

3 ZAŠ ITA, RAZBREMENJEVANJE IN KRMILJENJE POLPREVODNIŠKIH VENTILOV

Za zanesljivo delovanje polprevodniških ventilov v napravah mo nostne elektronike je nujno potrebna dodatna oprema kot so razbremenilna vezja in zaš itni elementi pred prevelikimi toki, prevelikimi strminami toka in napetostmi in pred previsokimi preklopnimi izgubami. Prijemi pa so za razli ne elemente specifi ni.

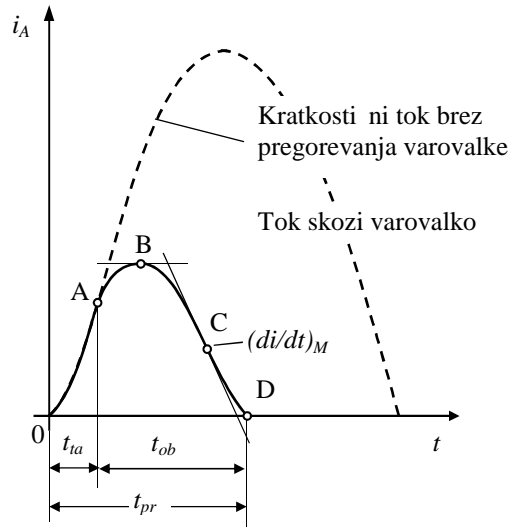
Tiristorje in diode moramo š ititi pred prevelikimi tokovi, saj je znano, da ne morejo vplivati na velikost toka, ko le-ta že ste e. Eventualni kratki stiki ali preobremenitve lahko povzro ijo uni enje ventila.

Moderne hitre tranzistorje pa pred prevelikimi tokovi lahko zaš itimo le preko krmilnega dela s tem, da stalno sledimo oziroma merimo tok in ga obvladujemo po regulacijskem principu.

Diode in tiristorje š itimo pred prevelikimi toki s specialnimi talilnimi varovalkami. Njihove karakteristike morajo biti prilagojene termi nim lastnostim ventilov. Te varovalke nameš amo v vsako tokovno vejo zaporedno k ventilu. Celotno pretvorniško vezje pa ponavadi š itimo z varovalko standardne izvedbe v dovodih na izmeni ni strani.

Zaradi majhne toplotne akumulacije aktivnega dela ventila (polprevodniškega kristala) za takšno zaš ito pridejo v poštev le specialne hitre talilne varovalke, s katerimi lahko oddvojimo tok predno kristal zaradi previsoke temperature izgubi svojo blokirno ali zaporno sposobnost. Varovalka mora prekiniti tok predno naraste do kriti ne velikosti I_{FRM} oziroma I_{TRM} .

Na sliki 3.1 vidimo zna ilno karakteristiko pregorevanja specialne talilne varovalke ob kratkem stiku v tokokrogu. Do trenutka t_A talilna varovalka še ne povzro a bistveno ve jega upora v tokokrogu. V trenutku t_A pa varovalka pregoreva. V njej se pojavi elektri ni oblok. Tok še nekoliko naraste, doseže najve jo vrednost v to ki B, nato pa ga napetost obloka zmanjšuje do vrednosti ni v to ki D, ko je pregorevanje varovalke kon ano. Pomembno pri tem je, da tok ne upada prehitro oz. da je strmina $-di/dt$ zmerna!



Slika 3.1: Pregorevanje specialne hitre talilne varovalke

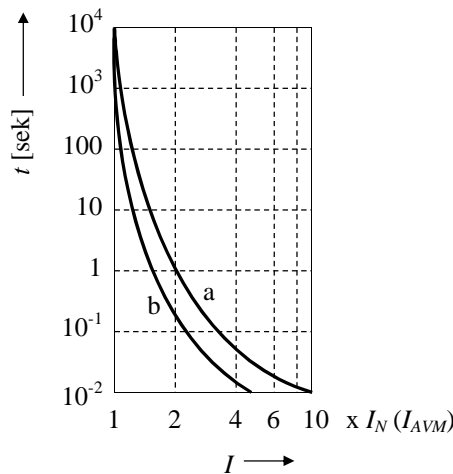
as pregorevanja varovalke je

$$t_{pr} = t_{ta} + t_{ob} \tag{3.1}$$

Pomemben podatek vsake specialne varovalke je vrednost t.i. bremenskega integrala (I^2t), ki podaja vrednost integrala (glej sl. 3.1).

$$\int_0^{t_a} i^2 dt \tag{3.2}$$

Za vsak ventil podajajo proizvajalci v katalogih vrednost integrala (I^2t). Ta integral je merilo za energijo, ki jo lahko kristal absorbira, ne da bi se njegova temperatura pove ala ez dopustno vrednost in kristal uni ila. Varovalko moramo izbrati vedno tako, da je:



Slika 3.2: Kratkosti na in pretokovna zaš ita ventila s talilno varovalko: (a) pretokovna karakteristika ventila, (b) talilna karakteristika varovalke

$$(I^2t)_V < (I^2t)_T \quad (3.3)$$

To velja za kratke stike v vejah! Varovalka pa mora š ititi ventil tudi pred velikimi toki, ki so manjši od kratkosti nih tokov. Omogo ati mora t.i. pretokovno zaš ito. Zato mora biti talilna karakteristika varovalke usklajena s karakteristiko dopustne preobremenitve ventila, ki ga varuje (sl. 3.2).

Nazivna napetost varovalke je najve ja dopustna efektivna vrednost aktivnih (gonilnih) napetosti v kratkosti nem tokokrogu. Nazivna napetost varovalke mora biti ve ja ali vsaj enaka delovni napetosti.

Nazivni tok varovalke je definiran kot najve ja dovoljena efektivna vrednost sinusnega toka pri nazivni frekvenci in pri nazivnih pogojih hlajenja. Ponavadi jemljemo za stacionarno obratovanje varovalko z nazivnim tokom, ki je vsaj 10% ve ji od delovnega toka.

Projektant mora pri izbiri varovalk upoštevati tudi režim obratovanja ventila (npr. pulzno) in obliko periodičnega delovnega toka skozi ventil.

Razen talilnih varovalk uporabljamo za zaš ito pred prevelikimi toki v asovnem obmo ju ez 1 minuto tudi stikala s termi no zaš ito. Pri krmiljenih pretvornikih pa lahko napravimo tudi zaporo krmilnih impulzov, ki jo sproži nadzorovalna elektronika. Ko bremenski tok prekora i dopustne vrednosti za prekinitev nedopustno velikih enosmernih tokov uporabljamo tudi specialna hitra stikala.

3.1 RC- leni za zaš ito tiristorjev in diod

3.1.1 Zaš ita pred efektom nosilcev naboja (ENN)

Na sliki 2.5. in sl. 2.10 smo videli, da pri diodah in tiristorjih, ki nehajo prevajati tok, leta te e za kratek as skozi ventil v inverzni smeri, doseže neko maksimalno amplitudo I_{RM} in se nato z veliko strmino di_R/dt zmanjša na vrednost ni . To povzro i na komutacijskih induktivnostih L_K , ki so praviloma vklju ene zaporedno k ventilom, inducirano napetost:

$$u_i = -L_K \frac{di_R}{dt} \quad (3.4)$$

Ta je lahko nekajkrat višja od nazivne omrežne napetosti oz. od komutacijske napetosti in zato prekora i maksimalno dovoljeno zaporno napetost U_{RRM} ventila. Posledica je uni enje ventila. Da to prepre imo, vežemo paralelno k diodam in tiristorjem RC- len,

kot kaže sl. 3.3. Njegovo delovanje ob izklopu diode lahko analiziramo na osnovi narisane vezja. Predpostavimo, da se inverzni tok $I_{RM}=I_q$ po preteku asa t_{stg} (glej sl. 2.5. in sl. 2.10.) trenutno prekine (npr. z narisanim idealnim stikalom na sl. 3.3)! Tok i_R bo komutiral (t.j. prešel) iz diode v RC-vejo. asovne poteke tokov in napetosti v nastalem dušenem resonan nem nihajnem tokokrogu $U_K - L_K - R - C - U_K$ lahko izra unamo:

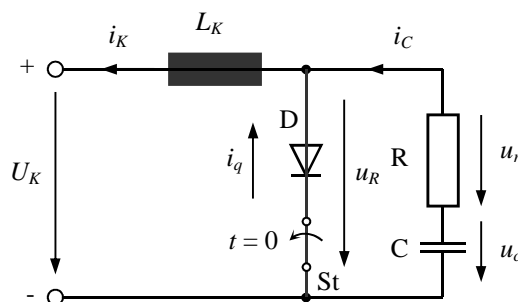
$$U_K = L_K \cdot \frac{di_C}{dt} + i_C \cdot R + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i_C dt \quad (3.5)$$

z začetnimi vrednostmi:

$$i_K(0) = i_C(0) = I_q, \quad u_C(0) = 0, \quad U_K = konst.$$

Rešitev te diferenciane ena be je odvisna od velikosti elementov R in C. Na sl. 3.4 je narisanih nekaj možnih asovnih potekov za inverzno napetost u_R na izklopljenem ventilu:

$$u_R = u_r + u_c \quad (3.6)$$



Slika 3.3: Nadomestno vezje

Ker je krožna frekvenca resonan nega kroga

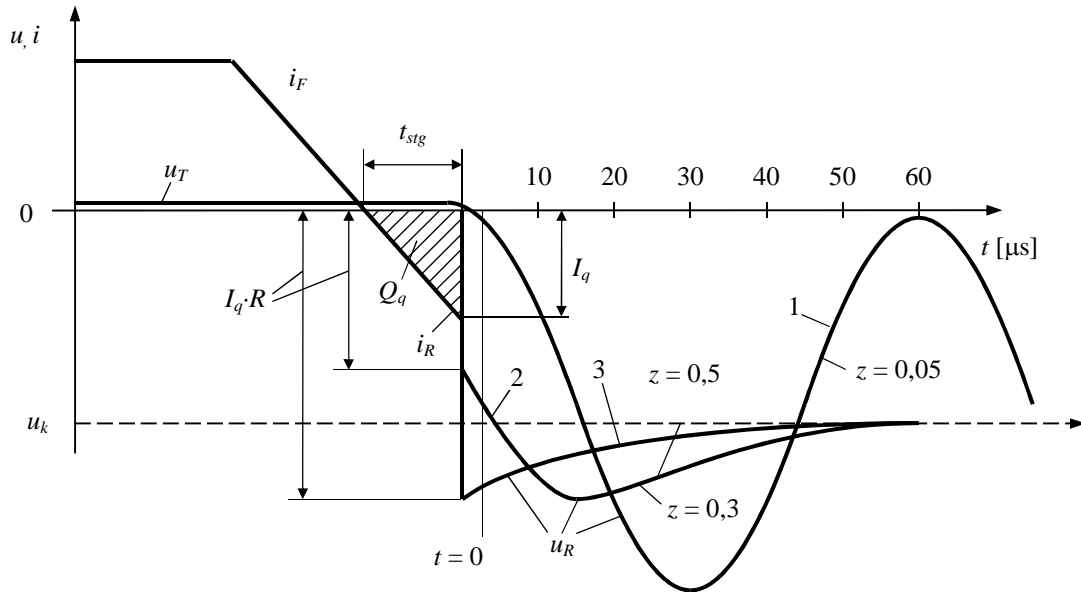
$$\tilde{S} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.7)$$

zelo velika, je prehodni pojav zelo hitro kon an. Zato se v praksi v tem asu tudi zunanja komutacijska napetost U_K (npr. omrežna napetost) ne more veliko spremeniti. V izra unu jo lahko upoštevamo kot konstantno vrednost. Kot vemo iz teorije, ima lahko prehodni pojav $u_r(t)$ in $u_c(t)$ v odvisnosti od konkretne vrednosti faktorja dušenja z:

$$z = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \leq ali \geq 1 \quad (3.8)$$

periodi en, dušen ali aperiodi en potek. Na sl. 3.4 so narisani trije zna ilni poteki napetosti $u_R = u_r + u_C$, ki se pojavi kot inverzna napetost na pravkar izklopljenem ventilu. Ob predpostavki, da je bila v asu $t = 0$ napetost na kondenzatorju ni , je za etna vrednost opazovane napetosti:

$$u_R(t = 0) = I_q \cdot R. \quad (3.9)$$



Slika 3.4: Prehodni pojavi ob izklopu diode v vezju na sl. 3.3

e je R zelo majhna in je faktor dušenja z mnogo manjši od vrednosti 1, je prehodni pojav zelo malo dušen in je maksimalna vrednost napetosti:

$$U_{RM} \cong 2 \cdot U_K \quad (3.10)$$

(krivulja 1). Pri ve jih vrednostih R oz. faktorja dušenja pa je prenihanje ustrezno manjše (krivulja 2). e je faktor dušenja velik ($z > 1$) je prehodni pojav aperiodi en. Tedaj prenihanja ni, pa pa je za etna amplituda U_{RM} lahko zelo velika zaradi velike vrednosti R :

$$U_{RM} = I_q \cdot R \quad (3.11)$$

(krivulja 3). V vsakem primeru pa moramo poskrbeti, da ni nikdar prekora ena maksimalno dopustna zaporna napetost ventila, t.j.

$$U_{RM} < U_{RRM} \quad (3.12)$$

Zaradi varnosti izberemo še varnostni faktor \dagger tako, da je

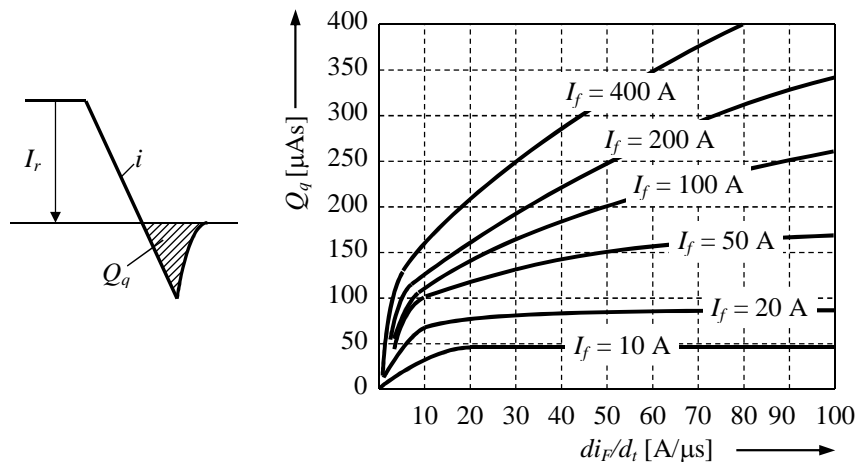
$$\dagger = \frac{U_{RRM}}{U_{RM}} = 1,5 \dots 2,5. \quad (3.13)$$

Iz povedanega izhaja, da je treba vedno izbrati pravilno dušenje prehodnega pojava. e je dušenje premajhno (majhna vrednost R), je prenihanje preveliko, e pa je dušenje preveliko, postane za etna vrednost napetosti zelo velika. Ponavadi dobimo najboljšo rešitev, e izberemo R in C tako, da je:

$$R \cong \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (3.14)$$

Seveda pa moramo poznati maksimalno vrednost inverznega toka $I_{RM} = I_q$. Izra unamo jo lahko, e poznamo vrednost Q_q . Ker pa velikost Q_q pri nekem ventilu ni konstantna, podajajo proizvajalci ventilov njeno velikost v diagramih, kot kaže npr. sl. 3.5. Iz diagrama lahko v odvisnosti od tokovne strmine $-di_F/dt$ pred izklopom ventila (v asu $t = 0$) in v odvisnosti od velikosti predhodnega prevodnega toka I_F od itamo vrednost Q_q . e upoštevamo, da prevodni tok pri izklapljanju ves as linearno upada (kar je zlasti res pri diodah, glej sl. 2.5), lahko zelo enostavno izra unamo maksimalni inverzni tok $I_{RM} = I_q$:

$$\frac{di_F}{dt} = \frac{U_K}{L_K} \quad Q_q = \frac{U_K}{L_K} \cdot \frac{t_{sig}^2}{2} \quad I_q = I_{RM} = \sqrt{\frac{2 \cdot U_K \cdot Q_q}{L_K}} \quad (3.15, 3.16, 3.17)$$



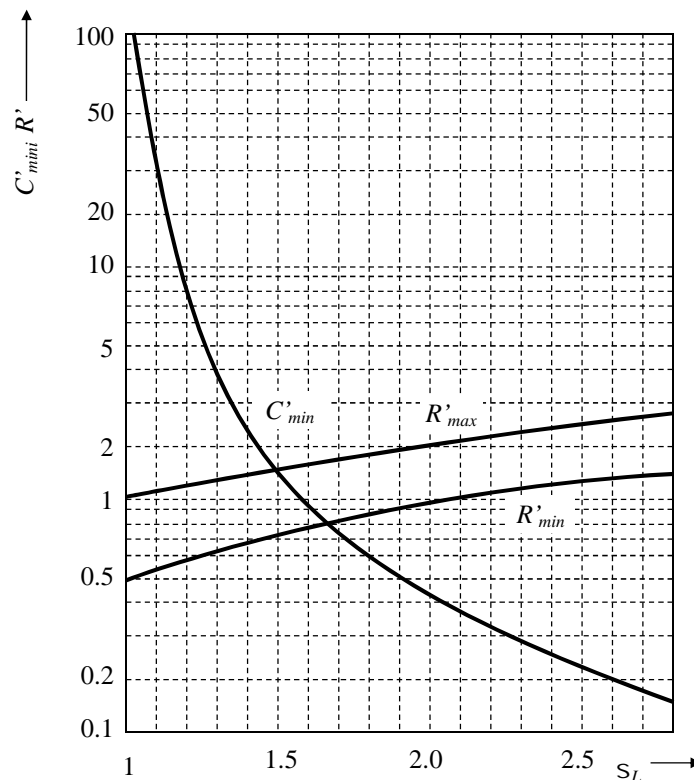
Slika 3.5: Odvisnost naboja sprostitve Q_q od velikosti prevodnega toka I_F in od velikosti tokovne strmine di_F/dt pri prehodu skozi vrednost ni (velja za tiristor T170F AEG in za temperaturo zaporne plasti 120°C)

V dosedanjih razmišljanjih in izra unih privzeta predpostavka, da se tok $I_{RM} = I_q$ skokovito zmanjša na vrednost ni, ni realna in so dobljeni rezultati preve mogli. V resnici se namre tok, ko doseže svojo maksimalno vrednost I_q , zmanjšuje proti vrednosti ni z neko kon no, pa vendarle še vedno veliko strmino di_R/dt . Natan en

izra un dogajanja ob upoštevanju tega dejstva ni možen. Zato podajajo proizvajalci ventilov v svojih katalogih smernice za izbiro oz. izra un dušilnega upora R in kondenzatorja C . Takšen diagram kaže sl.3.6. R_{max} in R_{min} sta maksimalna oz. minimalna vrednost normirane upornosti R , C_{min} pa je minimalna vrednost normirane kapacitivnosti C . V tem diagramu velja:

$$C = C' \cdot \frac{2Q_q}{U_K} \quad R = R' \cdot \sqrt{\frac{U_K L_K}{2Q_q}} \quad S = \frac{U_{RRM}}{U_K} \quad S_L = \frac{S}{\dagger} \quad (3.18, 3.19, 3.20, 3.21)$$

- \dagger - varnostni faktor (od 1,5 do 2,5)
 U_{RRM} - maksimalna periodi na zaporna napetost
 R'_{max}, R'_{min} - maksimalna oz. minimalna normirana vrednost zaš itne upornosti
 C'_{max}, C'_{min} - maksimalna oz. minimalna vrednost zaš itne kapacitivnosti



Slika 3.6: Diagram za dolo anje vrednosti dušilnega RC – lena za diode in tiristorje

Prakti ni zgled:

Za tiristor T170 F1000 (AEG) je treba dolo iti dušilni RC- len. Komutacijska napetost tiristorja je $U_K = 500$ V, komutacijska induktivnost pa $L_K = 25$ μ H. Tiristor prevaja najve ji tok $I_F = 400$ A. Maksimalno dovoljena periodi na zaporna napetost je za ta tiristor iz kataloga firme AEG $U_{RRM} = 1000$ V. Varnostni faktor izberemo $\dagger = 1,25$.

$$S_L = \frac{1000 \text{ V}}{1,25 \cdot 500 \text{ V}} = 1,6 \quad (3.22)$$

Iz diagrama na sl.3.6 od itamo za vrednost $S_L=1,6$ naslednje vrednosti: $C'_{min} = 1$, $R'_{max} = 1,6$, $R'_{min} = 0,8$. Ob predpostavljjeni linearni komutaciji je strmina:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_K}{L_K} = \frac{500 \text{ V}}{25 \mu\text{H}} = 20 \text{ A} / \mu\text{s} \quad (3.23)$$

Iz diagrama na sl.3.5 od itamo lahko za tok $I_F = 400 \text{ A}$ naboj $Q_q = 200 \mu\text{As}$.

$$C_{min} = C'_{min} \cdot \frac{2Q_q}{U_K} = 1 \cdot \frac{2 \cdot 200 \mu\text{As}}{500 \text{ V}} \cong 0,8 \mu\text{F} \quad (3.24)$$

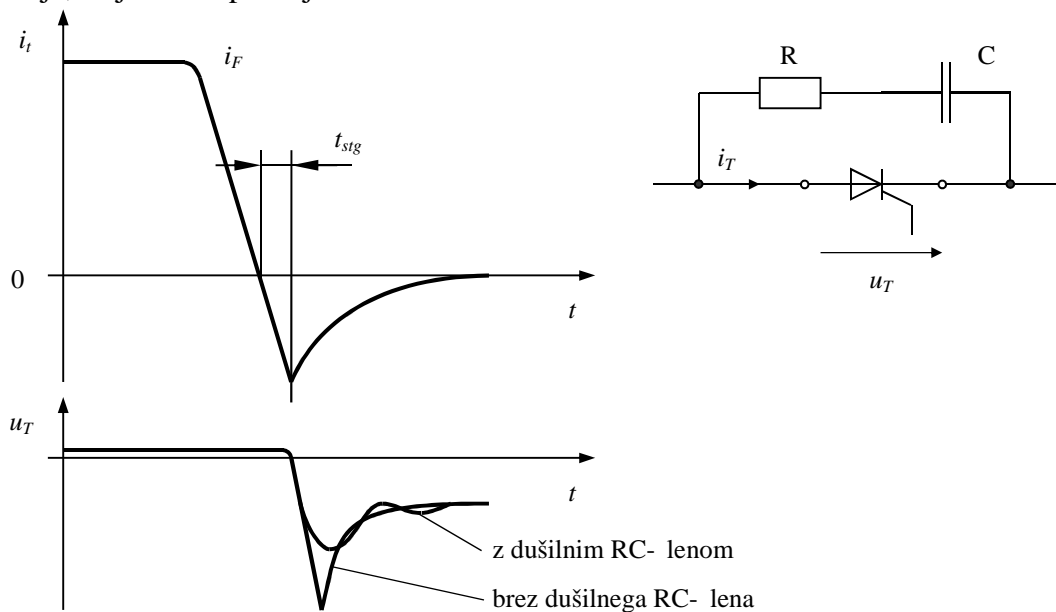
in vrednost dušilnega upora:

$$0,8 \sqrt{\frac{25 \mu\text{H} \cdot 500 \text{ V}}{2 \cdot 200 \mu\text{As}}} < R < 1,6 \sqrt{\frac{25 \mu\text{H} \cdot 500 \text{ V}}{2 \cdot 200 \mu\text{As}}} \quad (3.25)$$

Odlo imo se lahko za »okrogli« vrednosti: $C = 1 \mu\text{F}$ in $R = 6.8 \Omega$.

Potrebna mo uporaba R je odvisna tudi od režima obratovanja tiristorja in jo moramo izra unati posebej.

Za dolo itev dušilnega kondenzatorja se lahko opremo tudi na prakti ne izkušnje, ki jih podaja tabela 2. Slika 3.7 kaže zna ilni potek inverzne napetosti ob upoštevanju izklopa tiristorja, e je le-ta opremljen z dušilnim RC- lenom.



Slika 3.7: Vpliv dušilnega RC- lena na potek inverzne napetosti u_T po prenehanju prevajanja tiristorja

Tabela 2: Napotki za vrednost kondenzatorja dušilnega RC- lena za diode in tiristorje

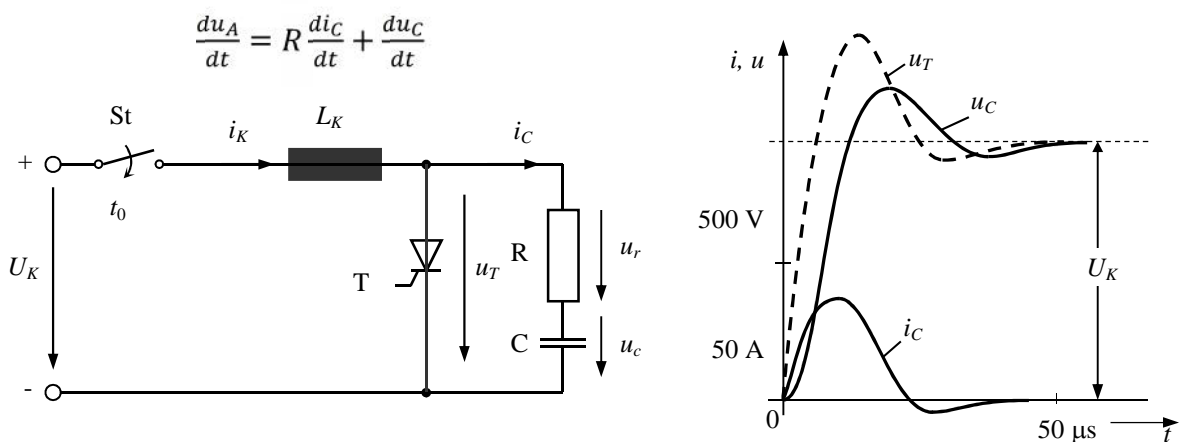
Tok [A]	Priporo en kondenzator C[μ F]	
	za diode	za tiristorje
1 3	0,01 0,025	0,025 0,10
3 10	0,025 0,10	0,10 0,25
10 30	0,10 0,25	0,25 0,50
30 100	0,25 1,0	0,50 1,0
100 in ve	1,0 2,0	1,0 2,0

3.1.2 Omejitev du/dt pri tiristorjih in diodah

RC- len, ki ga priklju imo vzporedno k diodi ali tiristorju, š iti ventile tudi pred prevelikimi napetostnimi gradienti du/dt , ki lahko nastopijo zaradi razli nih stikalnih manevrov v vezju. Dogajanja lahko analiziramo na podlagi poenostavljenega nadomestnega vezja na sl. 3.8. Predpostavljajmo, da v asu t_0 neko idealno stikalo priklopi zunanjo napetost U_K preko obstoje e komutacijske induktivnosti L_K na neprožen ventil in na RC- len! V praksi prevzamejo vlogo tega idealnega stikala ostali tiristorji v pretvorniških vezjih. Brez paralelnega RC- lena bi se pojavila na ventilu teoreti no neskon no velika sprememba napetosti du/dt . Prisotni kondenzator, ki je v asu $t = 0$ brez napetosti, pa ne dopuš a neskon no hitrega naraš anja napetosti u_A (\gg kondenzator je vztrajnost za napetost! \ll). Izhajajo iz vezja na sl. 3.8 vidimo, da imamo opraviti z dušenim nihajnim tokokrogom $U_K - L_K - R - C - U_K$ in lahko izra unamo asovne poteke za i_C , u_C in u_A :

$$u_A = i_C \cdot R + u_C \quad (3.26)$$

Na sliki 3.8 b) je rezultat izra una prikazan grafi no. Upoštewane so bile vrednosti. $U_K = 500$ V, $L_K = 50$ μ H, $C = 0,5$ μ F in $R = 10$ Ω . Predpostavljena izhodiš na napetost na kondenzatorju v asu $t = 0$ je ni . Za i_C in u_C dobimo dušena harmonska nihanja. Maksimalna strmina porasta napetosti na ventilu je:



Slika 3.8: Nadomestno vezje za izra un porasta napetosti du_A/dt na ventilu po vklopu stikala v asu $t = 0$: (a) vezje, (b) poteki tokov in napetosti

Ker je, gledano fizikalno, neposredno po vklopu stikala kondenzatorska napetost u_C še vedno ni , (tj. nespremenjena) in je zato porast toka skozi kondenzatorsko vejo dolo en z:

$$\frac{di_C}{dt} = \frac{U_K}{L_K} = \frac{di_K}{dt} \quad (3.27)$$

sledi:

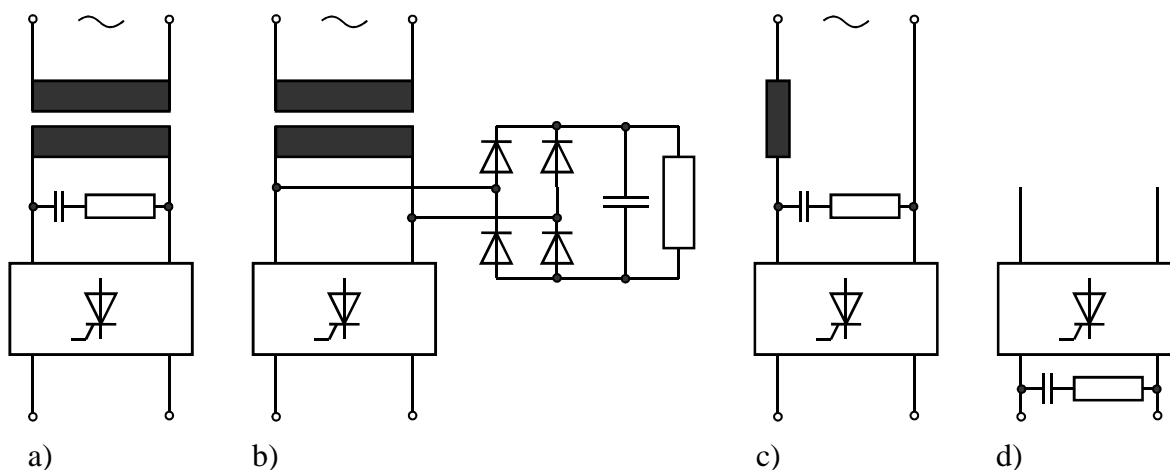
$$\left[\frac{du_A}{dt} \right]_{\max} = \frac{RU_K}{L_K} = 100 \text{ V}/\mu\text{s} \quad (3.28)$$

Ta vrednost mora biti manjša od dopustne vrednosti za tiristor $(du_D/dt)_{krit}$, sicer se poruši blokirna trdnost tiristorja, tj. pride do spontanega prevajanja.

3.1.3 Omejitev prenapetosti na transformatorju in na bremenu

Z dušilnimi RC- leni lahko prepre ujemu transientne prenapetosti tudi drugje v vezju. Na sl. 3.9 so prikazane nekatere možnosti. Z RC- lenom na sekundarnih transformatorskih sponkah prepre ujemu nastanek prenapetosti zaradi izklapljanja transformatorja, zaradi sprememb obremenitev ali zaradi prenapetosti, ki bi prihajale iz napajalnega omrežja. Kondenzator lahko priklju imo tudi prek enofaznega diodnega mostu a: v tem primeru je lahko kondenzator unipolaren (npr. cenejši elektrolitski).

e napajamo pretvorniška vezja neposredno iz elektri nega omrežja brez transformatorja, moramo uporabiti zaš itno serijsko dušilko, ki ji sledi RC- len (sl. 3.9 c). Serijska dušilka omejuje vrednosti di/dt (npr. ob komutaciji ventilov)!



Slika 3.9: Zaš itni RC - leni

Kon o lahko uporabimo RC- len tudi na bremenski strani pretvornika (sl. 3.9.d).

3.1.4 Vklonpe izgube ventilov in omejitvev tokovnih strmin di/dt pri tiristorjih

Zaradi kon no velikega vklopnega asa t_{gr} nastopi na tiristorju kratkotrajno zelo velika izgubna mo p_T , ki se prišteva k izgubam zaradi prevajanja tiristorja. e je izgubna mo velika, lahko pride do termi nega uni enja ventila.

Na strmino naraš anja toka i_T takoj po sprožitvi tiristorja bistveno vplivajo induktivnosti, ki se nahajajo v komutacijskem tokokrogu tiristorjev. e so te induktivnosti majhne (npr. samo stresane induktivnosti vodnikov), dobimo ob sprožitvi tiristorja velike poraste toka di_A/dt . Ker pa imamo, kot smo videli v prejšnjih poglavjih, paralelno k tiristorjem praviloma vedno tudi dušilne RC- lene, pride ob vklopu tiristorja še do njegove dodatne tokovne obremenitve, saj se kondenzatorska napetost izprazni prek vklopljenega tiristorja. Slika 3.10 kaže toka i_A in i_C , ki te eta po vklopu tiristorja. Neposredno po sprožitvi tiristorja dobimo tok i_A s strmino:

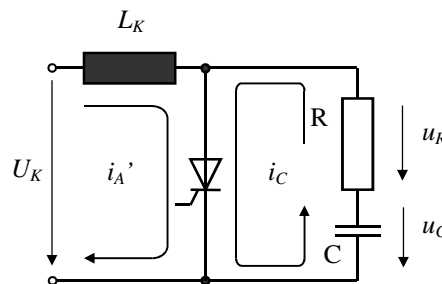
$$\frac{di_A}{dt} = \frac{U_K}{L_K} \quad (3.29)$$

in ob predpostavki, da je ob sprožitvi tiristorja na kondenzatorju prisotna napetost $u_C = U_K$, še:

$$\frac{di_C}{dt} = \frac{U_K}{R \cdot t_{gr}} \quad (3.30)$$

Ta matemati na zveza izhaja iz predpostavke, da se ob vklopu tiristorja napetost na njem v asu t_{gr} približno linearno zmanjšuje od vrednosti U_K na vrednost ni . Potemtakem bo skupna strmina skozi tiristor takoj po vklopu:

$$\frac{di_A}{dt} = \frac{di_A}{dt} + \frac{di_C}{dt} = U \cdot \left\{ \frac{1}{L_K} + \frac{1}{R \cdot t_{gr}} \right\} \quad (3.31)$$



Slika 3.10: Vklonp tiristorja

Iz te ena be sledi, da morata biti tako L_K kakor tudi R zadosti velika, da prepre imo prevelike tokovne strmine ob vklopu tiristorja.

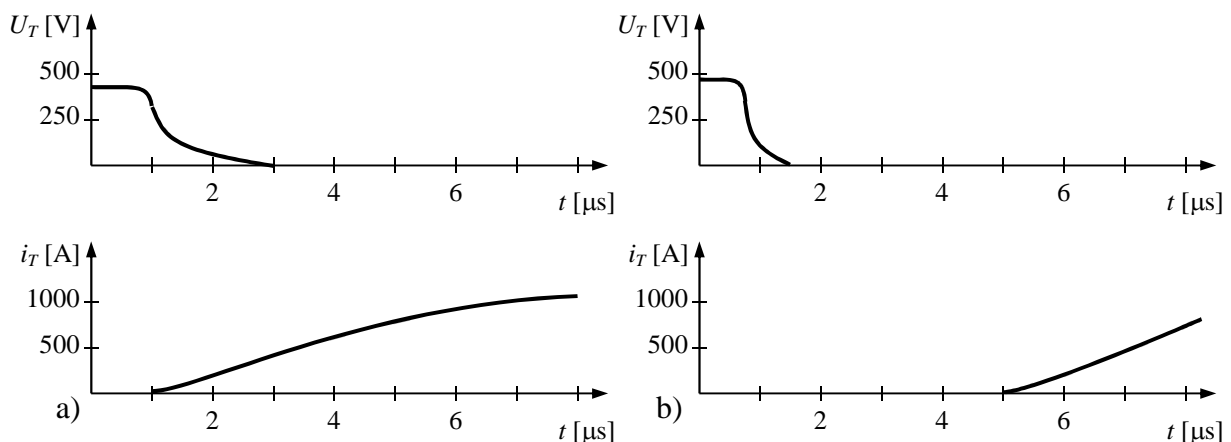
Ima pa induktivnost L_K še eno pomembno funkcijo: omejuje namre strmino blokirne napetosti du_D/dt , ko pripeljemo neproženemu tiristorju v vezju na sl. 3.10 skokovito napetost U_K ob predpostavki, da je tedaj $u_C = 0$. Na tiristorju se tedaj pojavi porast napetosti:

$$\frac{du_D}{dt} = \frac{U_K}{L_K} \cdot R \quad (3.32)$$

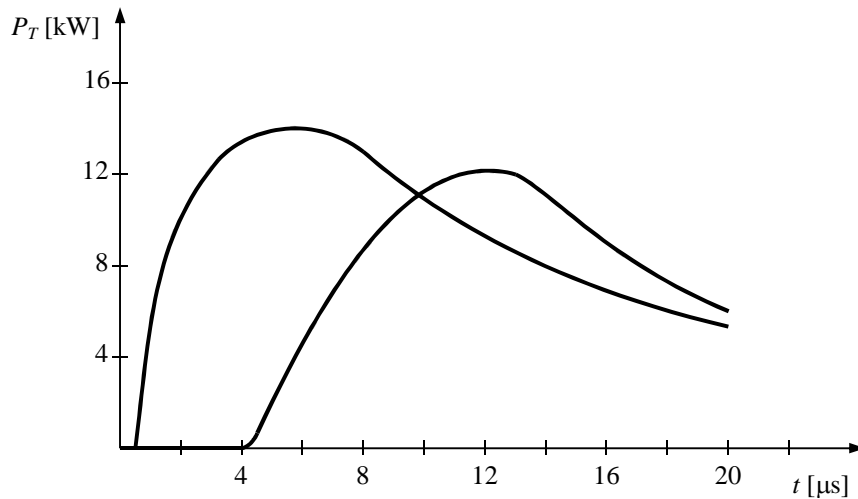
(ker je v prvem trenutku $di_L/dt = U_K/L_K$). Ta porast je pri velikih vrednostih R lahko tako velik, da prekora i dopustno $(du_D/dt)_{krit}$. Z dovolj velikim L_K lahko to sicer prepre imo, vendar pa velike vrednosti za L_K spet niso zaželene, ker se ob izklopih ventilov pojavijo na njej velike inducirane napetosti. V mnogih primerih zato v praksi uporabljamo raje **nelinearno** dušilko, ki ima feritno jedro in omogo a prehod v nasi enje. Takšno dušilko imenujemo tudi »nasi ena dušilka«. e priklju imo to dušilko zaporedno k tiristorju, tedaj dušilka zaradi svoje zelo velike za etne induktivnosti nekaj asa neposredno po vklopu tiristorja zelo omejuje tok (ga takoreko zakasni!). Ko pa zatem prehaja feritno jedro v nasi enje, postaja induktivnost te dušilke manjša in ne vpliva ve na zmanjšanje hitrosti naraš anja toka i_T . Nasi ena dušilka u inkuje torej samo kratek as neposredno po vklopu tiristorja. Na ta na in lahko razbremenimo tiristor ob vklopu. Oscilograma na sl.3.11 kažeta potek napetosti u_T in toka i_T ob vklopu tiristorja z navadno in z nelinearno dušilko. V obeh primerih znaša as upadanja blokirne napetosti t_{gr} približno $0,5 \mu s$, ko je feritno jedro dušilke že prešlo v nasi enje. Izgubna mo na tiristorju se zato zmanjša, enako tudi izgubna energija:

$$W_t = \int u_T \cdot i_T \cdot dt \quad (3.33)$$

kot kaže sl. 3.12. Ploš ina, ki jo oklepata ti dve krivulji s asovno osjo, je namre proporcionalna izgubni energiji. V primeru b) je manjša.



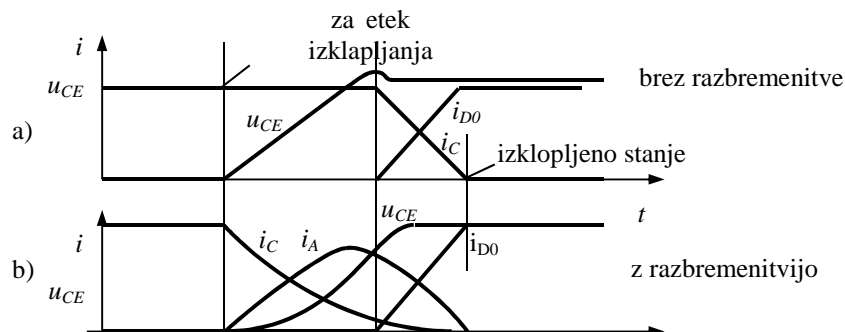
Slika 3.11: Razmere ob vklopu tiristorja, ki ima navadno (a) in nelinearno (b) komutacijsko dušilko L_K



Slika 3.12: Izgubna mo ob vklopu tiristorja, ki ima navadno (a) in nelinearno (b) komutacijsko dušilko

3.2 Razbremenjevanje tranzistorjev

Na in krmiljenja tranzistorjev in pa dejstvo, da so vsaj 10-krat hitrejši od tiristorjev, sta razloga, da jih glede preklonih izgub in po napetostnih in tokovnih strminah obravnavamo nekoliko druga e. Na in izklopa tiristorja je v primerjavi s tranzistorjem bistveno lažji. Tiristor izklopi tako, da mu najprej vzamemo tok, potem pa po asu sprostitve t_q lahko prevzame blokirno napetost. e le ta nastopa v pretvorniku s prisilno komutacijo, zato poskrbi posebno komutacijsko vezje. Tok in napetost se asovno ne prekrivata. Tranzistor ali GTO pa zaradi sposobnosti, da ga lahko preko krmilne elektrode tudi izklopimo, med izklapljanjem pri polnem toku (e ima breme induktivni karakter, to pa je pri visokih frekvencah vedno), mora prevzemati blokirno napetost.

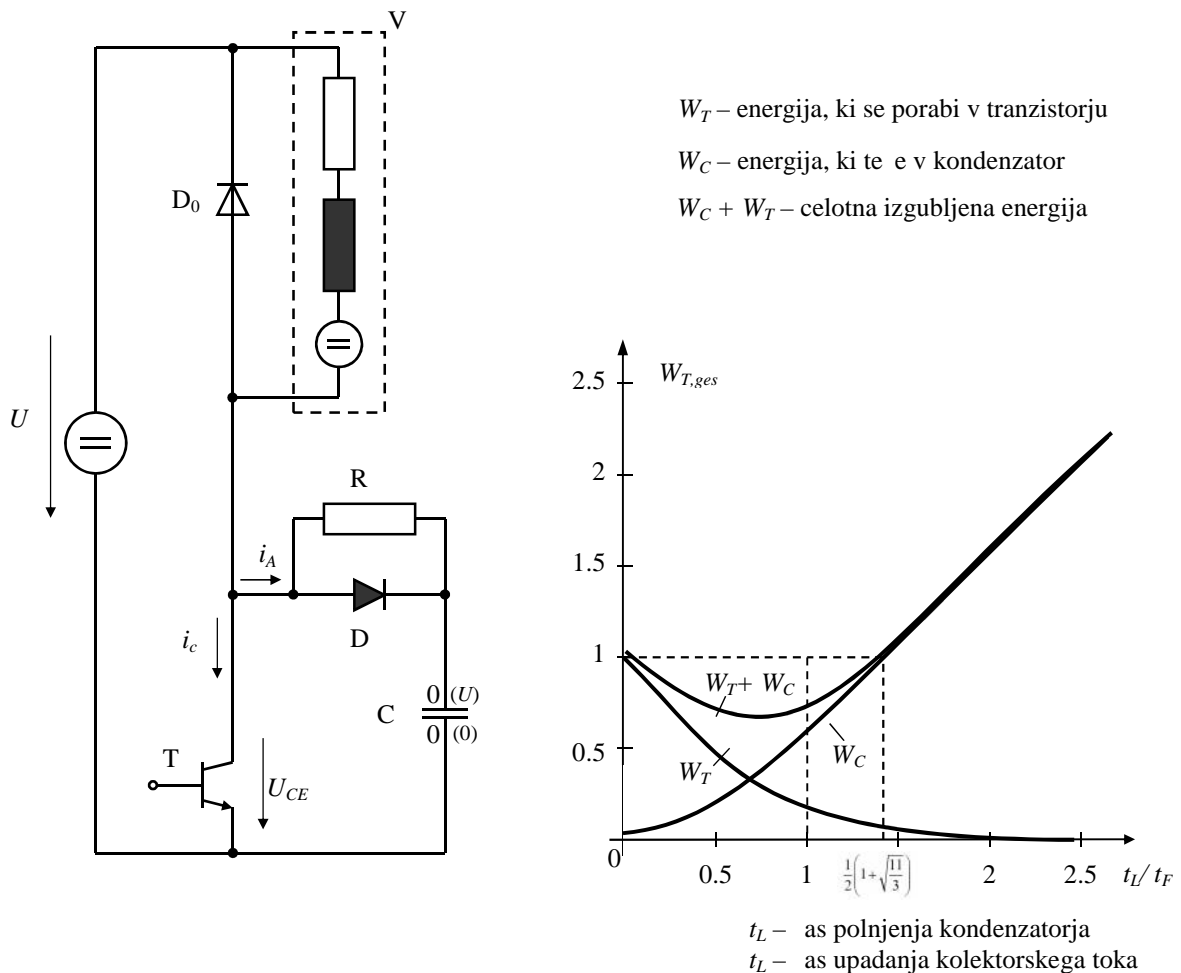


Slika 3.13: Potek izklopa tranzistorja a) GTO

Na sliki vidimo, da se šele ko napetost na kolektorju doseže napetost $U+U_D$ (glej sl. 2.24 in 3.13.a), pri ne tok seliti v prostote no diodo. To prekrivanje napetosti in toka,

ki pomeni veliko izgubno mo na tranzistorju, lahko zmanjšamo s takoimenovanim RCD vezjem (sl.3.14).

Kondenzator, ki se med izklopom polni preko diode, prevzame tok iz tranzistorja, tako kot kaže sl.3.13.b).



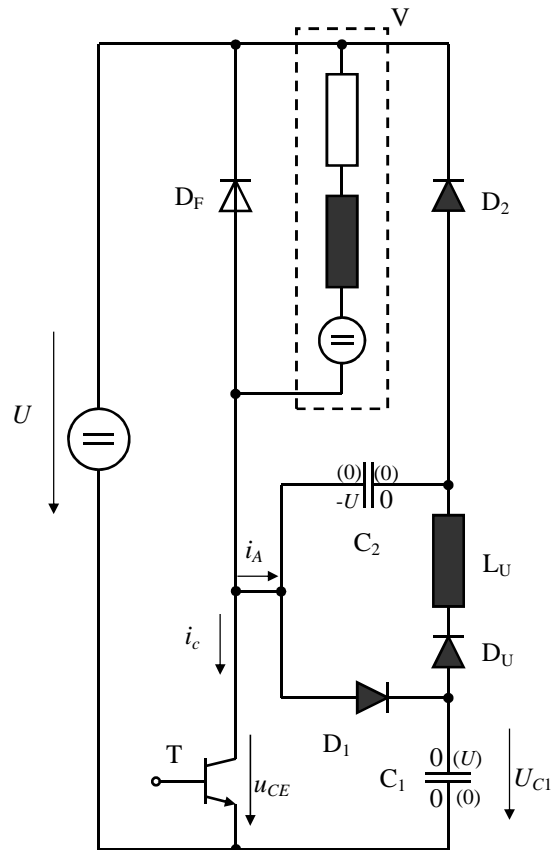
Slika 3.14: RCD razbremenitev tranzistorja

Te razbremenilne elemente dimenzioniramo glede na najve i izklopni tok in pa glede na dovoljeno napetostno strmino du/dt .

$$C > I_{Tmax} / \left(\frac{du}{dt} \right)_{max} \quad (3.34)$$

Da pa je kondenzator vedno pripravljen sprejeti maksimalno vrednost toka, mora biti pred izklopom popolnoma prazen. To dosežemo s primerno dimenzioniranim uporom R_a in pa z definiranim asom vklopljenega stanja tranzistorja, saj se skozenj takrat prazni kondenzator. Ta se skozi upor prazni po eksponencialni krivulji. Lahko pa dodamo namesto upora R-L kombinacijo, ki zagotavlja manjšo amplitudo praznilnega toka, ki dodatno obremenjuje transistor in skrajša as praznjenja.

S takšno izgubno razbremenitvijo smo preklopne izgube umaknili iz polprevodniškega stikala na zunanji upor R . e pa je naša želja dosegati im boljši izkoristek celotne naprave, se pa lahko poslužimo brezizgubnih razbremenilnih vezij, kakršno je na primer na sl.3.15.



Slika 3.15: Brezizgubno razbremenilno vezje

To vezje deluje tako, da se naboj na C_1 , ki se je zgradil med izklopom tranzistorja, po tranzistorjevem ponovnem vklopu ne porabi na upor R , pa se s prenihanjem preseli v kondenzator C_2 . Od tu pa se pri ponovnem izklopu tranzistorja preseli v enosmerni izvor U .

Razvijalci so v osemdesetih letih prejšnjega stoletja razvili ve takšnih razbremenilnih vezij, saj takratni prvi bipolarni tranzistorji, ki so bili sposobni delovati na omrežni napetosti, brez njih niso bili uporabni (primer BU V 98).

Moderni tranzistorji IGBT in MOS-FETI lahko delujejo brez takšnih razbremenilnih vezij.

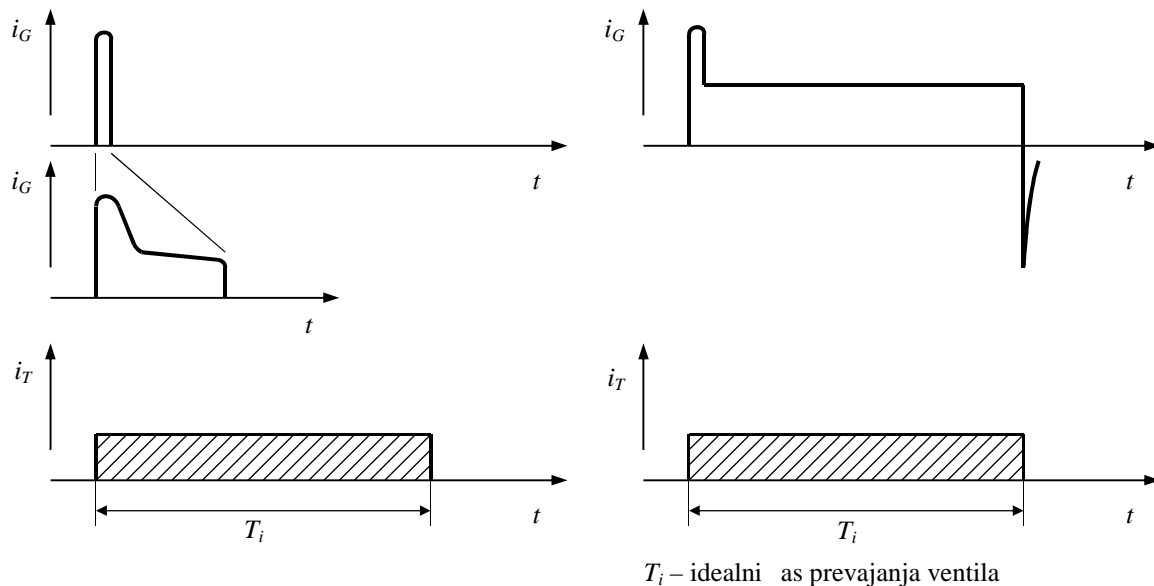
3.3 Krmiljenje polprevodniških ventilov

Za pravilno delovanje polprevodniških ventilov je poleg zaš itnih elementov potrebno pravilno oblikovati krmilni tok. Zahtevana amplituda in asovni potek se zelo razlikujeta za razli ne tipe polprevodniških ventilov. Tiristor ostane v prevodnem stanju, ko po nastopu krmilnega toka doseže držalni tok. Takrat krmilni impulz nima ve vpliva na stanje prevajanja. Nasprotno pa tranzistor mora imeti krmilni tok stalno, e ga želimo držati v prevodnem stanju.

V principu razlikujemo dve obliki impulza:

- kratek impulz in
- trajni impulz.

Kratek impulz mora biti daljši kot je potrebno, da ventil (tiristor) ostane v prevodnem stanju in je znatno krajši od predvidenega asa, ko naj bi bil tiristor odprt. Zahtevana dolžina trajanja kratkega impulza je odvisna od strmine toka di/dt tiristorja po vklopu. Ker o tem odlo a zunanji tokokrog, je torej dolžina kratkega impulza odvisna od porabnika. Prakti no je dolžina takšnega krmilnega impulza od 50 do 100 μ s. Oblike krmilnih impulzov so prikazane na sl. 3.16.



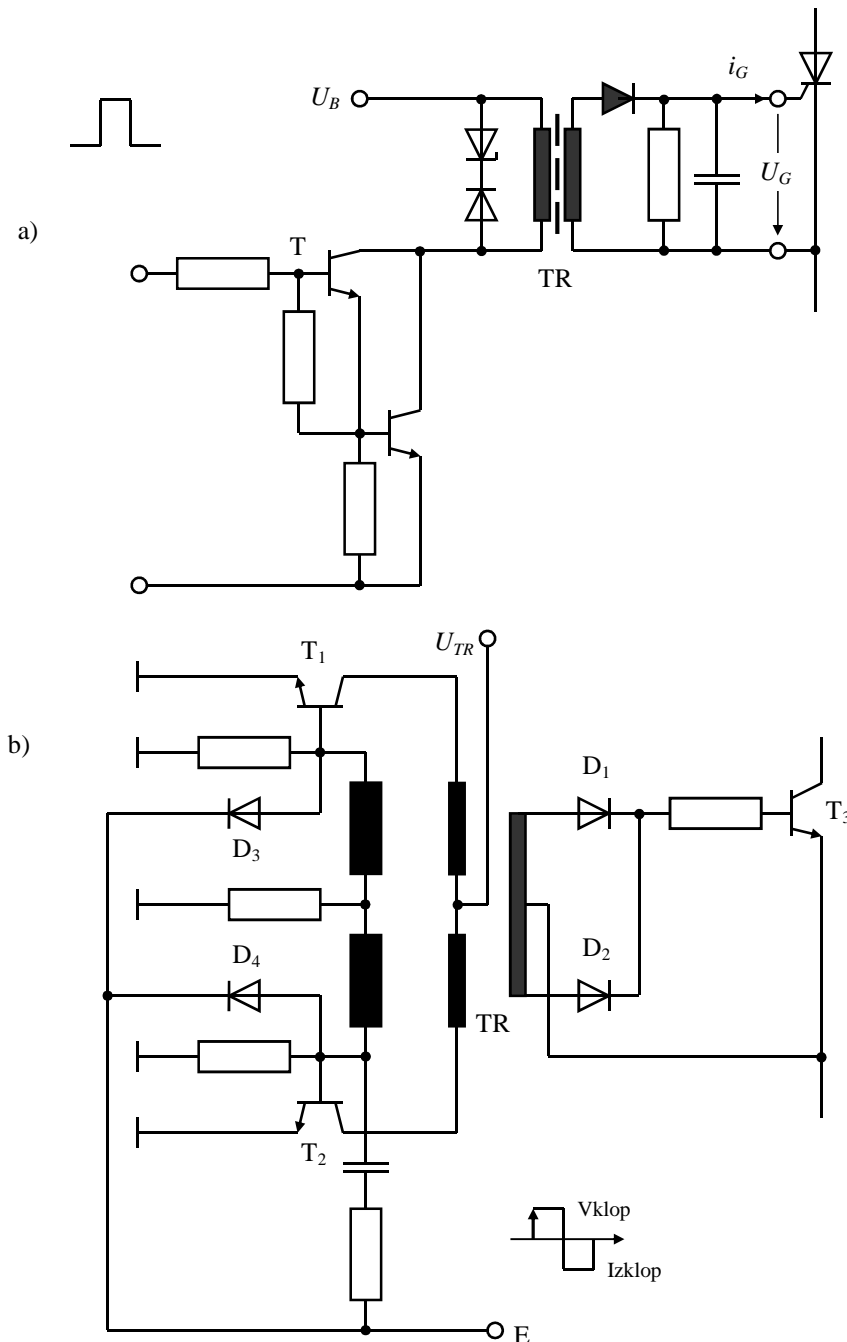
Slika 3.16: Oblike krmilnih impulzov

Za hiter vklop mora imeti impulz na za etku im ve jo strmino in nekoliko višjo amplitudo. Za hiter izklop pa je v ve ini primerov zaželen negativni bazni tok, ki im hitreje izprazni nosilce naboja v krmilni elektrodi in s tem pospeši izklop.

Za GTO tiristorje v principu zadostuje za vklop kratek impulz in za izklop kratek negativen impulz, vendar pa se zaradi zanesljivega delovanja velikokrat uporablja takšen krmilni impulz, kot pri tranzistorjih.

Trajen impulz je priporo ljivo uporabljati tudi pri krmiljenju tiristorjev, e obratujejo npr. v omrežno vodenih pretvornikih v štirikvadrantnem obratovanju, e tok ni dovolj zglajen in lahko pride pri dolo enih režimih delovanja do trganega toka.

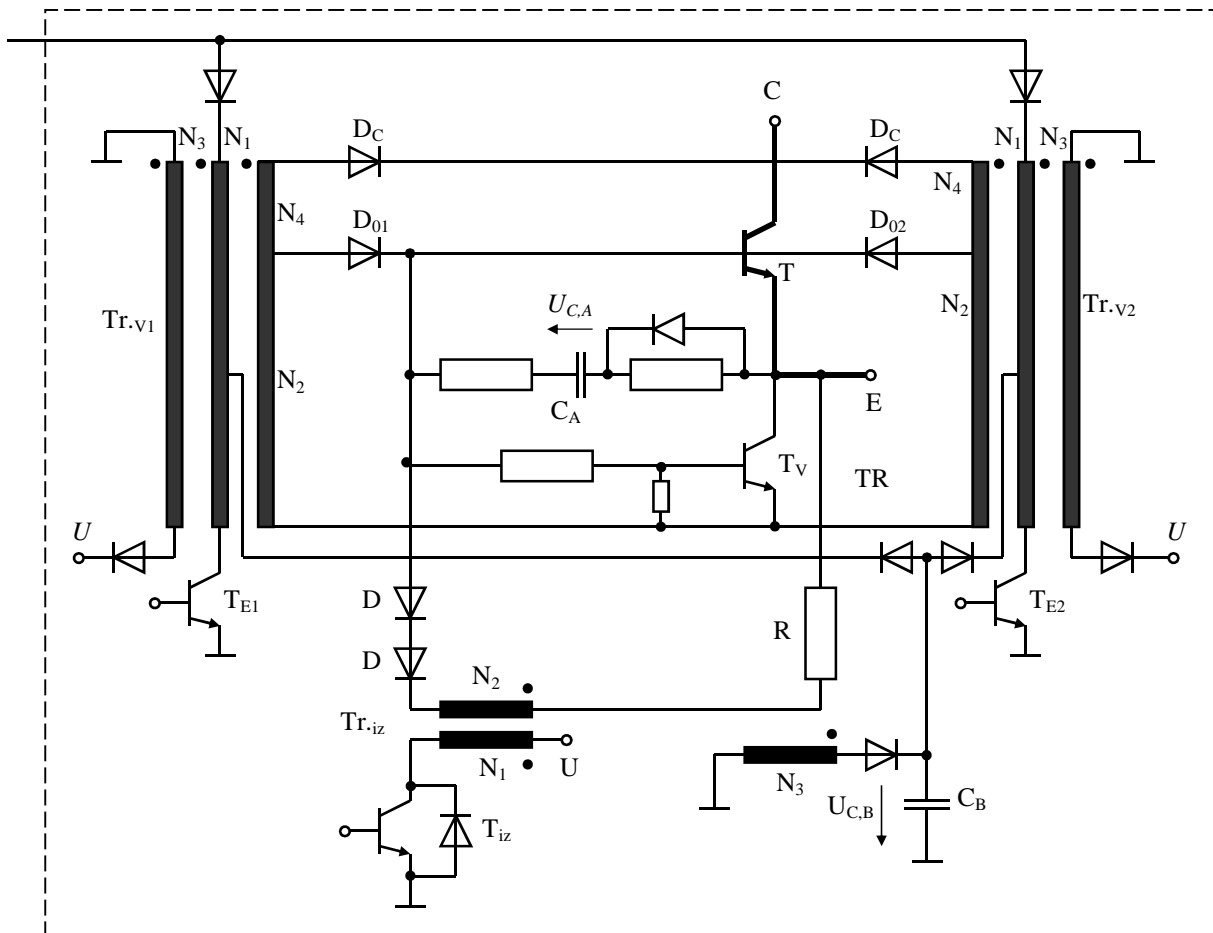
Slika 3.17 kaže vezje, ki je sposobno oblikovati kratek impulz a) in trajen impulz b). Za etek trajnega impulza je vklop oscilatorja, konec pa izklop oscilatorja. Na sekundarni strani transformatorja, ki skrbi za galvanško lo itev pa je mosti no usmerniško vezje.



Slika 3.17: Vezje za a) kratek krmilni impulz, b) trajen krmilni impulz

Kot zanimivost pa si pogledjmo še krmilno enoto za vzdrževanje krmilnega toka za bipolarni tranzistor, ki je bila razvita in uporabljana v LRT.

Tranzistor T je krmiljen preko treh feritnih transformatorjev, ki so dimenzionirani tako, da lahko prenesejo napetostni impulz dolg $10 \mu\text{s}$. Tr.v_1 in Tr.v_2 skrbita preko svojih krmilnih tranzistorjev za odprto stanje, Tr.iz pa tranzistor zapre. Krmilni impulz, ki ga vezje oblikuje je prikazan na sliki 2.22.



Slika 3.18: Bazno krmiljenje za bipolarni tranzistor

Odprto stanje po $10 \mu\text{s}$ se vzdržuje s tokovi preko diod D_{01} in D_{02} . Preko lovilnih diod D_C se z nekoliko višjo napetostjo (za napetost na N_4) od krmilne, vzdržuje tranzistor na meji nasi enja. Navitji N_3 služita za razmagnetenje transformatorjev.

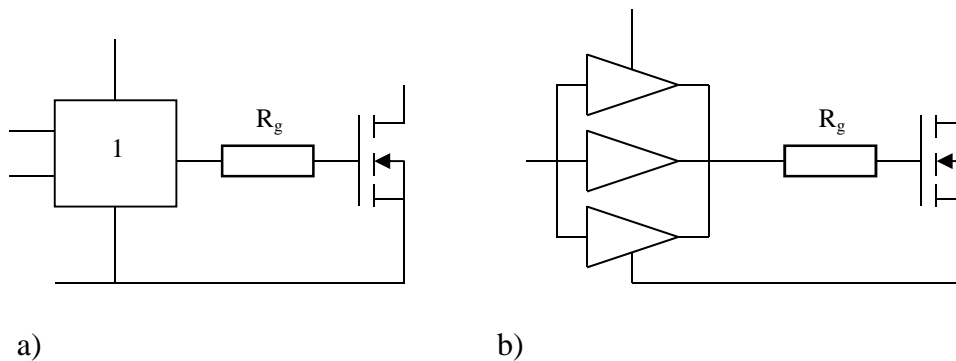
Za izklop tranzistorja poskrbi krmilni impulz T_{iz} na bazi tranzistorja, ki krmili izklopni transformator in sicer preko navitja N_2 . e sledimo tokokrogu vidimo, da najprej izprazni bazno emitorsko progo tranzistorja T, potem pa napolni kondenzator C_A na napetost U_{CA} , ki drži napetost baze tranzistorja T proti emitorju na negativni vrednosti

3 ÷ 5 V. Isto asno pa preko navitja N_3 napolni kondenzator C_B . Ta naboj povzro i pri ponovnem vklopu tranzistorja T preko enega od vklopnih transformatorjev (tistega, ki je prvi vklopil) pove an tokovni krmilni impulz. Tranzistor T_V je odprt pri vklopljenem stanju, pri izklopu pa zapre pot preko navitja N_2 . Dvojni prag diod DD pa poskrbi, da se vklopni krmilni impulz ne zaklju uje preko N_2 izklopnega transformatorja pa pa v bazno-emitorsko progo tranzistorja T.

Opisano vezje je na prvi pogled videti zahtevno, vendar pa ima nekaj zelo pomembnih dobrih lastnosti. Transformatorji zanesljivo vzdržijo galvansko lo itev zahtevanih 3 kV, poleg tega pa omogo ajo dodatno tokovno oja enje. Pri napajalni napetosti 24 V je oja enje 8. Tranzistor BUV 98, ki mu je bilo krmiljenje namenjeno, ima oja enje približno 5. To je torej skupaj 40. Mnogokrat se je ta tranzistor uporabljal v darlington kombinaciji, ki pa jo je s takšnim krmiljenjem možno voditi že iz logi nih vezij brez vmesnih oja evalnih stopenj.

MOSFET in IGBT sta napetostno krmiljena elementa. Pri akovali bi zelo majhne krmilne mo i, kar za stati ne razmere tudi velja. Ker pa delamo v mo nostni elektroniki z maksimalno dovoljenimi frekvencami, zlasti e gre za prenos mo i (energije) preko transformatorjev in ker je za polnjenje in praznjenje vhodnih kapacitivnosti krmilnega dela teh gradnikov potreben relativno velik tokovni impulz, pa te krmilne mo i niso tako zanemarljive.

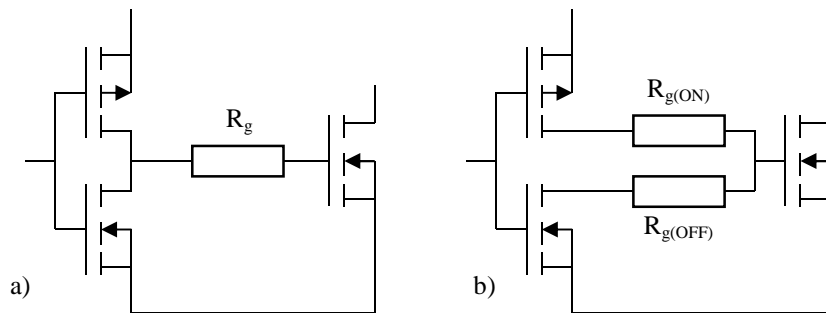
Na sliki 3.19.a) vidimo krmiljenje neposredno iz logi nih vezij. e to po mo i ne zadostuje, krmilni impulz oja amo z vzporedno vezanimi gonilniki oziroma buffer-ji. (sl.3.19.b)



Slika 3.19: Krmiljenje MOSFET-a:

- a) neposredno iz logi nih vezij
b) preko gonilnikov oja ano krmiljenje

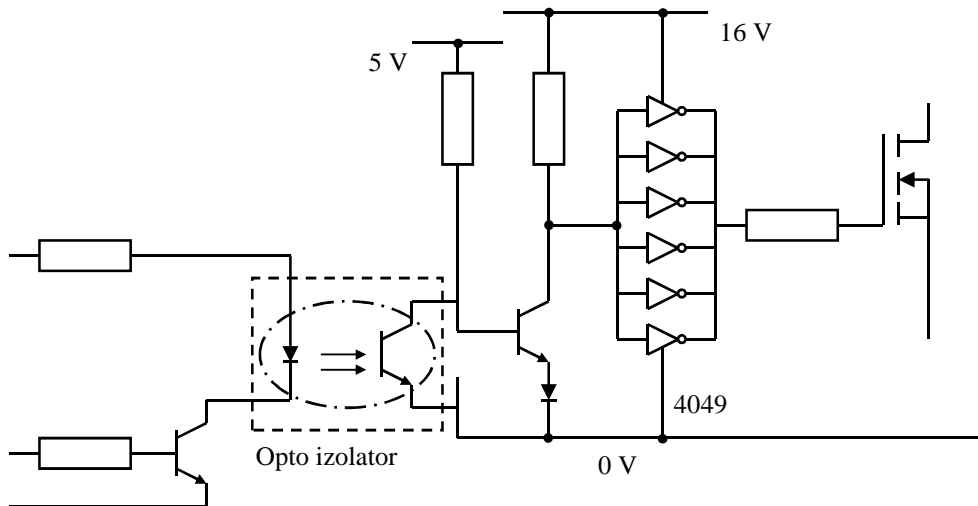
e tokovna zmogljivost omenjenih rešitev ne ustreza, ali pa e je odpornost na elektromagnetne motnje premajhna, potem uporabljamo krmilna vezja, ki jih zgradimo iz diskretnih elementov. Izhodna enota takih vezij je skoraj vedno zgrajena v t.i. push-pull vezavi iz dveh komplementarnih bipolarnih ali MOSFET transistorjev (sl. 3.20).



Slika 3.20: Izhodna stopnja v PUSH-PULL vezavi za krmiljenje MOSFET-a

Ta krmilna vezja zahtevajo precej pozornosti pri dimenzioniranju zaradi možnih kratkih stikov med dvema gonilnikoma. Pri vezju na sliki 3.20b je ta slabost odpravljena. Za doseganje maksimalnih preklopnih hitrosti moramo izvesti različne dodatne ukrepe, ki zmanjšujejo električne časovne konstante krmilnega tokokroga.

Za uporabo pri polprevodniških pretvornikih za indukcijske motorje pa potrebujemo galvanске ločitve, ki so lahko izvedene s pomočjo optičnih spojnikov ali transformatorjev. Optični spojnik je primeren le za galvanško ločitev krmilnega signala, prenos energije v krmilni del pa je največkrat rešen s pomočjo DC/DC pretvornika s transformatorjem.

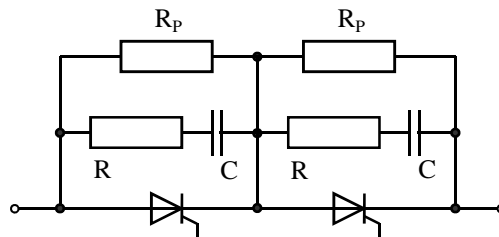


Slika 3.21: Prenos krmilnega signala z optičnim spojnikom

Industrijske izvedbe krmilnih vezij, ki jih nudijo različni proizvajalci, so opremljene še z najrazličnejšimi zaščitnimi funkcijami, kot so nadtokovna in prenapetostna zaščitna. Zanimivo pri tem je dejstvo, da za prenos krmilnega signala v večini primerov uporabljajo transformatorje in ne optične spojnike.

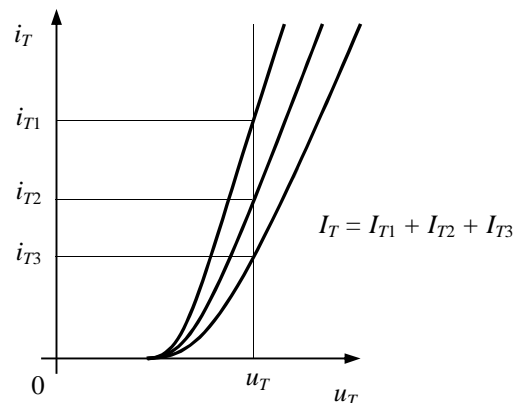
3.4 Zaporedna in vzporedna vezava ventilov

e moramo obratovati z velikimi napetostmi, ki prekora ujejo maksimalno dosegljive zaporne napetosti enega ventila, moramo pa vzeti ve ventilov in jih vezati zaporedno. Pri tem pa nastopajo zaradi vedno obstoje ih neenakih karakteristik zaporedno vezanih ventilov dolo ene težave.



Slika 3.22: Zagotavljanje stati ne in dinami ne enakomerne porazdelitve celotne zaporne napetosti na zaporedne ventile

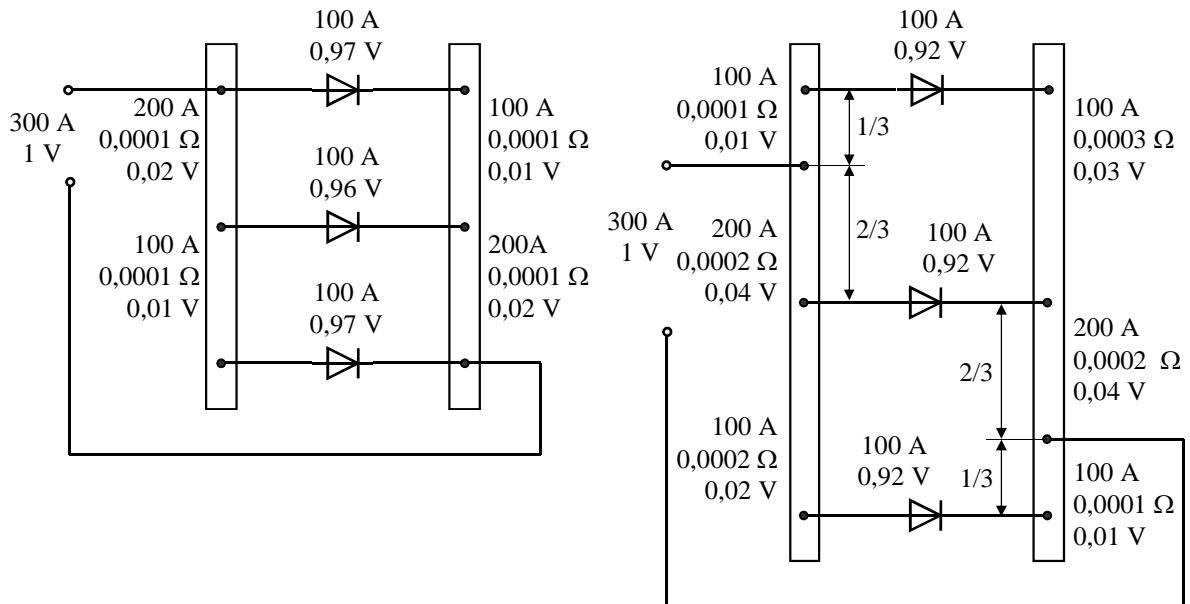
Inverzni toki posameznih ventilov niso povsem enaki in se zato celotna zaporna napetost ne porazdeli enakomerno na posamezne serijske ventile. Tako so lahko nekateri ventili napetostno preobremenjeni. Problem rešimo tako, da vežemo paralelno k ventilom visokoohmske upore R_p kot kaže sl.3.18. Njihova upornost mora biti tolikšna, da te e prek njih tok, ki je za en velikostni razred ve ji od inverznih tokov i_R ventilov.



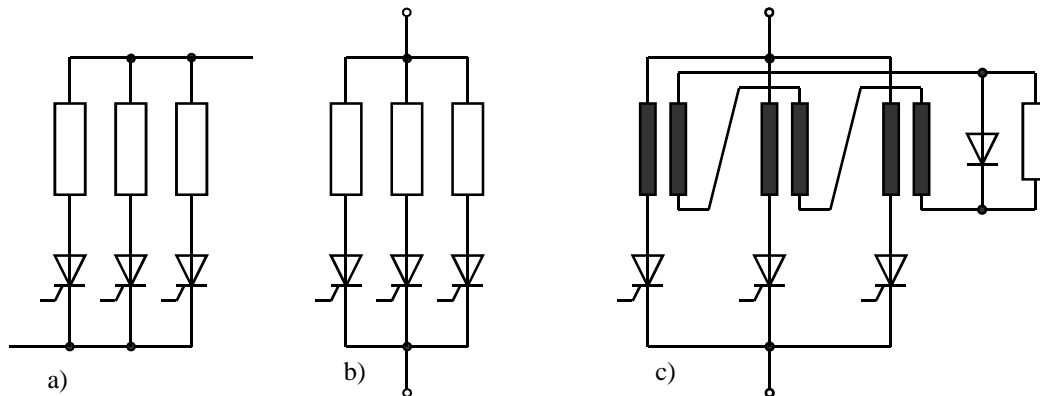
Slika 3.23: Vzporedno obratovanje tiristorjev z razli nimi prevodnimi karakteristikami

Pri hitrih spremembah zaporne napetosti prevzamejo **dinami no** porazdelitev celotne napetosti na zaporedne ventile kar obstoje i dušilni RC- leni, ki se vedno nahajajo ob vsakem ventilu. Kondenzatorji C lahko namre prevzamejo razliko Q nosilcev naboja pri izklapljanju (tj. prenehanju prevajanja verige ventilov) zaradi razli ne vrednosti Q_q posameznih ventilov, pa tudi razliko Q_q zaradi neenakega asa proženja t_{gr} . Zato se na kondenzatorjih pojavijo neke napetostne razlike $U_C = Q_q/C$. Te dodatne napetosti ne smejo biti prevelike, ker se pri izklopih ventilov izražajo kot dodatna prehodna

obremenitev ventilov v zaporni smeri. Najbolje je seveda, e izberemo za zaporedno vezavo ventile, ki imajo im bolj enake stati ne in dinami ne karakteristike.



Slika 3.24: Slaba (a) in dobra (b) izvedba priklju kov na zbiralnicah



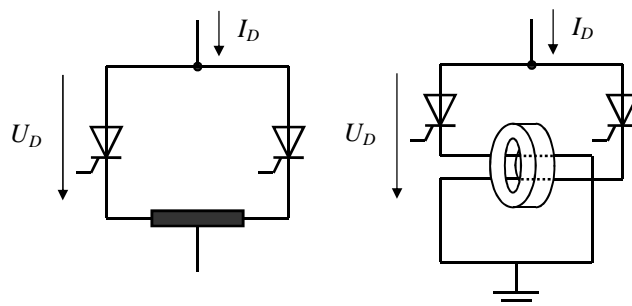
Slika 3.25: Možnosti za izboljšanje enakomernosti porazdelitve celotnega toka na vzporedno vezane ventile: (a) z upornostmi zbiralnic ali varovalk, (b) z zaporednimi induktivnostmi, (c) z magnetno sklopljenimi induktivnostmi

e moramo obratovati z zelo velikimi toki, ki presegajo sposobnost enega ventila, moramo vezati ve ventilov vzporedno. Tudi v tem primeru moramo poskrbeti, da se omogo i im bolj enakomerna stati na in dinami na porazdelitev celotnega toka na posamezne ventile. Vzrok za to neenakomerno stati no porazdelitev toka so neenake stati ne prevodne karakteristike posameznih ventilov (tj. razli ne pragovne napetosti in/ali razli ne diferencialne upornosti) ter razli no velike ohmske upornosti elektri nih

vodnikov (žic, tra nic). Izravnavanje tokov z vklapljanjem dodatnih izena evalnih ohmskih uporov pred posamezne ventile ni dobro, ker imamo opraviti vedno z velikimi toki in so zato dodatne izgube (i^2R) velike. Zato vedno raje uporabljamo ventile, ki so izbrani (selekcionirani) za vzporedno vezavo in imajo zelo enake stati ne in dinami ne karakteristike.

Morebitne majhne preostale razlike v stati nih karakteristikah pa izravnava jo že obstoje e talilne varovalke zaporedno z ventili s svojo ohmsko upornostjo, kajti pove an ventilski tok takoj povzro i napetostni padec na varovalki in se zato povratno zmanjša tok ventila. Pri pretvornikih za zelo velike toke (npr. pri galvanah) moramo posvetiti posebno pozornost elektri nim dovodom (zbiralkam). Na sl. 3.21 a) dovodi do paralelnih ventilov nimajo enake ohmske in induktivne upornosti. Boljšo rešitev kaže sl. 3.21 b). Na dinami no razdelitev toka na vzporedne ventile vplivajo induktivnosti v seriji s posameznim ventilom. Obstoje e neenakosti zaradi razli nih dovodov (žic, zbiralk) lahko izravnava mo z dodatnimi serijskimi induktivnostmi, kot kaže sl. 3.21 b). Te induktivnosti lahko tudi elektromagnetno sklopimo, npr. tako, kot kaže sl. 3.21 c). V tem primeru podpira sprememba toka ene veje v pozitivnem smislu spremembo v drugi veji. Vendar so takšne dušilke komplicirane in jih sre amo redkeje.

Pri vzporednem obratovanju ve ventilov ne moremo prakti no nikoli dose i popolnoma simetri ne razdelitve tokov. Zato moramo ventile obremeniti z manjšim tokom od nazivnega. Redukcijski faktor je ponavadi 0,8.



Slika 3.26: Elektromagnetna sklopitev dveh induktivnosti: (a) razdelitev toka na paralelna tiristorja, (b) tehni na izvedba

Poseben problem je še so asen vklop paralelnih tiristorjev. Tiristor, ki se sproži pred ostalimi, prevzame nase prehodno velik tok in je preobremenjen, »po asni« tiristor pa bo vklopil še kasneje, kajti njegova blokirna napetost se zaradi že prevajajo ega »hitrega« tiristorja zmanjša le na nekaj voltov! Zato smemo vezati vzporedno vedno le tiristorje, katerih karakteristike so im bolj enake, prožiti pa jih moramo s im bolj mo nimi in strmimi tokovnimi pulzi $i_G(t)$.

3	ZAŠ ITA, RAZBREMENJEVANJE IN KRMILJENJE POLPREVODNIŠKIH VENTILOV	42
3.1	RC- leni za zaš ito tiristorjev in diod	44
3.1.1	Zaš ita pred efektom nosilcev naboja (ENN)	44
3.1.2	Omejitev du/dt pri tiristorjih in diodah	50
3.1.3	Omejitev prenapetosti na transformatorju in na bremenu	51
3.1.4	Vklopne izgube ventilov in omejitev tokovnih strmin di/dt pri tiristorjih	52
3.2	Razbremenjevanje tranzistorjev	54
3.3	Krmiljenje polprevodniških ventilov	57
3.4	Zaporedna in vzporedna vezava ventilov	62