

Primena aktivnih ispravljača u elektromotornim pogonima visoke energetske efikasnosti

Marko Šinik¹, Leposava Ristić¹, Milan Bebić¹, Saša Štatkić², Dragan Jevtić¹, Neša Rašić¹, Bogdan Brković¹

¹Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

²Fakultet tehničkih nauka - Kosovska Mitrovica, Univerzitet u Prištini, Kosovska Mitrovica, Srbija

sm163090m@student.etf.bg.ac.rs, leposava.ristic@etf.bg.ac.rs, bebic@etf.bg.ac.rs, statkic@etf.rs, jevtic@etf.rs, rasic@etf.rs, brkovic@etf.rs

Sažetak—U radu je analizirana primena aktivnog ispravljača u industrijskim elektromotornim pogonima sa ciljem povećanja energetske efikasnosti. Rekuperacija energije kočenja u pogonima sa vertikalnim transportom tereta, kao i u toku smanjenja brzine u pogonima velikih inercija predstavljaju odlučujuće faktore za upotrebu aktivnih ispravljača. Ovakvi pogoni rade sa približno prostoperiodičnom ulaznom strujom u motornom i u generatorskom režimu rada. Faktor snage prema mreži je približno jednak jedinici, ali po potrebi se može podesiti i drugačije kako bi se dinamički kompenzovala reaktivna snaga ostalih potrošača priključenih na iste sabirnice kao i pogon sa aktivnim ispravljačem. Ovo je moguće samo ako postoji adekvatna rezerva u snazi pretvarača. Navedene prednosti, koje su eksperimentalno ispitane, a rezultati prikazani u radu, čine energetski pretvarač sa aktivnim ispravljačem najboljim izborom za primenu u pogonima visoke energetske efikasnosti. Rezultatima simulacija na razvijenom modelu, ilustrovan je uticaj harmonijskog izobličenja mrežnog napona na ulazne struje aktivnog ispravljača u sklopu frekventnog pretvarača u elektromotornom pogonu i omogućeno ispitivanje pogona u idealnim uslovima napajanja, kao i u radnim režimima koje je nemoguće ili opasno realizovati u laboratorijskim uslovima.

Ključne reči — *elektromotorni pogon; aktivni ispravljač; harmonijska analiza; rekuperacija; kompenzacija*

I. UVOD

Usled povećavanja cene energije i problema globalnog zagrevanja izazvanog efektom staklene bašte, nastalog kao posledica emisije štetnih gasova, u toku poslednjih decenija javio se značajan porast interesovanja naučne i stručne zajednice za teme energetske efikasnosti. Elektromotorni pogoni, posebno oni koji se koriste u industriji, prepoznati su kao jedan od glavnih činioca koji mogu značajno da doprinesu smanjenju ukupne potrošnje energije, s obzirom na svoju veličinu i instalisanu snagu. Ovo može biti postignuto [1] na sledeće načine:

- Povećanjem energetske efikasnosti tehnološkog procesa - rad u energetski efikasnoj radnoj tački procesa;
- Povećanjem energetske efikasnosti motora - izborom motora sa visokom klasom energetske efikasnosti;
- Radom elektromotornog pogona u energetski optimalnoj radnoj tački smanjenjem gubitaka u motoru i pretvaraču;
- Unapređivanjem rada pretvarača na strani mreže u elektromotornom pogonu, izborom aktivnog

ispravljača u fazi projektovanja, i parametarizacijom u fazi puštanja u rad.

Glavna tema ovog rada je primena aktivnog ispravljača kao pretvarača na strani mreže u elektromotornom pogonu, čime se ostvaruju bolje performanse pogona u pogledu talasnog oblika struje prema mreži, rekuperacije energije pri kočenju i kompenzacije reaktivne snage drugih potrošača koji su sa posmatranim pogonom sa aktivnim ispravljačem vezani na mrežu na istim sabirnicama.

Rad je organizovan na sledeći način: posle uvoda datog u prvom poglavlju, u drugom poglavlju sledi opis različitih topologija elektromotornog pogona sa frekventnim pretvaračem, sa posebnim osvrtom na opis energetske i upravljačkog dela aktivnog ispravljača kada se on koristi u okviru frekventnog pretvarača. U trećem poglavlju su prikazani rezultati simulacije na modelu elektromotornog pogona sa aktivnim ispravljačem, koji je razvijen za slučaj ispitivanja ponašanja pogona u idealnim uslovima napajanja, kao i u uslovima koje je opasno ili nemoguće ostvariti u laboratoriji. Verifikacija modela ostvarena je poređenjem sa rezultatima dobijenim merenjem na eksperimentalnoj postavi u laboratoriji, u motornom režimu rada. Ostali rezultati, snimljeni za izabrane karakteristične slučajeve koji ilustriju poboljšane performanse elektromotornog pogona sa aktivnim ispravljačem i PWM inverterom u pogledu energetske efikasnosti, prikazani su u četvrtom poglavlju. Zaključak je dat u petom poglavlju.

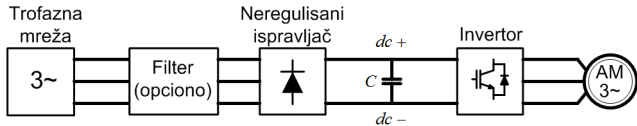
II. FREKVENTNI PRETVARAČ SA AKTIVNIM ISPRAVLJAČEM U ELEKTROMOTORNOM POGONU

U ovom poglavlju biće predstavljeni energetski i upravljački deo elektromotornog pogona sa aktivnim ispravljačem, koji oba podjednako imaju značajan uticaj na njegove performanse, a u pogledu ostvarenja glavnog cilja regulacije - regulacije brzine i momenta motora, energetske efikasnosti pogona i uticaja na napojnu mrežu.

A. Energetski deo

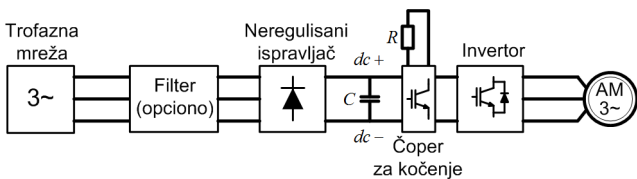
Moderni regulisani elektromotorni pogoni sa asinhronim motorima obično imaju sličnu topologiju frekventnog pretvarača, koji čine ispravljač, jednosmerno međukolo i inverter. Naponski pretvarači dominiraju u aplikacijama manje i srednje snage, ali se njihova primena postepeno širi i na aplikacije većih snaga. U pogonima velikih i vrlo velikih snaga primenjuju se druge topologije pretvarača, koje se

najčešće napajaju iz mreža srednjeg napona. Snage naponskih pretvarača u mrežama niskog napona dostižu vrednost od 2 MW, uz stalno povećanje maksimalne raspoložive snage. Najjednostavnija topologija energetskog dela pogona promenljive brzine sa frekventnim pretvaračem koji obezbeđuje napajanje motora naponom promenljive amplitude i učestanosti, prikazana na Sl. 1.



Sl. 1. Topologija frekventnog pretvarača u regulisanom elektromotornom pogonu sa asinhronim motorom

Neregulirani (diodni) ispravljač prikazan na Sl. 1, prenosi energiju samo u jednom smeru i to sa naizmenične na jednosmernu stranu, dok inverter može da radi u invertorskom režimu, snabdevajući motor aktivnom snagom, ali i u ispravljačkom režimu, prihvatajući aktivnu snagu od motora i prenoseći je nazad u pretvarač. Ispravljački režim invertora se javlja pri rekuperativnom kočenju motora, na primer prilikom spuštanja tereta vertikalnim transportnim uređajima (kranovi, liftovi i sl.), ili tokom usporavanja opterećenja koja imaju veliku inerciju. Da bi se frekventni pretvarač zaštitio od nedozvoljeno velike vrednosti jednosmernog napona u međukolu (napon na kondenzatoru C), neophodno je modifikovati topologiju sa Sl. 1. U aplikacijama u kojima se ne očekuju česti periodi kočenja motora, ili energija koja se oslobađa prilikom kočenja nije velika, moguće je koristiti konfiguraciju pretvarača sa čoperom i otpornikom za kočenje. Višak energije se na otporniku za kočenje (R) pretvara u toplotu, što svakako ne doprinosi ukupnoj energetskoj efikasnosti pogona. Međutim, ovo rešenje je ekonomski opravdano, pogotovu u slučajevima gde se malo energije može generisati iz pogona. Topologija pogona sa čoperom za kočenje u jednosmernom međukolu je prikazana na Sl. 2.



Sl. 2. Topologija frekventnog pretvarača sa čoperom za kočenje

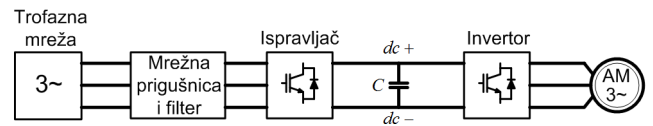
Drugi važan problem elektromotornog pogona sa nereguliranim (diodnim) ispravljačem, kao ulaznom jedinicom frekventnog pretvarača, je problem izobličenja struje iz mreže tokom njegovog rada. Kombinacija nereguliranog ispravljača i kondenzatora (C) u jednosmernom međukolu proizvodi harmonike višeg reda u mrežnoj struji. Ovo se numerički izražava preko ukupnog (pravog) faktora snage (λ), koji nekad ima vrednost $\lambda=0,7$, dok je faktor snage prvog harmonika visok, obično u opsegu iznad 0,95 [2]. Različiti proizvođači frekventnih pretvarača pristupaju ovom problemu na različite načine, da bi smanjili harmonijsko izobličenje na dozvoljenu vrednost definisanu IEEE [3] i IEC [4] standardima, a da bi zadržali nisku cenu. Pasivni filteri, ili „harmonijski filteri“, koji se povezuju između mrežnog napajanja i ispravljača su

često dodatne komponente pogona, koje nepovoljno utiču na dimenzije i težinu opreme u električnom ormaru, kao i na disipiranu toplotu na takvim komponentama. Cena pasivnih filtera je srazmerna njihovoj efikasnosti, zbog čega se često balans između cene i performansi definiše kao minimum potrebnih performansi za postizanje vrednosti definisanih standardima.

Suprotno neregulisanom ispravljaču kao ulaznoj jedinici frekventnog pretvarača, upotreba aktivnog ispravljača, ili PWM ispravljača, ima nekoliko prednosti, navedenih u [5]:

- Rad sa ukupnim (pravim) faktorom snage vrlo bliskim jedinici;
- Mogućnost vraćanja u napojnu mrežu ukupne energije generisane u toku kočenja;
- Prostoperiodični talasni oblik mrežne struje i u motornom i u generatorskom režimu rada;
- Mogućnost dinamičke kompenzacije reaktivne energije ostalih potrošača uz adekvatno dimenzionisanje po snazi elemenata frekventnog pretvarača;
- Mogućnost kompenzacije kratkotrajnih propada ili nesimetrije mrežnog napona.

Navedene prednosti čine frekventni pretvarač sa aktivnim ispravljačem u pogledu energetske efikasnosti najboljim izborom za primenu u elektromotornim pogonima. Međutim, negativna strana ovakvog pogona je njegova cena, što negativno utiče na širu upotrebu pretvarača sa ovom topologijom. Visoka cena ovakvog pretvarača je posledica upotrebe invertora sa istom strukturom i na mrežnoj strani (ispravljač) i na motornoj strani frekventnog pretvarača. Blok dijagram ove topologije je prikazan na Sl. 3.



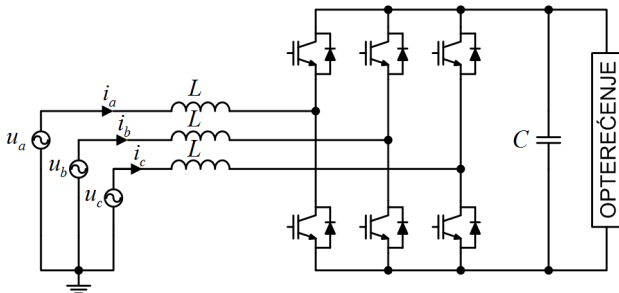
Sl. 3. Topologija frekventnog pretvarača sa aktivnim ispravljačem za regulisani elektromotorni pogon sa asinhronim motorom

Detaljna struktura energetskog dela aktivnog ispravljača na Sl. 4 prikazuje šest upravljivih prekidačkih elemenata, najčešće IGBT (engl. Insulated Gate Bipolar Transistors) tranzistora. Topologije aktivnih ispravljača koje imaju pojačavačko svojstvo najčešće za prekidačke komponente koriste ove tranzistore, kao i obaveznu prigušnicu (L), koja je povezana između mrežnog napajanja i energetskih tranzistora. Induktivnost prigušnice ograničava porast struje tokom prekidanja tranzistora (učestanost prekidanja je jednaka učestanosti PWM modulacije, što znači da je visoka), ali ima mali uticaj na rad na mrežnoj učestanosti (niska učestanost). Ako su trenutne vrednosti modulisanog napona i napona mreže u fazi, ali različite amplitude, ispravljač se ponaša kao čisto otpornički potrošač, što rezultuje prostoperiodičnim talasnim oblikom ulazne (mrežne) struje, naravno, zanemarujući harmonike usled visoke učestanosti PWM modulacije [6].

B. Upravljački deo

Upravljački deo ispravljača i invertora implementira se u digitalni upravljački sistem visokih performansi. Mikrokontroler se bazira na DSP-u (engl. digital signal

processor) ili sličnom procesoru sa velikom brzinom obrade podataka. U poslednje vreme, da bi se brzina obrade pojedinih delova programa još više povećala, koriste se FPGA (engl. Field-Programmable Gate Array) čipovi, uz nekoliko DSP jezgara koji rade u paraleli (konkurentno). Iako se realizuju u istoj upravljačkoj jedinici, upravljački deo motora i upravljački deo ispravljača se projektuju i analiziraju nezavisno. Upravljanje energetskim pretvaračem na strani motora (invertora) je dobro poznato i tema je mnogih radova i knjiga, dok će upravljanje ispravljačem (energetskim pretvaračem na strani mreže) ovde biti detaljnije prikazano.



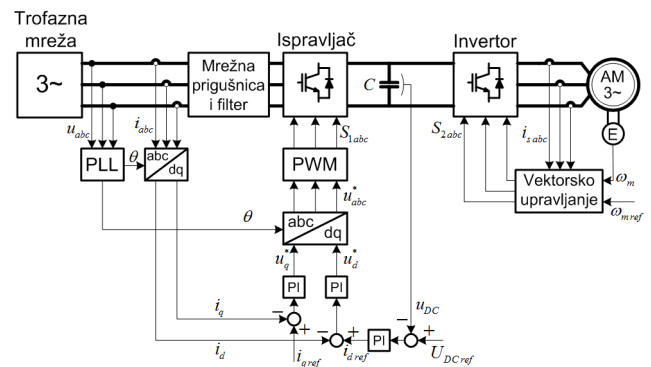
Sl. 4. Topologija energetskog dela aktivnog ispravljača

U novijoj literaturi su predstavljane razne strategije upravljanja PWM ispravljačima, ali se najčešće korišćene mogu svrstati u dve osnovne grupe: upravljanje zasnovano na naponu (engl. Voltage Oriented Control, VOC) [7], koje ima sličnosti sa vektorskim upravljanjem (engl. Field Oriented Control, FOC) asinhronog motora i direktno upravljanje snagom (engl. Direct Power Control, DPC) [8]. Može se uočiti sličnost VOC i FOC metode, jer obe koriste transformaciju koordinata i regulatore struje, kao i DPC metode sa direktnim upravljanjem momentom (engl. Direct Torque Control, DTC) asinhronog motora, jer ove dve metode ne koriste obrtnu transformaciju koordinata i imaju histerezisne komparatore u upravljačkoj strukturi. Obe strategije upravljanja dalje mogu biti podeljene na one bazirane na naponu (VOC, DPC) i one bazirane na virtualnom fluksu (engl. Virtual Flux Oriented Control, VFOC, i Virtual Flux based Direct Power Control, VF-DPC), u cilju postizanja robusnijeg upravljanja.

Osim navedenih načina upravljanja, potpuno nov način upravljanja koji omogućava da se PWM ispravljač ponaša kao virtualna sinhrona mašina (VSM) i poseduje dinamiku sinhronne mašine, skoro je predstavljen u [9]. Ova „tehnologija sinhro-pretvarača“ je razvijena za PWM pretvarače, bilo da se oni koriste na mrežnoj strani, ili na strani opterećenja, da bi se omogućila unifikacija integracije u „pametne“ elektro-energetske mreže. U industrijskim uređajima ove vrste, najčešće se za upravljanje aktivnim ispravljačem koriste VOC i VFOC načini upravljanja. VOC metoda je primenjena na aktivnom ispravljaču u laboratorijskoj eksperimentalnoj postavci, koja je korišćena za merenja i analizu u ovom radu. Obe metode su bazirane na vektorskom načinu upravljanja, koje je razvijeno za potrebe upravljanja asinhronim i sinhronim motorima. VOC upravljanje se obično primenjuje u sinhrono rotirajućem referentnom sistemu, jer se tako od periodičnih talasnih oblika struja i napona dobijaju jednosmerne veličine (vrši se transformacija koordinata). Postavljanjem direktne ose (d ose) rotirajućeg referentnog

sistema u osu sa vektorom napona, dinamički model se značajno pojednostavljuje, jer komponenta napona u q osi postaje jednaka nuli, što omogućava efikasnu regulaciju. Za rad sa jediničnim faktorom snage, q komponenta struje takođe treba da bude jednaka nuli.

Blok dijagram aktivnog ispravljača sa VOC upravljanjem je prikazan na Sl. 5. Ugao transformacije (θ) se dobija pomoću fazno spregnute petlje (engl. Phase Locked Loop), PLL bloka koji radi ispravno čak i ako postoje harmonijska izobličenja napona. Referentna vrednost q komponente struje (i_{qref}) se određuje prema referentnoj vrednosti faktora snage, dok se referenca d komponente struje (i_{dref}) dobija na izlazu PI regulatora jednosmernog napona. Princip rada pretvarača zahteva da referentna vrednost napona u jednosmernom međukolu ($U_{DCref} \geq 600$ Vdc) bude veća od napona neregulisanog (diodnog) ispravljača (540 Vdc za 400 Vac napona napajanja).



Sl. 5. Upravljački blok dijagram elektromotornog pogona sa aktivnim ispravljačem sa VOC upravljanjem

VFOC upravljanje predstavlja poboljšanje VOC upravljanja u pogledu osetljivosti ugla transformacije (θ) na fluktuacije i kratkotrajne prekide napona napajanja. Ovaj nedostatak VOC upravljanja se rešava primenom PLL- a, ali kvalitet odziva ispravljača zavisi od efikasnosti projektovanja PLL-a. Analogija VFOC upravljanja sa vektorskim upravljanjem motora je očigledna, pri čemu je brzina motora zamenjena naponom u jednosmernom međukolu.

III. SIMULACIONI MODEL ELEKTROMOTORNOG POGONA SA AKTIVNIM ISPRAVLJAČEM

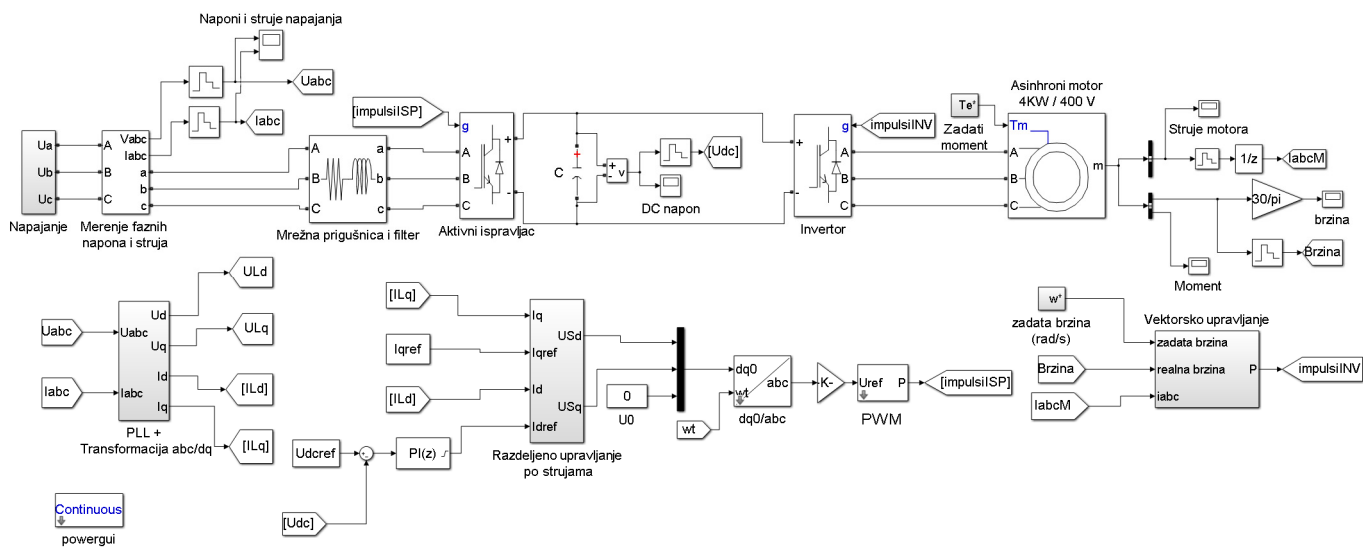
Sa ciljem da se omogućí ispitivanje ponašanja pogona u idealnim uslovima napajanja, kao i u radnim režimima koje je teško ili nemoguće ostvariti u laboratorijskim uslovima, razvijen je simulacioni model elektromotornog pogona sa aktivnim ispravljačem (Sl. 6) na kome je primenjeno VOC upravljanje, po ugledu na eksperimentalnu postavku u laboratoriji. Posmatrana su dva slučaja u režimu rada aktivnog ispravljača sa pozitivnom aktivnom snagom, odnosno u motornom režimu rada elektromotornog pogona (motor je opterećen polovinom nominalnog momenta). Prvi slučaj koji se analizira je slučaj kada je napon napajanja idealan prostoperiodičan signal. S obzirom da je zadata reaktivna komponenta struje jednaka nuli (faktor snage je jednak jedinici), talasni oblik struje je takođe idealno prostoperiodičan i u fazi sa naponom (Sl. 7). Idealni uslovi napajanja su vrlo retki, jer je mrežni napon na mestu

priključenja elektromotornog pogona vrlo često izobličen usled prisustva drugih nelinearnih potrošača u mreži, zbog čega će se kao drugi slučaj u simulaciji analizirati elektromotorni pogon u istim uslovima rada kao i u prvom slučaju, samo pri promenjenom naponu napajanja, koji će sada biti realan signal, snimljen u laboratoriji u kojoj se vrše merenja. Talasni oblik mrežne struje dobijen simulacijom na modelu, u uslovima kada je za mrežni napon uzeta snimljena vrednost dobijena merenjem u laboratoriji, zajedno sa snimljenom vrednošću mrežne struje dobijene merenjem u istim uslovima rada pogona, prikazani su na Sl. 8. Analizom prikazanih rezultata, može se jasno uočiti da je ostvareno zadovoljavajuće poklapanje rezultata simulacije sa rezultatima dobijenim merenjem u laboratoriji. Odgovarajuća odstupanja su posledica nemogućnosti da se detaljno modeluju svi delovi upravljačkog algoritma, koji su nedostupni kao intelektualna svojina proizvođača, kao i zbog toga što samo modelovanje uvek podrazumeva određeni stepen uprošćenja, odnosno

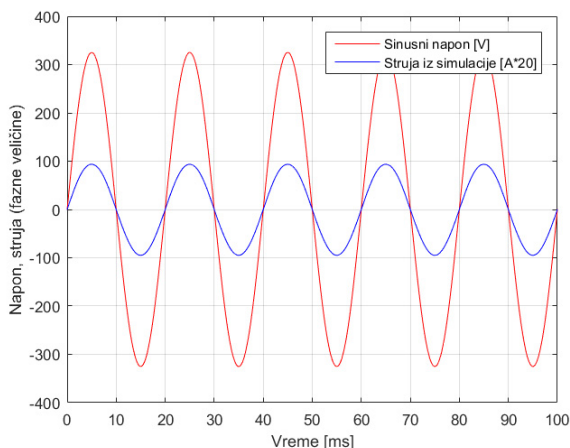
uvođenje opravdanih zanemarenja. Iz prikazanih rezultata se mogu izvesti dva bitna zaključka:

1. Samo u slučaju napajanja idealnim mrežnim naponom, dobiće se idealni talasni oblici mrežne struje, dok će se u ostalim slučajevima javiti odgovarajuća izobličenja u skladu sa izobličenjima mrežnog napona. Na osnovu toga, jasno se može utvrditi u vremenskim dijagramima snimljenim u toku eksperimenta, koja odstupanja od idealnog talasnog oblika su posledica neadekvatno podešenih vrednosti parametara, koja se eventualno mogu popraviti, a šta je posledica napajanja - što se može otkloniti u zavisnosti od mogućnosti upravljačkog algoritma, koje je predvideo i implementirao proizvođač opreme. Na taj način se mogu primeniti različiti načini ublažavanja štetnog uticaja izobličenja talasnog oblika mrežnog napona na talasni oblik mrežne struje.

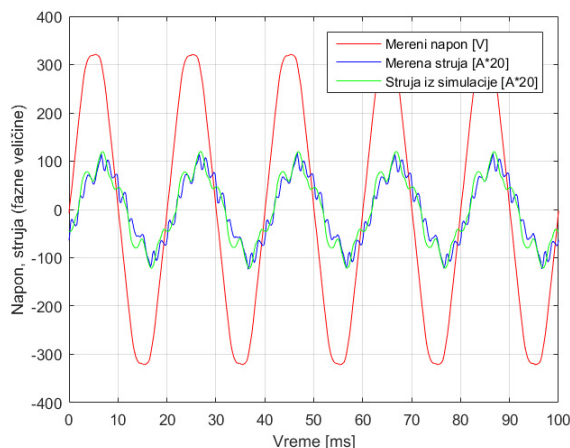
2. Pokazano je da se predstavljeni simulacioni model može koristiti za dalja ispitivanja ponašanja pogona u idealnim uslovima napajanja, kao i u uslovima koje je opasno ili nemoguće izvesti u laboratoriji.



Sl. 6. Blok dijagram simulacionog modela pogona sa aktivnim ispravljačem sa VOC upravljanjem



Sl. 7. Talasni oblik idealnog mrežnog napona i odgovarajuće mrežne struje dobijene simulacijom na modelu u motornom režimu rada elektromotornog pogona



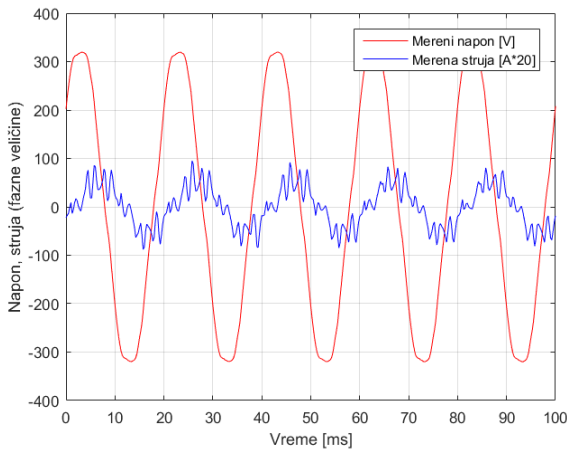
Sl. 8. Talasni oblici mrežnog napona i struje dobijeni merenjem u laboratoriji i talasni oblik struje dobijen simulacijom na modelu, u istim uslovima napajanja pogona (vrednost snimljena merenjem u laboratoriji) i u motornom režimu rada elektromotornog pogona

IV. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA I REZULTATI

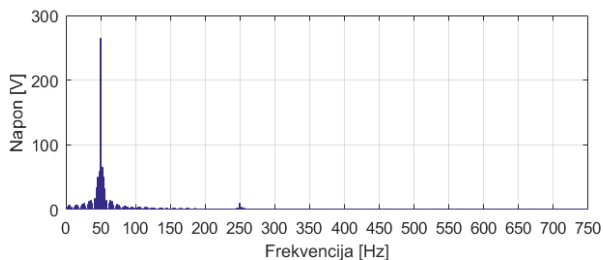
Eksperimentalna postavka, pomoću koje će se analizirati rad aktivnog ispravljača kao pretvarača na strani mreže u energetski efikasnom elektromotornom pogonu realizovana je u Laboratoriji za elektromotorne pogone na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Postavka se sastoji od dva mehanički spregnuta asinhrona motora napajana preko dva energetska prevarača (vektorski upravljani frekventni pretvarači sa naponskim inverterima). Ovakva konfiguracija omogućava mašinama da menjaju svoje uloge u eksperimentima: u slučaju kada je jedan pogonski motor drugi je opterećenje u generatorskom režimu rada i obrnuto. Jedan od energetskih pretvarača ima diodni mosni ispravljač, dok drugi, koji je tema ovog rada, ima aktivni ispravljač kao pretvarač na strani mreže. Performanse pretvarača će biti ilustrovane eksperimentalnim rezultatima dobijenim na navedenoj postavci u različitim režimima rada.

A. Talasni oblik ulazne struje

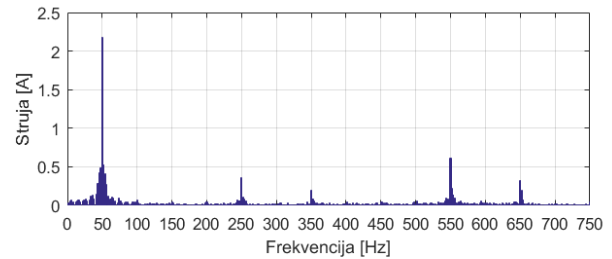
Talasni oblik ulazne struje pretvarača koji radi u režimu praznog hoda (u slučaju kada nije priključen motor) prikazan je na Sl. 9. Mrežni napon, prikazan na slici, sadrži harmonijska izobličenja izazvana nelinearnim potrošačima kao što su monofazna kompjuterska napajanja i fluorescentno osvetljenje u zgradi fakulteta. Iz tog razloga je i mrežna struja izobličena, a mala količina reaktivne snage se razmenjuje između pretvarača i mreže. Amplitudski spektar mrežnog napona je prikazan na Sl. 10, a mrežne struje na Sl. 11.



Sl. 9. Talasni oblik mrežnog napona i struje u režimu praznog hoda pretvarača (THDi=37,216%, THDu=3,623%)



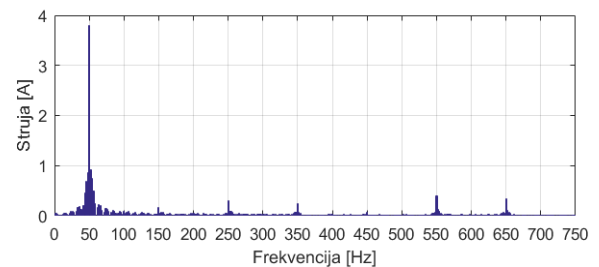
Sl. 10. Amplitudski spektar mrežnog napona – rad pretvarača u praznom hodu (učestanost odabiranja 4kHz)



Sl. 11. Amplitudski spektar mrežne struje – rad pretvarača u praznom hodu

B. Motorni režim rada

Rad aktivnog ispravljača sa pozitivnom aktivnom snagom predstavlja standardni režim rada pogona. Pretvarač uzima aktivnu snagu iz mreže i snabdeva motor potrebnim talasnim oblicima napona i struje. Reaktivna snaga, potrebna za rad motora se obezbeđuje iz pretvarača, a ne iz napojne mreže. Aktivna snaga uzeta iz mreže je veća od snage na vratilu motora, za snagu gubitaka u frekventnom pretvaraču (ispravljač, DC kolo i inverter) i motoru pri konverziji energije. Ovaj režim rada je korišćen pri verifikaciji simulacionog modela, pri čemu su na Sl. 8 prikazani mrežni napon i ulazna struja pretvarača. Amplitudski spektar mrežnog napona je praktično isti u svim režimima rada pogona u toku eksperimenta i prikazan je na Sl. 10, a amplitudski spektar mrežne struje za ovaj slučaj, prikazan je na Sl. 12.



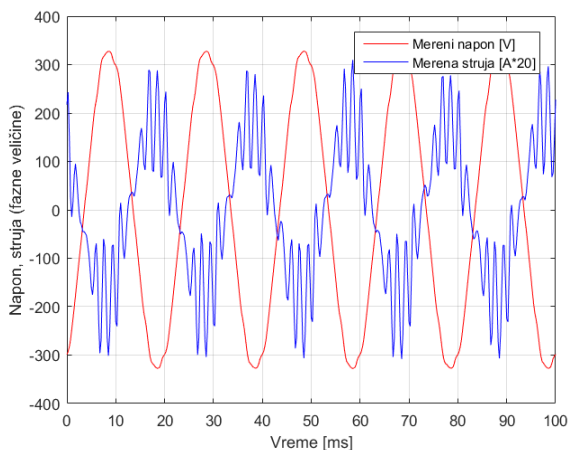
Sl. 12. Amplitudski spektar mrežne struje – rad pretvarača sa pozitivnom aktivnom snagom (P=1886 W, Q=445,6 Var, S=2382 VA, $\lambda=0,792$, $\cos\phi=0,973$, THDi=17,579%, THDu=2,645%)

C. Generatorski režim rada - rekuperacija energije u mrežu

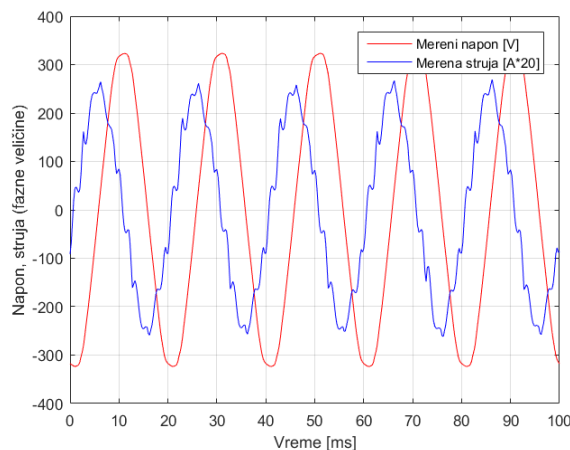
Glavna prednost aktivnog ispravljača je rad sa negativnom aktivnom snagom, odnosno rekuperacija energije. Talasni oblici mrežnog napona i struje pri radu sa negativnom aktivnom snagom su prikazani na Sl. 13, a amplitudski spektar mrežne struje na Sl. 114. U ovom režimu, aktivnu snagu generiše motor koji radi u režimu rekuperativnog kočenja. Energija se inverterom konvertuje i snabdeva jednosmerno međukolo pretvarača i injektira u napojnu mrežu. Gubici snage u pretvaraču nadoknađuju se iz generisane snage motora, što rezultuje nešto manjom snagom koja se vraća u mrežu, od one koju motor zaista proizvodi u generatorskom režimu rada.

D. Kompenzacija reaktivne snage na mestu priključenja pretvarača na mrežu

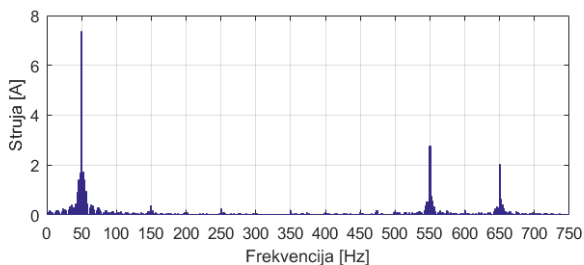
Osim svoje glavne funkcije da snabdeva energijom potrošače ili da vrši rekuperaciju aktivne snage pogona, pretvarač sa aktivnim ispravljačem ima mogućnost da radi sa



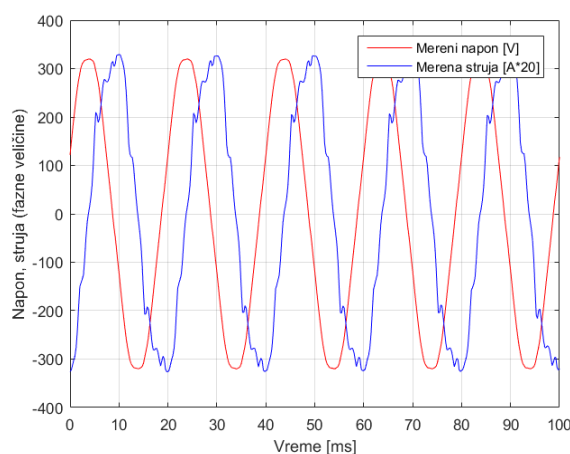
Sl. 13. Talasni oblici mrežnog napona i struje na ulazu u pretvarač - pretvarač radi sa negativnom aktivnom snagom ($P=4465$ W, $Q=444$ Var, $S=5139$ VA, $\lambda=-0,869$, $\cos\varphi=-0,995$, $THDi=47,033\%$, $THDu=2,231\%$)



Sl. 15. Talasni oblici mrežnog napona i struje na ulazu u pretvarač - pretvarač radi sa nultom aktivnom i negativnom reaktivnom snagom (kapacitivno opterećenje, $THDi=10,567\%$, $THDu=2,316\%$)



Sl. 14. Amplitudski spektar mrežne struje - pretvarač radi sa negativnom aktivnom snagom



Sl. 16. Talasni oblici mrežnog napona i struje na ulazu u pretvarač - pretvarač radi sa nultom aktivnom i pozitivnom reaktivnom snagom (induktivno opterećenje, $THDi=10,319\%$, $THDu=2,101\%$)

faktorom snage koji nije jedinični (tj. da radi sa faktorom snage između -1 i 1). Drugim rečima, može da kompenzuje reaktivnu snagu ostalih potrošača koji su povezani na istim mrežnim sabirnicama kao i pretvarač sa aktivnim ispravljačem. Preduslov za rad u ovom režimu je da se dimenzionisanjem pogona obezbedi dovoljna strujna margina. Da bi se ilustrovala ova karakteristika pogona, na Sl. 15 i Sl. 16 su prikazani talasni oblici mrežnog napona i struje sa pozitivnom (induktivnom) i negativnom (kapacitivnom) reaktivnom snagom koju pogon razmenjuje sa mrežom. Treba naglasiti da reaktivna snaga nije neophodna za rad ovog pogona, i zato se najčešće podešava da bude jednaka nuli.

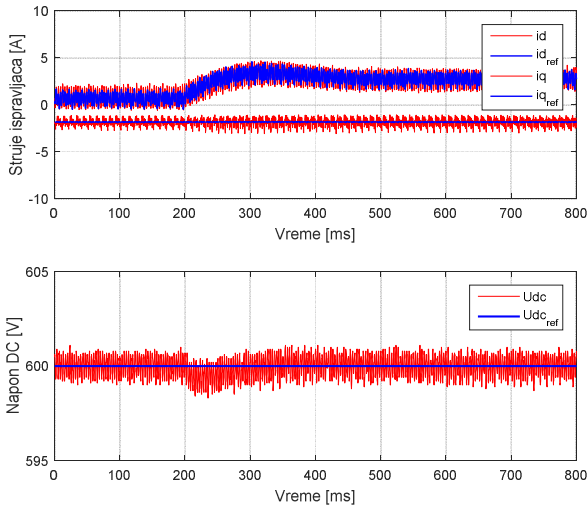
E. Prelazni režimi

Najčešći uzrok promene režima rada aktivnog ispravljača je promena režima rada pogona, uzrokovana promenom opterećenja. Povećanje opterećenja pogona pri radu na konstantnoj brzini dovodi do povećanja snage uzete iz mreže, bez promene ulazne reaktivne snage pretvarača. Ova promena je ilustrovana na slikama 17 i 18, gde su prikazane karakteristične veličine iz ispravljača i invertora (respektivno), odnosno brzina i moment pogona. Sa slika se vidi da povećanje opterećenja dovodi do povećanja aktivne komponente struje ispravljača, bez promene vrednosti reaktivne komponente. Odzivi regulatora struje motora sa vektorskim upravljanjem podešavaju se nezavisno od parametara regulatora struje ispravljača.

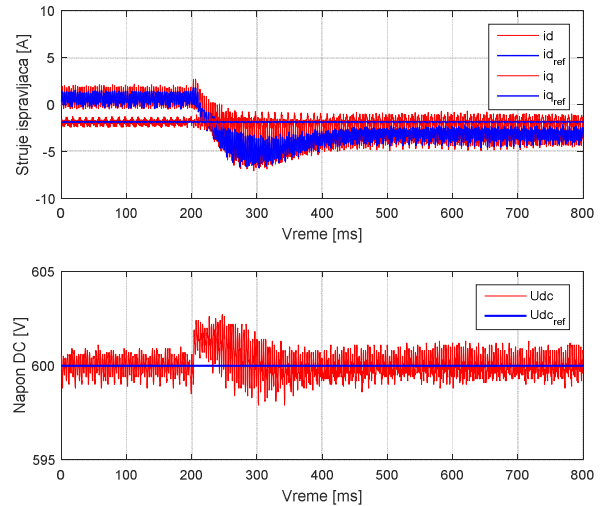
Na slikama 19 i 20 ilustrovana je promena momenta opterećenja pogona koja dovodi do pojave generatorskog režima rada pogona sa rekuperacijom energije u jednosmerno međukolo, odakle se pomoću aktivnog ispravljača vraća u mrežu. Ni u ovom prelaznom procesu ne dolazi do značajne promene reaktivne komponente struje ispravljača, dok aktivna komponenta struje postaje negativna, čime se ostvaruje rad ispravljača sa negativnom aktivnom snagom.

V. ZAKLJUČAK

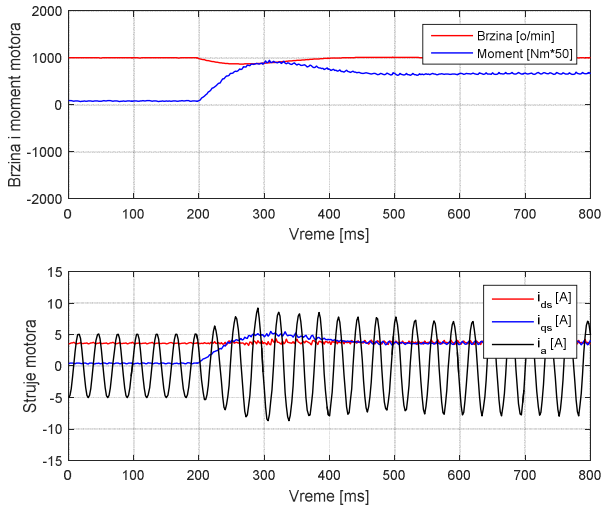
Rad prikazuje mogućnost povećanja energetske efikasnosti industrijskih elektromotornih pogona, što predstavlja kompleksan problem, s obzirom na glavne segmente u kojima energetska efikasnost može i treba da bude unapređena. Značajna ušteda energije može biti postignuta radom pogona u energetski optimalnoj radnoj tački sa stanovišta tehnološkog procesa, naravno uz zadovoljenje zahteva proizvodnje. Odabirom energetski efikasnijih komponenti pogona mogu se smanjiti neizbežni gubici u konverziji električne energije u mehaničku. Ovaj postupak ima nešto veću početnu cenu jer podrazumeva efikasnije motore i pretvarače, ali su zato



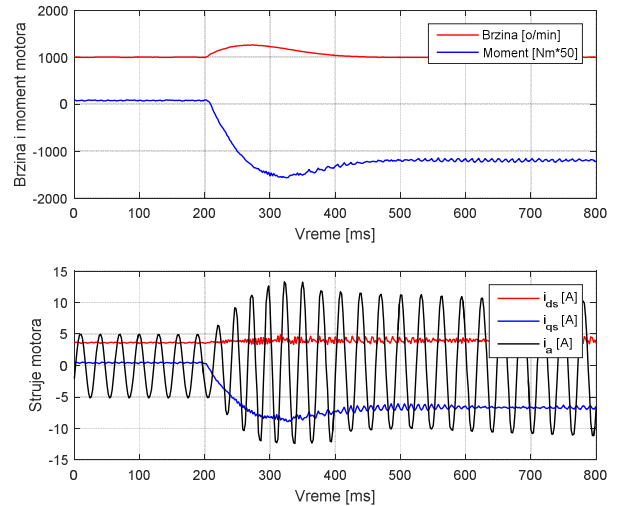
Sl. 17. Vremenski dijagrami karakterističnih veličina ispravljača pri naglom povećanju opterećenja motora – motorni režim rada: referentne i ostavarene komponente struja u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu i referentni i ostvareni napon u jednosmernom međukolu



Sl. 19. Vremenski dijagrami karakterističnih veličina ispravljača pri nagloj promeni opterećenja motora – generatorski režim rada: referentne i ostavarene komponente struja u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu i referentni i ostvareni napon u jednosmernom međukolu



Sl. 18. Vremenski dijagrami karakterističnih veličina pogona i invertora pri naglom povećanju opterećenja motora – motorni režim rada: brzina i moment motora, ostvarene vrednosti komponenti struja u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu i fazna struja motora



Sl. 20. Vremenski dijagrami karakterističnih veličina pogona i invertora pri nagloj promeni opterećenja motora – generatorski režim rada: brzina i moment motora, ostvarene vrednosti komponenti struja u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu i fazna struja motora

troškovi u radu (za energiju) značajno smanjeni, što dovodi do povoljnije ukupne ekonomske računice za korisnika.

Optimizacija gubitaka u motoru i pretvaraču je bitna samo ako su komponente pogona izabrane sa dovoljnom rezervom nominalne snage. Ovo uglavnom jeste slučaj, pošto se odabir vrši prema maksimalno planiranom radnom kapacitetu, što rezultuje čestim radom sa snagom manjom od nominalne. Moderni pretvarači, u svojim upravljačkim sistemima nude prilično jednostavan postupak kojim se ostvaruje navedeni režim rada, što ima za posledicu smanjenje gubitaka u motoru i pretvaraču, bez uticaja na ostale tehničke karakteristike pogona.

Primena regulisanih aktivnih ispravljača kao ulazne komponente frekventnog pretvarača pruža još više mogućnosti

za poboljšanje energetske efikasnosti elektromotornog pogona. Rekuperacija energije u pogonima sa vertikalnim transportom tereta, ili tokom usporavanja pogona koji imaju veliku inerciju su odlučujući faktori za upotrebu regulisanih ispravljača. Takvi pogoni rade sa prostoperiodičnom mrežnom strujom i u motornom i u generatorskom režimu. Faktor snage prema mreži je približno jednak jedinici, ali po potrebi može biti podešen i drugačije kako bi se dinamički kompenzovala reaktivna snaga ostalih potrošača priključenih na iste sabirnice kao i pogon sa aktivnim ispravljačem. Ovo je moguće samo ako postoji adekvatna rezerva u snazi pretvarača. Navedene prednosti čine energetski pretvarač sa aktivnim ispravljačem najboljim izborom za primenu u pogonima, u pogledu energetske efikasnosti i kvaliteta električne energije. Međutim, cena ovakvog pogona ograničava upotrebu ove topologije

pretvarača u većem broju aplikacija, pogotovu u onima gde postoje druge mogućnosti koje su ekonomski isplativije.

ZAHVALNICA

Rad je rezultat istraživačke delatnosti autora na projektu 33016, koji je finansijski podržan od Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] B. Jeftinić, S. Štatkić, M. Bebić, L. Ristić, „Multimotor controlled drives and energy efficiency in practice“, Chapter in monograph of national significance „Energy efficiency of electrical drives“, Faculty of technical sciences Čačak, University of Kragujevac, 2012. (in Serbian), ISBN: 978-86-7776-147-9, UDC 621 313, pp 219 – 337
- [2] Marian Kazmierkowski, Frede Blaabjerg, Ramu Krishnan, „Control in Power electronics – selected problems“, Academic Press Elsevier Science, 2002.
- [3] IEEE Standard 519-2014 – „IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems“, <https://standards.ieee.org/findstds/standard/519-2014.html>
- [4] IEC/EN 61000-3-2/A14, „Electromagnetic compatibility, part 3: Limits, section 2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current up to and including 16 A per phase)“, 4th Edition, May 2014.
- [5] Johann W. Kolar; Thomas Friedli, „The Essence of Three-Phase PFC Rectifier Systems—Part I“, IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, Volume: 28, Issue: 1, pp 176 - 198, DOI: 10.1109/TPEL.2012.2197867
- [6] Sam Guccione, Mahesh M. Swamy, Ana Stankovic, „Three-Phase Pulse-Width-Modulated Boost-Type Rectifiers“, Chapter in book „The Power Electronics Handbook“ edited by Timothy L. Skvarenina, CRC Press, 2002.
- [7] M. P. Kazmierkowski and L. Malesani, „Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: a survey“, *IEEE Trans. Indust. Electron.* 45, 691–703 (1998).

- [8] T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo, and I. Takahashi, „Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors“, *IEEE Trans. Indust. Appl.* 34, 473–479 (1998).
- [9] Qing-Chang Zhong, „Virtual Synchronous Machines: A unified interface for smart grid integration“, *IEEE Power Electronics Magazine*, December 2016

ABSTRACT

Application of active rectifiers in the industrial electric drives with the goal to improve their energy efficiency is analyzed in the paper. Recuperation of braking energy in drives with vertical transport of loads or during slow-down of high inertia drives are decisive factors for use of controlled rectifiers. Such drives operate with sinusoidal input current in both motoring and regenerative regime. Grid power factor of the drive is close to unity, but can be set otherwise if required, to dynamically compensate the reactive power of other consumers on the point of common connection. This is possible only if adequate reserve of converter's rated power is available. These advantages that are experimentally tested in the paper nominate the power converter with active rectifier for the best converter for drive applications, regarding the energy efficiency. The influence of the harmonic distortion of supply voltage to the active rectifier input currents within the frequency converter in the electrical drive is illustrated based on simulation model presented in the paper. The model enables to analyze the drive either in ideal supply voltages, or dangerous, or hard to perform modes of operation.

ACTIVE RECTIFIERS APPLICATION IN ELECTRICAL DRIVES WITH HIGH ENERGY EFFICIENCY

Marko Šinik, Leposava Ristić, Milan Bebić, Saša Štatkić, Dragan Jevtić, Neša Rašić, Bogdan Brković