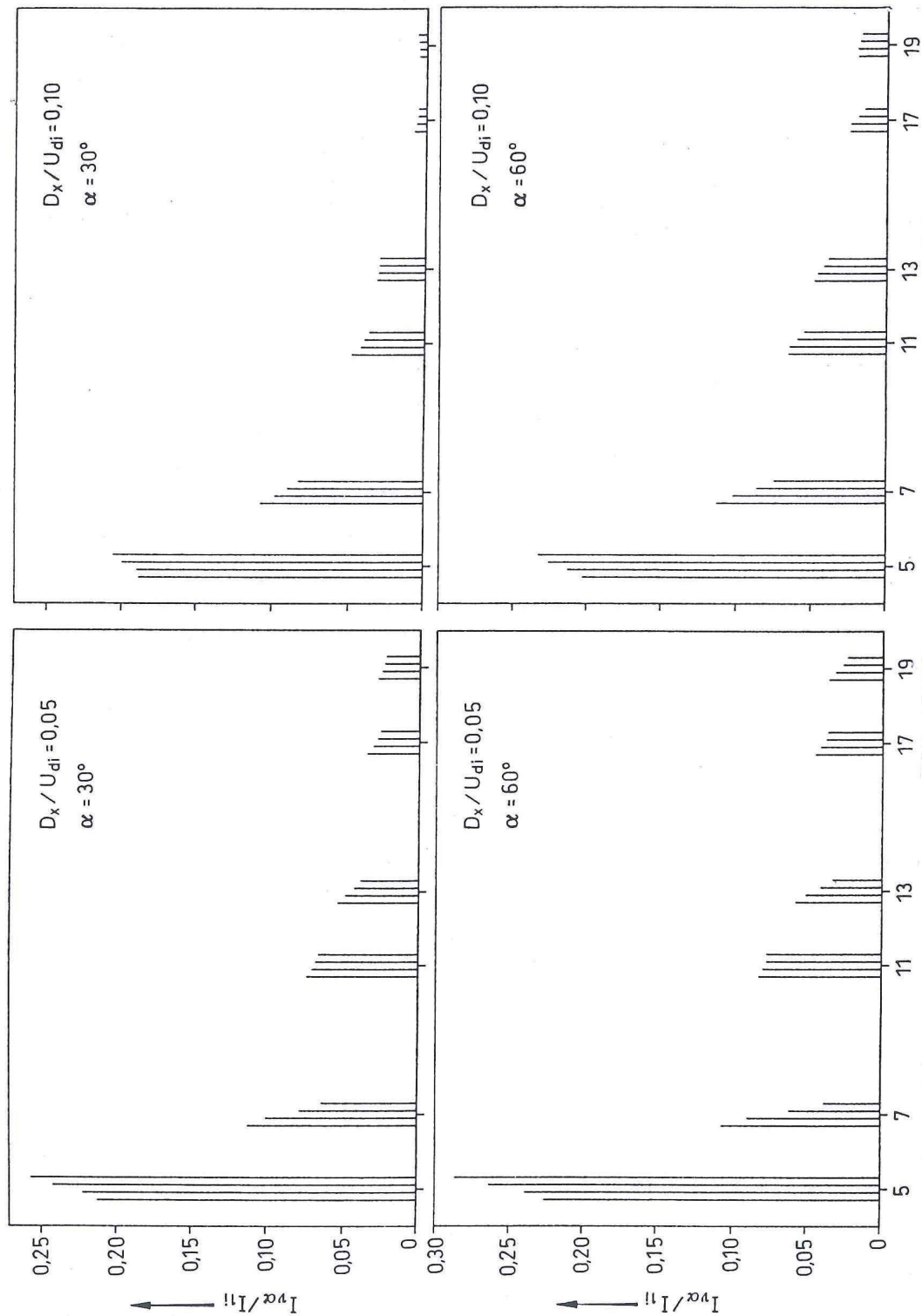
- Na enosmerni strani gladimo tok glede na zahteve bremena.
- Želja po sinusnem omrežnem toku pa izhaja iz zahteve po čim manjšem popačenju omrežne napetosti. Zahteve glede čistosti omrežnega toka postajajo vse večje, saj je koncentracija porabnikov, ki delajo po principih močnostne elektronike vse večja, istočasno pa je na istem omrežju vse več občutljivih porabnikov n.pr. računalniki, modemi, krmilni sistemi itd.
- Področje urejanje medsebojnih vplivov različnih porabnikov na skupnem omrežju obravnava EMS (elektromagnetna skladnost), ki jo bomo obravnavali kasneje.



Slika 7.33:

Vpliv prekrivanja  
na višjeharmonske  
komponente v omrežju

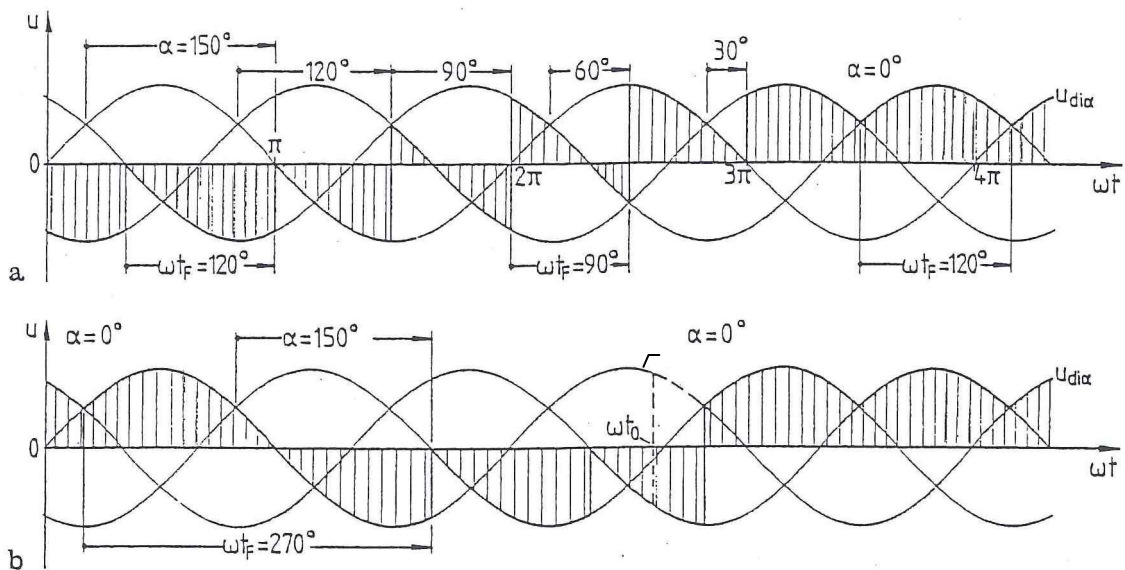




Slika 7.34: Vpliv nepopolnega glajenja na višjiharmonске komponente v omrežnem toku. Od leve proti desni za  $L_d/L_k = 10, 5, 2, 1$

### 7.13 Kot prevajanja toka in mrtvi čas

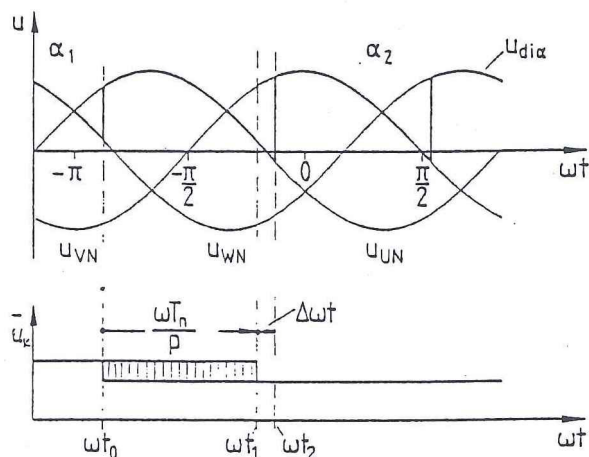
S spreminjanjem krmilnega kota  $\alpha$  vplivamo na velikost enosmerne napetosti pretvornika. Na sliki 7.35a je prikazan časovni potek enosmerne izhodne napetosti  $U_{di\alpha}$  pri postopnem prehodu iz razsmerniškega v usmerniško delovanje od  $\alpha = 150^\circ$  do  $\alpha = 30^\circ$ . Dolžina tokovnih paketov med prehodnim pojavom je  $90^\circ$  namesto  $120^\circ$  kar velja za stacionarno stanje pri tripulznem vezju. Pri prehodu iz usmerniškega v razsmerniški režim pa se tokovni paketi v prehodnem času ustrezno podaljšajo. Na sliki 7.35b vidimo nagel prehod od  $\alpha = 0^\circ$  na  $\alpha = 150^\circ$  in nazaj. Pravkar prevajajoč ventil, ki ga je zahteva po spremembi krmilnega kota doletela, je v tem primeru pri prehodu v razsmerniški režim prevajal tokovni paket dolg  $270^\circ$ . Takšni hitri prehodni pojavi so značilni pri napajanjih raznih magnetnih sistemov. Ta dejstva moramo upoštevati pri izbiri tiristorja saj temperatura zaporne plasti ne sme preseči dopustne vrednosti. O hitrosti oziroma načinu prehoda iz enega v drug režim delovanja odloča krmilni koncept naprave. Na sliki 7.35b sta po spremembi krmilne veličine prikazani dve možnosti: črtkana krivulja kaže prehod na ventil z največjo anodno napetostjo, izvlečena pa kaže, kako prevzame tok naslednji ventil pri krmilnem kotu  $\alpha = 0^\circ$ .



Slika 7.35: Izhodna napetost pretvornika a) pri postopnem prehodu iz razsmerniškega v usmerniško delovanje b) pri skočni spremembi krmilnega kota od  $0^\circ$  na  $150^\circ$  in nazaj na  $0^\circ$ .

Če gledamo pretvornik kot element regulacijskega kroga, lahko sklepamo, da izhodna enosmerna napetost ne more hipoma slediti krmilni veličini. Krmilni poseg učinkuje na izhod šele po vklopu sledečega ventila. Pretvornik dela v času  $t < t_0$  s krmilnim kotom  $\alpha_1$  (sl.7.36). V času, ko prevaja tiristor  $T_1$ , se skočno spremeni krmilna napetost v tem

smislu, da naslednji ventil vklopi pri nekem večjem krmilnem kotu  $\alpha_2$ . Šele po vklopu  $T_2$  v času  $t_2$  je dosežen



Slika 7.36: Način vrednotenja mrtvega časa omrežno vodenega pretvornika

želen učinek spremembe krmilne napetosti na izhodno napetost pretvornika. Prisoten imamo torej nek mrtvi časa med nastopom krmilne napetosti in spremembo izhodne napetosti. Če se krmilna napetost spremeni neposredno po času  $t_0$ , je mrtvi čas največji:

$$t_{M \max} = \frac{T_n}{p} + \Delta t,$$

če pa se spremeni krmilna napetost tik pred nastopom  $t_1$ , je mrtvi čas najmanjši in sicer:

$$t_{M \min} = \Delta t$$

Ker se krmilna veličina pogosto spreminja, predpostavljamo, da se to dogaja statistično enakomerno v časovnem intervalu  $t_0 < t < t_1$ . Zato upoštevamo mrtvi čas kot srednjo vrednost obeh:

$$T_M = \frac{1}{2} (t_{M \max} + t_{M \min}).$$

Običajno imamo opravka z majhnimi spremembami krmilnega kota  $\alpha$  okoli delavne točke in pri oceni statističnega mrtvega časa smemo trditi, da  $\Delta \alpha$  in z njim  $\Delta t$  limitirata proti nič, Tako dobimo statistični mrtvi čas p-pulznega pretvornika:

$$T_M = \frac{T_n}{2p}.$$

<b>7</b>	<b>TUJE VODENI PRETVORNIKI.....</b>	<b>91</b>
7.1	Omrežno vodeni pretvorniki.....	91
7.2	Komutacija pri šestpulznem mostičnem vezju .....	99
7.3	Bremenska karakteristika .....	106
7.4	Induktivni padec napetosti.....	106
7.5	Čas sprostitve in rezervni kot .....	108
7.6	Napetostni vdori zaradi komutacije.....	111
7.7	Krmilna jalova moč .....	115
7.8	Karakteristika jalove moči.....	117
7.9	Zaporedno krmiljenje .....	118
7.10	Polkrmiljena vezja.....	124
7.11	Krmljivost.....	126
7.12	Višje harmonske komponente enosmerne napetosti in izmeničnega toka.....	127
7.13	Kot prevajanja toka in mrtvi čas.....	132