

UDK:  
BIBLID:  
DOI

# Analiza i modelovanje pretvarača sa aktivnim ispravljačem i njegov uticaj na energetske efikasnost elektromotornog pogona

Vladimir Šinik<sup>1</sup>, Marko Šinik<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet Mihajlo Pupin, Đure Đakovića bb Zrenjanin, Srbija

<sup>2</sup> Informatika AD, Jevrejska 32, Srbija

[sinik.vladimir@gmail.com](mailto:sinik.vladimir@gmail.com), [chupavi.hitman@gmail.com](mailto:chupavi.hitman@gmail.com)

**Kratak sadržaj:** Cilj ovog rada je da prikaže, analizira i dokaže prednosti primene aktivnog ispravljača kao pretvarača na strani mreže u frekventnom pretvaraču elektromotornog pogona. Upotreba aktivnog ispravljača omogućava napredniji rad pogona, u pogledu talasnog oblika struje, rekuperacije energije pri kočenju odnosno generatorskom režimu rada motora, i kompenzaciju reaktivne snage potrošača povezanih sa mrežom u istoj tački gde i pogon sa aktivnim ispravljačem. Pored osnovne topologije energetskog dela pogona sa aktivnim ispravljačem i načinom upravljanja biće dati eksperimentalni rezultati i rezultati simulacije na modelu u nekoliko režima rada ovog pogona.

**Ključne reči:** aktivni ispravljač, elektromotorni pogon, simulacioni model, *Matlab/ Simulink*, harmonijska analiza, kompenzacija reaktivne energije

## 1 Uvod

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. Kao što je primećeno u poslednjih nekoliko decenija, sve veći deo električne energije se pretvara pomoću ispravljača, pre nego što se iskoristi na krajnjem

opterećenju (potrošaču) [1]. U sistemima, u kojima se primenjuju uređaji energetske elektronike, najčešće se koristi frekventni pretvarač, čiji je ispravljački deo najčešće diodni, ili tiristorski most. Ispravljači su nelinearni elementi po prirodi i stoga generišu struje viših harmonika u napojnu mrežu. Visok harmonijski sadržaj u struji napajanja i usled toga nizak faktor snage izazivaju brojne probleme u distributivnom sistemu električne energije. Najčešći su:

- naponska izobličenost i elektromagnetne smetnje (eng. electromagnetic interference (EMI)) [2-3] koji utiču na ostale korisnike energetskog sistema
- povećanje prividne snage elementima sistema (generatori, transformatori, vodovi, itd.) [4]

Iz tog razloga, vlade i internacionalne organizacije su uvele nove standarde (u SAD-u IEEE 519, a u Evropi IEC 61000-3) u kojima propisuju ograničenje harmonijskog sadržaja struje koju ispravljač uzima iz mreže [5-6]. Zato je razvijeno nekoliko novih topologija ispravljača, među kojima je najpopularniji aktivni ispravljač, koji su u skladu sa ovim standardima. Zbog mogućnosti da radi u generatorskom režimu rada sa približno sinusoidalnom ulaznom strujom, jediničnim faktorom snage i kontrolisanim naponom u jednosmernom međukolu, primena aktivnog ispravljača u regulisanim pogonima visokih performansi, gde se očekuju učestala zaletanja i kočenja pogona, je vrlo popularna. Aktivni ispravljač pripada grupi PWM pretvarača (pretvarači kojima se upravlja pomoću impulsno širinske modulacije – eng. Pulse Width Modulation). Dakle, najefikasniju konstrukciju frekventnog pretvarača čine PWM pretvarač na strani mreže i isti takav pretvarač na strani opterećenja. Pri regularnom radu motora, koji se napaja preko frekventnog pretvarača, pretvarač na strani mreže radi kao ispravljač, a pretvarač na strani opterećenja kao invertor, dok pri radu motora u generatorskom režimu pretvarači menjaju uloge. Ova topologija frekventnog pretvarača (PWM ispravljač-PWM invertor) omogućava četverokvadrantni rad pogona što je vrlo korisno u pogonima sa regulacijom brzine, jer pri kočenju pogona postoji mogućnost vraćanja energije u mrežu (rekuperacija). Aktivni ispravljač (PWM pretvarač na strani mreže) obezbeđuje stabilizaciju napona u jednosmernom međukolu i može da radi kao aktivni filter (eng. active line conditioner (ALC)) koji kompenzuje više harmonike i reaktivnu snagu na mestu sprege sa distributivnom mrežom [4]. Iz tog razloga se ovaj PWM ispravljač i naziva aktivnim.

Jedan od primera gde se koriste aktivni ispravljači su velike rudarske mašine na površinskim kopovima. One predstavljaju složene tehnološke jedinice koje iziskuju veoma zahtevne pogonske sisteme. Konkretno, aktivni ispravljači u ovakvim sistemima su našli primenu u dizalnim pogonima i to u slučajevima gde svaki pogon ima svoj frekventni pretvarač i ne postoji mogućnost da se energija koju pogon dizalice regeneriše potroši u nekom

drugom pogonu (to bi moglo u slučaju da je na jedan ispravljač i jednosmerno (DC) kolo povezano nekoliko invertora za svaki pogon), već se preko aktivnog ispravljača vraća u mrežu. Upotreba čopera i otpornika za kočenje u jednosmernom međukolu ne bi bila praktična zbog velike energije koju pogon dizalice regeneriše prilikom spuštanja velikog tereta (npr. velikog kotura za kopanje) [7].

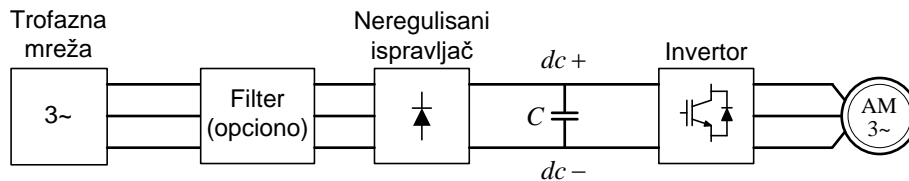
## 2 Osnovna topologija energetskeg dela pogona sa aktivnim ispravljačem i načini upravljanja

Energetski i upravljački deo elektromotornog pogona sa aktivnim ispravljačem podjednako imaju značajan uticaj na njegove karakteristike u pogledu regulacije brzine i momenta motora, energetske efikasnosti pogona i uticaja na napojnu mrežu.

### 2.1 Energetski deo pogona sa aktivnim ispravljačem

Moderni regulisani elektromotorni pogoni sa asinhronim motorima obično imaju sličnu topologiju statičkih (poluprovodničkih) energetskeg pretvarača, koji se sastoje od ispravljača, jednosmernog međukola i invertora [8].

Najjednostavnija topologija energetskeg dela pogona promenljive brzine sa energetskeg pretvaračem kojom se obezbeđuje napajanje motoru promenljivog napona i frekvencije [9] je prikazana na Slici 1.

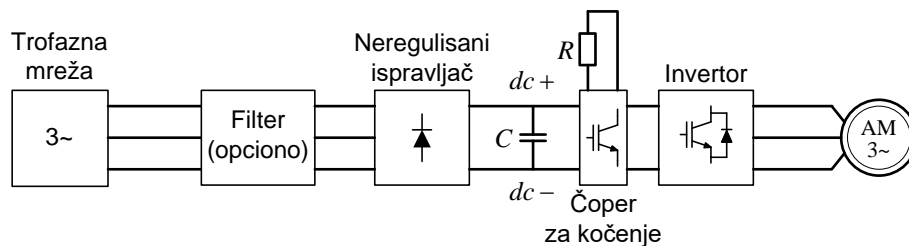


Slika 1. Topologija energetskeg pretvarača za regulisani elektromotorni pogon sa asinhronim motorom [9]

Neregulisani (diodni) ispravljač prikazan na Slici 1, sposoban je za prenos energije samo u jednom smeru i to sa naizmenične na jednosmernu stranu, dok invertor može da radi, i u invertorskom režimu, snabdevajući motor aktivnom snagom, i u ispravljačkom režimu, sprovodeći aktivnu snagu motora nazad u pretvarač. Ispravljački režim invertora se javlja prilikom regenerativnog kočenja motora, na primer prilikom spuštanja tereta

vertikalnim transportnim uređajima (kranovi, liftovi i sl.), ili tokom usporavanja opterećenja koji imaju veliku inerciju. Da bi se energetska pretvarač zaštitio od neprihvatljivo velikog jednosmernog napona u međukolu (napon na kondenzatoru  $C$ ), neophodna je modifikacija topologije sa Slike 1 [9].

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 energetska efikasnosti pogona. Međutim, ovo rešenje je ekonomski opravdano, pogotovu u slučajevima gde se malo energije može generisati iz pogona [9]. Topologija pogona sa čoperom za kočenje u jednosmernom međukolu je prikazana na Slici 2.



Slika 2. Topologija energetskog pretvarača sa čoperom za kočenje [10]

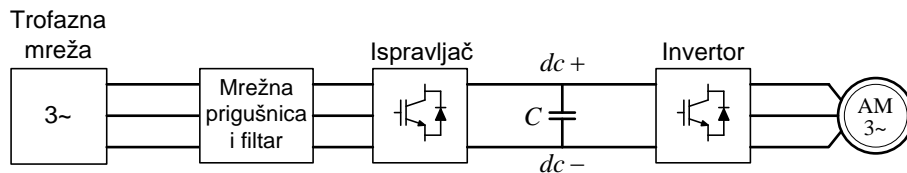
Drugi važan problem elektromotornog pogona sa nereguliranim (diodnim) ispravljačem, kao ulaznom jedinicom frekventnog pretvarača, je problem izobličenja struje iz mreže tokom njegovog rada. Kombinacija nereguliranog ispravljača i kondenzatora ( $C$ ) u jednosmernom međukolu proizvodi harmonike višeg reda u mrežnoj struji. Različiti proizvođači frekventnih regulatora pristupaju ovom problemu na različite načine, da bi smanjili harmonijsko izobličenje (distorziju) na zadovoljavajući nivo koji je definisan IEEE [11] i IEC [12] standardima, a da zadrže nisku cenu. Pasivni filteri, ili „harmonijski filteri“ povezani između mrežnog napajanja i ispravljača su česte dodatne komponente pogona, što povećava dimenzije i težinu opreme u električnom ormaru, kao i disipiranu toplotu na takvim komponentama. Cena pasivnih filtera je srazmerna njihovoj efikasnosti, stoga balans između cene i performansi je često definisan kao minimum potrebnih performansi da bi se dostigle standardne vrednosti [9].

Suprotno neregulisanom ispravljaču kao ulaznom delu energetskog pretvarača, upotreba uređaja zvanog aktivni ispravljač, ili PWM ispravljač, ima nekoliko prednosti navedenih u [13]:

- Rad sa ukupnim (pravim) faktorom snage vrlo bliskim jedinici;
- Mogućnost vraćanja celokupne regenerisane energije u napojnu mrežu;

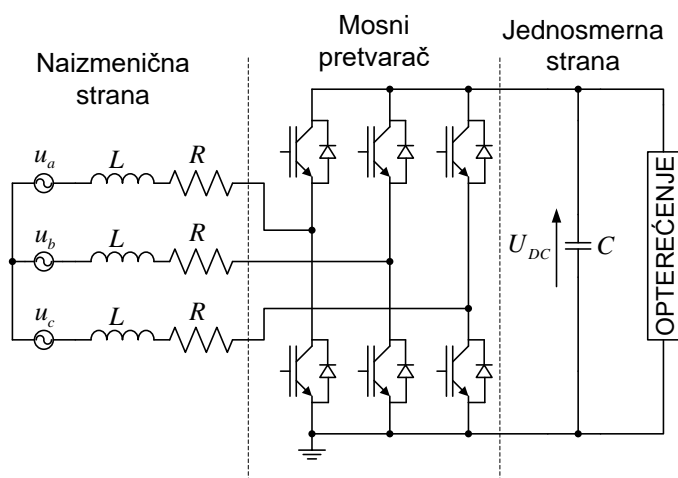
- Sinusoidalni talasni oblik ulazne (napojne) struje i u motornom i u generatorskom (regenerativnom) režimu rada;
- Mogućnost dinamičke kompenzacije reaktivne energije ostalih potrošača uz adekvatno dimenzionisanje po snazi elemenata pretvarača;
- Mogućnost kompenzacije kratkotrajnih propada ili neuravnoteženosti ulaznog napona [9].

Navedene prednosti nominuju energetski pretvarač sa aktivnim ispravljačem za najbolji pretvarač za primenu u pogonima, u pogledu energetske efikasnosti. Međutim, negativna strana ovakvog pogona je njegova cena, što ometa širu upotrebu pretvarača sa ovom topologijom. Visoka cena ovakvog frekventnog pretvarača je posledica upotrebe iste strukture i invertorskog i ispravljačkog dela [9]. Blok dijagram ove topologije je prikazan na Slici 3.



Slika 3 Topologija energetskog pretvarača sa aktivnim ispravljačem za regulisani pogon sa asinhronim motorom [9]

Detaljna struktura energetskog dela aktivnog ispravljača na Slici 4 prikazuje šest upravljivih prekidačkih elemenata, najčešće IGBT (engl. Insulated Gate Bipolar Transistors) tranzistora.



Slika 4 Topologija energetskog dela aktivnog ispravljača [10]

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) [9].

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 [14].

## 2.2 Načini upravljanja aktivnim ispravljačem

Upravljački deo ispravljača i invertora implementiran je u digitalnom upravljačkom sistemu visokih performansi. Mikrokontroler je baziran na DSP-u (eng. Digital Signal Procesor ) ili sličnom procesoru sa velikom brzinom obrade podataka. U poslednje vreme, da bi se brzina obrade pojedinih delova programa još povećala, koriste se FPGA (eng. Field-Programmable Gate Array) čipovi, uz nekoliko DSP jezgara koji rade u paraleli (konkurentno). Iako realizovani u istoj upravljačkoj jedinici, upravljački deo motora i upravljački deo ispravljača su dizajnirani i analizirani nezavisno [1]. Upravljanje pretvaračem na strani motora (invertora) je dobro poznato i tema je mnogih

radova i knjiga. Upravljanje ispravljačem će u ovom radu biti detaljnije predstavljeno.

Razne strategije upravljanja PWM ispravljačima su predstavljane u novijoj literaturi, ali najčešće korišćene mogu biti klasifikovane kao što je to urađeno u [4]:

- Upravljanja zasnovana na naponu;
  - Naponski orjentisano upravljanje (eng. voltage oriented control – VOC[15])
  - Direktno upravljanje snagom (eng. direct power control – DPC[16]).
- Upravljanja zasnovana na virtualnom fluksu;
  - Upravljanje zasnovano na virtualnom fluksu (eng. virtual flux oriented control - VFOC);
  - Direktno upravljanje snagom bazirano na virtualnom fluksu (eng. virtual flux based direct power control - VF-DPC).

Potpuno nov način upravljanja koji omogućava da se PWM ispravljač ponaša kao virtuelna sinhrona mašina (VSM) i da poseduje dinamiku sinhronne mašine, je skoro predstavljen u [17]. Ova „tehnologija sihropretvarača“ je razvijena za PWM pretvarače, bilo na mrežnoj strani, bilo na strani opterećenja, da bi se omogućio jedinstveni interfejs za integraciju „pametnih“ mreža u elektroenergetski sistem [8].

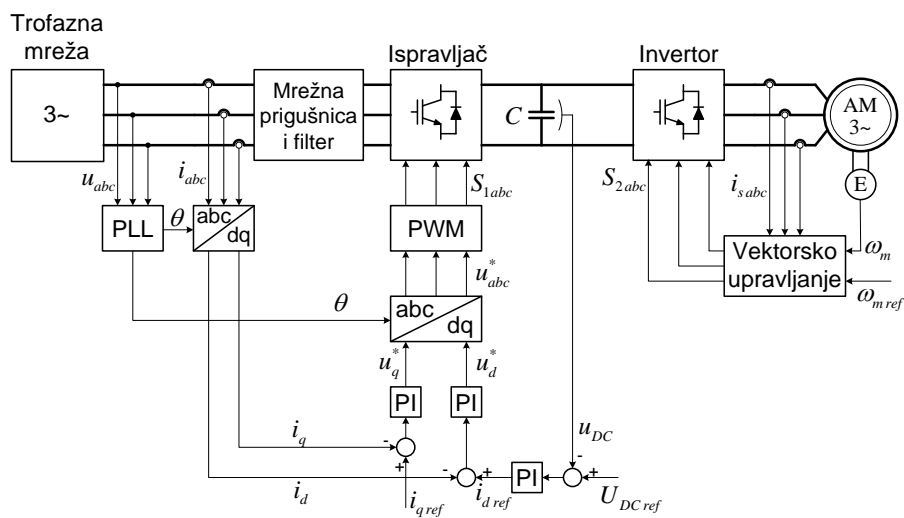
Dva načina upravljanja koja se najčešće koriste za upravljanje aktivnim ispravljačem u industrijskim uređajima:

- Upravljanje zasnovano na naponu (eng. voltage oriented control - VOC);
- Upravljanje zasnovano na virtuelnom fluksu (eng. virtual flux oriented control - VFOC) [8].

### **2.2.1 Upravljanje zasnovano na naponu(VOC)**

VOC upravljanje aktivnim ispravljačem je postalo vrlo popularno i konstantno se unapređuje i razvija, zbog toga što garantuje visoke dinamičke i statičke performanse preko unutrašnjih petlji regulacije struje [4]. Iz tog razloga konačne performanse VOC sistema upravljanja dosta zavise od kvaliteta primenjenog načina regulacije struje.

Blok dijagram VOC upravljanja je prikazan na Slici 5, gde je kao opterećenje aktivnom ispravljaču u jednosmernom međukolu priključen inverter preko kojeg se napaja asinhroni motor na kome je primenjeno vektorsko upravljanje. Ovaj blok dijagram prikazuje eksperimentalnu postavku i kao takav je realizovan i u simulaciji u programskom alatu *Simulink*.

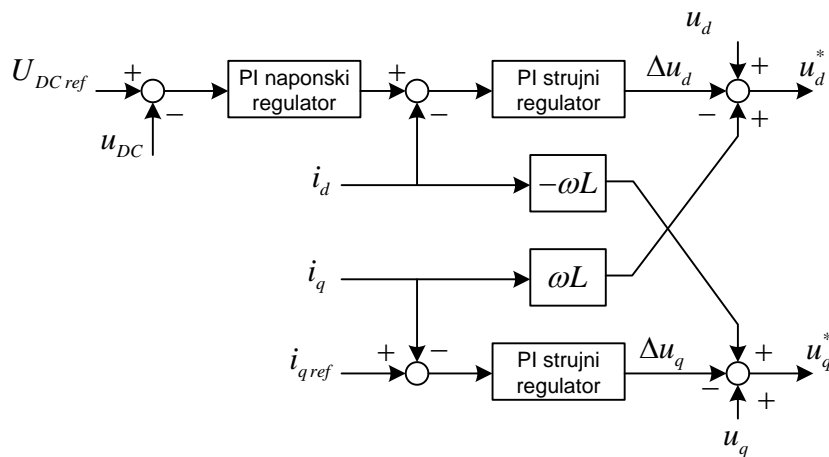


Slika 5. Upravljački blok dijagram pogona sa aktivnim ispravljačem sa VOC upravljanjem

Pomoću PLL (eng. Phase-locked loop) bloka, koji radi ispravno čak i ako postoje izobličenja ulaznog napona, određuju se fazni uglovi merenih napona napajanja, kao i njihova frekvencija. Fazni ugao napona  $u_a$ ,  $\theta$ , se koristi pri transformaciji merenih napojnih struja iz  $abc$  koordinantnog sistema u sinhrono rotirajući  $dq$  koordinantni sistem (Parkova transformacija). Ista transformacija se primenjuje i na napone. Time se od periodičnih talasnih oblika napona i struja dobijaju jednosmerne veličine što omogućava upotrebu PI regulatora u upravljačkoj strukturi. Da bi se dobio jedinični faktor snage na ulazu u ispravljač (tj. da bi struja bila u fazi sa naponom),  $q$  (reaktivna) komponenta struje treba da bude jednaka nuli jer je  $d$  osa obrtnog referentnog sistema postavljena u osu sa fazorom napona napajanja. Iz tog razloga se postavlja da je referentna vrednost  $q$  komponente struje ( $i_{qref}$ ) jednaka 0. Razlika između zadate i stvarne vrednosti struje  $i_q$  se dovodi na PI regulator na čijem izlazu se dobija zadata vrednost napona  $u_q$ . Zadata vrednost  $d$  komponente struje ( $i_{dref}$ ) se dobija na izlazu iz PI regulatora napona jednosmernog međukola ( $u_{DC}$ ). Princip rada pretvarača diktira da referenca jednosmernog napona ( $U_{DCref} \geq 600Vdc$ ) treba da bude veća od napona neregulisanog (diodnog) ispravljača (540Vdc za 400Vac napona napajanja) [1]. Greška struje  $i_d$  (razlika zadate i stvarne struje  $i_d$ ) se zatim dovodi na ulaz

drugog PI regulatora iz kojeg se na izlazu dobija zadata vrednost napona  $u_d$ . Nakon toga, vrši se inverzna transformacija prvobitnoj na osnovu istog ugla  $\theta$ , kako bi se dobili referentni naponi  $u_a^*$ ,  $u_b^*$  i  $u_c^*$ , koji se dovode impulsno širinskom modulatoru (PWM-u). PWM poredi te napone sa trouglastim nosiocem i na osnovu toga zadaje impulse za paljenje odgovarajućem tranzistoru.

PI regulatori struje nemaju zadovoljavajuće performanse praćenja zadate vrednosti u slučaju prikazanom na blok dijagramu sa Slike 5. Zato se za aplikacije visokih performansi koristi raspregnuto upravljanje strujama (Slika 6) [4].



Slika 6. Razdvojena regulacija po komponentama struje

### 2.2.2 Upravljanje zasnovano na virtuelnom fluksu (VFOC)

Zbog mogućnosti analogije napona napajanja, otpornosti i induktivnosti između mreže i ispravljača sa određenim veličinama u naizmeničnom motoru javila se mogućnost upravljanja pomoću virtuelnog fluksa. Otpornosti i induktivnosti između mreže i ispravljača predstavljaju otpornosti i induktivnosti rasipanja statorskog namotaja virtualnog motora, respektivno. Međufazni naponi ( $u_{ab}$ ,  $u_{bc}$ ,  $u_{ca}$ ) bi bili indukovani naponi usled uticaja virtuelnog fluksa u vazдушnom zazoru. Drugim rečima, integraljenjem međufaznih napona dobija se mrežni virtuelni fluks [4].

Upravljanje zasnovano na virtuelnom fluksu predstavlja poboljšanje upravljanja zasnovanog na naponu, zato što je smanjen uticaj poremećaja

mrežnog napona na transformacije u upravljačkom sistemu. Ovi problemi kod VOC upravljanja se mogu rešiti samo pomoću fazno spregnutih petlji (PLL), ali kvalitet odziva regulisanog sistema zavisi od toga koliko su efikasno projektovani PLL-ovi. Dakle, lakše je ugao vektora napona napajanja zameniti uglom vektora virtuelnog fluksa, zato što je ugao fluksa manje osetljiv od ugla napona na poremećaje napona napajanja, zahvaljujući prirodnom svojstvu integratora u izrazu za virtuelni fluks [4].

### 3 Eksperimentalni postavka

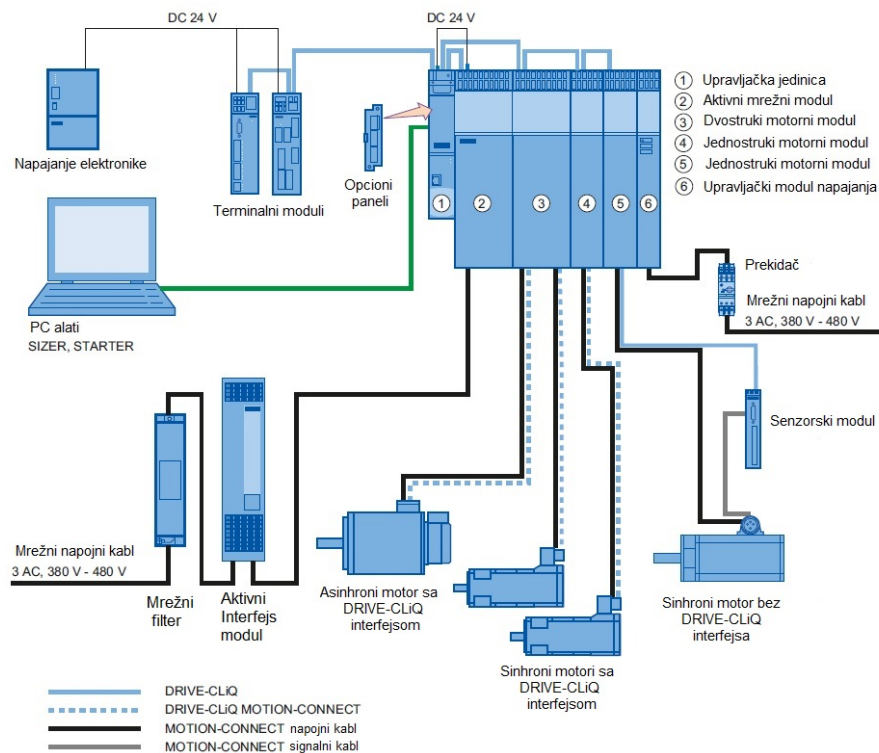
Eksperimentalna postavka, pomoću koje će se analizirati rad aktivnog ispravljača kao pretvarača na strani mreže u energetske efikasnom elektromotornom pogonu realizovana je u Laboratoriji za elektromotorne pogone na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Postavka se sastoji od dva mehanički spregnuta asinhrona motora napajana preko dva energetska pretvarača (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.

.Eksperimentalna postavka analiziranog sistema elektromotornog pogona sa frekventnim pretvaračem u čijem sastavu je aktivni ispravljač, pomoću koje će se izvršiti verifikacija određenih rezultata simulacije sastoji iz sledećih glavnih celina:

- Frekventni pretvarač *SINAMICS S120* (sadrži aktivni ispravljač)
- Frekventni pretvarač *SINAMICS G120*
- Dva asinhrona motora snage 4 kW

*SINAMICS* predstavlja familiju energetskih pretvarača *Siemens*-ove proizvodnje dizajniranih za primenu sa električnim mašinama i postrojenjima [18]. Napajanje jednog od motora od 4kW je obezbeđeno preko frekventnog pretvarača *SINAMICS S120*, a drugog, pomoću kojeg se opterećuje prvi, preko frekventnog pretvarača *SINAMICS G120*. Motori su spregnuti krutom mehaničkom vezom. Motorom koji se napaja preko frekventnog pretvarača *S120* upravlja se preko računara pomoću *Siemens*-ovog programa *STARTER* i koristi se direktno vektorsko upravljanje. Veza sa računarom je ostvarena preko *Ethernet* kabla. Ovaj motor je opremljen enkoderom za merenje apsolutnog položaja vratila motora na kome je postavljen.

Na Slici 7 prikazan je pregled kompletnog sistema koji predstavlja *SINAMICS S120*.



Slika 7 Pregled kompletnog sistema SINAMICS S120 [18]

Frekventni pretvarač SINAMICS G120 sadrži poluprovodnički ispravljački most koji nema mogućnosti vraćanja energije u mrežu i zato poseduje eksterni otpornik za kočenje koji je povezan sa modulom za kočenje u ovom frekventnom pretvaraču. Motor koji se napaja iz ovog pretvarača radi sa regulacijom momenta i njime se upravlja preko digitalnih ulaza ovog pretvarača. Ovaj motor zajedno sa svojim frekventnim pretvaračem nije obuhvaćen modelom na kome su vršene simulacije jer nije od interesa za analizu koja je sprovedena u ovom radu. Njihov uticaj je predstavljen step funkcijom, kojom je modelovano opterećenje motora napajanog iz frekventnog pretvarača sa analiziranim aktivnim ispravljačem.

## 4 Eksperimentalni rezultati i rezultati simulacije

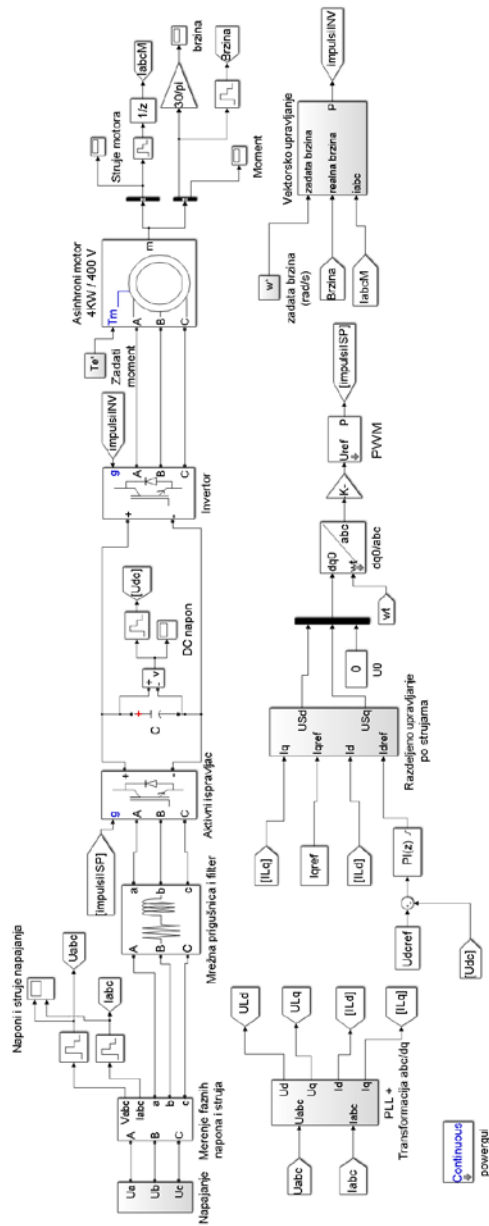
U ovom poglavlju će se prezentovati simulacioni model sistema sa aktivnim ispravljačem, rezultati dobijeni iz simulacije, kao i eksperimentalni rezultati dobijeni merenjem na eksperimentalnoj postavci predstavljenoj u poglavlju 3.

### 4.1 Model analiziranog sistema u programskom alatu Simulink

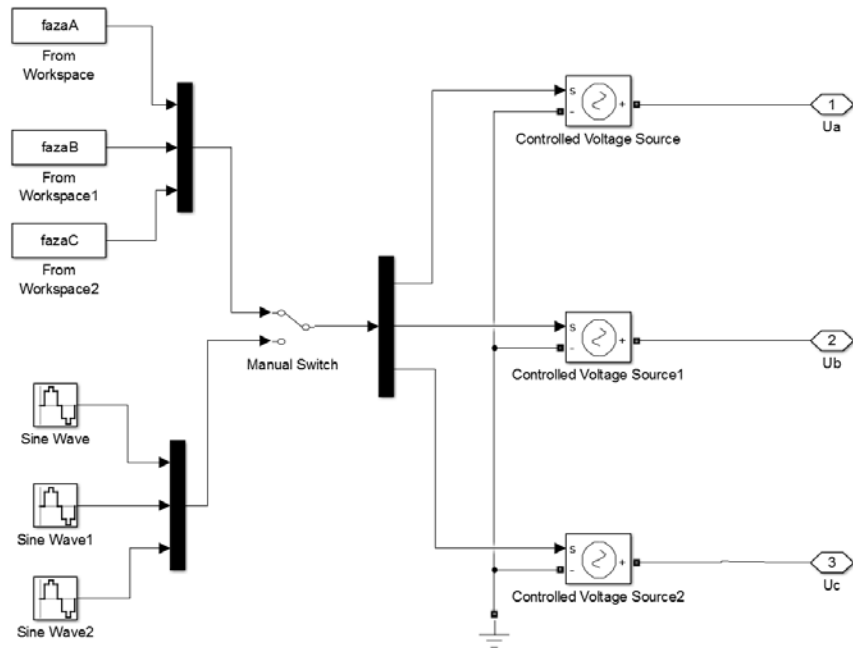
*Simulink* je grafičko programsko okruženje u sklopu programskog alata *MATLAB*, i koristi se za modelovanje, simulaciju i analizu dinamičkih sistema [19]. *Simulink* sadrži bogatu biblioteku raznih komponenti (blokova). Korisnik može da menja postojeće blokove, ali i da pravi svoje i tako formira željeni dinamički sistem. Simulacioni model realizovan u programskom alatu *Simulink*, prema blok dijagramu sa Slike 5, prikazan je na Slici 8.

Blok *Napajanje*, prikazan na Slici 9, realizovan je tako da postoji izbor da li će trofazni naponi biti idelnog sinusoidalnog oblika ili će se proslediti realan izgled napona (prethodno snimljen mernom opremom i eksportovan u zasebnu datoteku koju treba učitati pre puštanja simulacije).

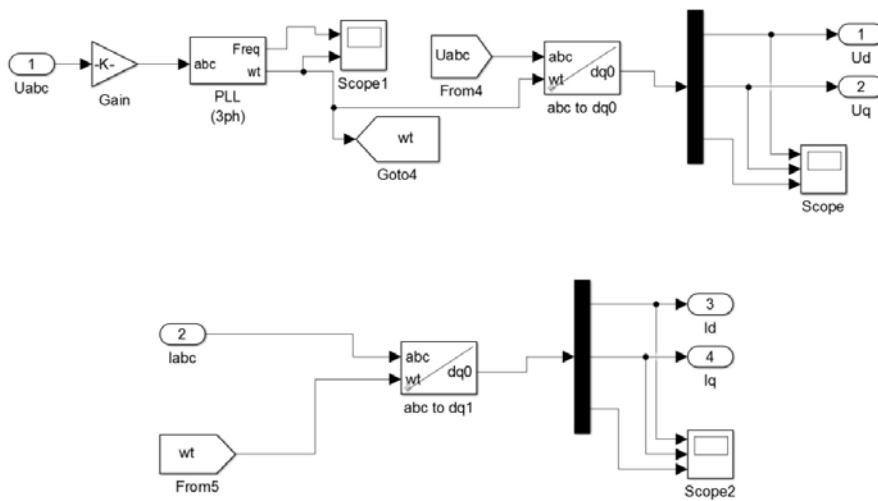
Za blokove koji predstavljaju aktivni ispravljač i inverter podešena je ista struktura i to IGBT tranzistori sa paralelnim diodama. Vrednosti za induktivnost  $L$  i otpornost  $R$  koje se nalaze između napajanja i aktivnog ispravljača, kao i za kondenzator  $C$  u jednosmernom međukolu biće predstavljene zajedno sa ostalim parametrima u predstojećem delu poglavlja.



Slika 8. Blok dijagram simulacionog modela pogona sa aktivnim ispravljačem sa VOC upravljanjem realizovan u Simulink-u



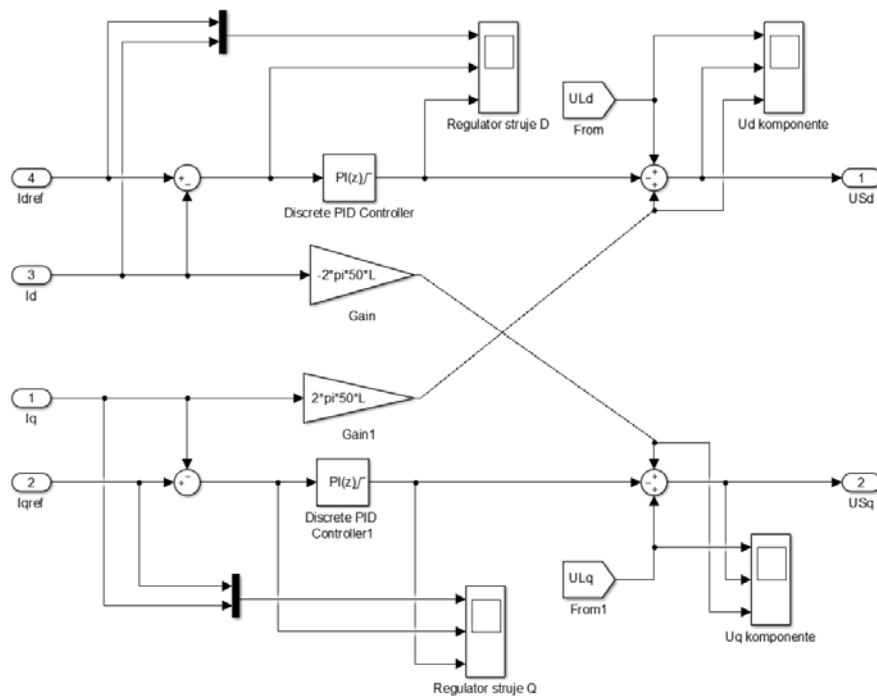
Slika 9 Sadržaj bloka Napajanje sa Slike 8



Slika 10 Sadržaj bloka PLL+Transformacija abc/dq sa Slike 8

U bloku *PLL+Transformacija abc/dq* (Slika 10) određuje se frekvencija i faza napona napajanja pomoću *PLL* bloka i vrši se transformacija ulaznih napona i struja iz *abc* koordinantnog sistema u sinhrono rotirajući *dq* koordinantni sistem. Blok za razdvojenu regulaciju po komponentama struje prikazan je na Slici 11 i predstavlja realizaciju blok dijagrama sa Slike 6.

Vektorsko upravljanje primenjeno na asinhronom motoru u simulaciji prikazano je na Slici 12. Realizovano je pomoću matematičkog modela pogona sa vektorskim upravljanjem.



Slika 11 Realizacija razdvojene regulacije po komponentama struje



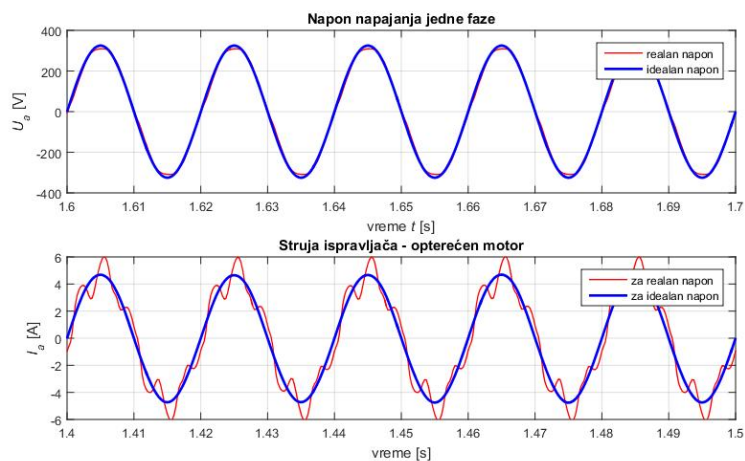
Tabela 1. Parametri analiziranog sistema

Parametar	Oznaka [jedinica]	Vrednost
Otpornost između napojne mreže i aktivnog ispravljača	$R$ [m $\Omega$ ]	5
Induktivnost između napojne mreže i aktivnog ispravljača	$L$ [mH]	0.86
Kapacitivnost sprežnog kondenzatora u jednosmernom međukolu	$C$ [ $\mu$ F]	2000
Koeficijent proporcionalnog dejstva PI regulatora DC napona	$K_{pu}$	0.09
Koeficijent integralnog dejstva PI regulatora DC napona	$K_{iu}$	25
Koeficijent proporcionalnog dejstva PI regulatora struja	$K_{pi}$	1
Koeficijent integralnog dejstva PI regulatora struja	$K_{ii}$	400
Nominalna snaga motora	$P_n$ [kW]	4
Nominalni međufazni napon napajanja	$U_n$ [V]	400
Frekvencija	$f$ [Hz]	50
Otpornost statora motora	$R$ [ $\Omega$ ]	1.02876
Induktivnost rasipanja u namotaju statora	$L_{ls}$ [mH]	9.52903
Međusobna induktivnost namotaja	$L_m$ [mH]	180.25806
Inercija rotora	$J$ [kg·m <sup>2</sup> ]	0.0131196
Faktor trenja	$k_{tr}$ [N·m·s]	0.002985
Broj pari polova	$p$	2
Nominalni fluks	$\Psi_n$ [Wb]	0.721774
Nominalni moment motora	$M_n$ [Nm]	26
Nominalna brzina obrtanja rotora	$n_n$ [ob/min]	1500

## 4.2 Uticaj nesavršenosti napona napajanja na linijsku struju i ponašanje pogona

U ovom potpoglavlju pokazaće se kako napon, koji nije savršeno sinusoidalan, utiče na ponašanje aktivnog ispravljača, ali i celog pogona. To će se pokazati pomoću predstavljenog simulacionog modela u programskom alatu *Simulink*. Poređiće se, pre svega, struje ispravljača (struje napajanja pogona) za slučaj kada je napon napajanja idealno sinusoidalnog oblika i za slučaj kada nije. Realan (nesinusoidalan) napon izmeren je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Odstupanje merenog faznog napona od idealnog sinusoidalnog oblika se javlja zbog nelinearnih potrošača kao što su monofazna kompjuterska napajanja i fluorescentno osvetljenje, čega ima dosta u zgradi fakulteta.

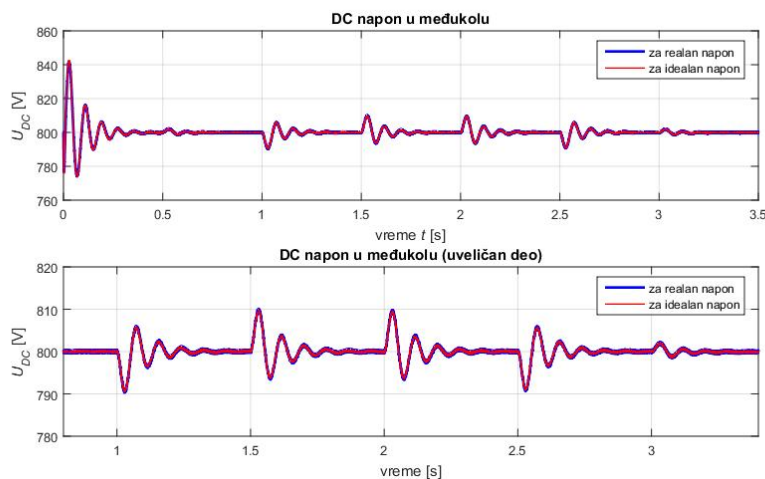
Na gornjem grafiku Slike 13 prikazani su talasni oblici idealnog sinusoidalnog napona (deblja plava linija) i realnog napona (tanja crvena linija). Usled odstupanja realnog napona od idealnog sinusoidalnog oblika javljaju se viši harmonici u struji ispravljača (tj. struji napajanja pogona). Naravno, očekuje se da će struja imati manja izobličenja pri manje izobličenom naponu. Na donjem grafiku Slike 13 prikazani su talasni oblici struje napajanja pogona pri idealnom i merenom naponu, kada je motor opterećen (moment opterećenja motora je 15Nm dok je njegov nominalni moment 26Nm). Osim struje, posmatraće se ponašanje i ostalih veličina u pogonu, tj. koliko one zavise od izobličenja napona.



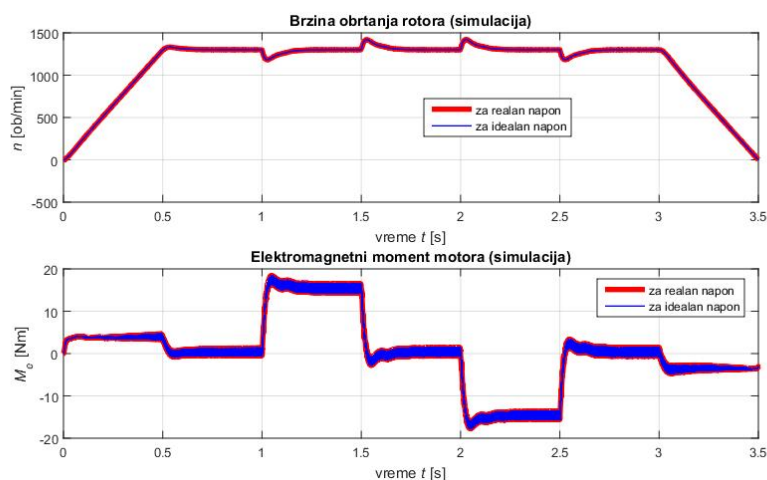
Slika 13. Talasni oblik napona napajanja i struje pretvarača. Na gornjem grafiku prikazani su realan (tanka crvena linija) i idealan napon (debela plava linija). Na donjem grafiku prikazana je struja koju ovakav pogon uzima iz mreže kada je motor opterećen pri realnom naponu napajanja pretvarača (tanka crvena linija) i pri idealno sinusoidalnom naponu napajanja pretvarača (debela plava linija)

Posmatraće se nekoliko režima rada ovog pogona. Referenca brzine se zadaje preko bloka *soft start* (brzina se linearno menja) i ona nakon pola sekunde dostiže konačnu zadatu vrednost od 1300 ob/min. Dakle, prvi posmatrani režim predstavlja ubrzavanje neopterećenog motora (od  $t=0s$  do  $t=0.5s$ ). Drugi režim obuhvata period od trenutka  $t=0.5s$  do trenutka  $t=1s$ , kada motor radi u praznom hodu. U trenutku  $t=1s$  motor se naglo opterećuje momentom od 15Nm ( $M_n=26Nm$ ). Tako da, treći režim obuhvata period od trenutka  $t=1s$  do trenutka  $t=1.5s$ , kada elektromagnetni moment motora dostiže moment opterećenja, a brzina se, koja je usled poremećaja za trenutak pala, usled regulacije vraća na zadatu vrednost ( $n=1300$  ob/min). U trenutku  $t=1.5s$  motor se rasterećuje i posmatra se novi prelazni proces koji je posledica naglog ukidanja opterećenja, usled čega elektromagnetni moment motora pada na nulu. Period od  $t=2s$  do  $t=2.5s$  predstavlja rad pogona u generatorskom režimu (moment opterećenja motora -15Nm). Nakon toga motor ponovo radi u praznom hodu (od  $t=2.5s$  do  $t=3s$ ), a zatim od trenutka  $t=3s$  koči do zaustavljanja u  $t=3.5s$ .

Na Slici 14 prikazan je napon u jednosmernom međukolu analiziranog pretvarača gde se vidi da se praktično poklapaju karakteristike jednosmernog napona u međukolu za slučaj kada je simulirani pogon napajan idealnim sinusoidalnim naponom (crvena linija) i kada je napajan sa realnim talasnim oblikom napona (plava linija).



Slika 14. Napon u jednosmernom međukolu pretvarača. Na gornjem grafiku prikazan je napon u međukolu pretvarača za realan napon napajanja (debela plava linija) kao i za idealno sinusoidalni (tanka crvena linija). Na donjem grafiku je prikazan uveličan deo koji nam je od interesa za posmatranje

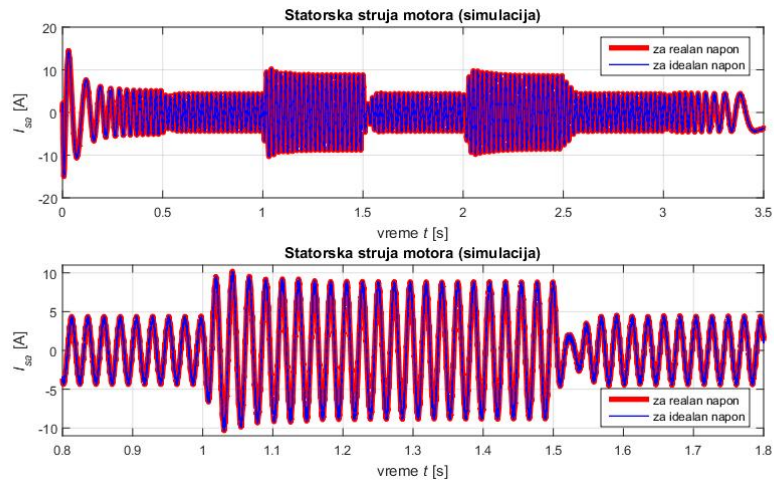


Slika 15. Brzina obrtanja rotora motora i elektromagnetni moment motora. Na gornjem grafiku prikazana je brzina obrtanja motora, a na donjem elektromagnetni moment

Može se primetiti da se javlja malo veći šum za slučaj napajanja realnim naponom, što se bolje vidi na uvećanom delu karakteristike. Na Slici 14 (dole) izdvojen je period kad se menja opterećenje motora i vidi se da prilikom svake promene opterećenja napon u DC kolu malo zaosciluje, ali PI regulator odradi svoju funkciju i vrati ga na zadatu vrednost od 800V.

Karakteristika brzine obrtanja rotora motora prikazana je na Slici 15 (gore). Vidi se da se karakteristika snimljena za realan oblik napona praktično potpuno poklapa sa karakteristikom snimljenom za idealan oblik napona. Ovo takođe važi i za karakteristiku elektromagnetnog momenta (Slika 15 (dole)).

Vremenska zavisnost statorske struje motora feze A ( $I_{sa}$ ) praktično se ne menja bez obzira da li je napon napajanja pogona u simulaciji realan (deblja crvena linija) ili idealan (tanja plava linija) (Slika 16(gore)). Na Slici 16(dole) prikazan je uvećan deo karakteristike sa Slike 16(gore), gde se bolje vidi trenutak opterećenja ( $t=1s$ ) i rasterećenja ( $t=1.5s$ ) motora.



Slika 16 Vremenska zavisnost statorske struje motora faze A ( $I_{sa}$ ) (period kada je motor opterećen). Na donjem grafiku uveličan deo sa gornjeg grafika kada je motor opterećen

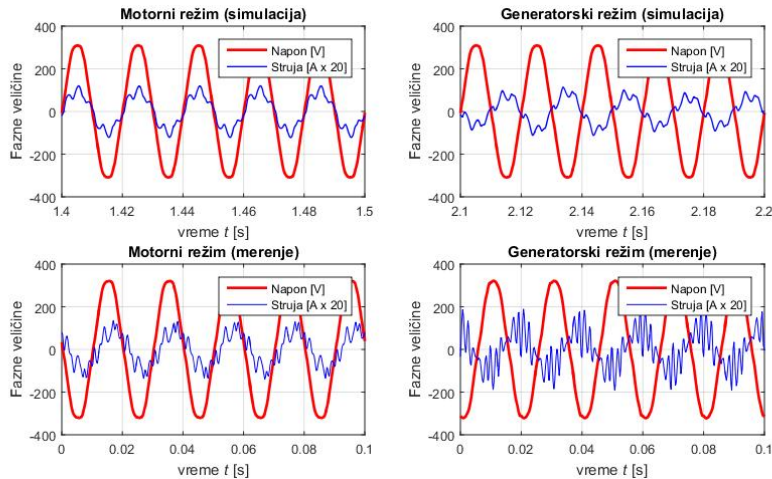
Na osnovu predstavljenih karakteristika zaključuje se da harmonici koji se javljaju u struji napajanja usled distorzije napona napajanja pogona, u simulaciji ne utiču na promenu ponašanja veličina u motoru, kao ni na veću promenu napona u jednosmernom međukolu.

#### 4.3 Režimi rada sistema

Rad aktivnog ispravljača sa pozitivnom aktivnom snagom predstavlja normalni radni režim pogona. Pretvarač uzima aktivnu snagu iz napojne mreže i snabdeva motor potrebnim talasnim oblicima napona i struje. Reaktivna energija potrebna za rad motora je generisana od strane pretvarača i ne dolazi iz napojne mreže. Aktivna snaga uzeta iz mreže je nešto veća nego aktivna snaga koja je prenesena do motora, jer se deo snage troši na gubitke pri konverziji energije u energetskom pretvaraču (ispravljač, DC kolo i inverter) [1]. Na gornjim graficima Slike 17 prikazani su talasni oblici napona i struje u motornom odnosno generatorskom režimu rada dobijeni simulacijom, dok su na donjim graficim iste slike talasni oblici napona i struje dobijeni na osnovu merenja na realnom pogonu.

Treba napomenuti da su u simulaciji korišćeni isti naponi napajanja kao i u realnom sistemu. Karakteristike u motornom režimu na Slici 17 dobijene su pri momentu opterećenja motora od 15Nm ( $M_n=26Nm$ ) i brzini obrtanja od

1300 ob/min, dok u generatorskom režimu motor proizvodi moment od 15Nm pri istoj brzini.



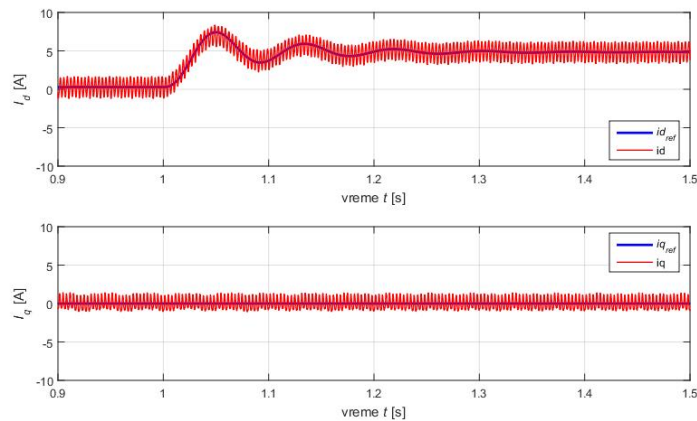
*Slika 17. Talasni oblici mrežnog napona i struje na ulazu ispravljača dobijeni pri realnom naponu napajanja u motornom i generatorskom režimu. Gornji grafici su dobijeni simulacijom dok su donji posledica merenja na realnom pogonu. Grafici sa leve strane su dobijeni pri motornom režimu rada, dok su ovi sa desne dobijeni pri generatorskom režimu*

Glavna prednost aktivnog ispravljača je rad sa negativnom aktivnom snagom, rekuperacija energije. U ovom režimu, aktivna snaga dolazi od motora koji radi u generatorskom režimu, prolazi kroz inverter nazad u DC kolo pretvarača i vraća se u napojnu mrežu. Gubici u pretvaraču se pokrivaju snagom iz motora što rezultuje nešto manjom snagom koja je vraćena u mrežu od one koju zaista motor proizvodi u generatorskom režimu [1].

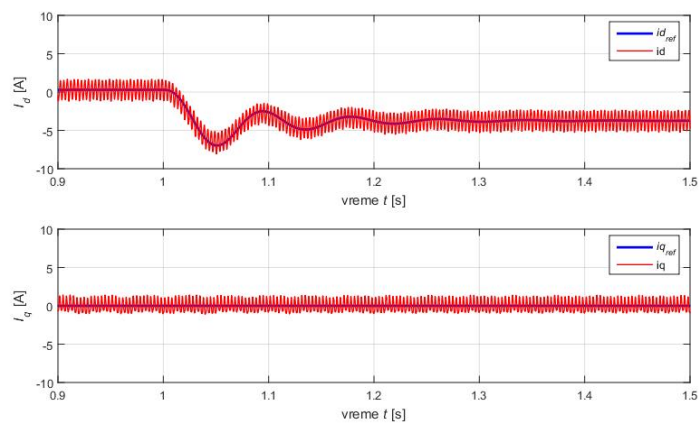
Dokaz da je faktor snage prema mreži približno jednak 1 u motornom režimu rada, odnosno da je približno -1 u generatorskom režimu rada predstavljen je na Slici 18, odnosno Slici 19. Na ovim slikama prikazane su aktivna i reaktivna komponenta struje zajedno sa njihovim referentnim vrednostima u oba režima rada pogona. Vidi se da u trenutku opterećenja motora u standardnom režimu rada dolazi do povećanja samo aktivne komponente struje koju pretvarač uzima iz mreže dok reaktivna ostaje praktično nepromenjena. Slična stvar je i sa generatorskim režimom rada. U trenutku kada se motor optereti negativnim momentom aktivna komponenta struje postaje negativna i ostvaruje se rad ispravljača sa negativnom aktivnom snagom tj. pogon vraća snagu u mrežu.

Na Slici 20 prikazan je harmonijski sastav napona napajanja pretvarača. On je isti i u sličaju simulacije i u slučaju merenja jer je napon napajanja koji je

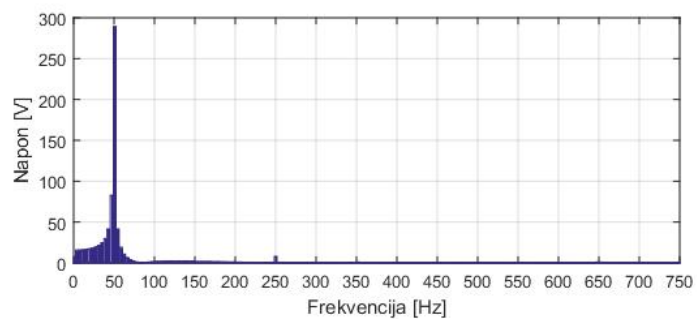
snimljen na realnom pogonu ubačen i u simulaciju. Harmonijski sastav struje koju pretvarač uzima iz mreže u motornom režimu rada, dobijene simulacijom, prikazan je na Slici 21, dok je za struju dobijenu merenjem na realnom pogonu prikazana na Slici 22. Na Slici 23 i Slici 24 prikazan je harmonijski sastav tih struja u generatorskom režimu rada. Sa grafika dobijenih merenjem na realnom pogonu (Slika 22 i Slika 24) može se primetiti da struja koja se vraća u mrežu pri radu motora u generatorskom režimu ima značajne vrednosti jedanaestog i trinaestog harmonika, što nije slučaj sa graficima dobijenih iz simulacije. Osim toga, sa grafika dobijenih simulacijom (Slika 21 i Slika 23) može se primetiti razlika u amplitudi prvog harmonika struje pretvarača. To što je prvi harmonik veći u motornom režimu rada je posledica gubitaka snage pri transformaciji energije u samom pretvaraču ali i samog načina simuliranja generatorskog režima. Naime, generatorski režim je dobijen tako što je motor opterećen istim momentom kao i u motornom režimu ali suprotnog znaka. Činjenica da model motora uvažava trenje kao i ostale gubitke u motoru ima za posledicu da on proizvodi manju snagu nego što troši u normalnom režimu. To se ne primećuje na graficima sa realnog pogona jer je eksperimentalna postavka realizovana tako da je struja koja se vraća u mrežu u generatorskom režimu ista kao i ona koja se uzima pri radu u motornom režimu. Sva odstupanja koja se javljaju su posledica nemogućnosti saznavanja detaljnog sadržaja modula korišćenih u eksperimentalnoj postavci, kao i zbog kompleksnosti modelovanja svakog od tih modula kao i samog asinhronog motora.



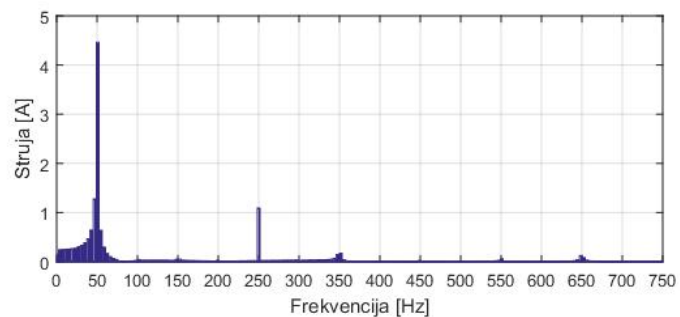
Slika 18. Referentne i ostvarene komponente struja u sinhrono rotirajućem koordinantnom sistemu pri povećanju opterećenja motora



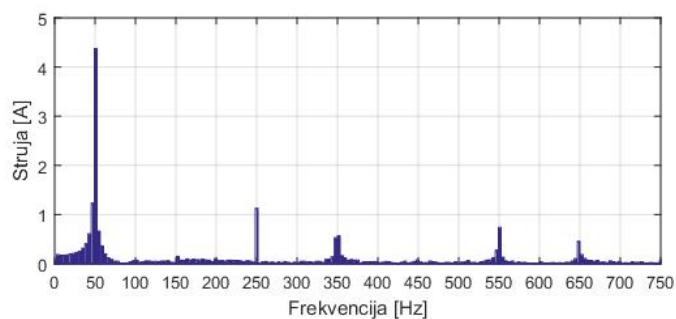
Slika 19. Referentne i ostvarene komponente struja u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu u periodu kada motor proizvodi električnu energiju



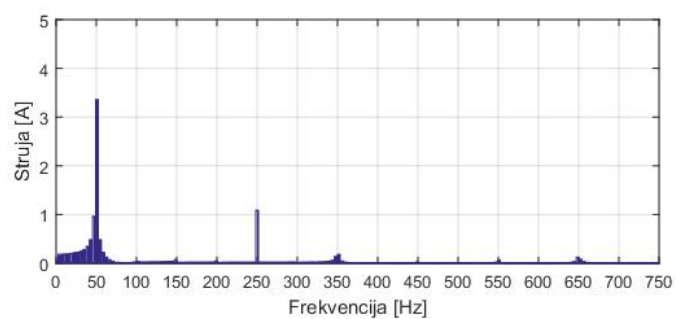
Slika 20. Harmonijski sastav napona napajanja ispravljača



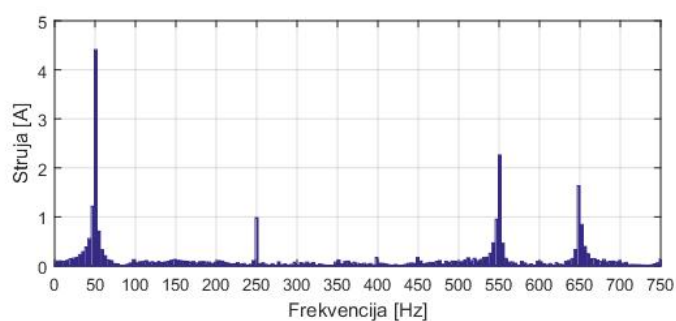
Slika 21. Harmonijski sastav signala struje na ulazu u ispravljač kada pogon radi u motornom režimu



Slika 22. Harmonijski sastav signala struje na ulazu ispravljača dobijenog merenjem kada pogon radi u motornom režimu



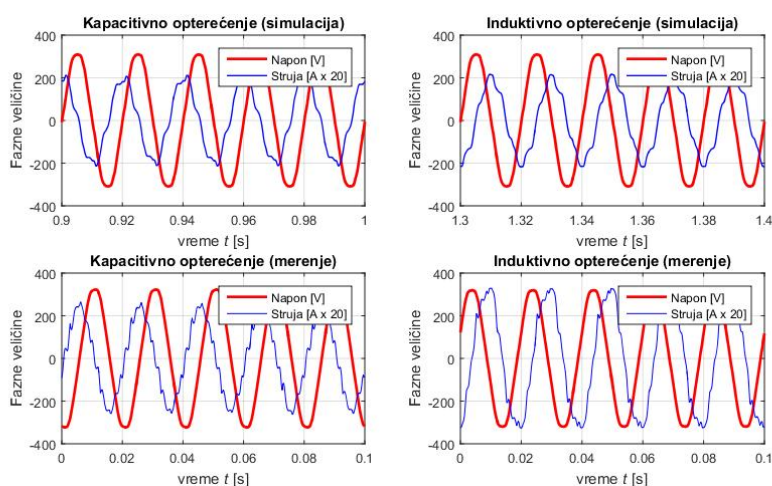
Slika 23. Harmonijski sastav signala struje na ulazu u ispravljač dobijenog simulacijom kada pogn radi u generatorskom režimu



Slika 24. Harmonijski sastav signala struje na ulazu u ispravljač dobijenog merenjem kada pogn radi u generatorskom režimu

#### 4.4 Kompenzacija reaktivne snage ostalih potrošača u postrojenju

Pretvarač sa aktivnim ispravljačem može da radi i sa 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 mrežu u istoj tački gde i pretvarač. Preduslov za rad u ovom režimu je da se dimenzionisanjem pogona obezbedi dovoljna strujna margina. Da bi se ilustrovala ova karakteristika pogona, na predstojećim slikama su prikazani talasni oblici faznih napona i struja sa pozitivnom (induktivnom) i negativnom (kapacitivnom) reaktivnom energijom koju pogon razmenjuje sa mrežom. Treba naglasiti da reaktivna energija nije neophodna za rad ovog pogona, i zato je inače podešena da bude jednaka nuli [1]. Dakle, na gornjem delu Slike 25 su prikazani talasni oblici napona i struje kada pogon sa aktivnim ispravljačem predstavlja kapacitivno (levo), odnosno induktivno (desno) opterećenje, dobijeni simulacijom. Dok su donji talasni oblici dobijeni merenjem.



Slika 25. Talasni oblici mrežnog napona i struje na ulazu u pretvarač kada on radi sa negativnom odnosno pozitivnom reaktivnom snagom i nultom aktivnom snagom. Gornji grafici su dobijeni simulacijom, dok su donji dobijeni merenjem na realnom pogonu. Grafici sa leve strane predstavljaju režim rada pretvarača sa negativnom reaktivnom snagom, a grafici desno sa pozitivnom reaktivnom snagom

## 5 Zaključak

Kroz ovaj rad je pokušano da se analizira uloga aktivnog ispravljača u poboljšanju energetske efikasnosti elektromotornih pogona. Mogućnost rekuperacije energije u mrežu koju poseduje pretvarač sa aktivnim ispravljačem čini ga vrlo pogodnim za upotrebu u pogonima sa vertikalnim transportom tereta kao i pogonima sa velikom inercijom koji pri usporavanju proizvode osetnu količinu energije. Takođe, ovakav pretvarač omogućava rad pogona sa prekično sinusoidalnom ulaznom strujom i u motornom i u generatorskom režimu. Faktor snage prema mreži je približno jednak jedinici, ali može biti podešen i drugačije kako bi se dinamički kompenzovala reaktivna energija ostalih potrošača pruključenih na istu tačku gde i pogon sa aktivnim ispravljačem. Ovo je moguće samo ako postoji adekvatna rezerva u snazi pretvarača. Ove prednosti nameću energetski pretvarač sa aktivnim ispravljačem kao najbolji pretvarač za primenu u pogonima, u pogledu energetske efikasnosti. Međutim, cena ovakvog pogona ograničava njegovu upotrebu u većini aplikacija, pogotovu u onima gde postoje druge mogućnosti koje su ekonomski isplativije.

## 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] Q. Zhaoming, W. Xin, L. Zhengyu, M.H Pong, “Status of electromagnetic compatibility research in power electronics”, in Proc. IEEE *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2000)*, Beijing (China), Aug 15-18, 2000, 12 pp.
- [3] A. Majid, J. Saleem, F. Alam and K. Bertilsson, “Analysis of radiated EMI for power converters switching in MHz frequency range”, in Proc. IEEE 9th International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, *Power Electronics and Drives (SDEMPED 2013)*, Valencia (Spain), Aug. 27-30, 2013, pp. 428-432
- [4] Marian P. Kazmierkowski, Frede Blaabjerg, Ramu Krishnan, *Control in Power electronics – selected problems*, Academic Press Elsevier Science, 2002.
- [5] Ž. Janda , „Jedna klasa trofaznih ispravljača sa sinusoidalnom strujom koji koriste ubrizgavanje viših harmonika struje“, Doktorska disertacija, Beograd

2004.

- [6] V. Katić, *Kvalitet električne energije-viši harmonici*, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Novi Sad 2002.
- [7] Borislav Jeftenić, Milan Bebić, Ilija Mihailović, Neša Rašić, Saša Štatkić, Snežana Aleksandrović, Ilija Jeftenić, Dragan Jevtić, Leosava Ristić, „Power converters on mining machines“, *18th INTERNATIONAL SYMPOSIUM on POWER ELECTRONICS – Ee 2015*, Novi Sad, Srbija, 28.-30. oktobar, 2015.
- [8] Leosava Ristić, Milan Bebić, Taufik Taulo, Marko Šinik, Ilija Mihailović, Dragan Jevtić, Neša Rašić, „Analysis of energy efficiency and influence to the supply grid of electrical drives with active rectifier“, VI regionalna konferencija *Industrijska energetika i zaštita životne sredine u zemljama jugoistočne Evrope IEEP 2017*, Zlatibor, Srbija, 21-24. jun 2017.
- [9] Marko Šinik, Leosava Ristić, Milan Bebić, Saša Štatkić, Dragan Jevtić, Neša Rašić, Bogdan Brković, „Primena aktivnih ispravljača u elektromotornim pogonima visoke energetske efikasnosti“, Naučno-stručni simpozijum *Energetska efikasnost | ENEF 2017*, Banja Luka, 3-4. novembar 2017. godine
- [10] Marko Šinik, „Analiza energetske efikasnosti i uticaj na napojnu mrežu elektromotornog pogona sa aktivnim ispravljačem“, Master rad, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, Septembar 2017
- [11] *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE Standard 519-2014 Available: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/519-2014.html>
- [12] *Electromagnetic compatibility, part 3: Limits, section 2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current up to and including 16 A per phase)*, IEC/EN 61000-3-2/A14 4th Edition, May 2014
- [13] 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
- [14] Sam Guccione, Mahesh M. Swamy, Ana Stankovic, „Three-Phase Pulse-Width-Modulated Boost-Type Rectifiers“, *The Power Electronics Handbook* edited by Timothy L. Skvarenina, ch 4.3, CRC Press, 2002.
- [15] M. P. Kazmierkowski and L. Malesani, „Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: a survey“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 45, 691–703 (1998).
- [16] T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo, and I. Takahashi, „Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors“, *IEEE Transactions on Industry Applications* 34, 473–479 (1998).

- [17] Qing-Chang Zhong, „Virtual Synchronous Machines: A unified interface for smart grid integration“, *IEEE Power Electronics Magazine*, December 2016.
- [18] *SINAMICS S120 Booksize Power Units Manual* · 01/2013, Accessed: 07.09.2017. [Online]. Available: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/012/68042012/att\\_97659/v1/GH2\\_0113\\_eng\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/012/68042012/att_97659/v1/GH2_0113_eng_en-US.pdf)
- [19] Simulink Accessed: 06.09.2017. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Simulink#cite\\_note-2](https://en.wikipedia.org/wiki/Simulink#cite_note-2)

**Abstract.** The aim of this paper is to present, analyze and demonstrate the benefits of using an active adapter as a network converter in the frequency converter of an electric motor. The use of an active rectifier allows for more advanced operation of the drive, in terms of wavelength current, energy recovery in braking, or generator mode of the motor order, and compaction of the relative power of consumers connected to the network at the same point where the drive with an active rectifier. In addition to the basic heat engineering of the energy part of the drive with an active rectifier and control mode, the experimental results and results of the simulation on the model will be given in several operating modes of this plant.

**Keywords:** active rectifier, electric drive, simulation model, *Matlab / Simulink*, harmonic analysis, compression

## **Analysis and modeling of the converter with active rectifier and its influence on energy efficiency of the electric drive**

Vladimir Šinik<sup>1</sup>, Marko Šinik<sup>2</sup>