

7 TUJE VODENI PRETVORNIKI

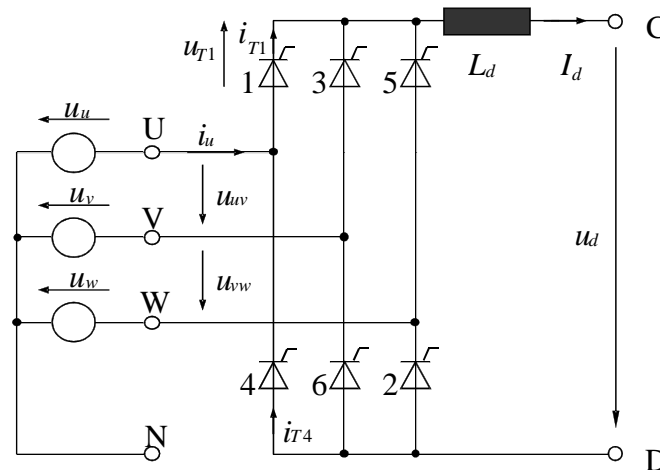
Pod tem naslovom bomo obravnavali pretvornike, ki kot stikalne elemente uporabljajo tiristorje, za takt delovanja in komutacijo pa skrbi bodisi

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

7.1 Omrežno vodeni pretvorniki

Delovanje tuje vodenih pretvornikov si bomo razložili na primeru trifaznega mosti nega vezja. Vezje je prikazano na sliki 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.

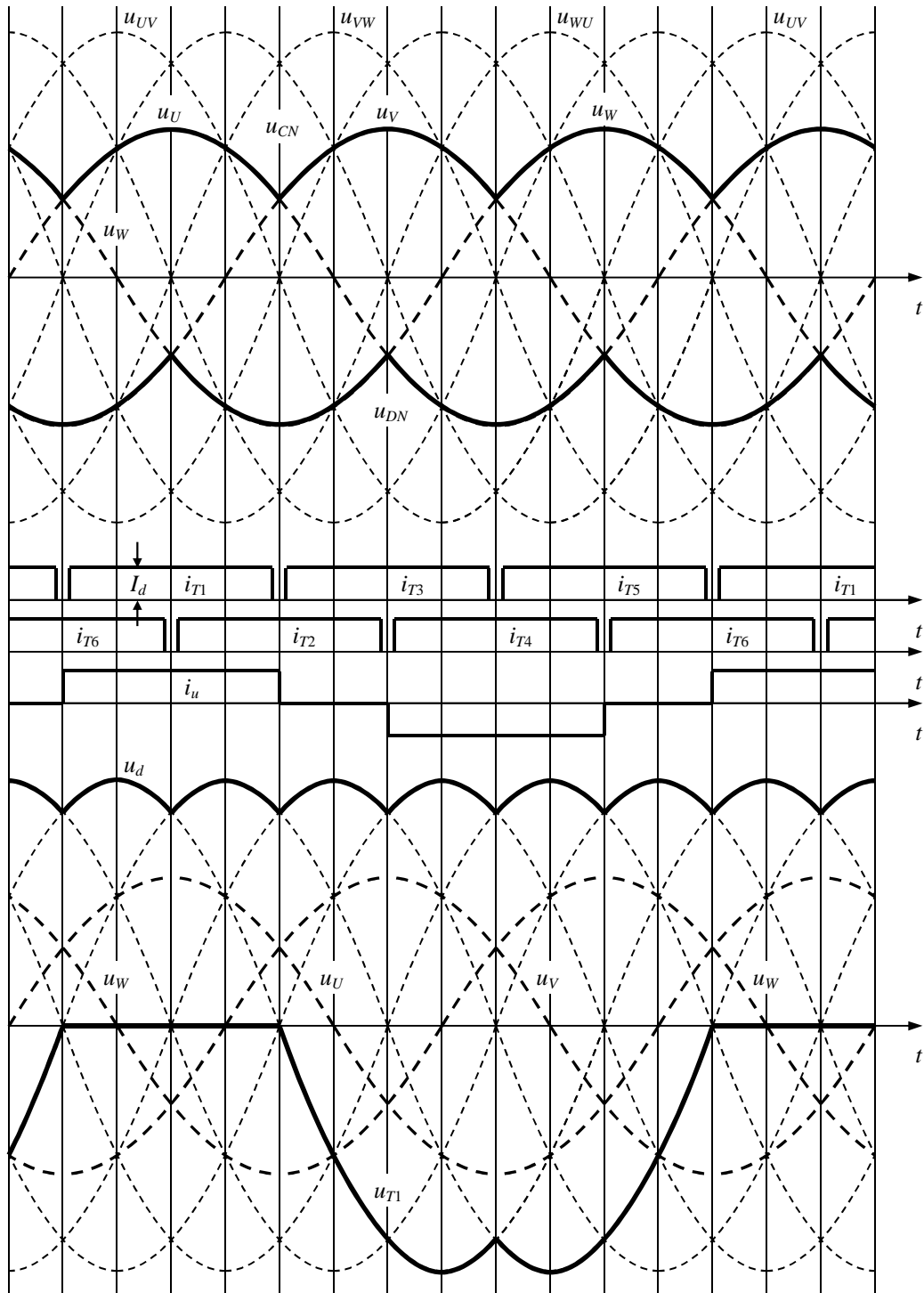


Slika 7.1: Trifazno mosti no vezje

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

Za zgornjo tiristorsko grupo je to:

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



Slika 7.2: asovni potek elektri nih veli in s slike 7.1

asovni potek elektri nih veli in s slike 7.1 je na sliki 7.2. Slika se pri ne pri prehodu napetosti faze u_U skozi ni .

Napetost U_{CN} , ki predstavlja potencialno razliko med to ko 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	$3\pi/6 < \check{S}t < 7\pi/6$	$u_{DN} = u_W$
Tiristor 4	$7\pi/6 < \check{S}t < 11\pi/6$	$u_{DN} = u_U$
Tiristor 6	$11\pi/6 < \check{S}t < (2\pi+3\pi/6)$	$u_{DN} = u_V$

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

$$i_U = i_{T1} - i_{T4} \quad (7.1)$$

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

$$u_d = u_{CD} = u_{CN} - u_{DN} \quad (7.2)$$

kar predstavlja vsakokratno najve jo 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 mosti nem 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 ozna ujemo število komutacij v eni ventilski grupi. V primeru šestpulznega mosti nega vezja znaša komutacijsko število $q = 3$.

Ker obe komutacijski grupi komutirata s asovnim zamikom, se spreminja topologija vezja vsakih $\pi/3$. Število neisto asnih komutacij v asu ene periode izmeni ne 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 mosti no vezje.

V šestpulznem mosti nem vezju sta, gledano iz enosmerne strani, dve komutacijski grupi, ki sta vezani v serijo. V splošnem označimo **število komutacijskih grup, ki ne komutirajo istočasno s rko s**.

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

$$p = q \cdot s \cdot r \quad (7.3)$$

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

$$u_{UV} = \sqrt{2}U \cos \omega t \quad (7.4)$$

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

$$\bar{U}_0 = \frac{1}{\pi/3} \cdot \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2}U \cos \omega t \cdot d\omega t \quad \bar{U}_0 = \frac{3}{\pi} \sqrt{2}U = 1,35 \cdot U \quad (7.5)$$

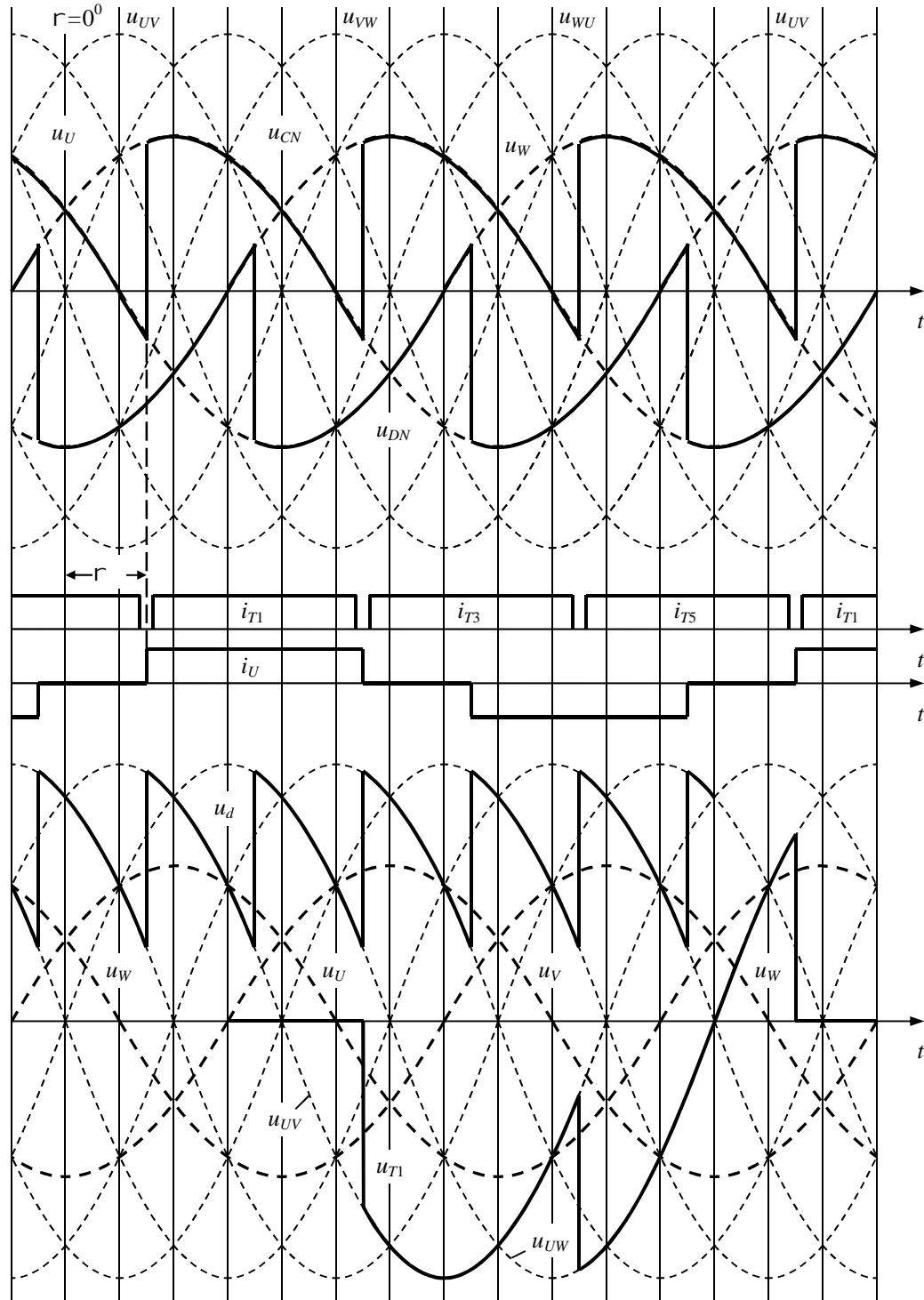
U je pri tem efektivna vrednost medfazne napetosti trifaznega sistema.

Če v vezju s slike 7.1 krmilni kot α 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.

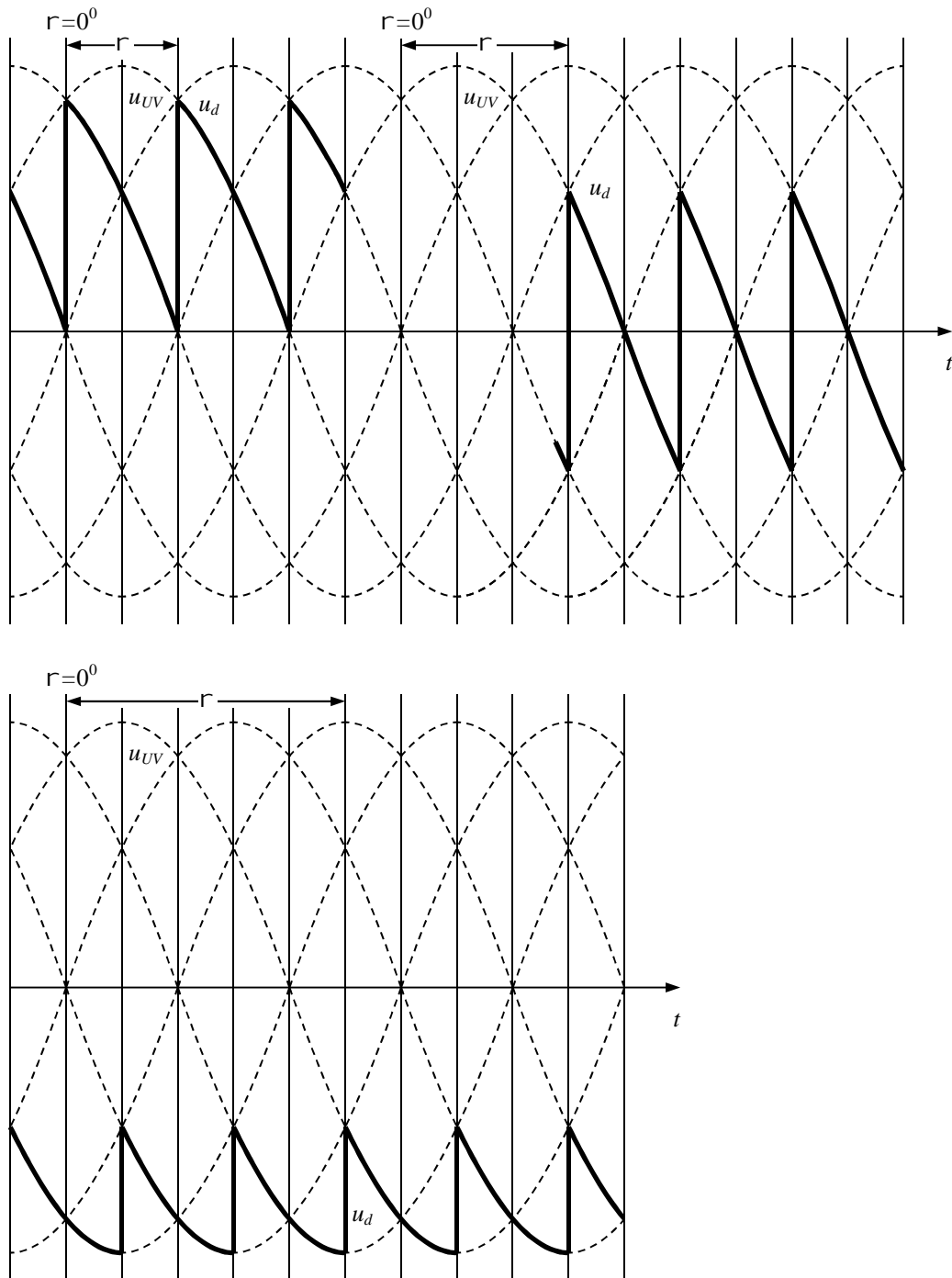
Delovanje tega na druga krmiljenja izhodne usmerjene napetosti, ki ga imenujemo **fazno krmiljenje**, je razloženo na sliki 7.3. Tiristorje prežimo vsakokrat za kot α premaknjeno glede na kot naravne komutacije ($\alpha = 0$), kar je primer, če so v vezju diode. Ker je prehod toka še vedno idealen (brez 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 α . Enako velja tudi za omrežni tok, ki je za kot α 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 α . Kako izgleda napetost na tiristorju za ta primer krmilnega kota pa kaže osnovni potek napetosti U_{T1} .

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



Slika 7.3: asovni poteki napetosti in tokov za fazno krmiljenje šestpulznega mostja nega vezja

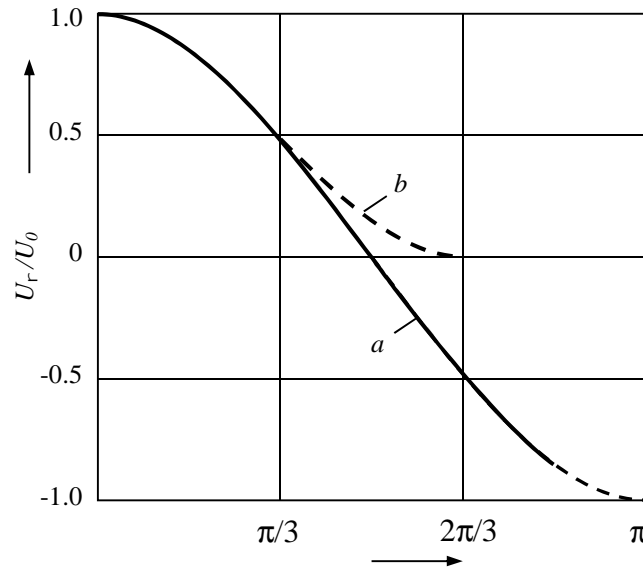


Slika 7.4: asovni poteki usmerjene napetosti u_d pri razli nih krmilnih kotih r

Aritmeti no srednjo vrednost usmerjene napetosti pri nekem **krmilnem kotu** r lahko izra unamo z integracijo enega intervala:

$$\bar{U}_r = \frac{1}{f/3} \int_{-(f/6)+r}^{+(f/6)+r} \sqrt{2}U \cos \check{S}t \cdot d\check{S}t = \frac{3}{f} \sqrt{2}U \cos r = \bar{U}_0 \cos r \quad (7.6)$$

Odvisnost aritmetične srednje vrednosti usmerjene napetosti pri faznem krmiljenju v odvisnosti od kota γ U_r je prikazana na sliki 7.5.



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

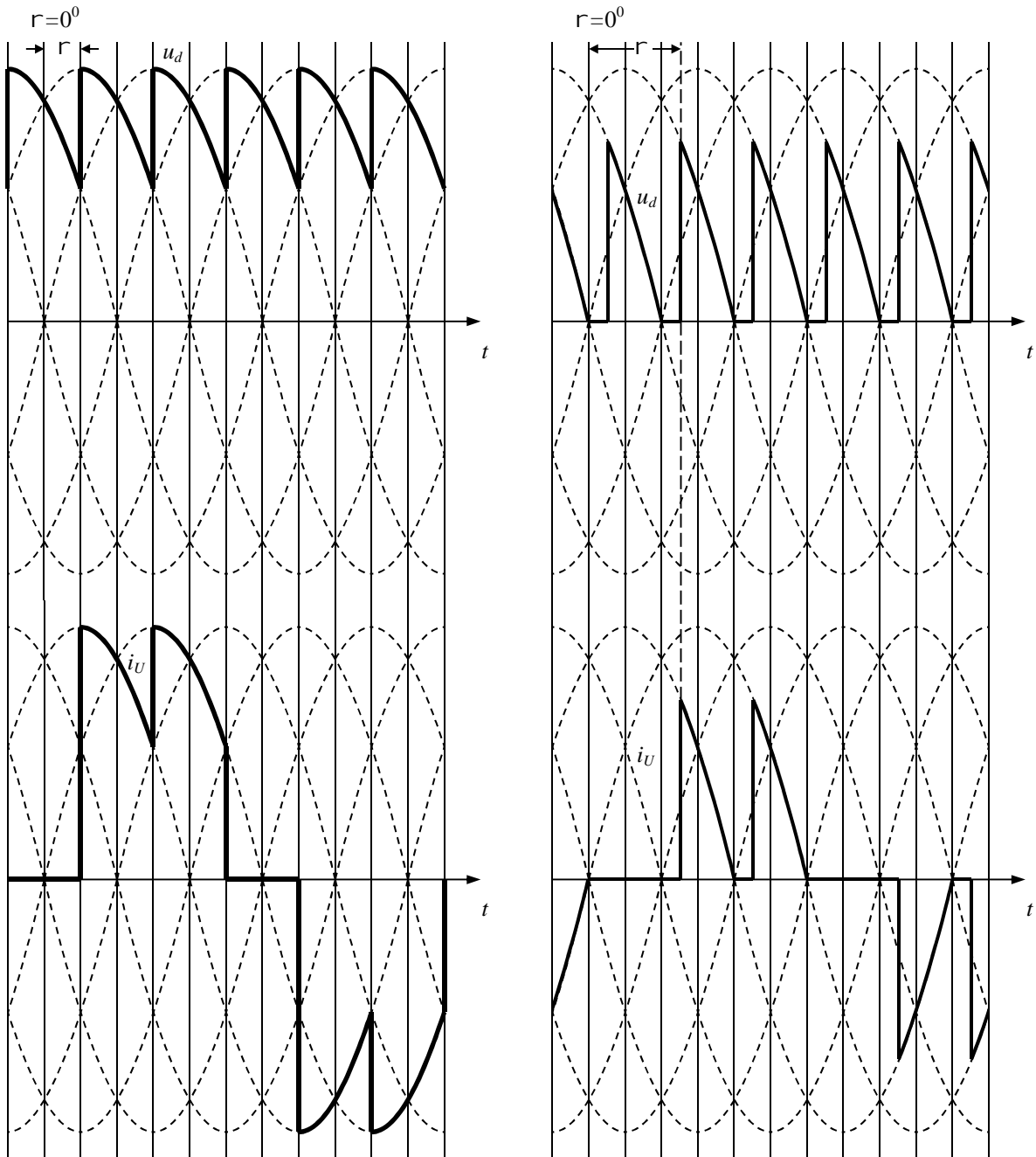
Vidimo, da je največja izhodna enosmerna napetost pri krmilnem kotu $\gamma = 0$, t.j. v primeru naravne komutacije, kar velja tudi za vezje, ki ima namesto tiristorjev diode. Zgornji izraz smo izpeljali ob predpostavki, da imamo idealen prehod toka iz ene veje na drugo, popolnoma zglajen enosmerni tok,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

Pri krmilnem kotu $\gamma > \pi/2$ postane U_r 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 delo obravnavano vezje za krmilne kote $\gamma < \pi/2$ kot usmernik, za kote $\gamma > \pi/2$ pa kot razsmernik.

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

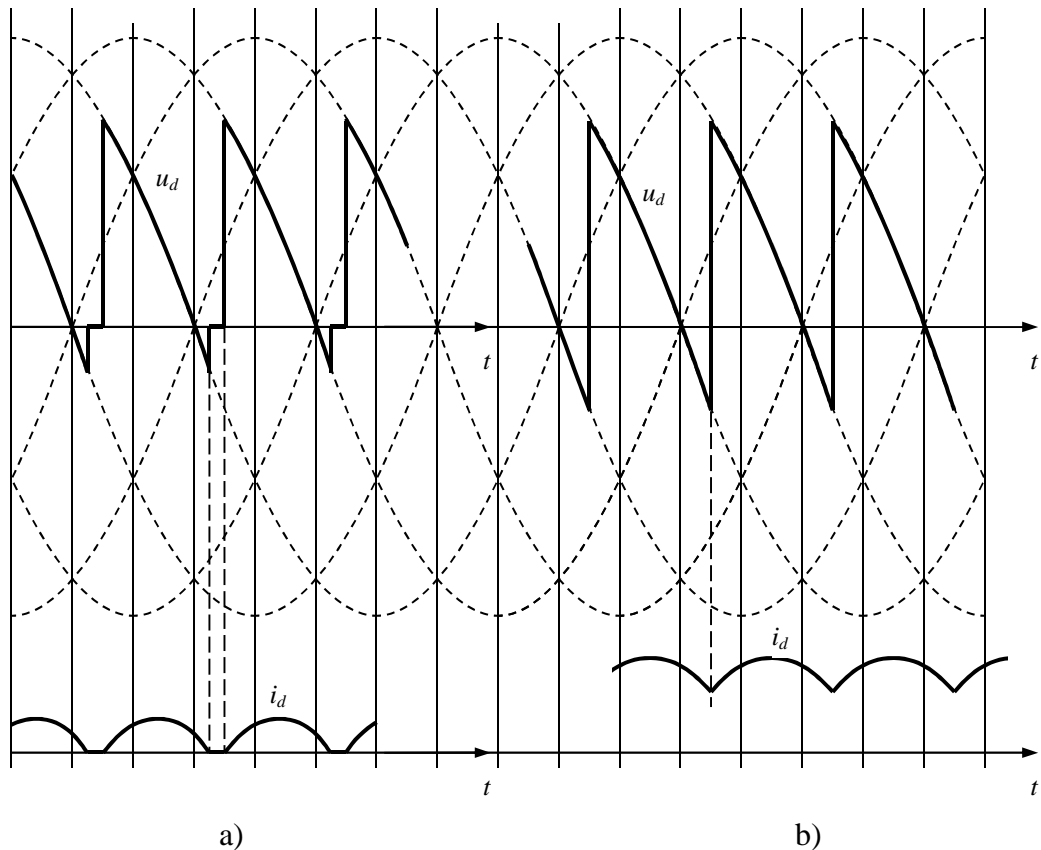
Za kot $\gamma > \pi/3$ tok i_d ni več zvezen. Rečemo tudi, da je tok trgan. Isto velja tudi za tok na omrežni strani, kar vidimo na oscilogramu toka i_u .

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 isto drugačno regulacijsko tehniko, ne prejeme kot pa zvezen tok.



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

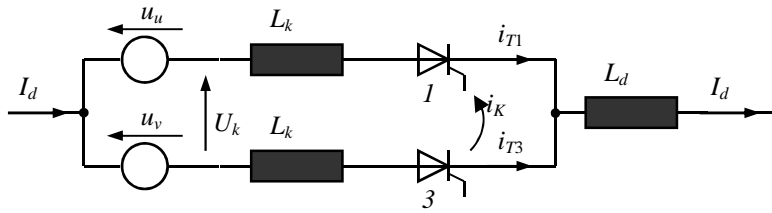
Na sliki 7.5 je prikazana tudi krmilna karakteristika $U_r = f(r)$ za primer isto ohmskega bremena. Za obravnavano trifazno mostjo no vezje vidimo, da lahko po principu faznega krmiljenja spreminjamo izhodno napetost od maksimalne vrednosti do vrednosti ni s spremembo krmilnega kota od $r = 0$ do $r = 2\pi/3$.

Slika 7.7: asovni poteki u_d in I_d pri nepopolnem glajenju

7.2 Komutacija pri šestpulznem mosti nem vezju

Do sedaj smo obravnavali šestpulzno mosti no 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 prakti nih 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 prakti no 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 as zelo kratek, bomo zopet predpostavili, da je enosmeren tok v obravnavanem asovnem 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 izra un komutacije

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

$$u_K = \sqrt{2}U_K \sin \check{S}t \quad (7.7)$$

Prehod toka s tiristorja 1 na tiristor 3 lahko za kot $\gamma = 0$ opišemo z naslednjo ena bo:

$$u_K + L_K \frac{di_{T1}}{dt} - L_K \frac{di_{T3}}{dt} = 0 \quad (7.8)$$

$$i_{T1} + i_{T3} - I_D = 0 \quad (7.9)$$

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

Ker velja:

$$-\frac{di_{T1}}{dt} = \frac{di_{T3}}{dt} = \frac{di_K}{dt} \quad i_K - \text{komutacijski tok} \quad (7.10)$$

lahko napišemo:

$$u_K = 2L_K \frac{di_K}{dt} = \sqrt{2}U_K \sin \check{S}t \quad (7.11)$$

Od tod je:

$$i_K = \frac{\sqrt{2}U_K}{2\check{S}L_K} \cdot \int_0^{\check{S}t} \sin \check{S}t \cdot d\check{S}t = \frac{\sqrt{2}U_K}{2\check{S}L_K} (1 - \cos \check{S}t) \quad (7.12)$$

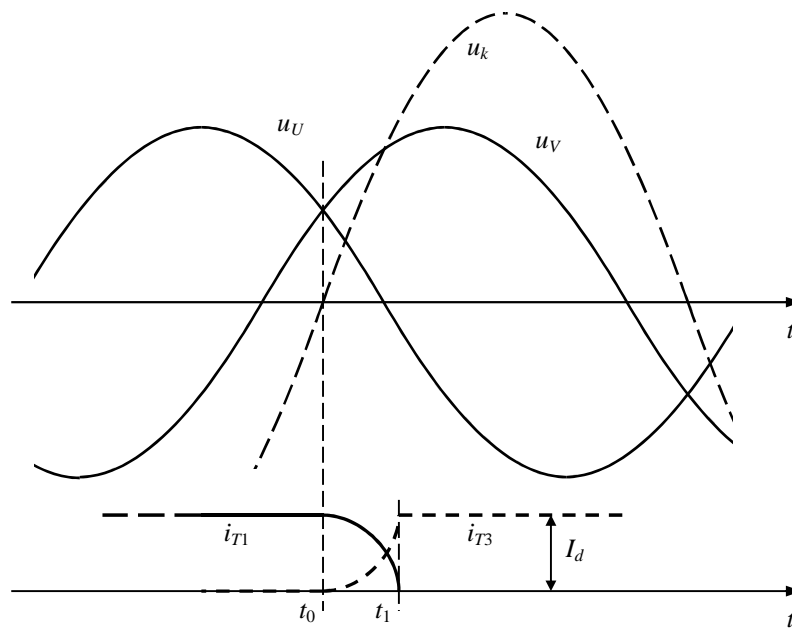
Tok tiristorja T_3 , ki prevzema tok, je kar enak toku i_K :

$$i_{T3} = \frac{\sqrt{2}U_K}{2\check{S}L_K} (1 - \cos \check{S}t) \quad (7.13)$$

$$i_{T1} = I_d - i_{T3} = \frac{\sqrt{2}U_K}{2\check{S}L_K}(\cos\check{S}t - 1) + I_d \quad (7.14)$$

Ena bi veljata, dokler je $i_{T1} > 0$. 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 , pripadajo kot pa kot prekrivanja u .

$$U = \check{S} t_u = \check{S} (t_1 - t_0) \quad (7.15)$$



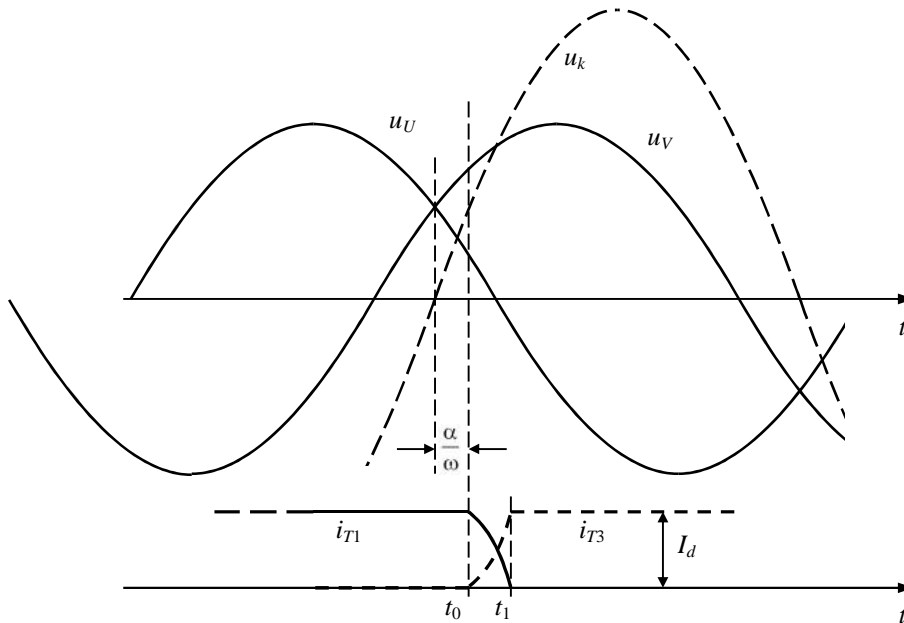
Slika 7.9: časovni potek tokov in napetosti v komutacijskem krogu pri kotu $r = 0$

S prestavitvijo integracijskih mej pri izrazu za i_K od r do $(r + \check{S}t)$ dobimo rešitvi za tokova obeh tiristorjev:

$$i_{T3} = \frac{\sqrt{2}U_K}{2\check{S}L_K}(\cos r - \cos(\check{S}t + r)) \quad (7.16)$$

$$i_{T1} = \frac{\sqrt{2}U_K}{2\check{S}L_K}(\cos(\check{S}t + r) - \cos r) + I_d \quad (7.17)$$

časovni potek veli in za ta primer je na sliki 7.10.



Slika 7.10: asovni poteki tokov in napetosti med komutacijo pri krmilnem kotu α razli nem od ni

Na sliki 7.11 lahko vidimo komutacijske razmere pri razli nih krmilnih kotih. Tok i_{K0} na sliki je tok, ki bi ga poganjala napetost u_K v komutacijskem tokokrogu, e v njem ne bi bilo ventilov. Pri vsakem krmilnem kotu imamo druga no obliko asovnega poteka komutacijskega toka, saj se komutacijski proces vrši pod druga nimi napetostnimi pogoji, ki so razvidni v zgornjem delu slike. V asu komutacije se ena komutacijska induktivnost izprazni, druga pa napolni, za kar je potrebna pri vseh krmilnih kotih r enaka napetostno asovna ploskev (šrafirano). To velja, e je $I_d = \text{konst.}$

Na kot prekrivanja oziroma as komutacije vplivajo komutacijski parametri: \check{S} , U_K , L_K in delovna parametra: krmilni kot α in enosmerni tok I_d .

Kot prekrivanja u lahko izra unamo iz izraza za i_{T1} , ko ta doseže vrednost ni . as prekrivanja je $\check{S}t = u$. Iz ena be

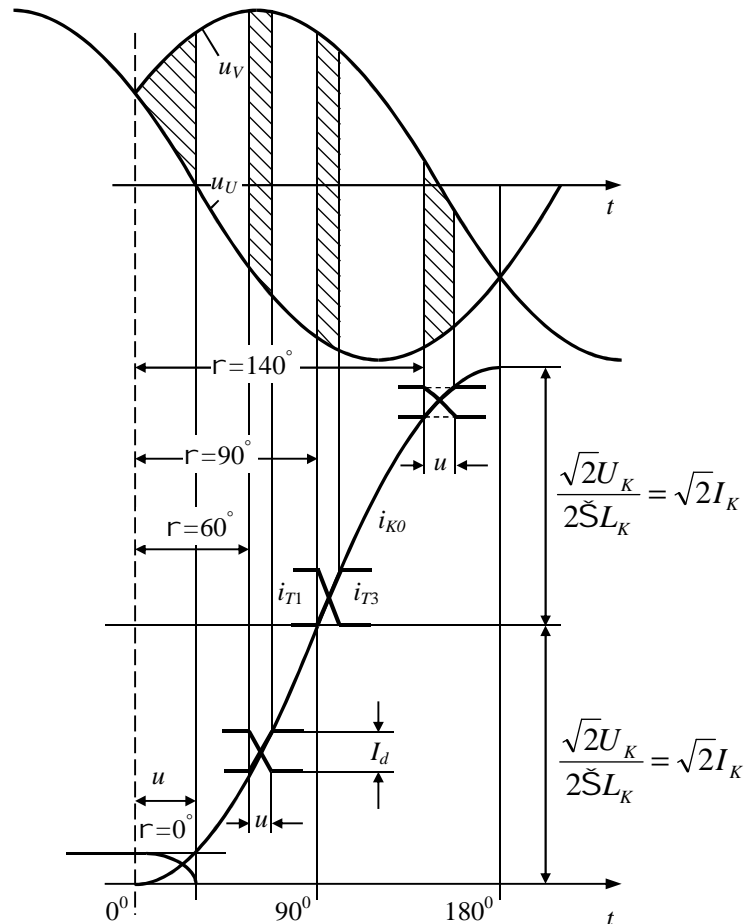
$$\frac{\sqrt{2}U_K}{2\check{S}L_K} \cdot (\cos(u+r) - \cos r) + I_d = 0 \quad \text{dobimo} \quad (7.18)$$

$$\cos(r+u) = \cos r - \frac{2I_d\check{S}L_K}{\sqrt{2}U_K} = \cos r - \frac{I_d}{\sqrt{2}I_K}; \quad (7.19)$$

$$I_K = \frac{U_K}{2\check{S}L_K} \quad (\text{efektivna vrednost trajnega kratkosti nega toka}) \quad (7.19)$$

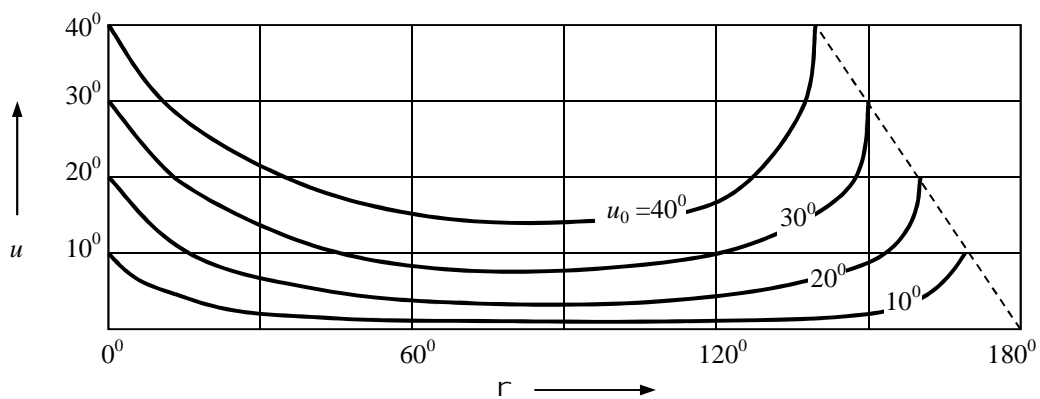
Lahko izra unamo tudi kot prekrivanja u_o , ki velja za kot $r = 0$, t.j. za kot pri naravni komutaciji ali kot tudi re emo za etni kot prekrivanja.

$$\cos u_o = 1 - \frac{2\tilde{S}L_K I_d}{\sqrt{2}U_K} = 1 - \frac{I_d}{\sqrt{2}I_K} \tag{7.20}$$



Slika 7.11: Komutacijski prehodni pojavi pri razli nih krmilnih kotih

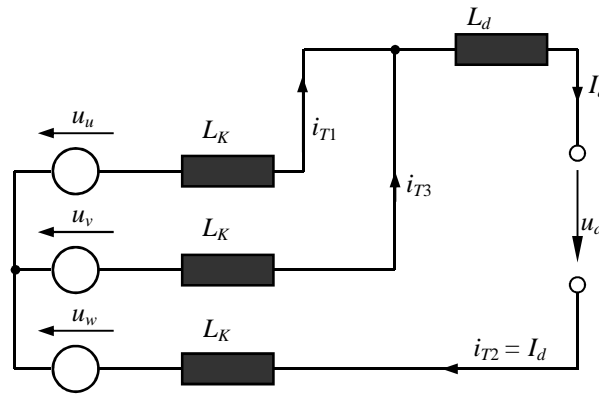
Na sliki 7.12 imamo prikazano odvisnost kota prekrivanja od krmilnega kota, pri emer je parameter za etni kot prekrivanja u_o .



Slika 7.12: Kot prekrivanja v odvisnosti od krmilnega kota r

Zaradi prekrivanja ne moremo krmiliti izhodne napetosti dlje kot do rtkane rte na sliki. e pri tem upoštevamo še potreben as sprostitve tiristorja, ki ga ta potrebuje, da lahko zopet blokira napetost v prevodni smeri, vidimo, da se krmilno obmo je še bolj omeji.

V asu prekrivanja, torej med komutacijskim prehodnim pojavom, izhodna enosmerna napetost ni ve takšna kot v idealnih razmerah. Za izra un njenega asovnega 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 mostu nem vezju. Narisane so samo povezave v katerih so prevajajo i ventili.



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

e velja:

$$i_{T1} + i_{T3} = I_d = \text{konst.} \quad \text{potem je:} \quad (7.21)$$

$$u_d + u_w - u_u + L_K \frac{di_{T1}}{dt} = 0 \quad (7.22)$$

$$u_d + u_w - u_v + L_K \frac{di_{T3}}{dt} = 0 \quad (7.23)$$

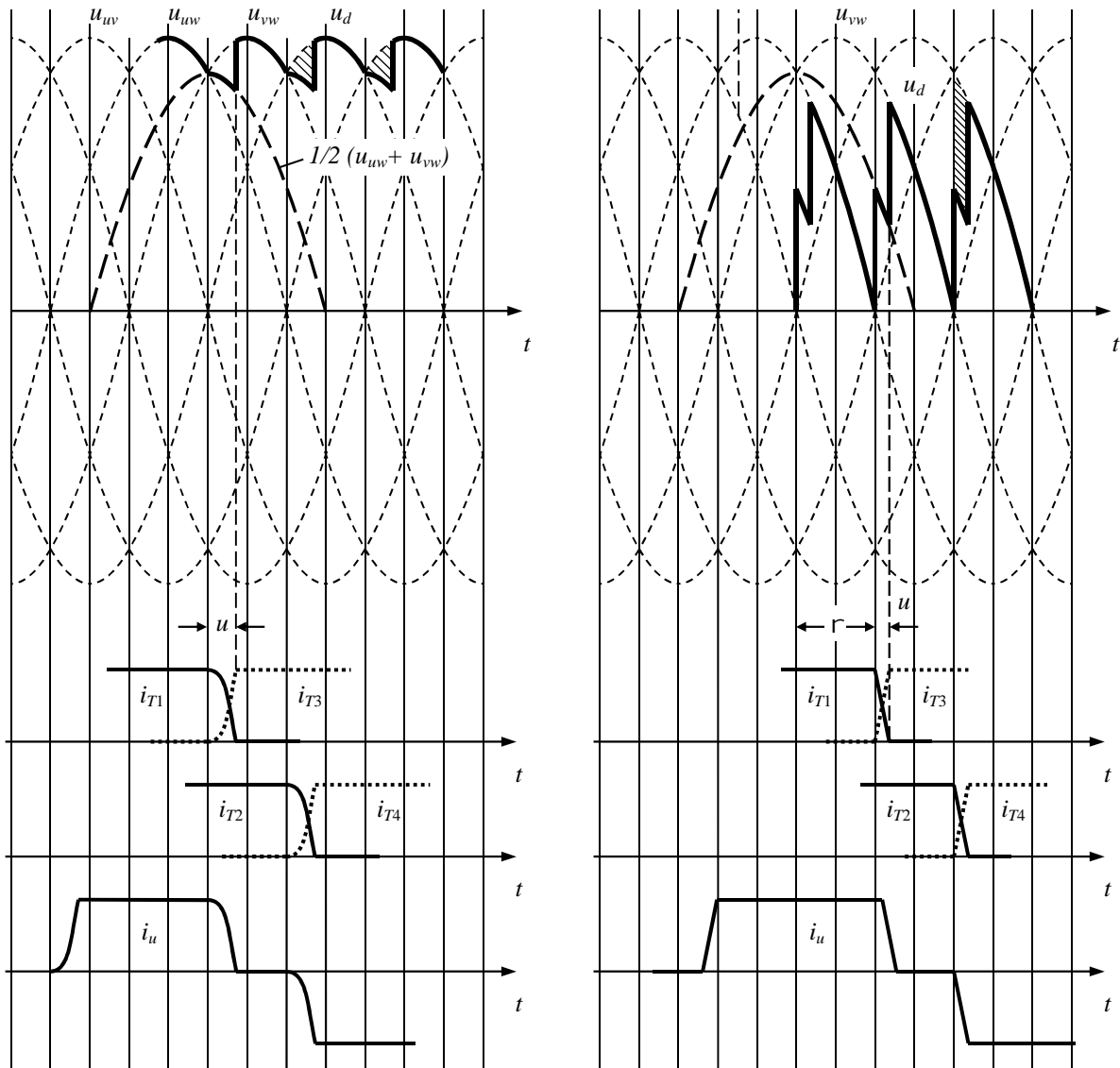
e privzamemo, da je $u_w - u_u = u_{wu}$
 $u_{uw} = -u_{wu}$

dobimo iz zgornjih ena b asovni potek enosmerne napetosti med prekrivanjem.

$$u_d = \frac{1}{2}(u_{uw} + u_{vw}) \quad \text{ali} \quad u_d = u_{vw} - L_K \frac{di_{T3}}{dt} \quad (7.24)$$

Na tej osnovi so narisani oscilogrami na sliki 7.14.

$$u_d = \frac{1}{2}(u_{uw} + u_{vw}) \quad (7.25)$$



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

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

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 izra unanega.

7.3 Bremenska karakteristika

Idealna enosmerna napetost usmernika U_{di} , ki smo jo pri razli nih krmilnih kotih imenovali U_{dir} 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 povzro ijo induktivnosti L_K v komutacijskem krogu. V komutacijskem krogu nahajajo e se induktivnosti omejujejo tokovne strmine komutacijskih tokov in s tem š itijo ventile pred prevelikim di/dt . Velikost tega padca napetosti bomo izra unali s pomo jo slike 7.14. V asu prekrivanja prevajata dve fazi isto asno tako, da ovojnica usmerjene napetosti ne gre po trenutno najvišji medfazni napetosti, ampak po njuni srednji vrednosti. Iz slike je lepo razvidna napetostno-asovna ploskev, ki se pri vsaki komutaciji izgubi (rtkana ploskev).

Za komutacijski krog velja ena ba:

$$u_K - 2L_K \cdot \frac{di_{T3}}{dt} = 0 \quad (7.26)$$

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

$$\int_0^{t_u} u_K dt = 2L_K \int_0^{I_d} di_{T3} \quad (7.27)$$

Napetostno- asovna ploskev ob eni komutaciji je induktivni padec napetosti

$$\frac{1}{2} \int_0^{t_u} u_K dt = L_K I_K \quad [\text{Vs}] \quad (7.28)$$

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

V asovni 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:

$$D_X = f s q L_K I_d \quad (7.29)$$

Izražen relativno proti U_{di} :

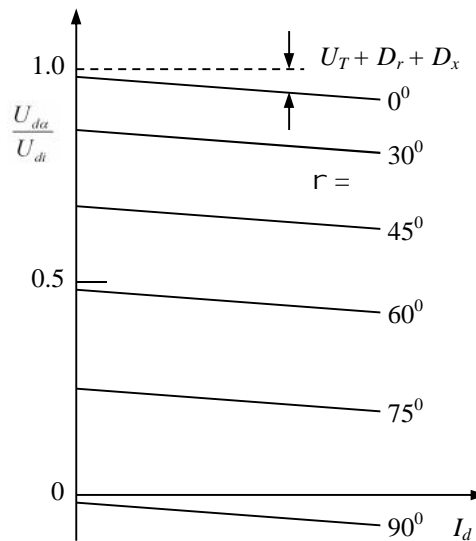
$$d_x = \frac{D_X}{U_{di}} \quad (7.30)$$

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 ventilom 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 sta linearno odvisna od bremenskega toka.

7.5 as sprostitve in rezervni kot

Poglejmo si na tem mestu skrajni možni doseg v razsmerniškem podro ju ob upoštevanju kota prekrivanja in asa sprostitve vklopljivega tiristorja. Potem, ko tiristorski tok postane ni , mora biti tiristor najmanj za as 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 $r = 150^\circ$, seveda za primer šestpulznega mosti nega vezja.

Zunaj asa prekrivanja velja naslednje:

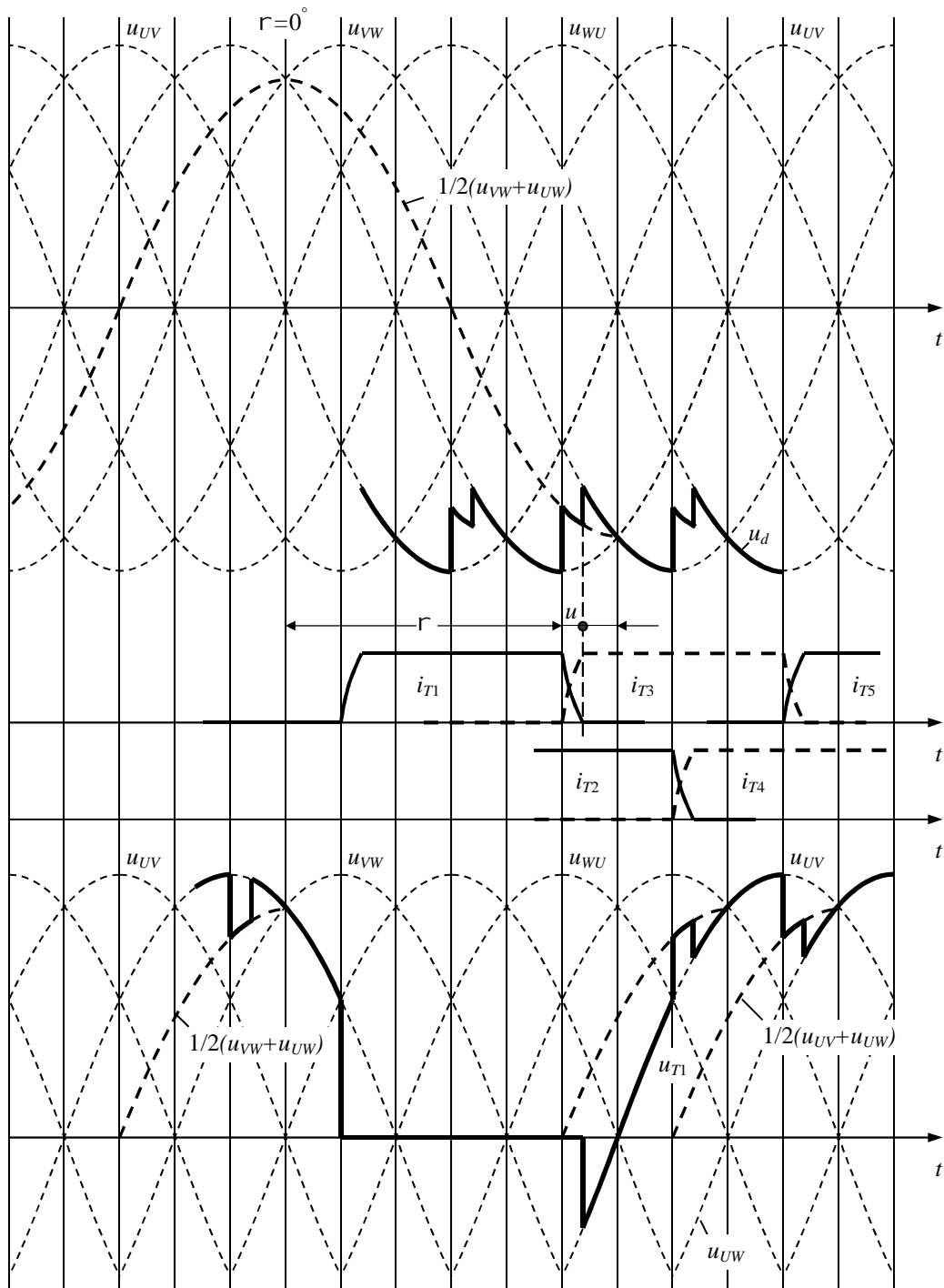
v intervalu, ko je $i_{T3} = I_d$

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

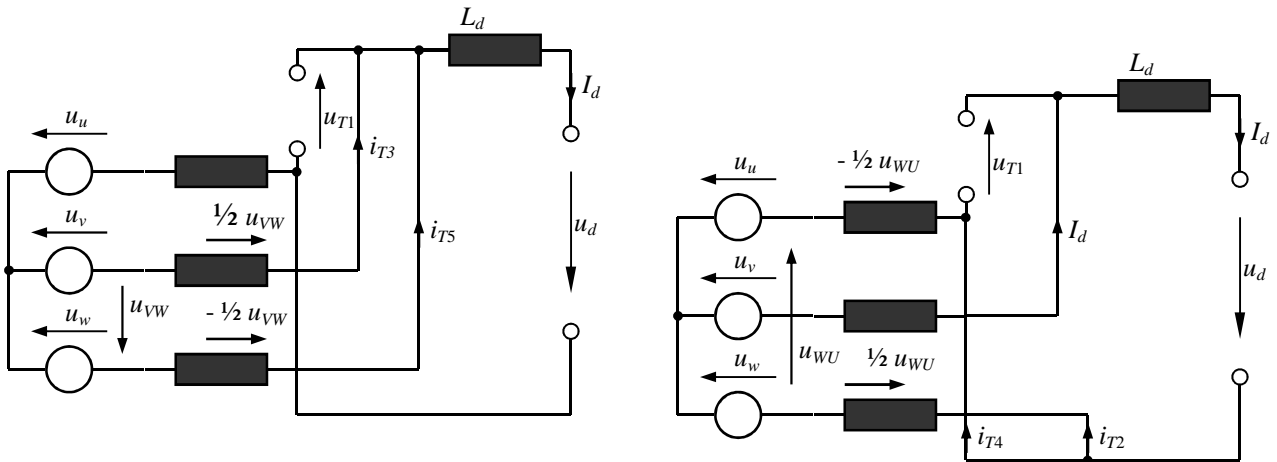
v intervalu, ko je $i_{T5} = I_d$

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

Napetost na tiristorju T_1 je torej pri vsakem krmilnem kotu sestavljena iz odsekov teh napetosti. Za $r = 150^\circ$ je prikazan asovni potek napetosti izven asa 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 $r = 150^\circ$

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:

$$u_{T1} - u_{UV} - \frac{1}{2}u_{VW} = 0 \quad (7.31)$$

$$u_{T1} - u_{UW} + \frac{1}{2}u_{VW} = 0 \quad (7.32)$$

$$2u_{T1} = u_{UV} + u_{UW} \quad (7.33)$$

$$u_{T1} = \frac{1}{2}(u_{UV} + u_{UW}) \quad (7.34)$$

Ta krivulja je narisana v sliki 7.16.

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

$$u_{T1} - u_{UV} - \frac{1}{2}u_{WU} = 0 \quad (7.35)$$

$$u_{T1} - u_{WU} + \frac{1}{2}u_{WU} = 0 \quad (7.36)$$

$$u_{T1} = \frac{1}{2}(u_{UV} + u_{WV}) \quad (7.37)$$

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

$$u_{T1} = \frac{1}{2}(u_{UW} + u_{VW}) \quad (7.38)$$

Ti asovni poteki napetosti na T_1 med prekrivanjem so narisani na sliki 7.16. Na tej sliki je kot χ ozna en kot ugasni kot. Pogoj za zanesljiv prehod toka iz tiristorja T_1 na T_3 je, da je rezervni as t_s do skrajnega razsmerniškega režima ve ji kot je as sprostitve t_q . Kotu χ odgovarja v asovnem merilu rezervni as.

$$\chi = \check{S} t_s \text{ } 0 \check{S} t_q \quad (7.39)$$

Na tej sliki tudi vidimo, da je maksimalni krmilni kot Γ_{max} v razsmerniškem podro ju omejen dodatno še s kotom prekrivanja u .

$$\Gamma_{max} = f - (\chi + u) \quad (7.40)$$

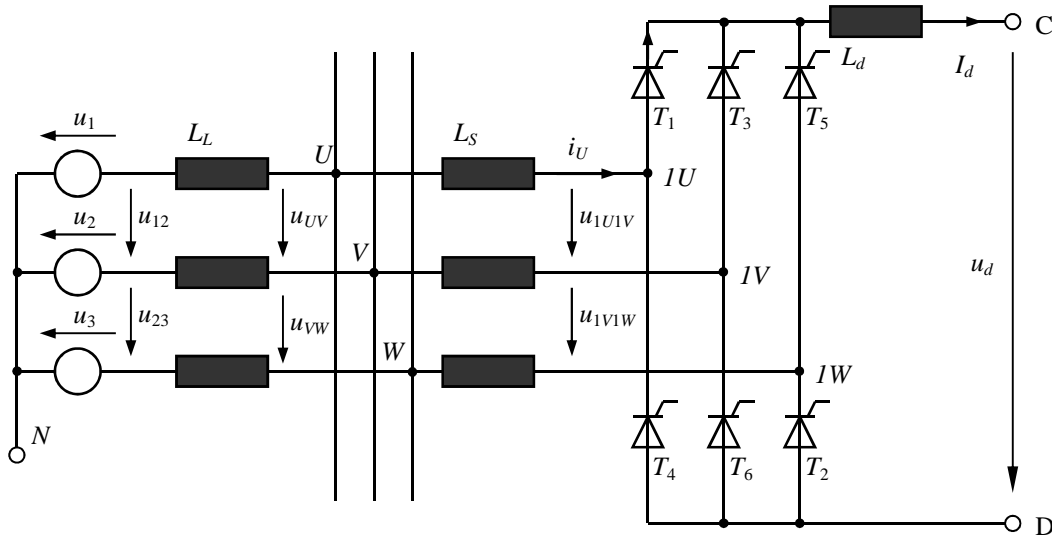
e bi torej bil krmilni kot $\Gamma < \Gamma_{max}$, potem tiristor ob nastopu pozitivne napetosti še ne bi bil sposoben to napetost blokirati. Ostal bi v prevodnem stanju in pretvornik bi v razsmerniškem režimu "prevesil", kar bi pomenilo direkten kratek stik med omrežjem in aktivnim bremenom (v kratkosti nem je vsota napetosti delujo e faze in napetosti bremena – generatorja).

7.6 Napetostni vdori zaradi komutacije

Do sedaj smo obravnavali omrežno napetost kot idealni sinusni vir brez notranjih upornosti. e 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 razli ne namene zadosten prakti en približek dejanskemu stanju. Slika 7.18 kaže šestpulzno mosti no vezje, ki je priklju eno na omrežje preko induktivnosti L_S . Omrežje pa predstavljajo idealni viri z napetostmi u_1, u_2, u_3 in omrežne induktivnosti L_L . Priklju ne sponke usmerniškega vezja U, V, W ozna ujejo omrežne priklju ne sponke, na katere so lahko priklju eni 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:

$$U_{1U1V} = u_{UV} = u_{12} \quad (7.41)$$

Slika 7.18: Šestpulzno vazje priklju eno na omrežje preko L_S

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

$$u_{1U1V} = 0 \quad (7.42)$$

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 ena b za vsako od obeh vej, ki komutirata:

$$u_{1U1V} - \frac{1}{2}u_{23} - u_{12} = 0 \quad u_{1U1V} + \frac{1}{2}u_{23} - u_{13} = 0 \quad (7.43)$$

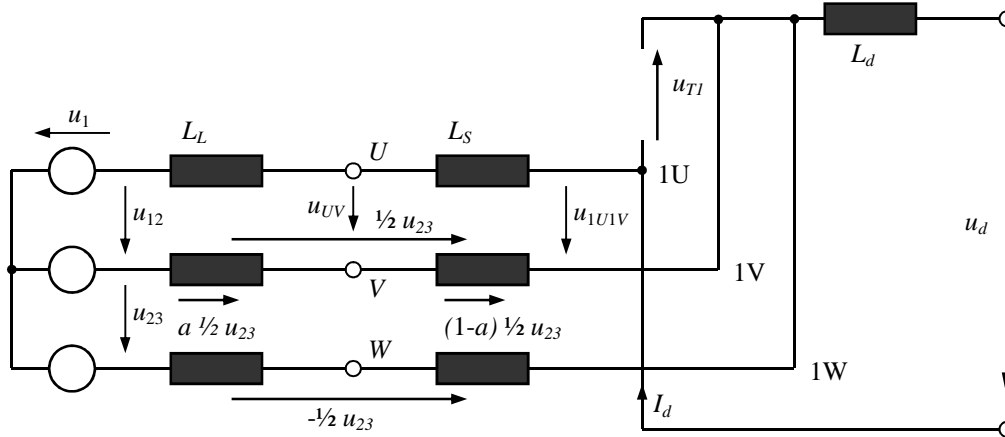
$$u_{1U1V} = \frac{1}{2}(u_{12} + u_{13}) \quad (7.44)$$

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

Za intervale prekrivanja 5-1 in 2-4 dobimo ena bi:

$$u_{1U1V} - \frac{1}{2}u_{13} - u_{12} = 0 \quad u_{1U1V} + \frac{1}{2}u_{13} + u_{23} = 0 \quad (7.45)$$

$$u_{1U1V} = \frac{1}{2}(u_{12} + u_{32}) \quad (7.46)$$

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

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

Iz slike 7.20 lahko razberemo, da so vdori najve ji pri krmilnem kotu $r = 90^\circ$. Širina napetostnih vdorov je enotna in je enaka asu prekrivanja.

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

Med prekrivanjem 1-3 in 4-6 dobimo:

$$u_{12} - a \frac{1}{2} u_{12} - u_{UV} - a \frac{1}{2} u_{12} = 0 \quad (7.47)$$

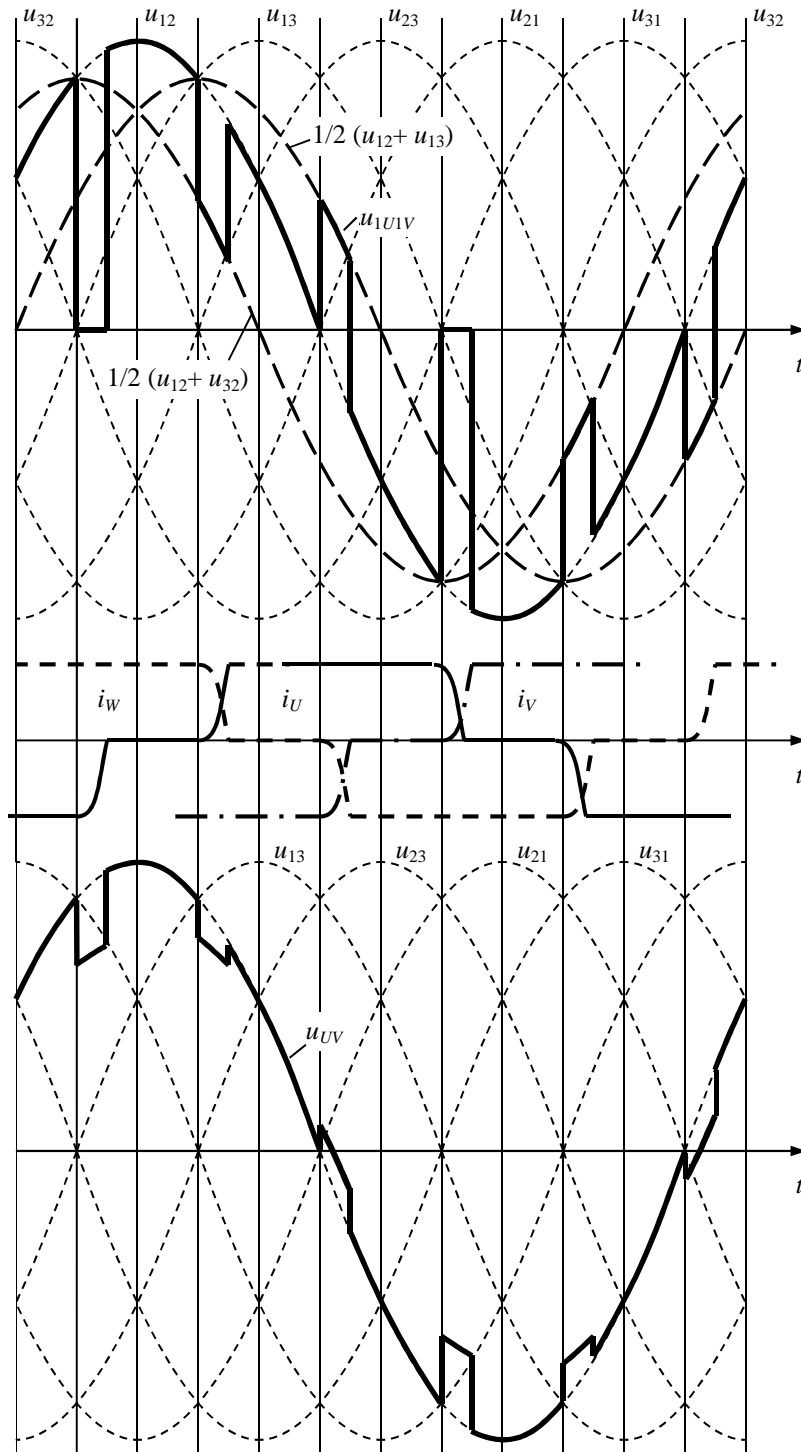
$$u_{UV} = u_{12} - a \cdot u_{12} \quad (7.48)$$

Pri tem je

$$a = \frac{L_L}{L_L + L_S} \quad (7.49)$$

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

$$u_{UV} - a \frac{1}{2} u_{23} - u_{12} = 0 \quad u_{UV} = u_{12} + a \frac{1}{2} u_{23} \quad (7.50)$$



Slika 7.20: asovni poteki izmeni nih napetosti: a) na tiristorjih, b) na omrežnih sponkah

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

Razli nost obeh oscilogramov u_{1UV} in u_{UV} je prepri ljiva. Tako deformirana napetost na sponkah omrežja ima zelo negativne posledice, saj je ta glavni vir motenj, ki jih takšni krmiljeni usmerniki povzro ajo na omrežju.

7.7 Krmilna jalova mo

Jalova mo zaradi faznega krmiljenja ali krmilna jalova mo 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 $\gamma = 0$, omrežna napetost in osnovna harmonska komponenta toka v fazi. Jalova mo osnovne harmonske komponente je torej ni .

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

Velja:

$$\{\gamma = \gamma \quad \text{in} \quad \cos \{\gamma = \cos \gamma \quad (7.51)$$

Pri popolnoma zglajenem toku je navidezna mo osnovne harmonske komponente

$$P_{nav1} = U_{di} \cdot I_d \quad (7.52)$$

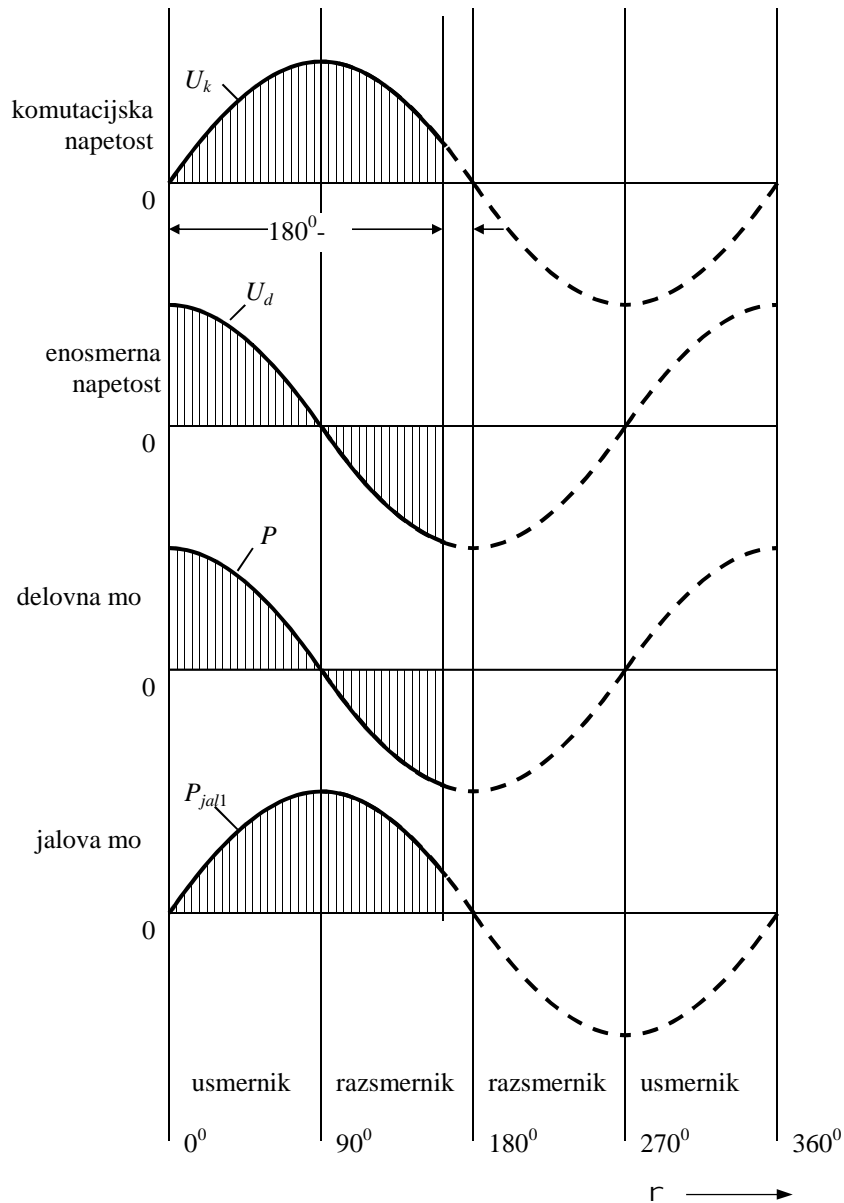
Delovna mo je enaka delovni mo i osnovne harmonske komponente

$$P = P_1 = U_{dir} \cdot I_d = U_{di} \cdot I_d \cdot \cos \gamma \quad (7.53)$$

in jalova mo osnovne harmonske komponente je

$$P_{ja11} = U_{di} \cdot I_d \cdot \sin \gamma \quad (7.53)$$

Iz teh ena b vidimo, da je faktor premika $\cos \{\gamma$ enak cosinusu krmilnega kota γ oziroma fazni zasuk osnovne harmonske komponente toka enak krmilnemu kotu γ . Te razmere so zna ilne za polprevodniške pretvornike z naravno komutacijo (omrežno vodene pretvornike).



Slika 7.21: Krmilno območje omrežno vodenega pretvornika

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

Iz osnovnega 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.

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

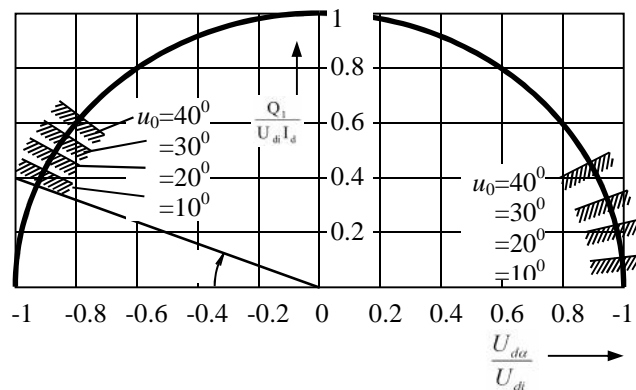
$$P = P_1 = U_{di} I_{di} \left(\cos \alpha - \frac{D_X}{U_{di}} \right) \quad (7.54)$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \approx \frac{U_{di} I_{di} \left(\cos \alpha - \frac{D_X}{U_{di}} \right)}{U_{di} I_{di}} = \cos \alpha - \frac{D_X}{U_{di}} \quad (7.55)$$

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

7.8 Karakteristika jalove mo i

Grafi ni prikaz jalove mo i ob upoštevanju ena b za P_{jal1} in P_1 je polkrog na sliki 7.22. Tudi ob upoštevanju prekrivanja je približno polkrog, krmilno obmo je pa se nekoliko omeji. Za etno prekrivanje u_o povzro i induktivno jalovo mo že pri krmilnem kotu $\alpha = 0$. Ugasni kot χ pa omejuje obratovanje pretvornika v skrajnem razsmerniškem režimu.



Slika 7.22: Jalova mo v odvisnosti od enosmerne napetosti

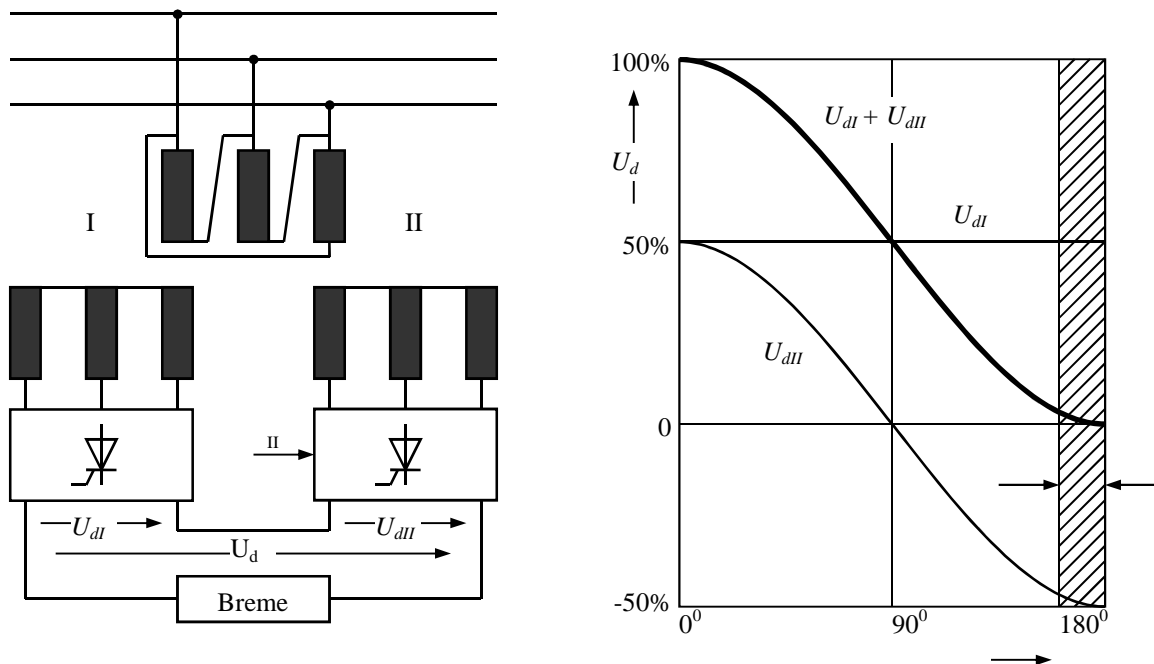
Ker jalova energija le dodatno obremenjuje omrežje, transformator in ventile, ni pa ne pripomore k prenešeni mo i je nezaželena in škodljiva. V želji po zmanjšanju krmilne jalove mo i so raziskovalci razvili razli na vezja in principe, ki zagotavljajo manjšo porabo jalove energije za specifi na podro ja uporabe. Najpomembnejša so:

- zaporedno krmiljenje
- nesimetri no krmiljenje
- vezja z ni elno diodo
- transformator z odcepi
- prisilna komutacija

7.9 Zaporedno krmiljenje

Na sliki 7.23 imamo v serijo vazana dva enaka pretvornika. Možnost krmiljenja je od +100% do skoraj -100%. e upoštevamo idealne razmere (gladek tok, brez prekrivanja), potem imamo pri krmilnih kotih obeh pretvornikov 90^0 , ko je izhodna napetost enaka 0 ($U_{dr1} = U_{dr2} = 0$), najve jo jalovo mo . Njena vrednost je:

$$P_{jal1} = U_d I_d = (U_{dr1} + U_{dr2}) I_d \tag{7.56}$$

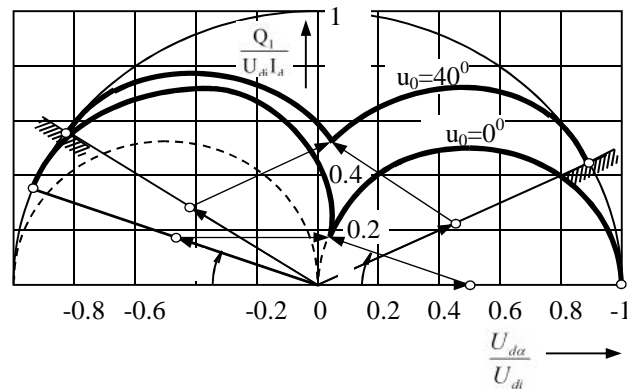


Slika 7.23: Zaporedno vezana pretvornika

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 isti jalovi tok. Lahko pa dosežemo, da je usmerjena napetost $U_d = 0$ na tak na in, da enega od obeh pretvornikov krmilimo z $r_1 = 0^0$, drugega pa z $r_2 = 180^0$, saj sta tedaj napetosti obeh pretvornikov enaki in nasprotno usmerjeni. Tokovni blok prvega pretvornika na

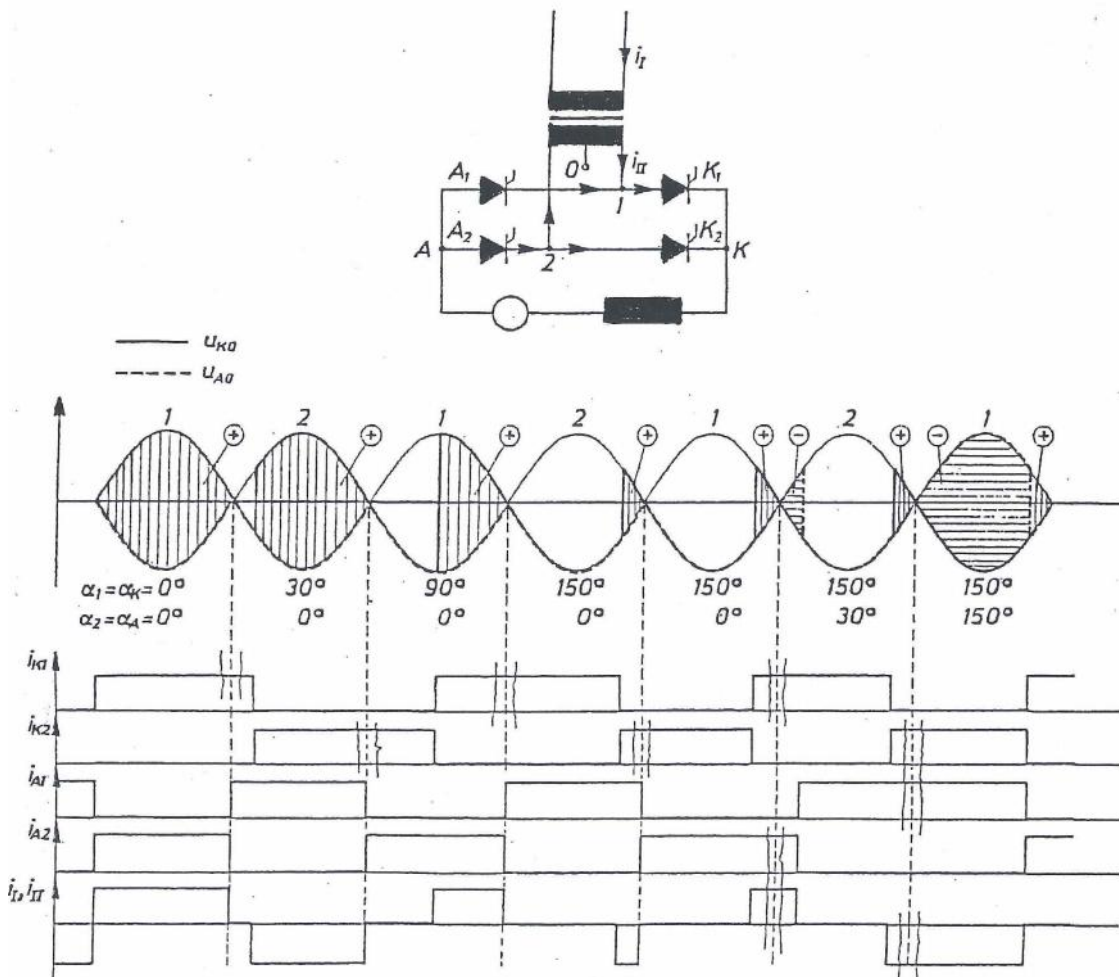
primarni strani je z omrežno napetostjo v fazi, tokovni blok drugega pretvornika pa v protifazi. Jalova mo kakor tudi navidezna mo sta v tem idealnem primeru enaki ni .

Zaradi rezervnega asa, ki ga ventil potrebuje za zanesljiv izklop v razsmerniškem podro ju, krmilni kot 180° ni dosegljiv. e 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 mo i Q od enosmerne $U_{dr} \cdot I_d$ za dva za etna kota prekrivanja in sicer 0° in 40° obakrat pri enakem ugasnem kotu.



Slika 7.24: Jalova mo P_{jal1} v odvisnosti od $U_{dr} \cdot I_d$ za kota prekrivanja 0° in 40°

Serijska vezava dveh usmernikov po sliki 7.23 sicer mo no izboljša razmere glede porabe jalove energije v celotnem krmilnem podro ju od usmerniškega do razsmerniškega režima delovanja. Vendar pa zaradi napetostne obremenitve ventilov ni najbolj gospodarna. Je pa ta na in zelo primeren tam, koder imamo že v principu opravka s serijsko vezavo dveh delnih usmernikov. To so mosti na vezja. e pri enofaznem mosti nem vezju krmilimo anodno ventilsko grupo s krmilnim kotom α_1 , katodno ventilsko grupo pa s krmilnim kotom α_2 , potem dosežemo enak efekt, kot pri serijski vezavi dveh lo enih usmernikov, le da seštevanje dveh tokovnih paketov pri mosti nem vezju nastopi že na sekundarni strani (pri serijski vezavi dveh lo enih usmernikov z lo enimi sekundarnimi navitji pride do prekrivanja toka šele na primarni strani). Analiza delovanja vezja pokaže, da pri takšnem na inu krmiljenja dveh ventilskih grup, ko sta isto asno prožena A_1 in K_2 enosmerni tok te e v prostem teku mimo transformatorja in sploh ne obremenjuje sekundarnega navitja. Za nekaj primerov krmilnih kotov je to prikazano na sliki 7.25.



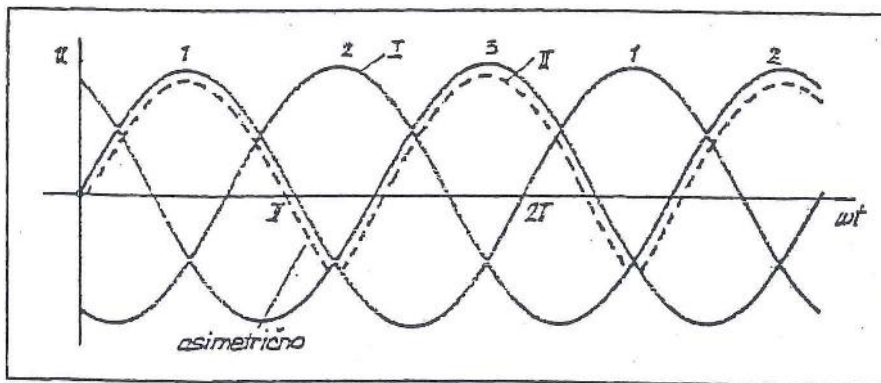
Slika 7.25

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

$$U_{di\alpha_{cel}} = \frac{1}{2} U_{di} \cos \alpha_1 + \frac{1}{2} U_{di} \cos \alpha_2 \quad (7.57)$$

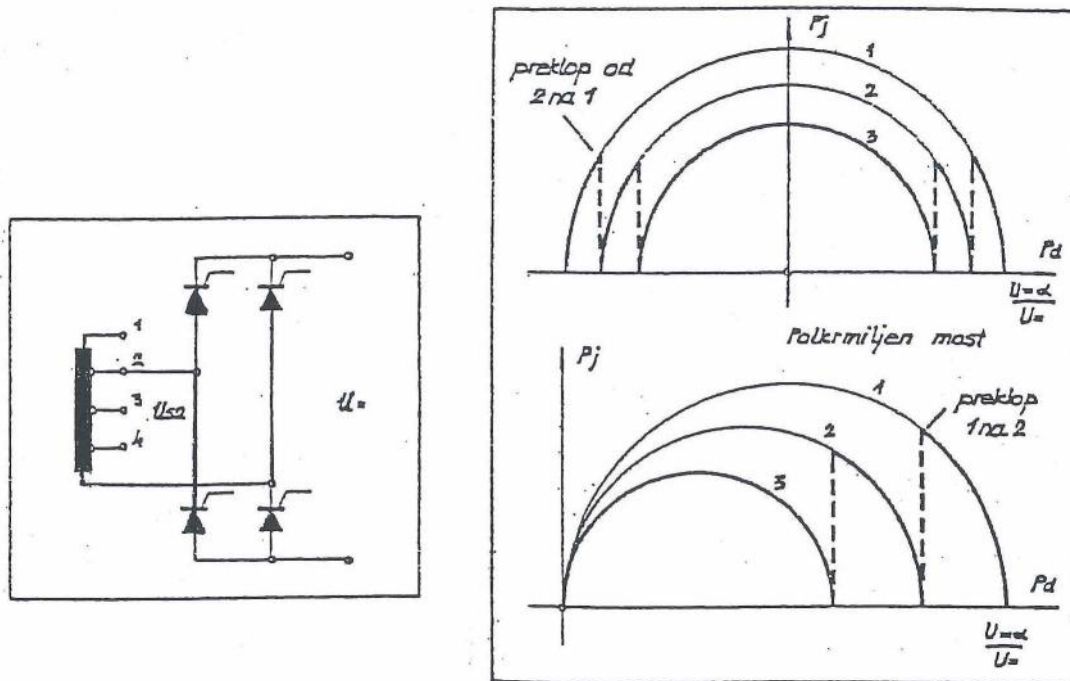
Za trifazno mosti no vezje veljajo enaki zaključki, le pri višjih harmonskih komponentah toka se razmere poslabšajo.

Nesimetri no krmiljenje je ena od možnosti kako zmanjšati jalovo krmilno mo . Vendar pa je zaradi velike popa itve toka na izmeni ni strani (neenakomarna tokovna obremenitev faz) prakti no prepovedana. To velja posebej še s stališ a EMI.



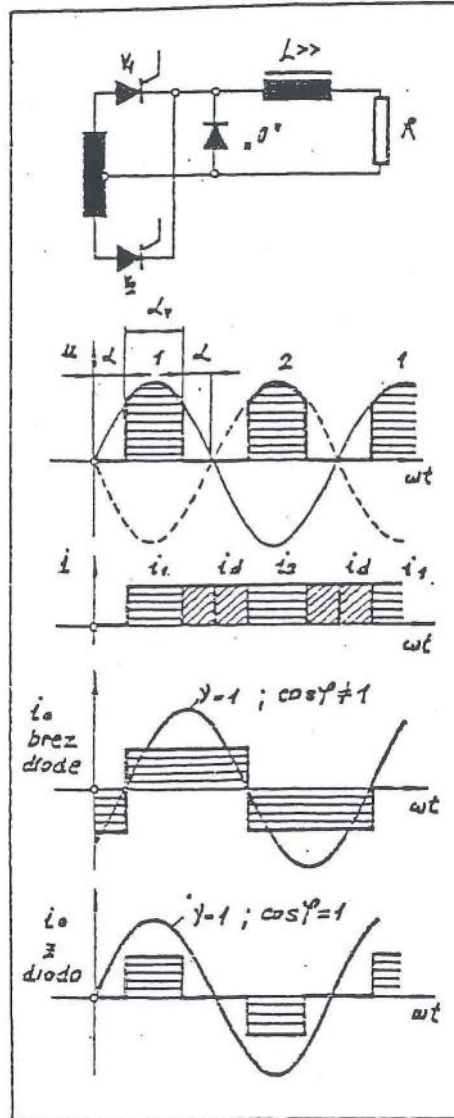
Slika 7.26: Asimetri no krmiljenje

Transformator z odcepi (slika 7.27) je ena od možnosti, da se lahko držimo območja omejitve krmilnih kotov, vendar pa je preklopnik na transformatorju kriti no mesto. Uporabno je le za zelo poasne 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 na in je možen s tranzistorji. Moderni pogoni niso ve enosmerni zato lahko re emo, da je ta princip sicer možen, se pa ne uporablja.

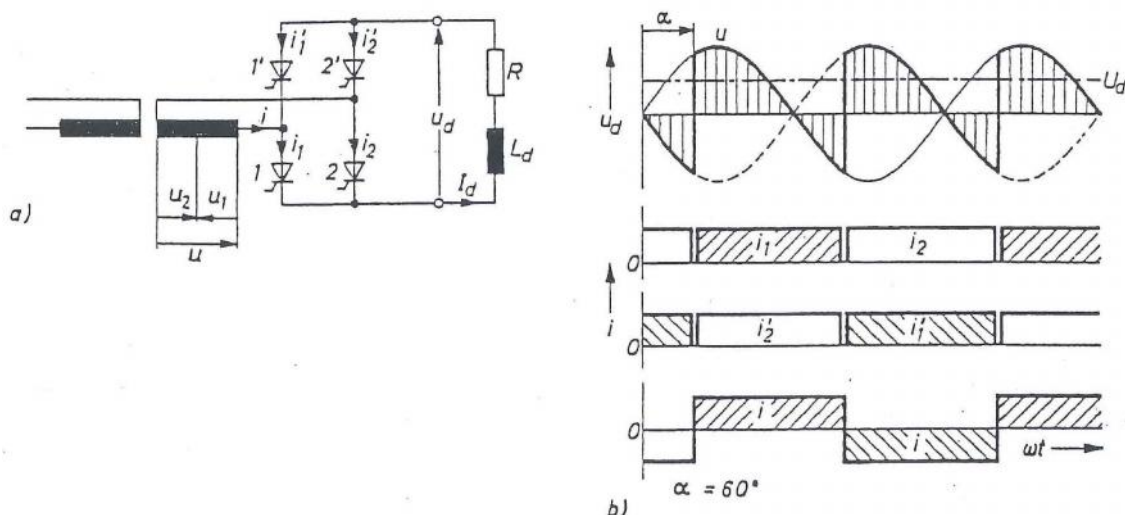


Slika 7.28: Prisilna komutacija

7.10 Polkrmiljena vezja

Mosti na vezja, ki smo jih obravnavali do sedaj so lahko delovala v usmerniškem na inu in smo jih imenovali polnokrmiljena vezja. e pa nam zadostuje le usmerniški na in, ki omogo a 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.

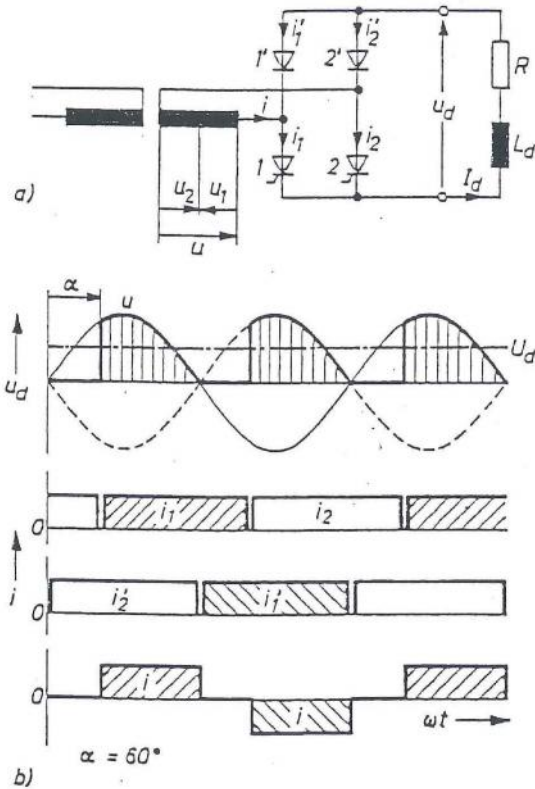
Delovanje si pogledjmo na dvopulznem mosti nem vezju, ki ga polnokrmiljenega kaže slika 7.29.



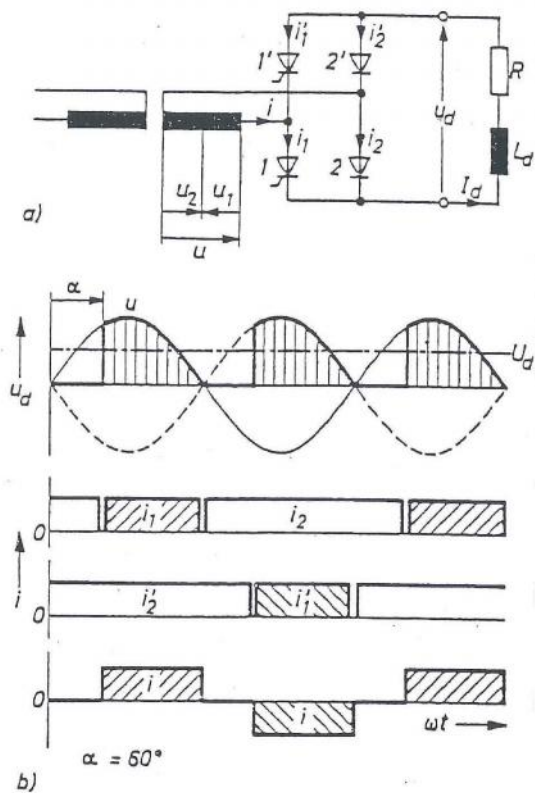
Slika 7.29: Dvopulzno mosti no vezje

Na sliki vidimo vezje ter oscilograme napetosti in tokov za primer zglajenega enosmernega toka. Ventili prevajajo 180° široke tokovne bloke, ki se pri faznem krmiljenju premikajo s krmilnim kotom γ .

Na naslednjih dveh slikah (7.30 in 7.31) pa vidimo obe možni varianti polkrmiljenih enofaznih mosti ev s pripadajo imi oscilogrami. Enkrat imamo nekrmljiva ventila – diodi v ventilski grupi, drugi pa v ventilski veji. Prvo se imenuje simetri no polkrmiljeno vezje, drugo pa nesimetri no polkrmiljeno vezje. Na izmeni ni strani so oscilogrami tokov enaki, le pri asimetri no krmiljenem vezju na sliki 7.30 so diode tokovno bolj obremenjene, saj se z ve anjem krmilnega kota ve a razmerje asov prevajanja toka diod in tiristorjev.

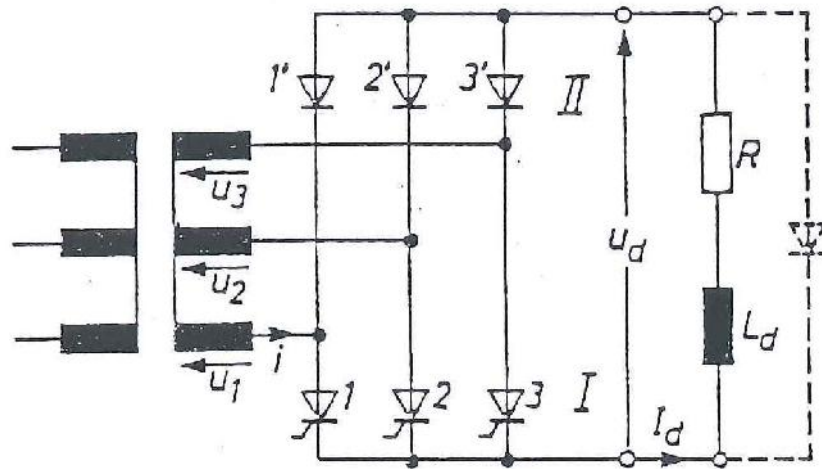


Slika 7.30



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° , drugi pa s poljubnim kotom 0° do 180° , e ne upoštevamo prekrivanja in izklopnega kota γ . Popolnoma odprto vezje je šestpulzno, od krmilnega kota 60° naprej pa je tripulzno, kar pogojuje drugo harmonsko komponento v omrežnem toku. Na bremenski strani ima to vezje običajno še dodatno prostoto no diodo.



Slika 7.32: Trifazno polkrmiljeno mosti no vezje

7.11 Krmljivost

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

Vezje (pretvornik), ki ima v mo nostnem delu le diode se imenuje »nekrmljivo« ali nekrmiljeno vezje. rka, ki tovrstne naprave ozna uje je »U«. Ta oznaka se velikokrat kar izpuš a.

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

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

Polkrmiljeno mosti no 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 mosti no vezje je lahko, kot smo omenili (sl.7.30), tudi asimetri no krmiljeno, e ima tiristorja v ventilski veji namesto v ventilski grupi. Za takšna vezja se uporablja lahko oznaka »HZ«. To vezje se uporablja n.pr. pri izmeni no napajanih lokomotivah tja do mo i 10 MW, zanimivo pa je bilo tudi pri manjših mo eh za napajanje vzbujanj ali kotve pri enosmernih pogonih.

7.12 Višjeharmonske komponente enosmerne napetosti in izmeni nega toka

Zaradi stikalnega delovanja polprevodniških ventilov povzročajo pretvorniki višje harmonske komponente napetosti in toka na strani omrežja, kakor tudi na enosmerni strani. Želja je isti 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 izmeni ne napetosti na enosmerni strani in višjeharmonske komponente tokov na izmeni strani enostavno izrazimo preko harmonske analize:

Usmerjena napetost polno izkrmiljenega usmernika ima v območju od $-\frac{f}{2}d$ do $+\frac{f}{2}$ osnovni potek po ena bi:

$$u_d = \hat{U}_s \cos \check{S}t \quad (7.58)$$

zato vsebuje samo cosinusne člene:

$$U_d = U_{di} + \sum U_{\check{e}} \sqrt{2} \cos \check{e} \check{S}t \quad (7.59)$$

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

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

$$U_v \sqrt{2} = U_S \sqrt{2} \frac{p}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{p}}^{+\frac{\pi}{p}} \cos \omega t \cos v \omega t \, d\omega t = U_{di} \frac{2}{v^2 - 1} \quad (7.60)$$

$$U_v = \frac{\sqrt{2}}{v^2 - 1} \cdot U_{di} \quad (7.61)$$

Velikost nastopajo e višje harmonske komponente napetosti na enosmerni strani je odvisna zgolj od reda le-te in ne od pulznega števila pretvorniškega vezja. Pri dolo enem 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	Frekvenca v . harmonska $\cdot 50$ [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

$$v = n \cdot p \pm 1 \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (7.62)$$

katere efektivna vrednost je:

$$I_{vi} = \frac{1}{v} I_{li} \quad (7.63)$$

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

Idealni omrežni tok ima efektivno vrednost

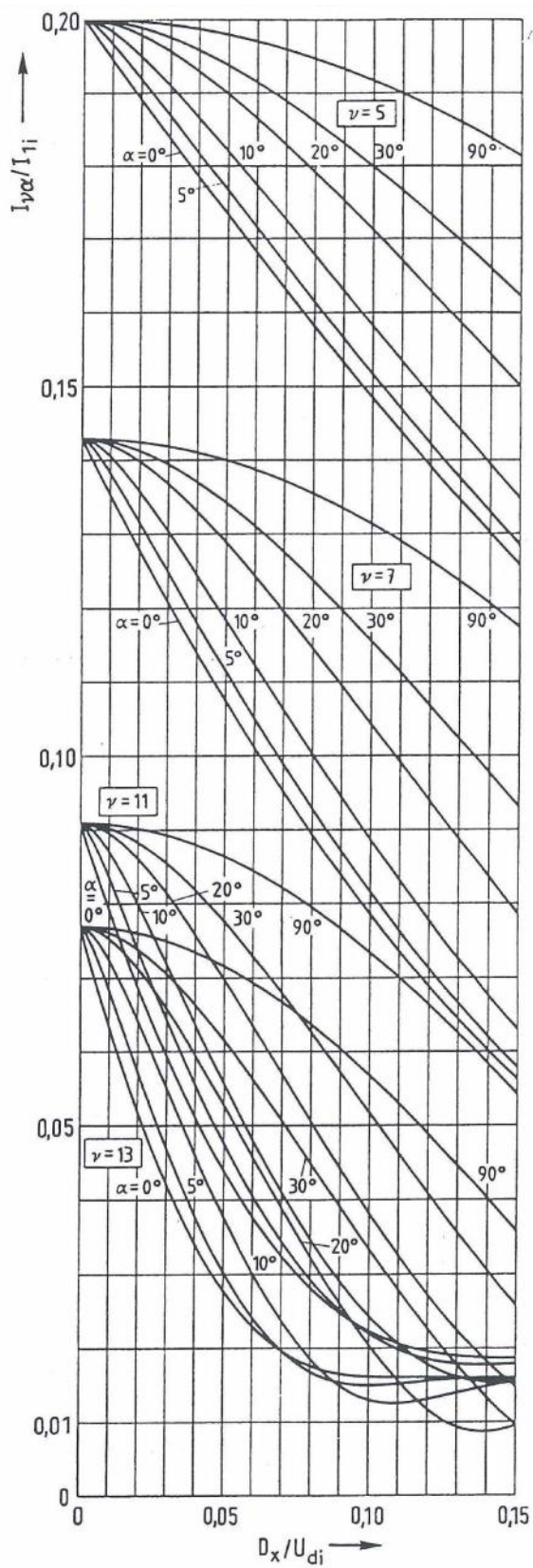
$$I_{Li} = \sqrt{I_{li}^2 + \sum I_{vi}^2} = I_{li} \sqrt{1 + \sum \frac{1}{v^2}} \quad (7.64)$$

V splošnem lahko re emo, 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 druga ne amplitude višjih harmonskih komponent v izmeni nem toku (slika 7.33 in 7.34)

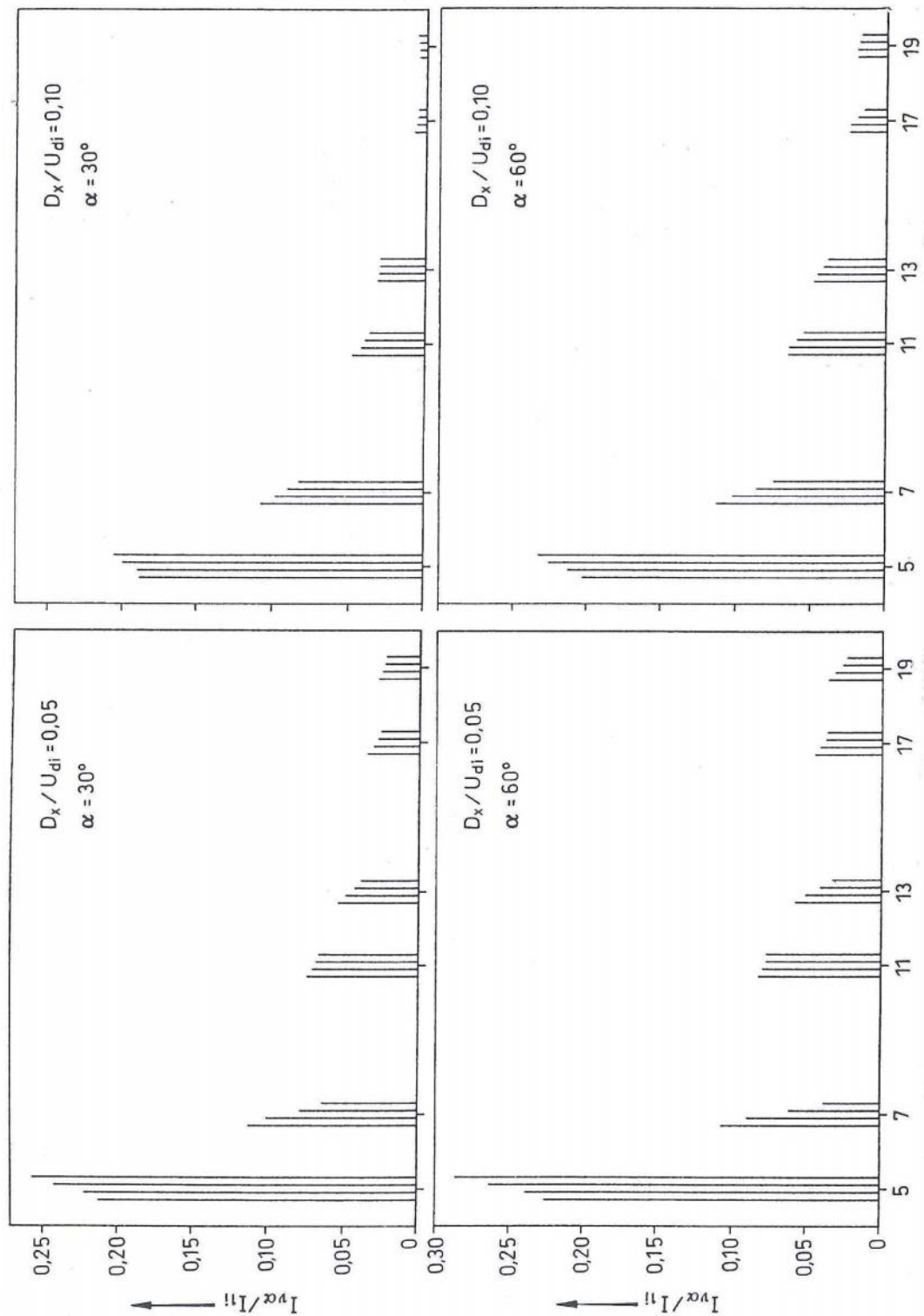
Zaključek razmišljanja o višjih harmonskih komponentah:

- Na enosmerni strani gladimo tok glede na zahteve bremena.
- Želja po sinusnem omrežnem toku pa izhaja iz zahteve po im manjšem popa enju omrežne napetosti. Zahteve glede istosti omrežnega toka postajajo vse ve je, saj je koncentracija porabnikov, ki delajo po principih mo nostne elektronike vse ve ja, isto asno pa je na istem omrežju vse ve ob utljivih porabnikov n.pr. ra unalniki, modemi, krmilni sistemi itd.
- Podro je urejanje medsebojnih vplivov razli nih porabnikov na skupnem omrežju obravnava EMS (elektromagnetna skladnost), ki jo bomo obravnavali kasneje.



Slika 7.33:

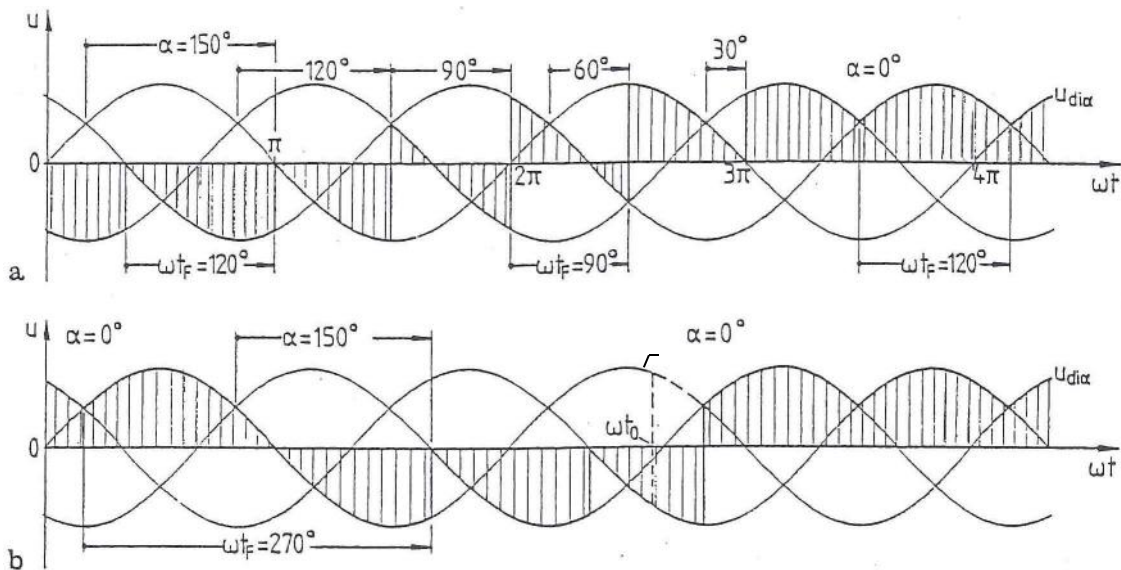
Vpliv prekrivanja
na višjeharmonske
komponente v omrežju



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

7.13 Kot prevajanja toka in mrtvi as

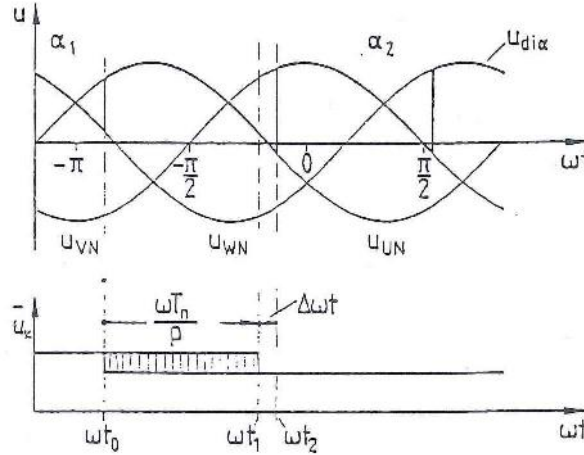
S spreminjanjem krmilnega kota α vplivamo na velikost enosmerne napetosti pretvornika. Na sliki 7.35a je prikazan asovni potek enosmerne izhodne napetosti $U_{di\alpha}$ pri postopnem prehodu iz razsmerniškega v usmerniško delovanje od $\alpha = 150^\circ$ do $\alpha = 30^\circ$. Dolžina tokovnih paketov med prehodnim pojavom je 90° namesto 120° kar velja za stacionarno stanje pri tripulznem vezju. Pri prehodu iz usmerniškega v razsmerniški režim pa se tokovni paketi v prehodnem asu ustrezno podaljšajo. Na sliki 7.35b vidimo nagel prehod od $\alpha = 0^\circ$ na $\alpha = 150^\circ$ in nazaj. Pravkar prevajajo ventil, ki ga je zahteva po spremembi krmilnega kota doletela, je v tem primeru pri prehodu v razsmerniški režim prevajal tokovni paket dolg 270° . 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: prva krivulja kaže prehod na ventil z največjo anodno napetostjo, iz druge 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 skokni spremembi krmilnega kota od 0° na 150° in nazaj na 0° .

Če gledamo pretvornik kot element regulacijskega kroga, lahko sklepamo, da izhodna enosmerna napetost ne more hipoma slediti krmilni veličini. Krmilni poseg uinkuje na izhod šele po vklopu sledenega ventila. Pretvornik dela v asu $t < t_0$ s krmilnim kotom α_1 (sl.7.36). V asu, ko prevaja tiristor T_1 , se skokno spremeni krmilna napetost v tem

smislu, da naslednji ventil vklopi pri nekem večjem krmilnem kotu α_2 . Šele po vklopu T_2 v času t_2 je dosežen



Slika 7.36: Na in vrednotenja mrtvega časa omrežno vodenega pretvornika

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

$$t_{M \max} = \frac{T_n}{p} + \Delta t, \quad (7.65)$$

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

$$t_{M \min} = \Delta t \quad (7.66)$$

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:

$$T_M = \frac{1}{2} (t_{M \max} + t_{M \min}). \quad (7.67)$$

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

$$T_M = \frac{T_n}{2p}. \quad (7.68)$$

7	TUJE VODENI PRETVORNIKI.....	91
7.1	Omrežno vodeni pretvorniki.....	91
7.2	Komutacija pri šestpulznem mosti nem vezju	99
7.3	Bremenska karakteristika	106
7.4	Induktivni padec napetosti.....	106
7.5	as sprostitve in rezervni kot	108
7.6	Napetostni vdori zaradi komutacije.....	111
7.7	Krmilna jalova mo	115
7.8	Karakteristika jalove mo i.....	117
7.9	Zaporedno krmiljenje	118
7.10	Polkrmiljena vezja.....	124
7.11	Krmljivost.....	126
7.12	Višje harmonske komponente enosmerne napetosti in izmeni nega toka	127
7.13	Kot prevajanja toka in mrtvi as.....	132