

PROTIPARALELNO USMERNIŠKO VEZJE BREZ KROŽNEGA  
TOKA KOT ELEMENT REGULACIJSKEGA KROGA

dr. Karel JEZERNIK  
Visoka tehniška šola Maribor

POVZETEK

Protiparalelno usmerniško vezje brez krožnega toka uporabljamo v enosmernih štirikvadratnih pogonih in pogonih direktnih frekvenčnih presmernikov. V obeh izvedbah je posebej zahtevna izvedba preklopa usmerniških vezjih z ozirom na nastop krožnega toka. Z novo metodo ugotavljanja toka nič in izvedbe adaptivnega regulatorja je možno doseči enako dinamiko kot pri vezju s krožnim tokom. Priloženi so nekateri rezultati dobljeni z metodo digitalne simulacije.

APPLICATIONS OF THE CIRCUIT WITH SUPPRESSED CIRCULATING

CURRENT - The circuit with suppressed circulating current is employed both for reversible d.c. drives and for a.c. drives with mains-commutated static converters. Depending on the requirements that have to be satisfied by the dynamic response of the controlled drive, various solutions of the problems associated with circulating current may be adopted. As a result of new methods of determining current zero and the availability of adaptive controllers, it is now possible for the dead time and actuating time to be made so short that it is almost impossible to distinguish between the dynamic response of a drive with suppressed. There are given some results of research we got them by digital simulation.

UVOD

Protiparalelno usmerniško vezje brez krožnega toka se uporablja v izvedbah enosmernih in izmeničnih elektromotorskih pogonov. Pri obeh izvedbah je osnovni gradbeni element trifazni mostični usmernik (L1). Pri enosmernih pogonih uporabimo dva protiparalelno spojena mostična usmernika za napajanje kotve motorja (slika 1), medtem ko je pri izmeničnih pogonih število protiparalelnih vezij odvisno od števila faz naprave (L2, L4).

V preteklosti so se v enosmernih pogonih uporabljala protiparalelna vezja s krožnim tokom, ker so bila vezja brez krožnega toka dinamično počas-

nejša. Obsežnost energetskega dela naprave je pa v tej izvedbi mnogo večja, saj potrebujemo obvezno usmerniški napajalni transformator z dvema sekundarnima navitjema, poleg tega pa moramo vgrajevati obsežne in drage dušilke za omejevanje krožnega toka. Tehnološki razvoj elektronskih komponent je omogočil zanesljivo in dinamično ustrezno delovanje protiparalelnega vezja brez krožnega toka, pri katerem odpadejo robustne dušilke za omejevanje krožnih tokov in v primeru ustreznih napetostnih razmer tudi usmerniški transformator. S povečanimi zahtevami za elektroniko, predvsem regulator toka, opuščamo tudi zaradi cene in robustnosti gladilno dušilko v enosmernem tokokrogu. Pri izmeničnih napravah direktnih frekvenčnih presmernikov pa dodatne dušilke v izhodnem tokokrogu za glajenje toka zaradi fizikalnega principa delovanje naprave opuščamo, ker nam velikost dušilke določa direktno maksimalno izhodno frekvenco naprave (L2, L4).

Pri obeh izvedbah naprav nastopa v skupnem delovnem območju relativno veliko območje trganja izhodnega toka (do 30 %). Za obratovanje v območju zveznega usmerjenega toka je problematika delovanje trifaznega usmerniškega vezja dobro raziskana (L2, L3). Regulacije elektromotorskih pogonov izvedemo v kaskadni izvedbi s podrejenim regulacijskim krogom toka motorja (L2, L3). Iz zahtev po dobri dinamiki in točnosti zadovoljuje izbira PI-regulatorjev za regulacijo toka motorja in vrtilne hitrosti (če je zagonska konstanta motorja štirikrat večja od električne konstante kotve motorja). V območju trganja izhodnega toka pa nastopajo dodatne regulacijske težave, ki imajo dva osnovna vzroka:

1. sprememba statične karakteristike usmernika
2. sprememba strukturne regulacijske proge.

Pri prehodu iz zveznega v trgan tok se spremeni obnašanje zaprtega tokovnega regulacijskega kroga (regulacijski krog se obnaša kot odprt), kar povzroči poslabšanje dinamike regulacijskega kroga vrtilne hitrosti in lahko vodi celo k njegovi nestabilnosti. Ustrezno rešitev problema predstavlja uporaba adaptivnega regulatorja toka motorja, ki mu spremenimo ojačanje in integracijsko časovno konstanto ob nastopu trganja toka.

#### PROBLEMATIKA PROTIPARALELNEGA VEZJA

Pri protiparalelnih usmerniških vezjih nastopijo opisani problemi v območju trganja izhodnega toka usmernikov. Območje trganja nastopa pri vsaki spremembi smeri izhodnega toka. Zgradba regulacijskega sistema na sliki 1 je podobna zgradbi enokvadratnega enosmernege regulacijskega pogona z dodatno vgrajeno elektronsko logiko, ki mora skrbeti pri spremembi vrtilnega momenta za čimbolj kontinuiran prehod toka enega usmernika na drugega. Ta prehod naj poteka dinamično hitro, vendar brez nevarnosti za nastanek krožnega toka. Zahteve, ki se pojavljajo so naslednje: hitro zmanjšanje toka, ki trenutno teče (n.pr.:  $i_A$ ), čim krajši premor v katerem sta oba sistema zaprta in hitro povečanje toka drugega usmernika (n.pr.:  $i_B$ ) pri preklopu prožilnih impulzov.

Hitro zmanjšanje toka usmernika dosežemo s premikom prožilnih impulzov usmernika, ki vodi tok v razsmerniško območje delovanja. Premor je lahko toliko krajši, kolikor ustrežneje ugotovimo trenutek, ko ventili prenehajo prevajati tok. Preklop impulzov na drug usmerniški sistem je dovoljen po času premora, ki mora biti večji od časa sprostitve nosilcev nabojev uporabljenih ventilov. Teoretični minimum prenosa je določen s časom sprostitve nosilcev nabojev tiristorjev (cca 0,5 ms). Naraščanje toka  $i_B$  po preklopu prožilnih impulzov na sistem B je določen z: lego impulzov v trenutku preklopa, hitrosti premika impulzov do trenutka vklopa novega usmernika, obnašanja regulacijskega kroga toka pri trganem in zveznem toku. V celoti nastopajo naslednji problemi:

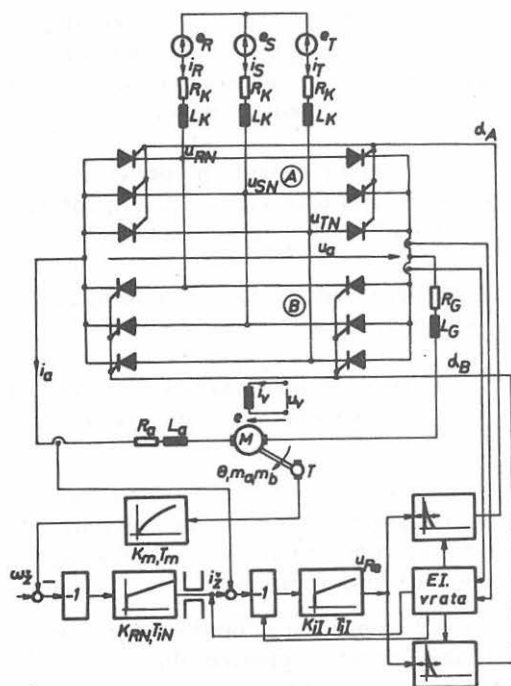
1. zanesljiva in hitra ugotovitev stanja tiristorjev z ozirom na prevajanje in zapiranje. Od izvedbe meritve ugotavljanja stanja toka nič in časa sprostitve nosilcev nabojev ventilov je odvisen čas premora za preklop impulzov na nov sistem.
2. hitro izkrmiljenje prožilnih impulzov novega usmerniškega sistema, ki zagotavlja takoj naraščanje toka po preklopu impulzov. Ta potrební čas moramo vštetí v čas premora.
3. hitro zmanjšanje toka usmernika, ki je možno samo v primeru, ko je tokovni regulator adaptivno prilagojen spremembam parametrov regulacijske proge pri zveznem in trganem usmerjenem toku.

Uporaba protiparalelnega usmerniškega vezja brez krožnega toka se razlikuje glede na rešitev omenjenih problemov: ugotavljanje toka nič, krmiljenje prožilnih impulzov za zmanjšanje toka, ki trenutno teče in hitro naraščanje toka novega usmernika, izvedbe adaptivnega regulatorja toka.

V današnjem razvoju elektronskih komponent (operacijski ojačevalniki, FET - stikala, optokoplerji), je možno izvesti protiparalelno vezje brez krožnega toka tako, da ima dinamično enako vezju s krožnim tokom.

#### DIGITALNA SIMULACIJA - METODA NAČRTOVANJA TEHNIŠKIH SISTEMOV

Z metodo digitalne simulacije smo ponazorili obnašanje štirikratnega elektromotorskega pogona na sliki 1 in direktnega frekvenčnega presmernika na sliki 2. Raziskovali smo dinamično preklapa in dimenzioniranje regulatorja toka ob preklopu usmernikov. Rezultate digitalne simulacije elektromotorskega pogona kaže slika 3 in direktnega frekvenčnega presmernika za sinusni potek zelenega toka kaže slika 4. Pri obeh izvedbah smo analizirali protiparalelno vezje brez krožnega toka s skupnim tokovnim PI - regulatorjem, ki v primerjavi z izvedbo dveh ločenih tokovnih regulatorjev predstavlja ugodnejšo varianto z ozirom na ceno, vendar nudi manjšo možnost glede krmiljenja vžignih impulzov ob izmenjavi usmernikov v obratovanju. Stacionarno in dinamično obnašanje obeh sistemov na slikah 1 in 2 smo opisali z matematičnimi modeli kot so podani v (L2, L3, L5). Računalniški programi so pisani v fortranu in sicer modularno, tako da obnašanje posameznih podsistemov opišemo s samostojnimi podprogrami (L4).



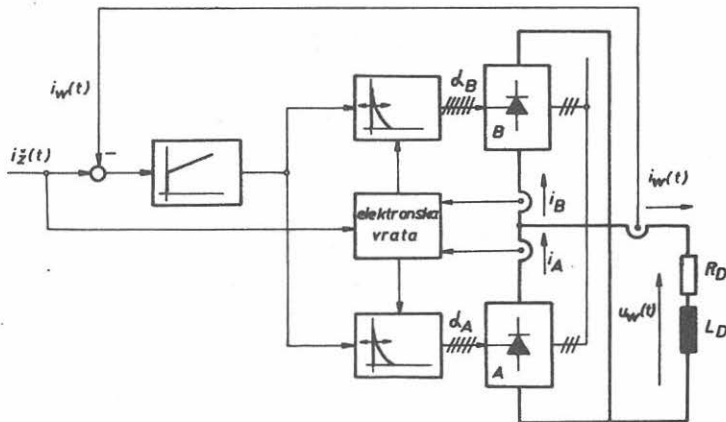
Sl. 1. Enosmerni štirikvadrantni reguliran pogon

vitev, da je vse posege na tokovnem PI - regulatorju potrebno opraviti ob nastopu stanja toka usmernika nič in ne kot je mnogokrat omenjeno v literaturi po končanem premoru med obema preklopama. V primeru enosmernega elektromotorskega pogona (rezultati prekrmljenja vrtilne hitrosti na sliki 3) je ugodno nastavljanje vžigne impulze novega usmernika v razsmerniškem območju delovanja. To pa zahteva precejšnje povečanje elektronike, saj je potrebno upoštevati vpliv inducirane napetosti na porast toka po končanem preklopu pro-

V matematičnih modelih usmernikov smo ponazorili pojave komutacij ventilov, prostega prevajanja in trganja toka. Ker vezje trifaznega mostičnega usmernika ne vsebuje pomembnejših energijskih akumulatorjev je pomembno tudi poznavanje vpliva usmernikov na napajalno omrežje. Veličine obeh sistemov na slikah 3 in 4 so normirane in sicer smo v primeru enosmernega motorja za napetosti in vrtilno hitrost izbrali kot osnovne vrednosti veličine praznega teka in za tokove in momente vrednosti kratkega stika. Pri direktnem frekvenčnem presmerniku smo vse veličine normirali na maksimalne vrednosti nazivnih veličin.

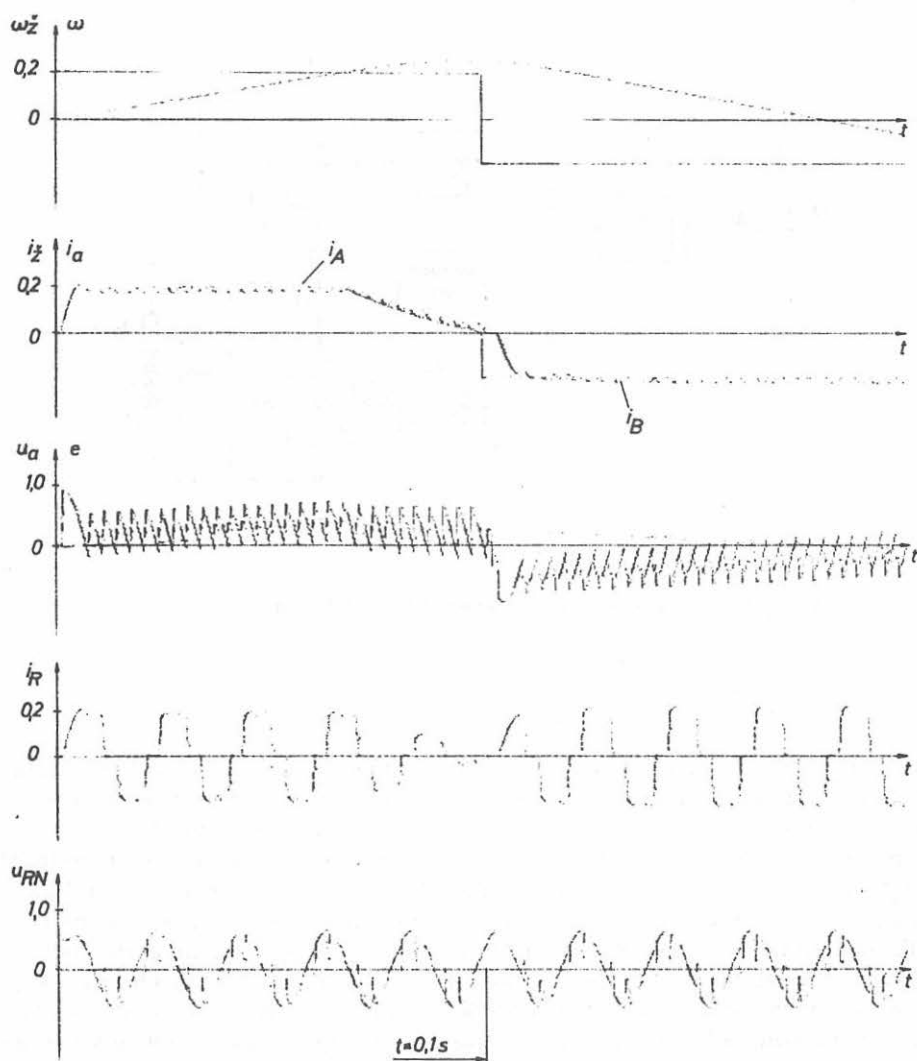
Za primerjavo prehodnih pojavov veličin naprav, posebej izhodnih tokov usmernikov ob preklonih, smo vse regulacijske kroge v vseh izračunih dimenzionirali za dušenje  $D = 1/\sqrt{2}$  ( $L_2, L_3$ ). Za tokovne regulatorje smo izbrali parametre za primer zveznega toka. Raziskovali smo načine krmiljenja vžignih impulzov usmernikov, da bi bile izpolnjene postavljene dinamične zahteve.

Iz vseh opravljenih eksperimentov sledi enoumna ugotovitev,

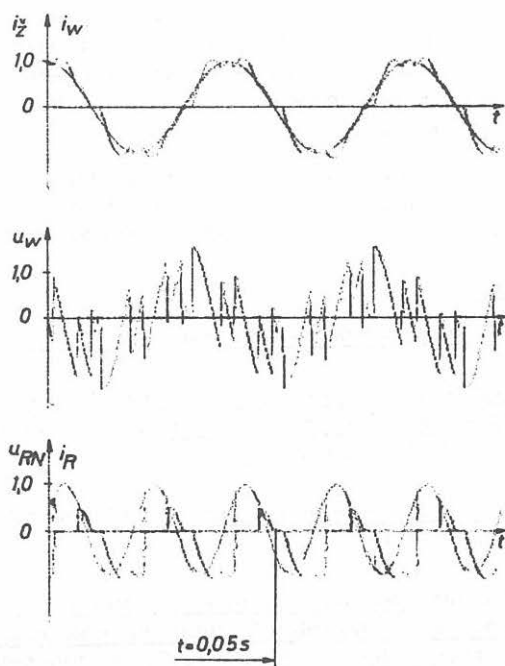


Sl. 2. 6-pulzni direktni frekvenčni presmernik

žilnih impulzov. V primeru direktnega frekvenčnega presmernika (rezultate izračunov kaže slika 4) je za delno dinamiko izmeničnega toka bremena potrebno v začetku premora postaviti izhod PI - regulatorja na vrednost nič. Po končanem preklpu nov usmernik prične usmerjati v usmerniškem področju, kar ustreza zahtevam hitrega naraščanja toka. Zaradi sinusnega spreminjanja želenega toka direktnega frekvenčnega presmernika, posebej pri bremenih večjih induktivnosti in zahtevanih višjih izhodnih frekvencah, invertiranje izhoda PI - regulatorja toka po preklpu impulzov ni ugodno zaradi povečanja tokovnega udara usmernika in temu sledečemu zmanjševanju toka usmernika v razsmerniškem delovanju. Dovoljeno spreminjanje vžignih impulzov v razsmerniškem območju moramo namreč zaradi pojava prevešanja razsmernika omejiti na sigurnostno mejo. Pri naših simulacijah smo dovolili maksimalno izkrmljenje prožilnih impulzov do  $150^\circ$ .



Sl. 3. Časovni potek tokov, napetosti in vrtilne hitrosti štirikvantnega reguliranega elektromotorskega pogona; Električna časovna konstanta kotve motorja  $T_a = 12,06$  ms, časovna konstanta motorja  $T_z = 60,33$  ms



Sl. 4. Časovni poteki tokov in napetosti 6-pulznega direktnega frekvenčnega presmernika, izhodna frekvenca 25 Hz; normirane veličine:  $L_D/Z_0 = 4,2$  ms - induktivnost bremena,  $R_D/Z_0 = 0,132$  ohmska upornost bremena,  $R_K/Z_0 = 0,005$  - notranja upornost omrežja,  $L_K/Z_0 = 0,15$  ms - notranja induktivnost omrežja

#### ZAKLJUČEK

V vseh izračunih digitalne simulacije smo izbrali za srednjo vrednost časa premora 1 ms. Velikost premora je odvisna od izvedbe in zanesljivosti naprav, pri čemer je posebej pomembna ugotovitev stanja toka nič usmernikov. Najustreznejšo rešitev za meritev toka nič predstavlja meritev padcev napetosti na ventilih z optokoplerji in seveda z ustrežno logiko. Izbira ventilov z manjšim časom sprostitve nosilcev nabojev ni tako pomembna, kot je sama meritev toka nič. Za regulator toka bi bila najboljša rešitev adaptivni regulator, ki bi ob nastopu trganja toka usmernikov in tudi v času premora preklo-

pov vžignih impulzov spremenil njegovo PI - v I-obnašanje. To pa seveda zahteva povečanje obsežnosti elektronike tako glede izvedbe regulatorjev toka in možnosti krmiljenja vžignih impulzov z inducirano napetostjo pri izvedbi enosmernega elektromotorskega pogona, ki v bistvu predstavlja dodatno krmiljenje tokovnega regulacijskega kroga.

Digitalna simulacija nam omogoča cenen študij vseh omenjenih variant obratovanja in še drugih, pri čemer naj poudarimo poleg možnosti preprostega spreminjanja vhodnih podatkov natančno reproduktivnost izračunov.

#### LITERATURA

- (1) G. Möltgen, Netzgeführte Stromrichter mit Thyristoren, Siemens 1974
- (2) K. Jezernik, Digitalna ponazoritev dinamičnih sistemov s posebnim poudarkom na presmerniških vezjih, Fak. za elektrotehn. v Ljubljani 1976, disertacija
- (3) W. Leonhard, Regelung in der elektrischen Antriebstechnik, Teubner, Stuttgart 1974
- (4) R. Cajhen, K. Jezernik, Bausteinförmiger Aufbau eines Simulationsprogrammes zur digitalen Nachbildung elektrischer Systeme mit Stromrichterschaltungen, 3. Leistungselektronik Konferenz Budapest 77, Bd. 1, s. 1.18
- (5) K. Jezernik, Spremenljivke stanja in njihova uporaba pri digitalni simulaciji dinamičnih sistemov, Avtomatika, Zagreb 1-2/1976, s. 31