

MIKROPROCESORSKO UPRAVLJANJE DVANAESTO-PULSNIM REDNIM TIRISTORSKIM MOSTOM

Vladimir Vukić, Marko Janković, Rajko Prole
Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd

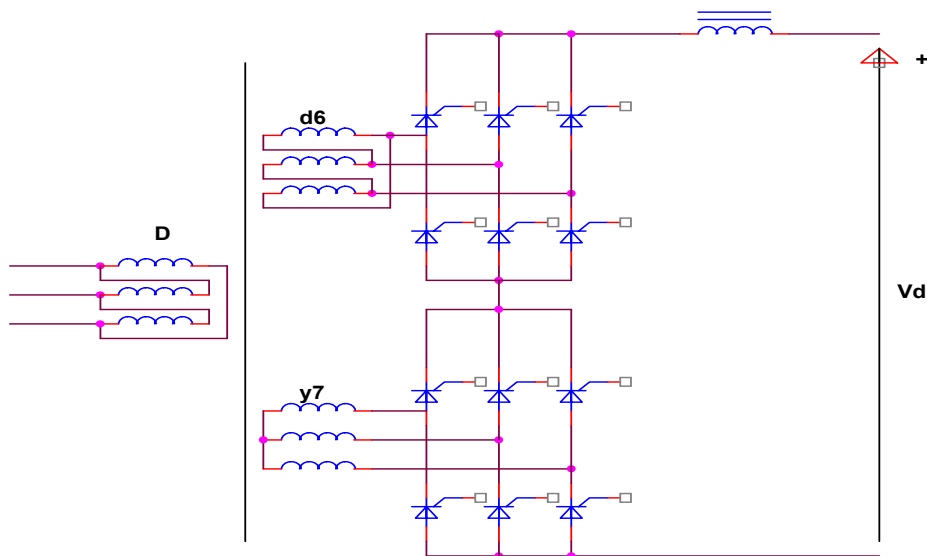
Sadržaj: *U radu je opisano praktično rešenje upravljačke elektronike dvanaestopulsnog tiristorskog mosta. Rešenje je bazirano na mikrokontroleru "Intel" 80C196. Data je koncepcija uređaja i prikazani su rezultati dobijeni prilikom ispitivanja prototipa sa električnim lukom kao teretom. Prikazano rešenje elektronike obezbeđuje mogućnost upravljanja svim konfiguracijama tiristorskih mostova u različitim oblastima energetske elektronike i elektromotornih pogona.*

Ključne reči: *dvanaestopulsni tiristorski most, regulacija napona i struje, električni luk, mikrokontroler 80C196.*

1. UVOD

Zahtevi za visokim kvalitetom električne energije, kao i potreba za radom ispravljača na visokim naponima, dovela je do primene dvanaestopulsnih rednih tiristorskih ispravljača. Zahtev za korišćenjem dvanaestopulsnih ispravljača je prvenstveno prisutan kod visokonaponskog prenosa električne energije jednosmernom strujom (HVDC, High-voltage DC Transmission), gde je veoma značajno sprečavanje prodiranja viših harmonika u prenosnu mrežu, kao i smanjenje talasnosti jednosmernog napona, da bi se u potpunosti obezbedilo povezivanje delova elektroenergetskog sistema koji nisu međusobno sinhronizovani. Takođe, zbog potrebe za prenosom energije na visokom naponu, značajno je i pitanje maksimalnog napona koje tiristorski most može da podnese - zbog redne veze dva punoupravljljiva tiristorska mosta, kod dvanaestopulsnog rednog ispravljača je maksimalan napon dvostruko veći u odnosu na klasični punoupravljljivi (šestopulsni) ispravljač.

Pored HVDC sistema, dvanaestopulsni ispravljači nalaze primenu i u sistemima besprekidnog napajanja (Uninterruptible Power Supply, UPS), u sistemima pobude sinhronih motora i generatora, kao i elektromotornim pogonima. Poslednjih godina je u svetu aktuelno uvođenje plazmatronskih sistema za generisanje električnog luka u topionicama i termoelektranama. Ovi sistemi zahtevaju izvore jednosmerne struje velike snage, sa malom talasnošću napona. Jedna od primenjenih koncepcija za napajanje elektroda je upravo dvanaestopulsni redni ispravljač. Zahtevi korisnika za visokom pouzdanošću sistema, mogućnošću zadavanja parametara preko računara serijskom komunikacijom i stalnom akvizicijom podataka o radu uređaja nameću primenu mikroprocesorskog upravljanja kao rešenje koje nema alternativu. Zbog gasnodinamičkih karakteristika električnog luka, koje ga čine veoma složenim objektom upravljanja, upravo je kod plazmatronskog ispravljača izuzetno značajan izbor optimalnog načina paljenja tiristora i sinteza parametara regulatora.



Slika 1: Konfiguracija dvanaestopulsnog rednog ispravljača

2. PRINCIP RADA DVANAESTOPULSNOG REDNOG ISPRAVLJAČA

Ova klasa ispravljača predstavlja rednu vezu dva standardna punoupravljiva (6-pulsna) tiristorska mosta, fazno pomereni za 30° , što se postiže izborom sprege sekundara energetskog transformatora (u ovom slučaju, sprega je Dd6y7). Na ovaj način se vrši redukcija talasnosti izlaznog napona, kao i suzbijanje harmonika izlaznog napona oblika $6k \pm 1$, gde je $k=1, 3, 5 \dots$. Kod dvanaestopulsnog rednog ispravljača su dominantni harmonici izlaznog napona oblika $12k \pm 1$, $k=1, 2, 3 \dots$ (11. i 13. harmonik, 23. i 25. itd), koji su pomereni naviše i znatno manje utiču na deformacije mrežnog napona [1].

Srednja vrednost napona na izlazu 12-pulsnog rednog ispravljača V_d je dvostruko veća u odnosu na šestopulsni, i može se predstaviti jednačinom [2]:

$$V_d = V_{d1} + V_{d2} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos\alpha - \frac{6\omega L_S}{\pi} I_d \quad (1)$$

gde je V_{LL} - efektivna vrednost međufaznog napona na sekundaru transformatora, L_S - rasipna induktivnost transformatora, α - ugao paljenja tiristora, meren od trenutka preseka sinusoida dve faze, I_d - jednosmerna struja na izlazu ispravljača. Drugi član jednačine je vezan za komutacioni pad napona, i u proračunima uglavnom može da bude zanemaren. Izraz (1) važi ukoliko je $\alpha \leq 60^\circ$. Kada je ugao veći od 60° , važi jednačina [2]:

$$V_d = V_{d1} + V_{d2} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \left(1 + \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right)\right) - \frac{6\omega L_S}{\pi} I_d \quad (2)$$

Dvanaestopulsni ispravljač ima dvostruko više komutacija u jednoj periodi od punoupravljivog, pa se u naponu javlja dvanaest propada ("notches"), što može

negativno da utiče na rad upravljačkih sklopova, posebno kola za sinhronizaciju [3]. Zbog toga je prilikom realizacije sklopova za sinhronizaciju posebna pažnja posvećena sprečavanju pojave negativnih uticaja propada napona tokom komutacije.

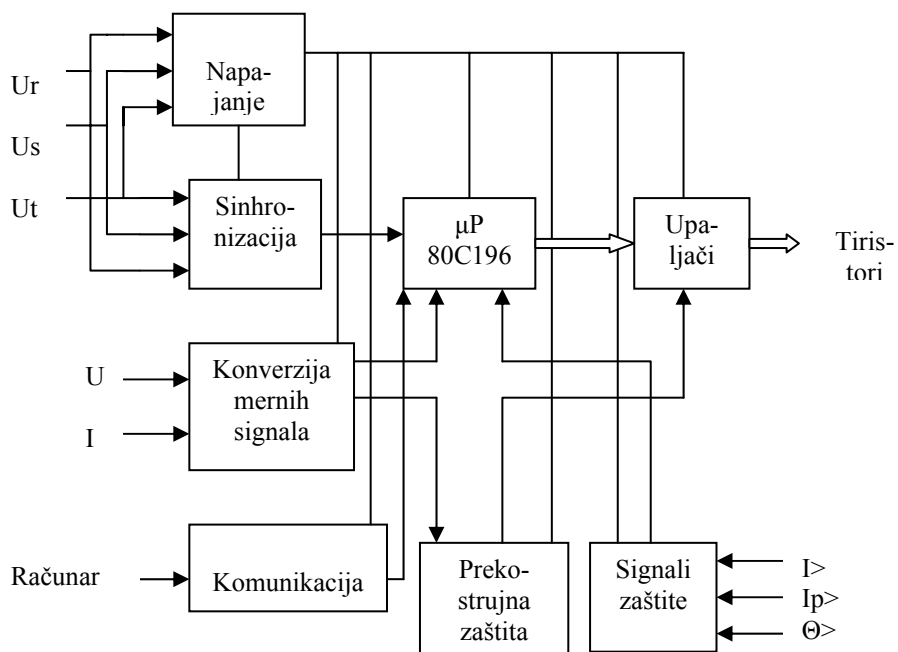
3. OPIS UPRAVLJAČKE ELEKTRONIKE

Na slici 2 je prikazana koncepcija elektronike za upravljanje dvanaestopulsnim rednim ispravljačem. Elektronika je razvijena u Institutu "Nikola Tesla" za upravljanje plazmatronskim ispravljačem, projektovanim za ugradnju u postrojenje za potpalu kotla i podršku vatri na blokovima A1 i A2 termoelektrane "Nikola Tesla" u Obrenovcu.

Centralni deo sistema je mikroprocesorska karta bazirana na "Intel"-ovom mikrokontroleru 80C196. Procesor ima više funkcija koje obavlja u sistemu:

- regulisanje struje i napona na izlazu ispravljača;
- fazno pomeranje impulsa - generisanje upaljačkih impulsa za tiristore na osnovu poređenja sinhronizacionog signala i izlaza regulatora;
- implementacija zaštitnih funkcija;
- komunikacija sa centralnim računarom - prijem referenci i kontrolnih signala, i predaja merenih veličina i logičkih signala.

Komunikacija između centralnog računara i upravljačke elektronike ispravljača se obavlja preko izolovane RS-485 komunikacije. Primenjeno rešenje omogućava transfer podataka brzinom do 2,5 Mbit/s, mada se u praksi primenjuje znatno manji bitski protok.



Slika 2: Koncepcija upravljačke elektronike

Napajanje se obezbeđuje sa primarne strane ispravljačkog transformatora. Mrežni napon se transformiše na dva naponska nivoa: +5V, za napajanje mikrokontrolera, i $\pm 12V$, za napajanje analogne elektronike.

Sinhronizacioni impulsi se dobijaju od sinusoida mrežnog napona (U_r , U_s , U_t), uz vršenje neophodnih prilagođenja za rad procesora.

U okviru upaljačkog sklopa realizovano je dvanaest galvanski izolovanih izlaza za paljenje tiristora. Impulsi za paljenje, koje generiše mikrokontroler, pojačavaju se do nivoa potrebnog za paljenje tiristora. Signal se do gejta tiristora prenosi preko impulsnog transformatora.

Konvertor mernih signala vrši transformaciju signala sa strujnih i naponskih mernih pretvarača. Strujni signal u opsegu 4-20 mA se prevodi na naponski nivo 0 - 5 V. Propusni opseg izolovanog konvertora strujnog u naponski signal je 600Hz.

Prekostrujna zaštita je realizovana kao nezavisni analogni sklop. U slučaju pojave visoke trenutne vrednosti struje sa strujnog senzora, dolazi do dejstva na upaljače tiristora, i uređaj se isključuje.

Signali zaštite (ispad osigurača u mostu ($I>$), ispad automata ($I_p>$), visoka temperatura hladnjaka tiristora ($\theta>$)) se preko kola za prilagođenje odvede do mikrokontrolera, gde su softverski realizovane zaštitne funkcije. U slučaju pojave nekog od ovih signala, vrši se isključenje uređaja.

Realizovana elektronika je višenamenska - pored korišćenja za dvanaestopulsni plazmatronski ispravljač, može da se koristi, uz izmenu pojedinih delova programa, i za upravljanje klasičnim poluupravljivim i punoupravljivim ispravljačima, kao i upravljanje ispravljačem za punjenje baterije sa dodatnom granom (postoji mogućnost da se oba mosta konfigurišu kao punoupravljivi). Posebna pogodnost za primenu kod ispravljača sa dodatnom granom je galvanska odvojenost elektronike od energetskog kola, odnosno postojanje interne mase. Uz dodavanje potrebnih senzora i implementiranje zaštitnih funkcija, predstavljena elektronika može da bude upotrebljena u elektromotornim pogonima sa motorom jednosmerne struje i za pobudu sinhronih mašina.

4. REALIZACIJA UPRAVLJAČKIH FUNKCIJA

Upravljačke funkcije su realizovane u okviru dve prekidne rutine. Sinhronizaciona prekidna rutina radi na (približno) 20ms, odnosno definisana je trajanjem jedne periode mrežnog napona. Regulaciona prekidna rutina je definisana trajanjem 1/12 periode, što iznosi oko 1,66ms.

Tokom sinhronizacione prekidne rutine se vrši merenje potrebnih vremenskih intervala i praćenje prisustva faze. Prilikom detekcije prisustva ulaznog naizmeničnog napona, mikrokontroler u prvom prolazu određuje fazni redosled napona [4]. Na ovaj način je obezbeđeno da pravilan rad ispravljača ne zavisi od načina vezivanja kablova napajanja, što je veoma značajno kod šestopulsnih i dvanaestopulsnih ispravljača. U ovoj prekidnoj rutini se vrši merenje trajanja periode i 1/12 periode. Takođe, vrši se i detekcija ispada faze. Sinhronizacioni impulsi se dovode na posebne "brze ulaze" mikroprocesora (HSI - High Speed Inputs), čime se obezbeđuje precizan proračun trenutka prolaska referentne faze kroz nulu, kao i precizno određivanje periode ulaznog signala.

Za vreme trajanja regulacione prekidne rutine vrši se proračun regulatora, A/D konverzija signala sa mernih pretvarača, određuje se ugao paljenja tiristora i proveravaju flegovi zaštite (pregorevanje osigurača mosta, ispad automata, reagovanje bimetalne zaštite). Trajanje ove prekidne rutine određuje se u prethodnom koraku sinhronizacione

rutine. U ovom vremenskom intervalu se generišu upaljački impulsi za odgovarajući par tiristora, prema utvrđenom faznom redosledu. Trajanje impulsa je određeno trajanjem rutine (oko 1,66ms), što je sasvim dovoljno za aktiviranje tiristora. Generisanjem novih impulsa se automatski vrši gašenje prethodnog para impulsa. Sinhronizacija na mrežni napon je nezavisna od procesa regulacije izlazne struje i napona ispravljača. Pojava sinhronizacionog impulsa generiše prekid najvišeg prioriteta.

5. REGULACIJA NAPONA I STRUJE

Kao što je pomenuto, proračun izlaza regulatora se vrši tokom trajanja prekidne rutine. Kod plazmatronskog dvanaestopulsnog ispravljača je, zbog problema održanja stabilnosti gorenja električnog luka, primarna regulacija struje, za razliku od sistema besprekidnog napajanja i punjača za baterije, gde je primarna regulacija izlaznog napona. Razlika u realizaciji ovih modela je isključivo softverske prirode, i oba modela regulacije se ostvaruju delovanjem na ugao paljenja tiristora, odnosno faznim pomeranjem pobudnih impulsa na gejtovima. Ugao paljenja se meri od trenutka preseka dve sinusoidne mrežne napona (u oblasti pozitivnih vrednosti napona). Regulacija se, zbog mrežnog komutovanja tiristora, vrši u opsegu od 0° do 120° , računato u odnosu na presek sinusoida dve faze. Kao što je navedeno, u opsegu ugla paljenja od 0° do 60° primenjuje se jednačina (1), dok se za uglove od 60° do 120° primenjuje izraz (2). Da bi se izvršila linearizacija prenosne funkcije $G(s) = \frac{U(s)}{\alpha(s)}$, gde je $U(s)$ - funkcija izlaznog

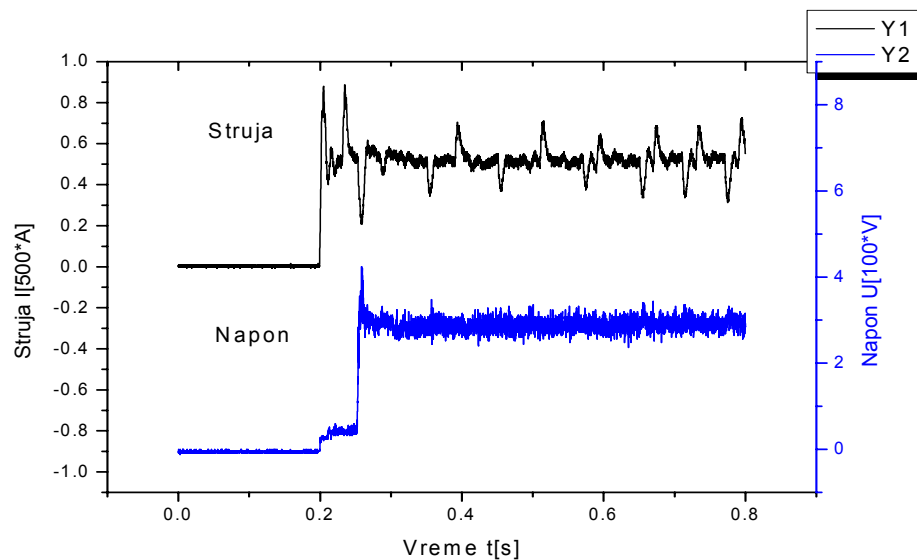
napona, a $\alpha(s)$ - funkcija ugla paljenja tiristora, napravljena je tabela arccos, sa 1024 vrednosti, kojom se vrši linearizacija veze između ugla paljenja i srednje vrednosti izlaznog napona [5]. Na ovaj način je obezbeđena visoka rezolucija zadavanja ugla paljenja, od $0,12^{\circ}$ el. Pošto se električni luk ponaša kao rezistivni teret, čija se otpornost linearno menja u okolini radne tačke, dobija se linearna veza između ugla paljenja α i izlazne struje I_d . Na ovaj način je omogućeno jednostavno zadavanje referentne vrednosti struje, kao i zadavanje reference napona.

Tokom rada mogu da se menjaju referentne vrednosti struje i napona zadavanjem vrednosti na nadređenom računaru. Softverski je onemogućeno zadavanje napona i struja koje izlaze iz radnog opsega. Posebna pogodnost je mogućnost zadavanja parametara regulatora serijskom vezom tokom rada uređaja. Zadavanje poruke serijskom vezom generiše prekid najnižeg prioriteta.

6. REZULTATI ISPITIVANJA

Ispitivanja elektronike su vršena na prototipu ispravljača MARIP 350-300 (350V, 300A jednosmerno), proizvođača "Minel Automatika". Ispravljač je testiran na plazmatronskim elektrodama, u Institutu za nuklearne nauke "Vinča". Na slici je dat snimak faze starta ispravljača, kada se vrši paljenje električnog luka.

Eksperimentom je ustanovljeno da je u fazi starta potrebno veliko proporcionalno dejstvo (K_p) PID regulatora, zbog velike brzine uspostavljanja električnog luka, dok je nakon faze starta potrebno smanjenje K_p , radi izbegavanja pojave oscilacija struje.



Slika 3: Talasni oblici struje i napona električnog luka u fazi starta

7. ZAKLJUČAK

U radu je razmotrena praktična realizacija dvanaestopulsnog rednog ispravljača i odgovarajuće mikroprocesorske upravljačke elektronike. Predstavljene su koncepcija elektronike i realizovani koncept upravljanja. Prikazani su rezultati ispitivanja prototipa uređaja i problemi koji se javljaju pri regulaciji u statičkim i dinamičkim uslovima. Zbog fleksibilne realizacije, predstavljeni model upravljačke elektronike može da bude primenjen i u drugim oblastima energetske elektronike, kao što su sistemi besprekidnog napajanja, sistemi pobude sinhronih mašina i upravljanje elektromotornim pogonima.

LITERATURA

- [1] N. Mohan, T.M. Undeland, W.P. Robbins, *Power Electronics*, John Wiley & Sons, Inc, USA, 1995.
- [2] B.L. Dokić, *Energetska elektronika - pretvarači i regulator*, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, 2000.
- [3] Vladimir Katić, *Kvalitet električne energije - viši harmonici*, monografija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2002.
- [4] M.Janković, Đ. Stojić, J. Bebić, "Prikaz realizacije modularnog ispravljačkog stepena SBN-a na bazi mikrokontrolera 80535", *VIII simpozijum "Energetska elektronika"*, Novi Sad, 1995.
- [5] J. Bebić, *Jedan novi pristup konstrukciji monofaznih sistema za besprekidno napajanje*, magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1994.

Abstract: This paper presents practical realization of the serial twelve-pulse converter drive electronics. The solution is based on microcontroller "Intel" 80C196. Device conception was shown and also some experimental results, with an electric arc as a load were presented. Proposed realization provides a solution for thyristor bridges control in various areas of power electronics and electric drives.

MICROPROCESSOR CONTROL OF TWELVE-PULSE SERIAL LINE-FREQUENCY CONVERTER

Vladimir Vukić, Marko Janković, Rajko Prole