

## **Analiza i modelovanje pretvarača sa aktivnim ispravljačem i njegov uticaj na energetska 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)

**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.

**Cljučne 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 energetskeg 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 inverter, dok pri radu motora u generatorskom režimu pretvarači menjaju uloge. Ova topologija frekventnog pretvarača (PWM ispravljač-PWM inverter) omogućava četverokvadratni 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].

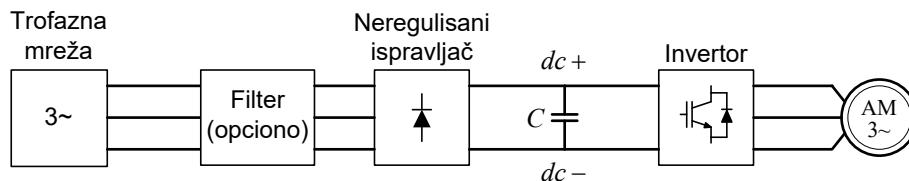
## 2 Osnovna topologija energetskog dela pogona sa aktivnim ispravljačem i načini upravljanja

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) energetskih pretvarača, koji se sastoje od ispravljača, jednosmernog međukola i invertora [8].

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

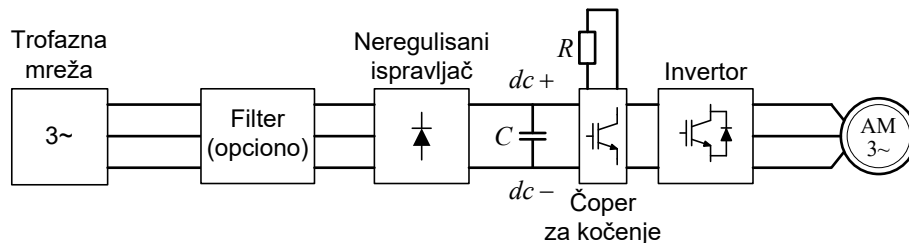


Slika 1. Topologija energetskog pretvarača za regulisani elektromotorni pogon sa asinhronim motorom [9]

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 energetski 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 energetskoj 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]

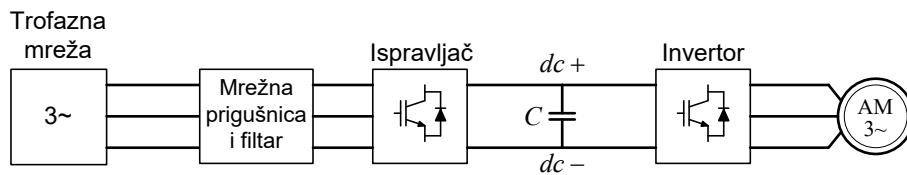
Drugi važan problem elektromotornog pogona sa nereguliranim (diodnim) ispravljačem, kao ulaznom jedinicom frekventnog pretvarača, je problem izobličenja struje iz mreže tokom njegovog rada. Kombinacija nereguliranog ispravljača i kondenzatora (C) u jednosmernom međukolu proizvodi harmonike višeg reda 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 nereguliranom 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;

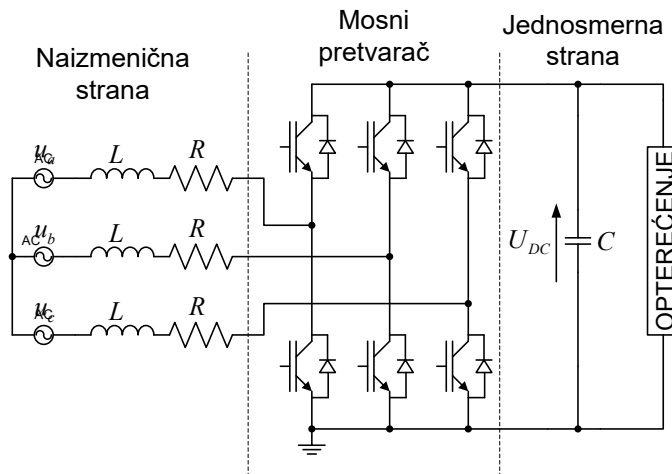
- Mogućnost kompenzacije kratkotrajnih propada ili neuravnoteženosti ulaznog napona [9].

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

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 **sihr**opretvarača“ 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].

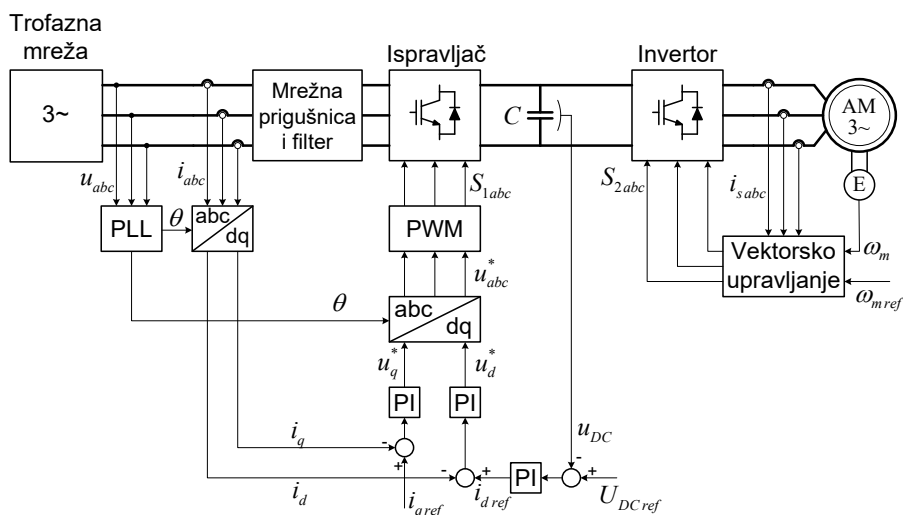
Dva načina upravljanja koja se najčešće koriste za upravljanje aktivnim ispravljačem u industrijskim uređajima:

- 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*.



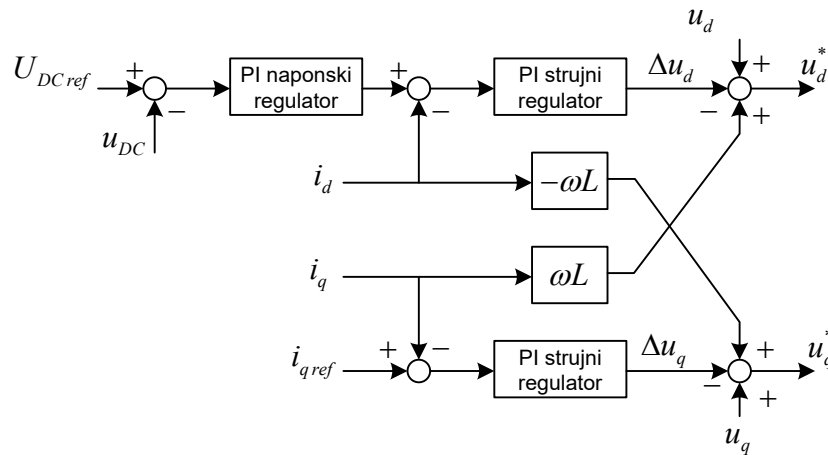
Slika 5. Upravljački blok dijagram pogona sa aktivnim ispravljačem sa VOC upravljanjem

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  $abc$  koordinatnog sistema u sinhrono

rotirajući  $dq$  koordinatni 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 ( $U_{DC\ ref} \geq 600Vdc$ ) 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 naizmjeničnom 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 Eksperimentalna postavka

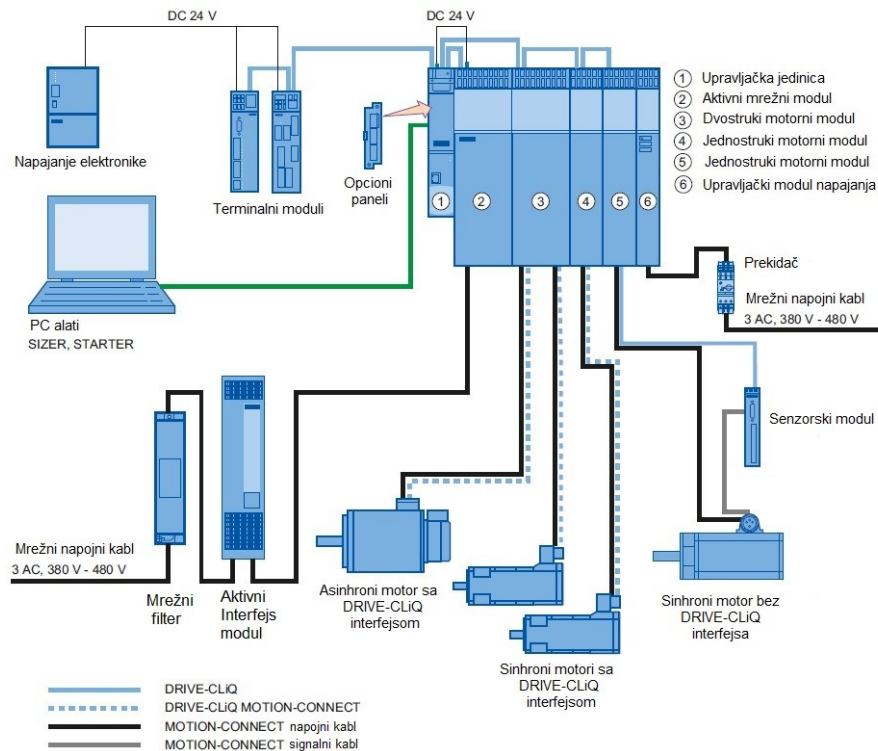
Eksperimentalna postavka, pomoću koje će se analizirati rad aktivnog ispravljača kao pretvarača na strani mreže u energetske efikasnom elektromotornom pogonu realizovana je u Laboratoriji za elektromotorne pogone na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Postavka se sastoji od dva mehanički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

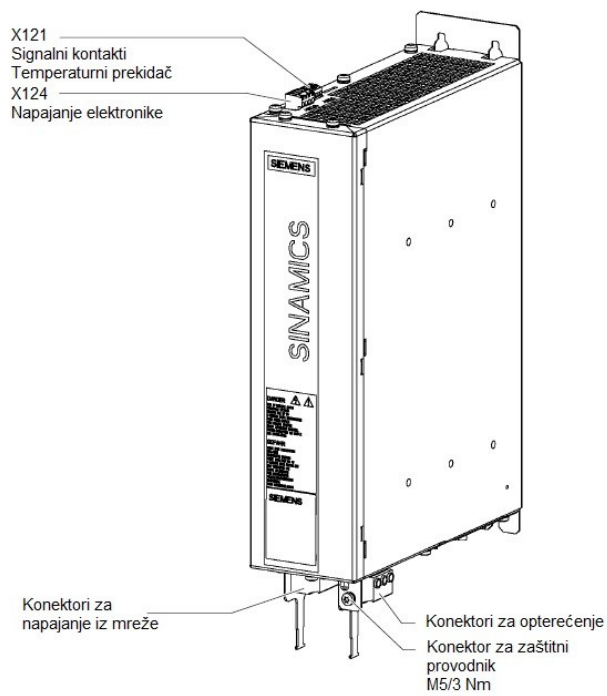
### 3.1 Aktivni interfejs modul

Aktivni ispravljač (Active Line Module) se pomoću aktivnog interfejs modula vezuje na mrežu. Ovaj modul sadrži sledeće funkcionalne jedinice:

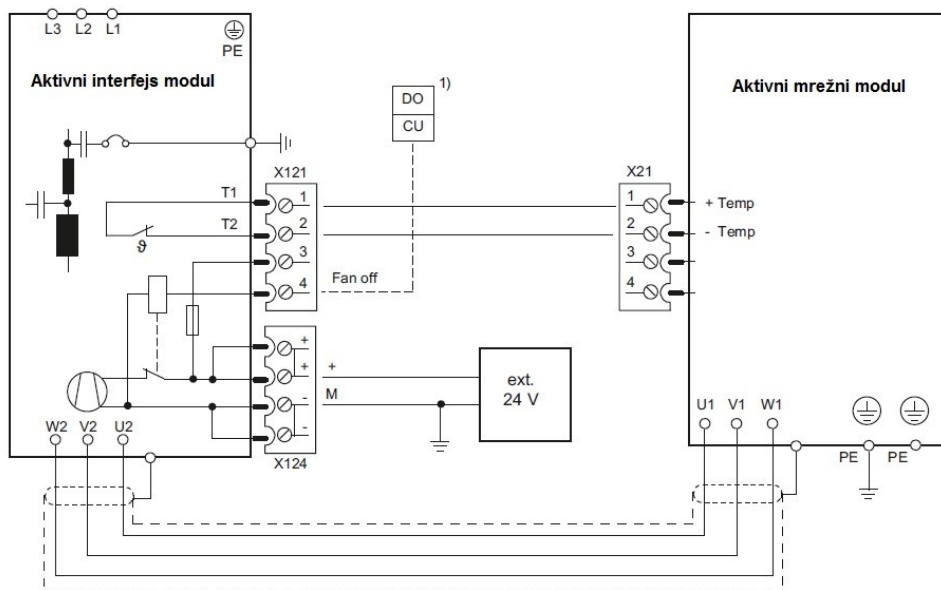
- mrežne prigušnice (ograničavaju harmonike na propisanu vrednost)

- filtere prekidačke učestanosti i filtere niske učestanosti (ukoliko nisu eliminisane upravljačkim algoritmom)
- mrežne filtere
- redukciju opterećenja za izolaciju motora usled faktora razonancije [18]

Izgled ovog modula i primer sa načinom za njegovo povezivanje prikazani su na Slici 8 i Slici 9, respektivno.



Slika 8 – Aktivni interfejs modul 16 kW [18]



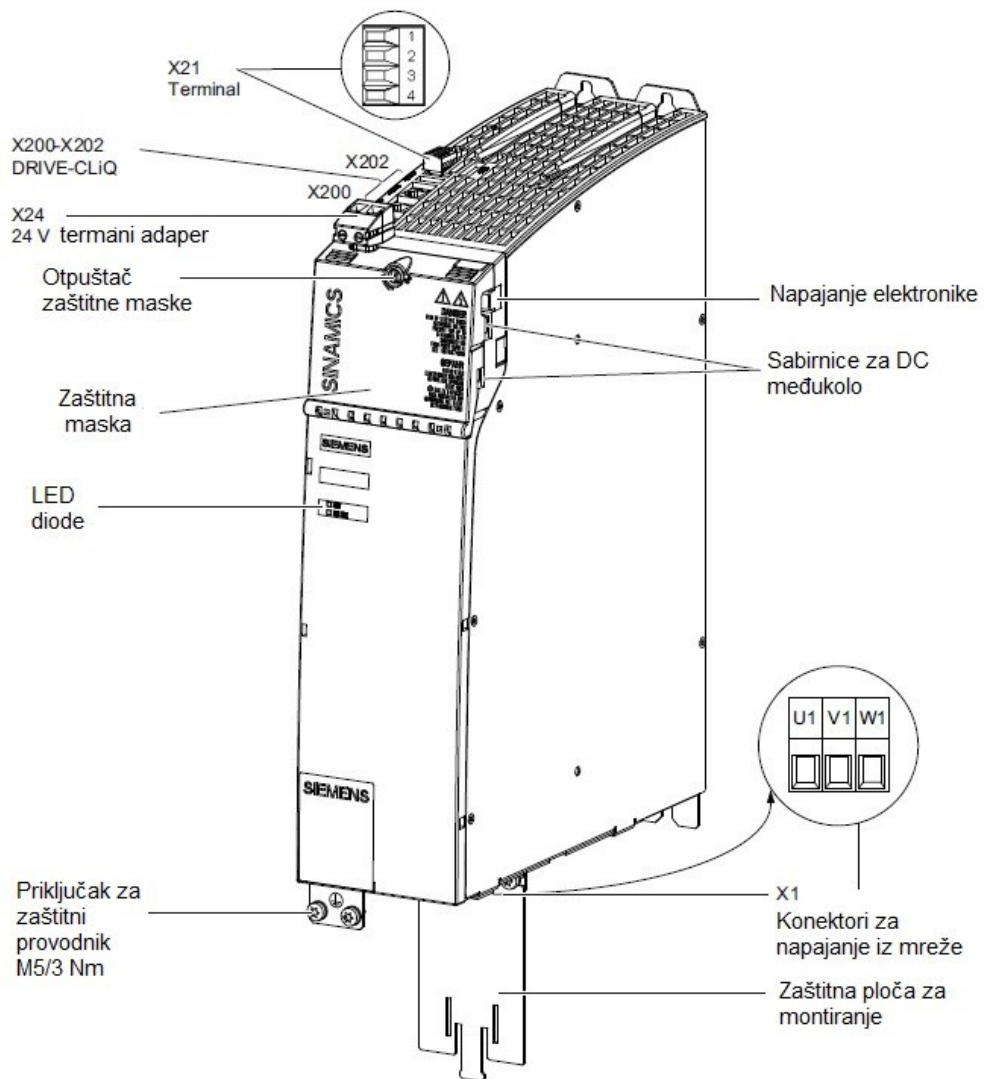
Slika 9 – Primer sa načinom za povezivanje aktivnog interfejs modula [18]

### 3.2 Aktivni mrežni modul (Aktivni ispravljački modul)

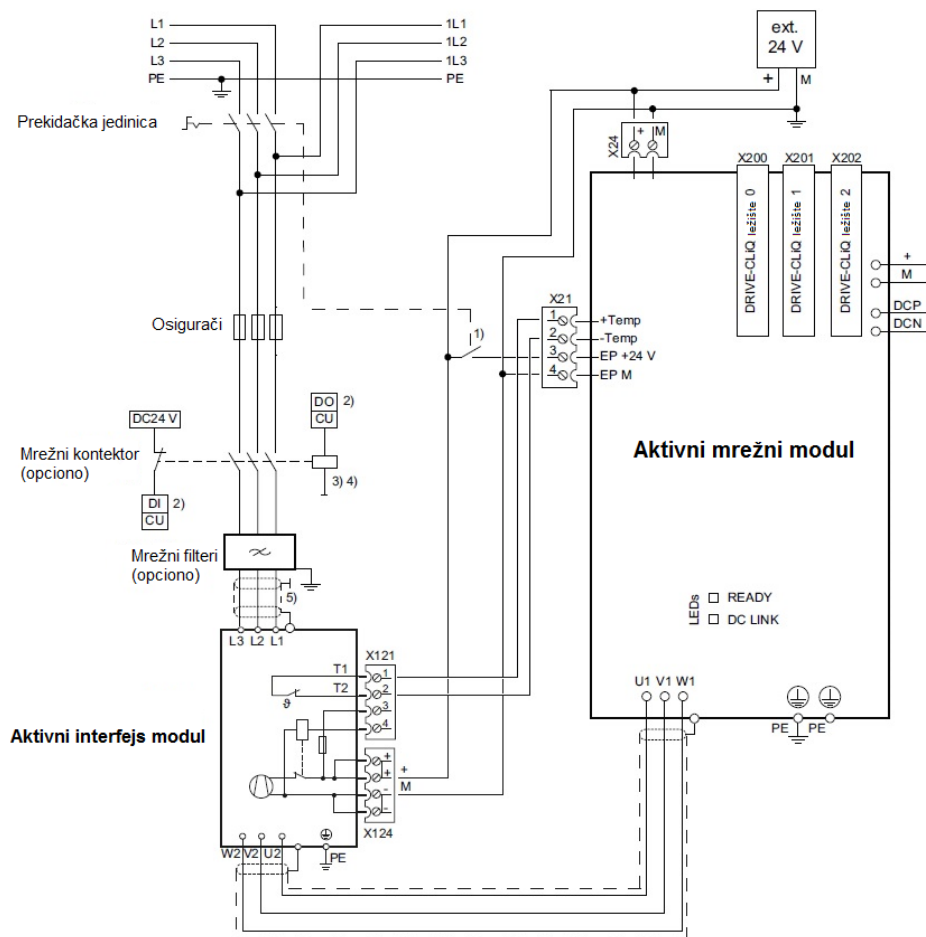
Ovaj modul generiše konstantan, regulisan jednosmerni napon u jednosmernom međukolu, i napaja se iz trofazne mreže preko aktivnog interfejs modula. Jednosmernim naponom, koji se dobija na izlazu aktivnog mrežnog modula, napaja se motorni modul (koji predstavlja inverter). Ovakav način napajanja obezbeđuje da na motorni modul ne utiču fluktuacije u mreži. Kada motor radi u generatorskom režimu, aktivni mrežni modul vraća energiju nazad u mrežu. Ta sposobnost vraćanja energije u mrežu može biti deaktivirana parametrizacijom [18].

Punjenje kondenzatora u jednosmernom međukolu počinje čim se priključi napajanje i ne zavisi od redosleda faza tog napona napajanja. Opterećenje može biti priključeno na jednosmerno međukolo nakon što se odobri rad modula. Opcioni glavni kontaktor je potreban da bi se prekinulo napajanje. Aktivni mrežni modul ima integrisanu prenaponsku zaštitu [18].

Izgled aktivnog mrežnog modula snage 16 kW i sa unutrašnjim hlađenjem prikazan je na Slici 10, a primer sa načinom za njegovo povezivanje je prikazan na Slici 11.

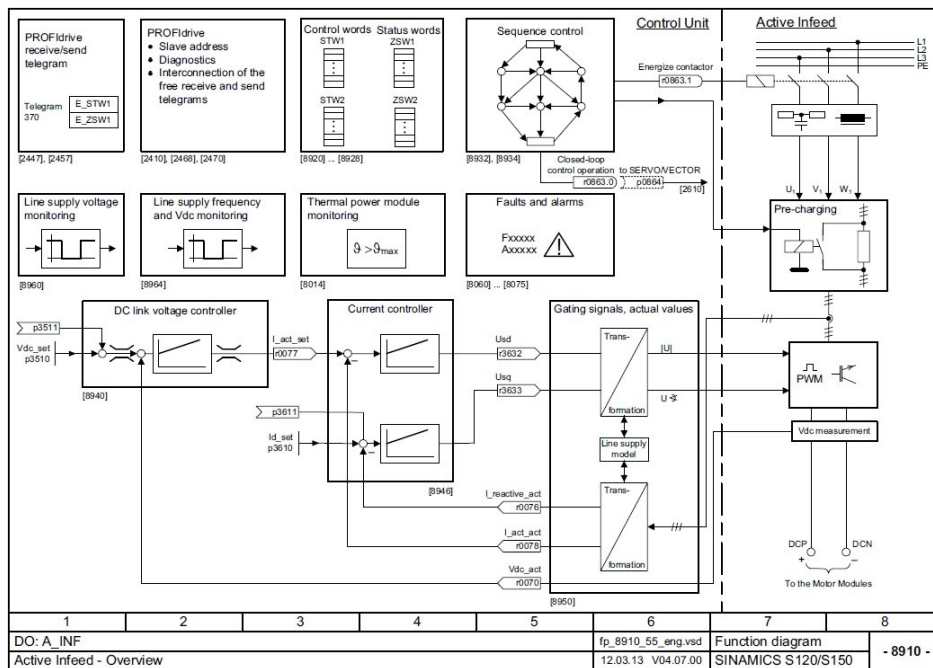


Slika 10 – Aktivni mrežni modul snage 16kW [18]



Slika 11 – Primer sa načinaom za povezivanje aktivnog mrežnog modula [18]

Na Slici 12 prikazan je funkcionalni blok dijagram aktivnog ispravljača implementiranog u ovaj modul. Na slici se vidi i upravljački deo aktivnog ispravljača koji se nalazi u upravljačkoj jedinici (zaseban modul), na osnovu čega je zaključeno da je imlementirano VOC upravljanje ovim aktivnim ispravljačem.



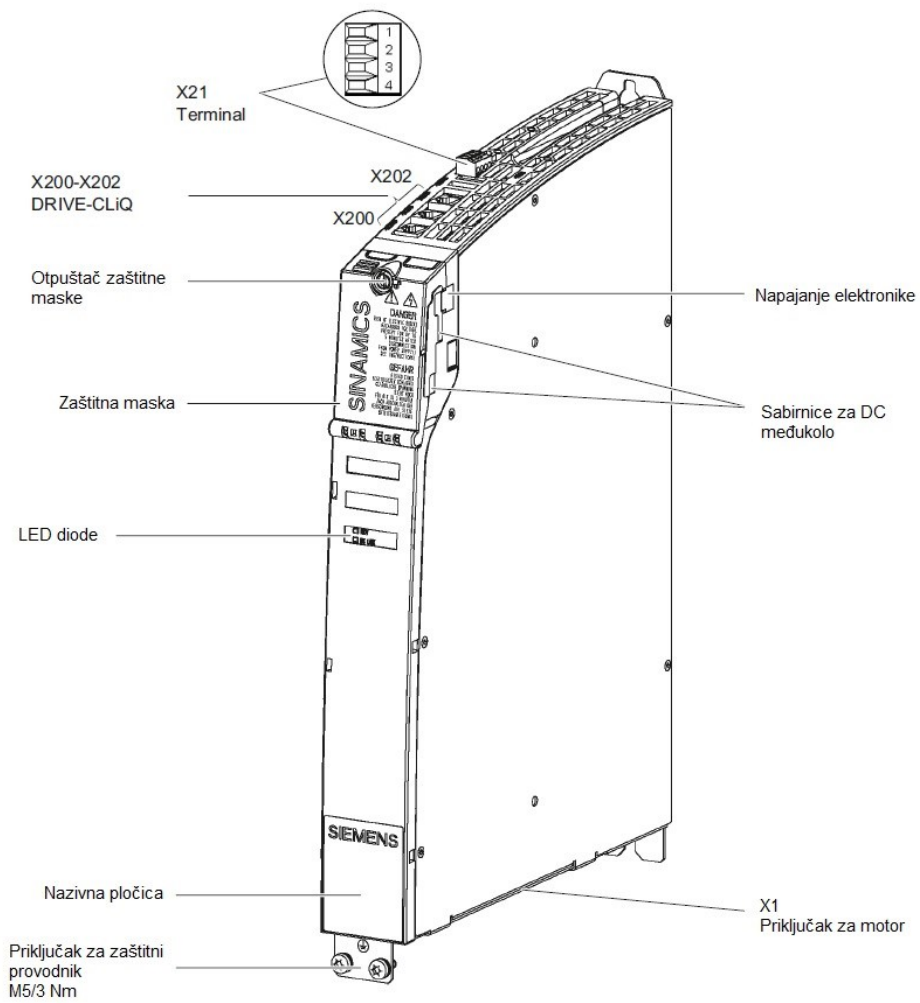
Slika 12 – Funkcionalni blok dijagram aktivnog ispravljača (eng. Active Infeed) iz Siemens-ovog uputstva [19]

### 3.3 Motorni modul (Invertorski modul)

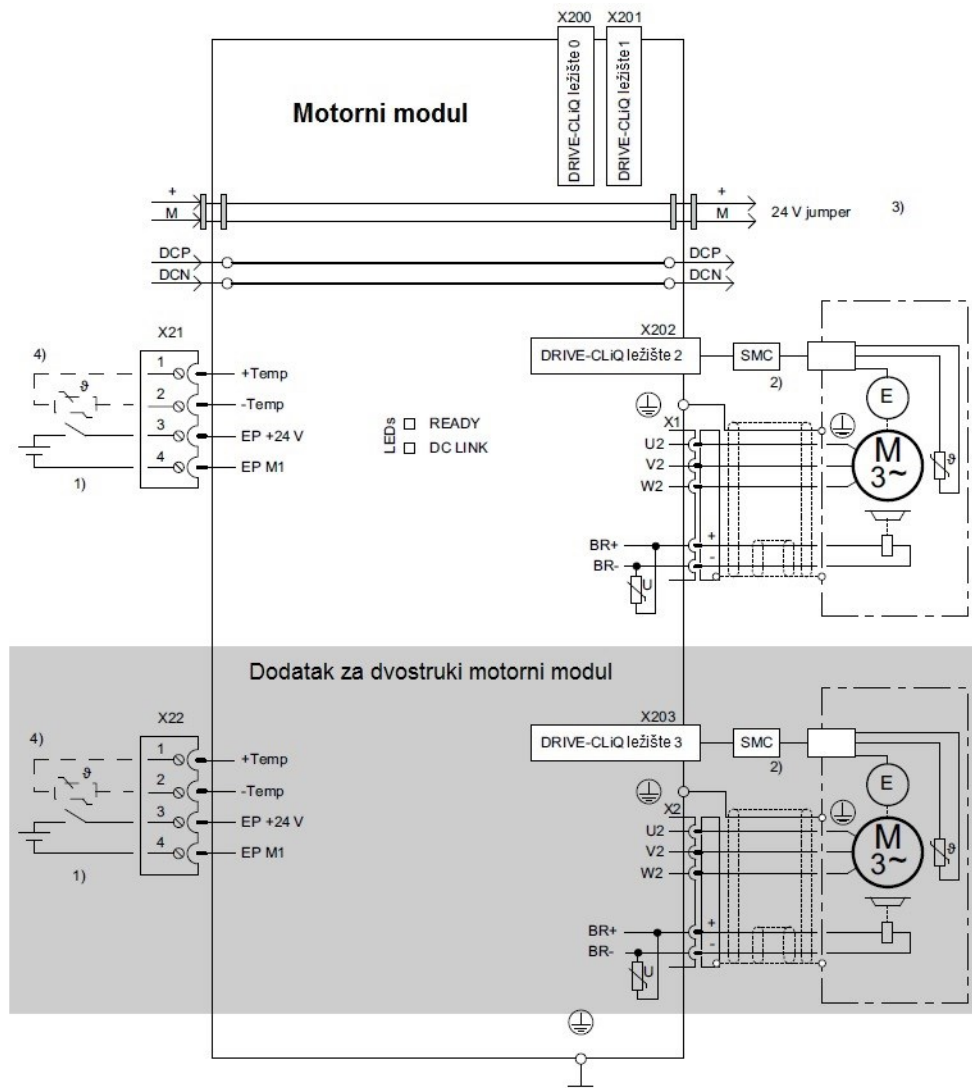
Motorni modul predstavlja inverter koji obezbeđuje napajanje motoru, koji je povezan na njega. Napajanje ovom modulu se obezbeđuje preko jednosmernog međukola koje je veza sa prethodnim modulom (aktivnim ispravljačem). Motorni modul mora biti povezan sa kontrolnom jedinicom preko *DRIVE-ClIQ*-a. Funkcije upravljanja motornim modulom su implementirane u upravljačku jedinicu. Postoji mogućnost za povezivanje i dva motora na jedan aktivni ispravljač. To se realizuje pomoću dvostrukog motornog modula [18].

Izgled motornog modula i primer sa načinom za njegovo povezivanje prikazani su na Slici 13 i 14. U eksperimentalnoj postavci korišćen je samo jedan motorni modul (jednostruki motorni modul).





Slika 13 – Jednostruki motorni modul sa unutrašnjim hlađenjem (16 kW) [18]



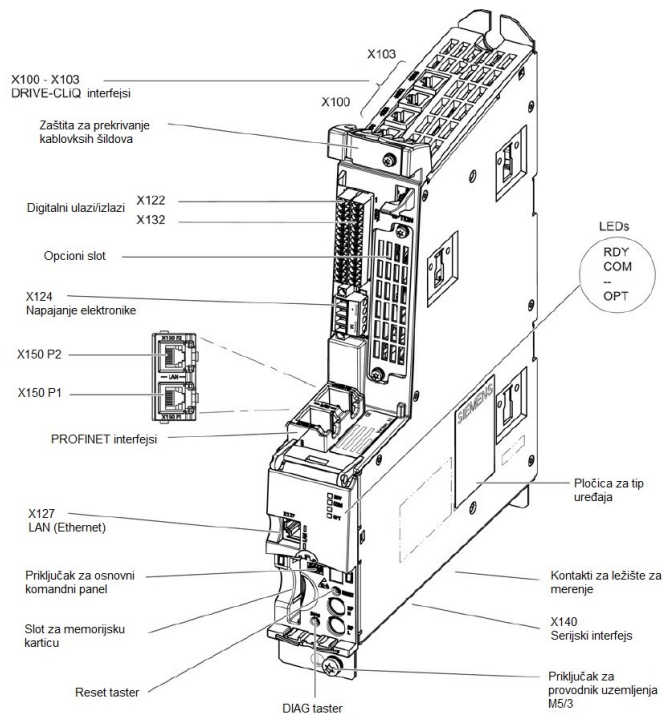
- 1) Neophodno radi sigurnosti
- 2) Senzorski modul (eng. Sensor Modules Cabinet) neophodan za motore koji nemaju DRIVE-CLiQ interfejs
- 3) 24 V za naredni modul
- 4) Opciono (npr. za motor bez enkodera)

Slika 14 – Primer sa načinom za povezivanje motornog modula [18]

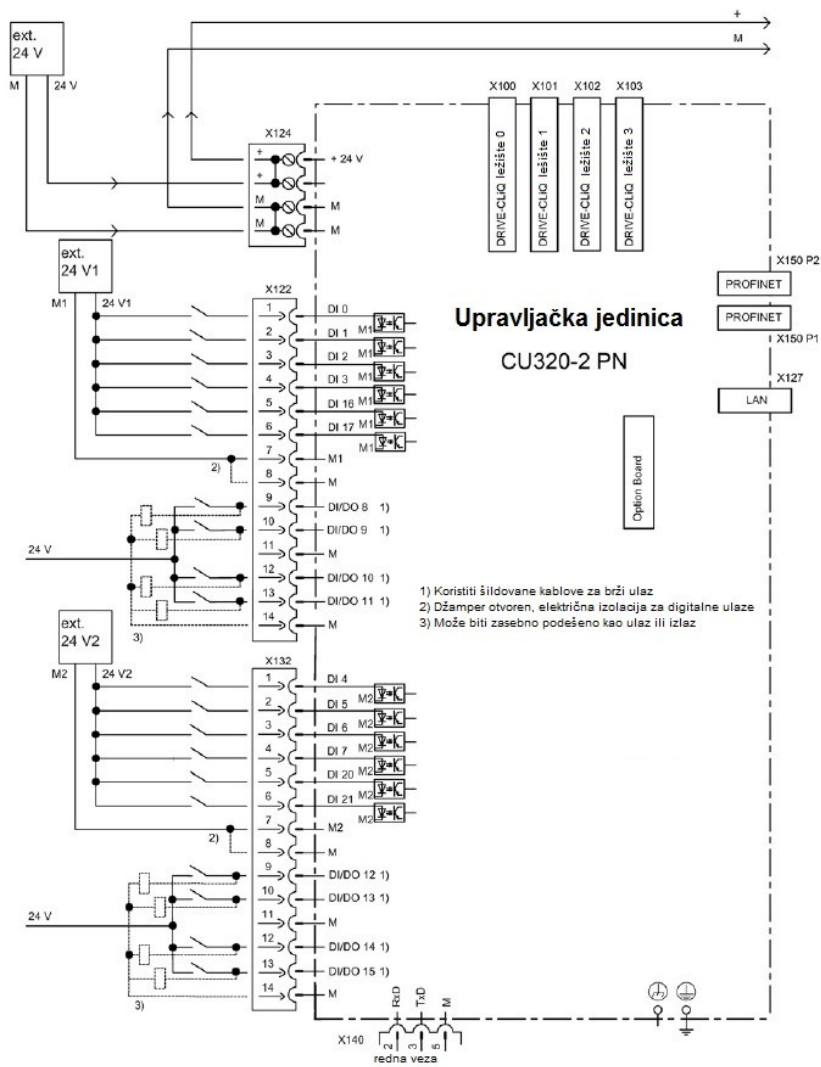
### 3.4 Upravljačka jedinica frekventnog pretvarača

Sva „inteligencija“ pogona sa svim regulacionim funkcijama je smeštena u upravljačku jedinicu. Ovaj modul je sposoban da na pogonu primenjuje vektorsko, servo i  $U/f$  upravljanje. Takođe, može da vrši regulaciju brzine i momenta uz još dosta dodatnih naprednih funkcija [20]. Dakle, upravljačka jedinica je centralni modul iz koga se upravlja svim delovima frekventnog pretvarača. Upravljačka jedinica komunicira sa ostalim komponentama pomoću *DRIVE-CliQ*-a. U ovoj eksperimentalnoj postavci upravljačka jedinica komunicira sa računarom pomoću *PROFINET* interfejsa. Ona je dizajnirana da se koristi za nekoliko pogona. Broj pogona sa promenljivom brzinom zavisi od potrebnih performansi, specijalnih funkcija i načina upravljanja motorom (servo, vektorsko ili  $U/f$ ) [20].

Na Slici 15 prikazan je izgled upravljačke jedinice, dok je na Slici 16 prikazan primer sa načinom za njeno povezivanje.



Slika 15 – Upravljačka jedinica [20]



Slika 16– Primer sa načinom za povezivanje upravljačke jedinice [20]

### 3.5 Dodatne komponente

Frekventni pretvarač analiziran u ovom radu od dodatnih komponenti poseduje: modul za monitoring napona, enkoder i 24V adapter za napajanje elektronike.

#### *Modul za monitoring napona (VSM10)*

Ovaj modul meri (prati) napon napajanja pre mrežne reaktanse i šalje taj podatak delu upravljačke jedinice zaduženoj za regulaciju aktivnog ispravljača. Postoji opcija da se ova komponenta koristi da bi se povećao stepen otpornosti na nepravilnosti u napajanju iz mreže. Kao dodatak osnovnoj nameni, postoji mogućnost da se u ovaj modul uključi temperaturni senzor koji bi pratio temperaturu mrežne reaktanse [21].

Korišćenje ovog modula se preporučuje u pogonima koji rade u uslovima sa značajnim fluktuacijama frekvencije [22].

#### *Senzorski modul*

Kao senzorski modul koristi se SMC30. U njemu se procenjuju signali koji stižu sa enkodera i prilagođavaju se upravljačkoj jedinici, sa kojom je povezan preko *DRIVE-CLiQ*-a. Dakle on upravljačkoj jedinici šalje podatke o brzini i poziciji rotora ali, ako je potrebno, i o temperaturi motora i referentnoj tački [21].

#### *24V adapter*

Ovaj modu predstavlja jednofazni ispravljač pomoću kojeg se jednofazni naizmenični napon iz glavnog napajanja (220 V, 50 Hz) pretvara u 24 V jednosmerni napon. Sva elektronika ovog frekventnog pretvarača se napaja ovim naponom.

### 3.6 Frekventni pretvarač SINAMICS G120

Frekventni pretvarač *SINAMICS G120* se u analiziranoj eksperimentalnoj postavci koristi za upravljanje asinhronim motorom, koji predstavlja opterećenje glavnom asinhronom motoru (upravljan preko pretvarača S120). Sastoji se iz dve glavne komponente: upravljačke jedinice i napojnog modula. Upravljačka jedinica upravlja i prati rad napojnog modula, kao i motora koji je povezan na pretvarač [23].

Pomoću ovog frekventnog pretvarača, u analiziranoj eksperimentalnoj postavici, na motor kojim on upravlja primenjeno je diskretno vektorsko upravljanje i motor radi u regulaciji momenta. Pri kočenju motora, energija koju motor proizvodi se disipira na otporniku za kočenje. Napojni modul kontroliše otpornik za kočenje preko integrisanog kočnog modula [23].

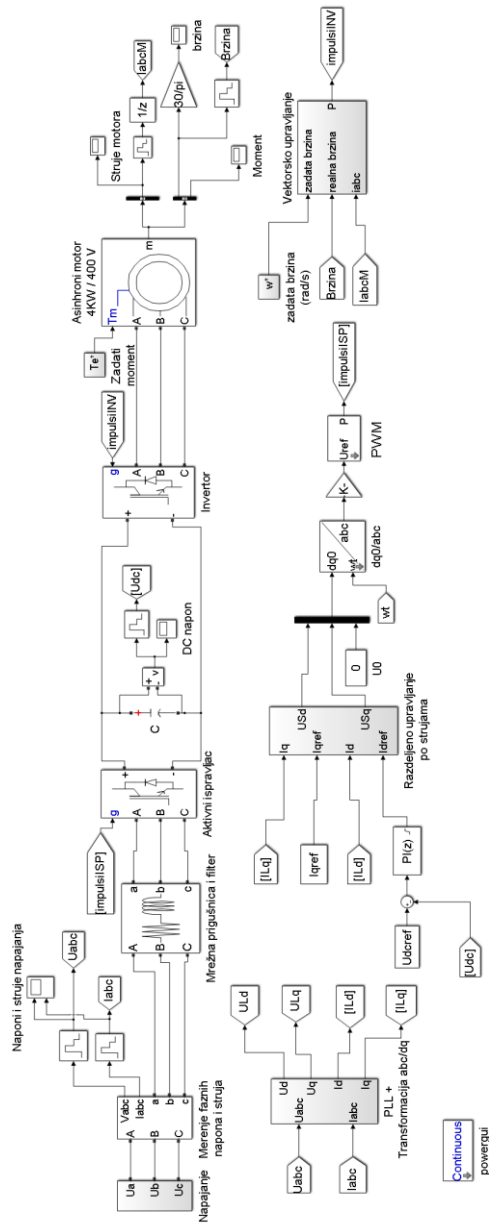
## 4 Simulacioni model i rezultati simulacije

### 4.1 Model analiziranog sistema u programskom alatu Simulink

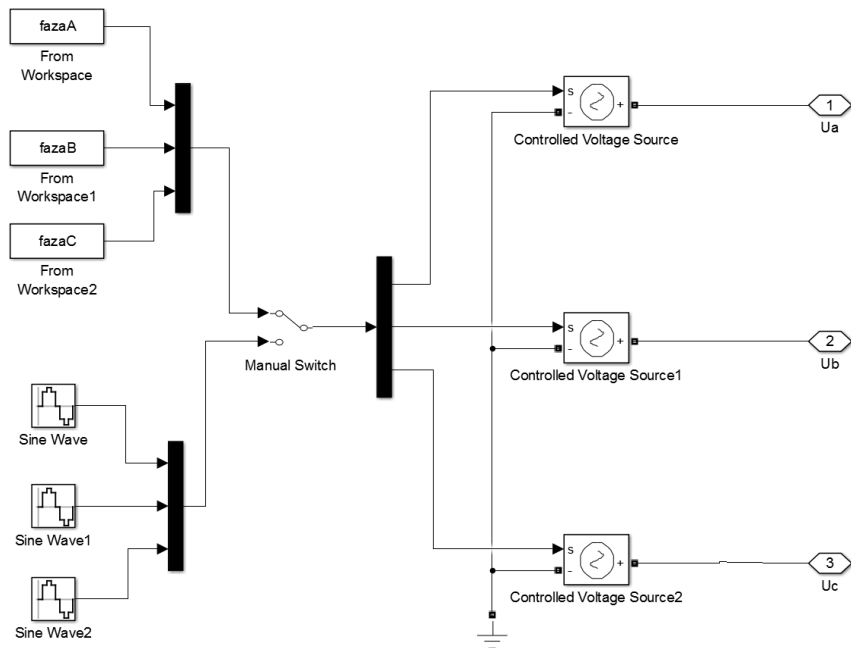
*Simulink* je grafičko programsko okruženje u sklopu programskog alata *MATLAB*, i koristi se za modelovanje, simulaciju i analizu dinamičkih sistema [19]. *Simulink* sadrži bogatu biblioteku raznih komponenti (blokova). Korisnik može da menja postojeće blokove, ali i da pravi svoje i tako formira željeni dinamički sistem. Simulacioni model realizovan u programskom alatu *Simulink*, prema blok dijagramu sa Slike 5, prikazan je na Slici 17.

Blok *Napajanje*, prikazan na Slici 18, realizovan je tako da postoji izbor da li će trofazni naponi biti idealnog sinusoidalnog oblika ili će se proslediti realan izgled napona (prethodno snimljen mernom opremom i eksportovan u zasebnu datoteku koju treba učitati pre puštanja simulacije).

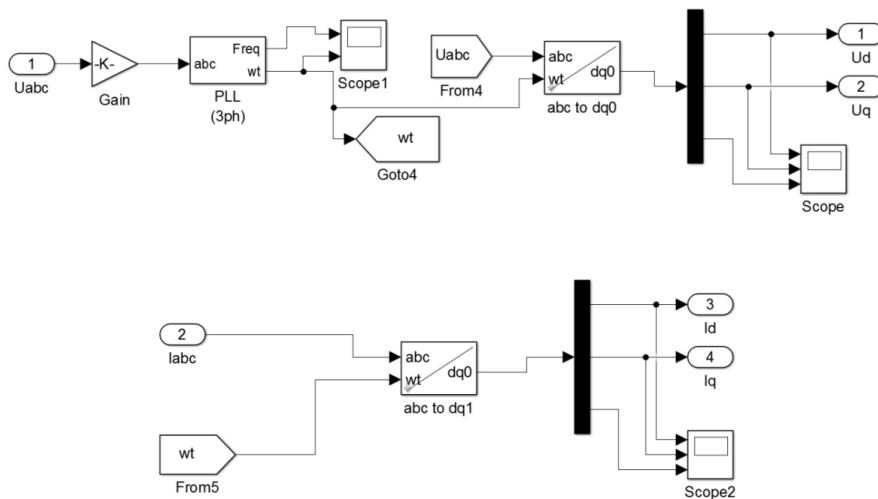
Za blokove koji predstavljaju aktivni ispravljač i inverter podešena je ista struktura i to IGBT tranzistori sa paralelnim diodama. Vrednosti za induktivnost  $L$  i otpornost  $R$  koje se nalaze između napajanja i aktivnog ispravljača, kao i za kondenzator  $C$  u jednosmernom međukolu biće predstavljene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



Slika 17. Blok dijagram simulacionog modela pogona sa aktivnim ispravljačem sa VOC upravljanjem realizovan u Simulink-u



Slika 18 Sadržaj bloka Napajanje sa Slike 17



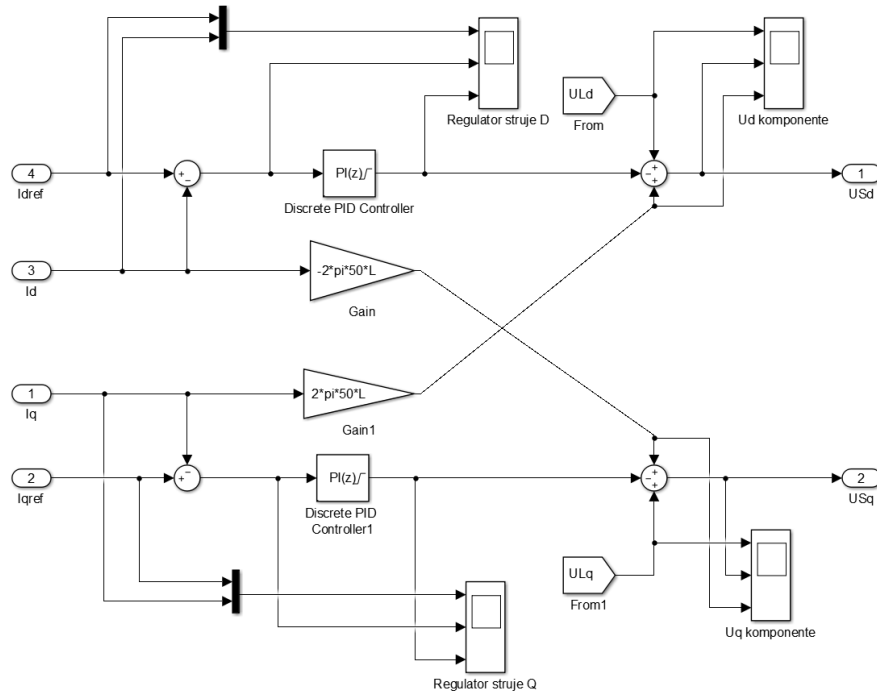
Slika 19 Sadržaj bloka PLL+Transformacija abc/dq sa Slike 17

U bloku *PLL+Transformacija abc/dq* (Slika 19) određuje se frekvencija i faza napona napajanja pomoću *PLL* bloka i vrši se transformacija ulaznih napona i struja iz *abc* sistema u sinhrono rotirajući *dq* sistem. Blok za

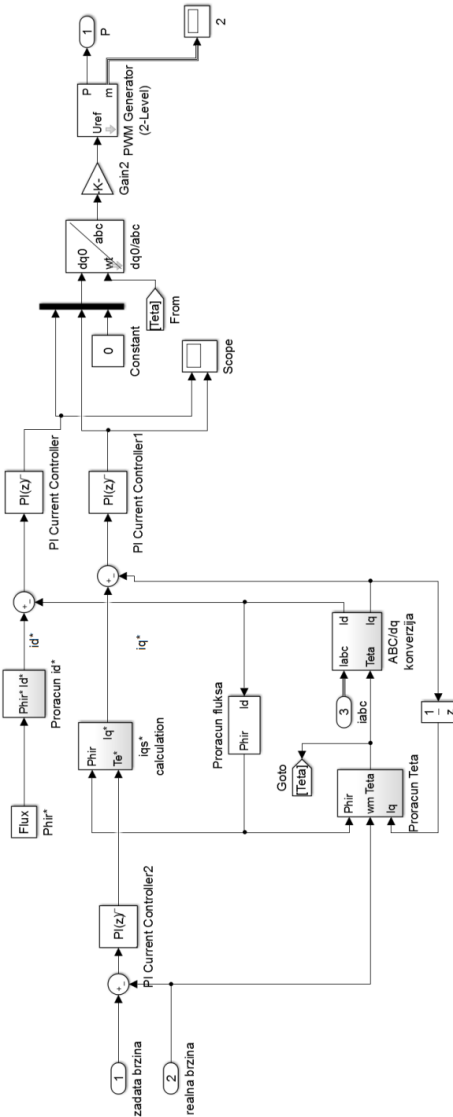


razdvojenu regulaciju po komponentama struje prikazan je na Slici 20 i predstavlja realizaciju blok dijagrama sa Slike 6.

Vektorsko upravljanje primenjeno na asinhronom motoru u simulaciji prikazano je na Slici 21. Realizovano je pomoću matematičkog modela pogona sa vektorskim upravljanjem.



Slika 20 Realizacija razdvojene regulacije po komponentama struje



Slika 21 Realizacija vektorskog upravljanja za asinhroni motor u simulaciji

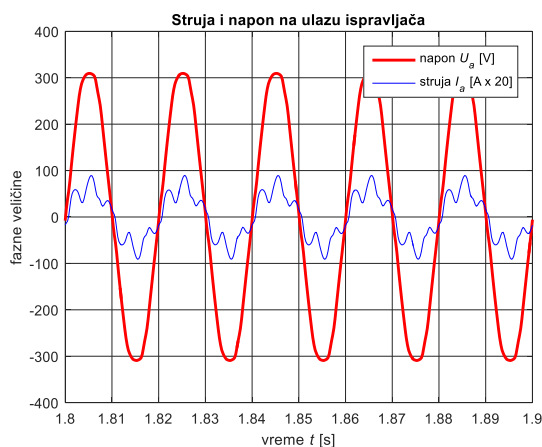
Značajni parametri koje je pre puštanja simulacije neophodno učitati prikazani su u Tabeli 1. Određene veličine (moment opterećenja  $M_m$  [Nm] i brzina obrtanja rotora  $n$  [ob/min]) nisu navedeni u tabeli jer će se menjati u zavisnosti od režima koji se posmatra u predstavljenom sistemu.

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	$K_{ij}$	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

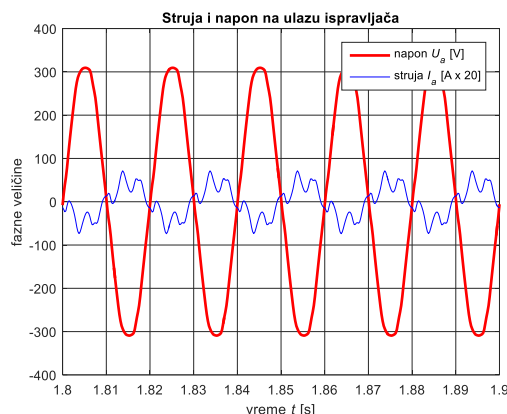
## 4.2 Talasni oblik ulazne struje

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 snaga 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 Slici 22 su prikazani fazni napon i struja u opisanom režimu rada. Treba napomenuti da su u simulaciji korišćeni isti naponi napajanja kao i u realnom sistemu i to oni sa manjim izobličenjem. Takođe, treba reći da su karakteristike na Slici 22 i dobijene pri momentu opterećenja motora od 13Nm (50% nominalnog momenta) i brzini obrtanja 1000 ob/min.



Slika 22 – Struja na ulazu ispravljača dobijena simulacijom pri realnom naponu napajanja u motornom režimu

Glavna prednost aktivnog ispravljača je rad sa negativnom aktivnom snagom, rekuperacija energije. Talasni oblici ulaznih faznih napona i struja pri radu sa negativnom aktivnom snagom su prikazani na Slici 23. U ovom režimu, aktivna snaga dolazi od motora koji radi u režimu regenerativnog kočenja, prolazi kroz inverter nazad u DC kolo pretvarača i injektira se u napojnu mrežu. Gubici u pretvaraču se pokrivaju snagom iz motora što rezultuje nešto manjom snagom koja je injektirana u mrežu od one koju zaista motor proizvodi u generatorskom režimu [1]. U ovom slučaju referenca brzine je ista kao i u motornom režimu rada a moment opterećenja je istog inteziteta ali suprotnog znaka.



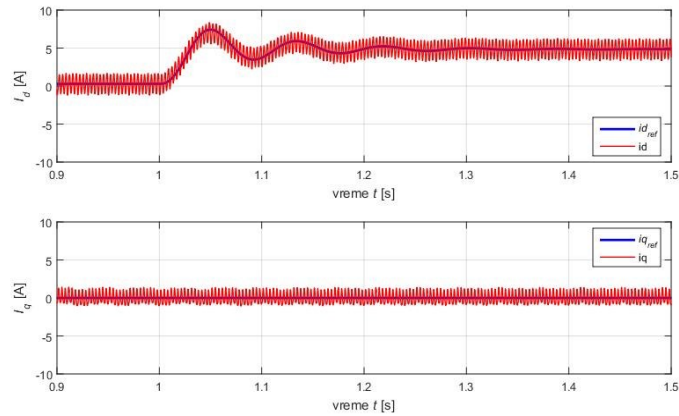
Slika 23 - Struja na ulazu ispravljača dobijena simulacijom pri realnom naponu napajanja u regenerativnom režimu

Razlog za to što je pik struje veći pri radu ispravljača sa pozitivnom snagom (vidi se ako se uporede Slika 22 i Slika 23) je to što je snaga koju motor troši u standardnom režimu praktično jednaka snazi koju on proizvodi u generatorskom režimu rada, ako je moment po intezitetu isti a suprotnog znaka. Deo snage se troši pri transformaciji energije u pretvaraču, pa je u motornom režimu rada snaga koja se uzima iz mreže jednaka zbiru gubitaka snage i snage koja je potrebna motoru, pa je samim tim i struja veća. A u generatorskom režimu, deo snage koju motor proizvodi troši se na gubitke u pretvaraču pa sa manje snage vraća u mrežu, zbog čega je i struja manja.

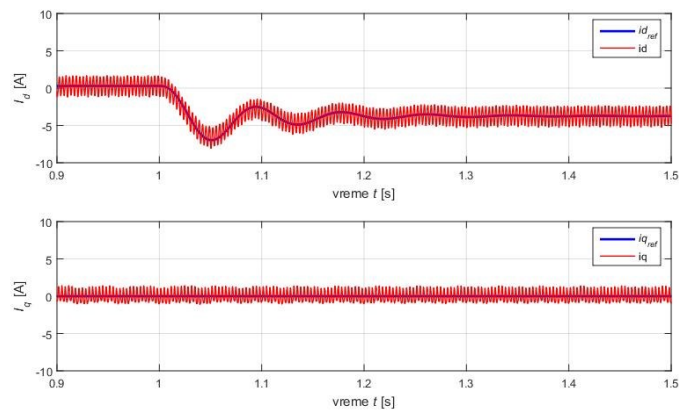
Dokaz da je faktor snage prema mreži približno jednak 1 u motornom režimu rada, odnosno da je približno -1 u generatorskom režimu rada predstavljen je na Slici 24, odnosno Slici 25. Na ovim slikama prikazane su aktivna i reaktivna komponenta struje zajedno sa njihovim referentnim vrednostima u oba režima 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 ne promenjena. 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 26 kao rezultat simulacije prikazan je harmonijski sastav napona napajanja pretvarača. Harmonijski sastav struje koju pretvarač uzima iz mreže u motornom režimu rada, dobijene simulacijom, prikazan je na Slici 27. Na Slici 28 prikazan je harmonijski sastav tih struja u generatorskom režimu rada. Osim toga, sa grafika dobijenih simulacijom (Slika 27 i Slika 28) 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

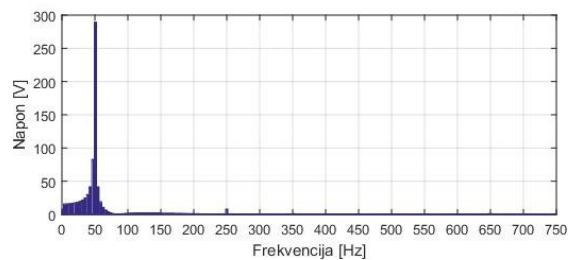
generatorskog režima. Naime, generatorski režim je dobijen tako što je motor opterećen istim momentom kao i u motornom režimu ali suprotnog znaga. Činjenice da model motora uvažava trenje kao i ostale gubitke u motoru ima za posledicu da on proizvodi manju snagu nego što troši u normalnom režimu.



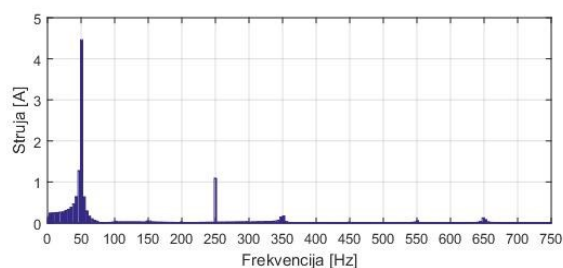
Slika 24. Referentne i ostvarene komponente struja u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu pri povećanju opterećenja motora



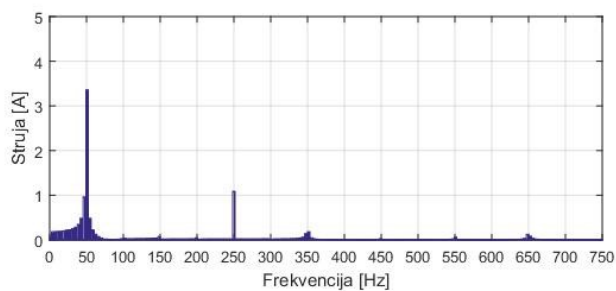
Slika 25. Referentne i ostvarene komponente struja u sinhrono rotirajućem koordinatnom sistemu u period kada motor proizvodi električnu energiju



Slika 26. Harmonijski sastav napona napajanja ispravljača



Slika 27. Harmonijski sastav signala struje na ulazu u ispravljač kada pogon radi u motornom režimu



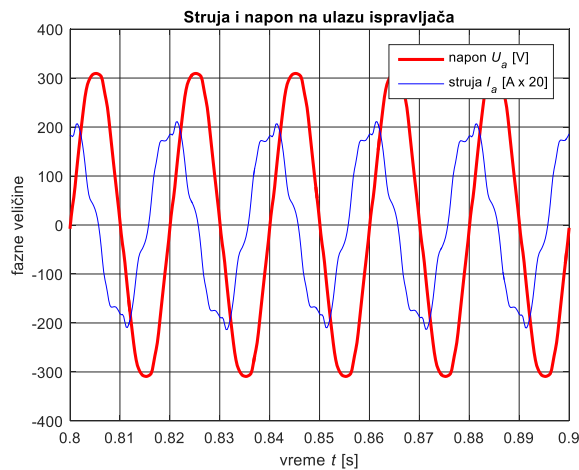
Slika 28. Harmonijski sastav signala struje na ulazu u ispravljač dobijenog simulacijom kada pogon radi u generatorskom režimu

### 4.3 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 kompezuje reaktivnu snagu ostalih potrošača koji su povezani na

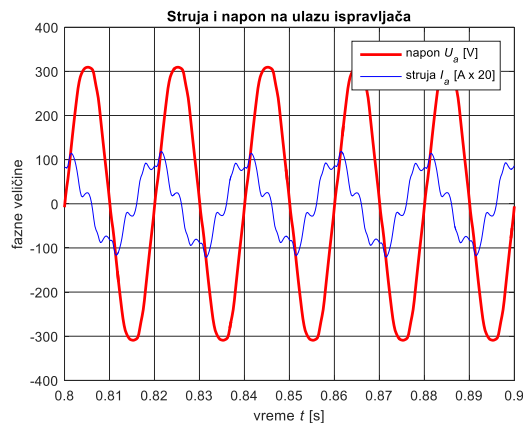
mrežu u istoj tački gde i pretvarač. Preduslov za rad u ovom režimu je da se dimenzionisanjem pogona obezbedi dovoljna strujna margina. Da bi se ilustrovala ova karakteristika pogona, na predstojećim slikama su prikazani talasni oblici faznih napona i struja sa pozitivnom (induktivnom) i negativnom (kapacitivnom) reaktivnom snagom koju pogon razmenjuje sa mrežom. Treba naglasiti da reaktivna snaga nije neophodna za rad ovog pogona, i zato je inače podešena da bude jednaka nuli [1].

Na Slici 29, i na Slici 30 na osnovu simulacije predstavljeni su slučajevi kada pogon sa akativnim ispravljačem predstavlja kapacitivno opterećenje, a motor je neopterećen (aktivni ispravljač radi sa negativnom reaktivnim snagom i aktivnom snagom praktično jednakom nuli). Takođe, treba reći da je u slučaju prikazanom na Slici 30 i reaktivna energija koja se razmenjuje sa mrežom manja nego u u slučaju prikazanom na prve dve slike, jer je zadata reaktivna komponenta struje duplo manja ( $i_{q,ref} = 5$  A u odnosu na  $i_{q,ref} = 10$  A).



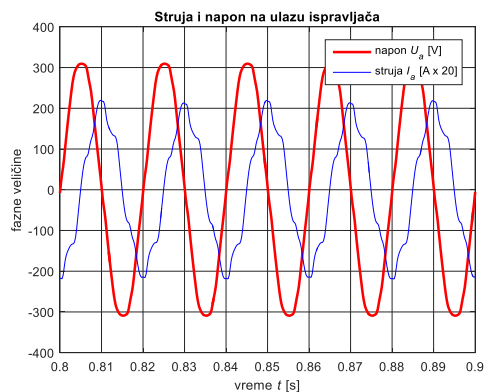
Slika 29 – Struja i napon na ulazu ispravljača dobijeni simulacijom (ispravljač radi sa negativnom reaktivnom ( $i_{q,ref} = 10$  A) i nultom aktivnom snagom)



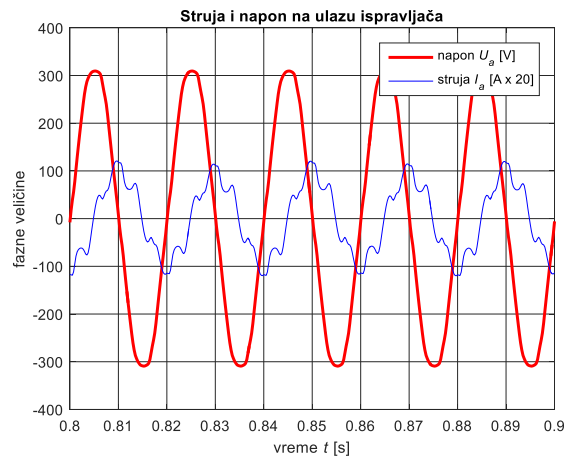


Slika 30 – Struja i napon na ulazu ispravljača dobijeni simulacijom (ispravljač radi sa negativnom reaktivnom ( $i_{q\ ref} = 5\ A$ ) i nultom aktivnom snagom)

Na Slikama 31 i 32 predstavljeni su na osnovu simulacije slučajevi kada pogon sa akativnim ispravljačem predstavlja induktivno opterećenje, a motor je neopterećen (aktivni ispravljač radi sa pozitivnom reaktivnim snagom i aktivnom snagom praktično jednakom nuli). Takođe, treba reći da je u slučaju prikazanom na Slici 32 i reaktivna energija koja se razmenjuje sa mrežom manja nego u u slučaju prikazanom na Slici 31 i jer je zadata reaktivna komponenta struje duplo manja ( $i_{q\ ref} = -5\ A$  u odnosu na  $i_{q\ ref} = -10A$ ).



Slika 31 – Struja i napon na ulazu ispravljača dobijeni simulacijom (ispravljač radi sa pozitivnom reaktivnom ( $i_{q\ ref} = -10A$ ) i nultom aktivnom snagom)

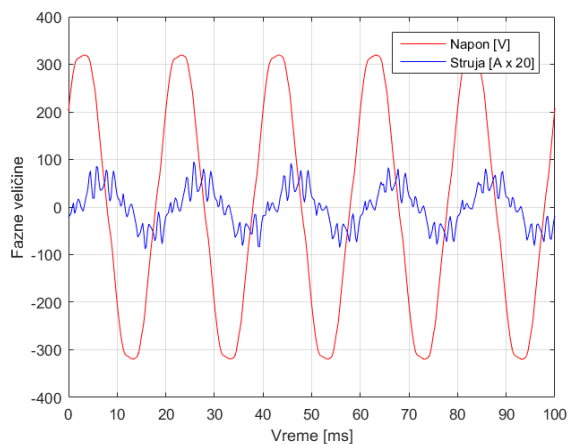


Slika 32 – Struja i napon na ulazu ispravljača dobijeni simulacijom (ispravljač radi sa pozitivnom reaktivnom ( $i_{q\ ref} = -5A$ ) i nultom aktivnom snagom)

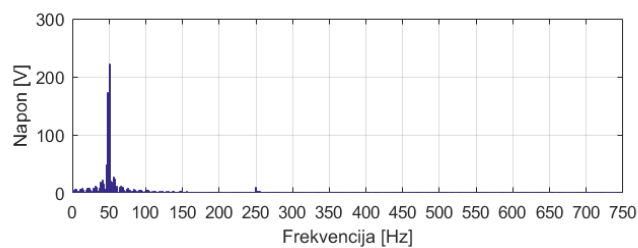
## 5 Eksperimentalni rezultati

### 5.1 Talasni oblik ulazne struje

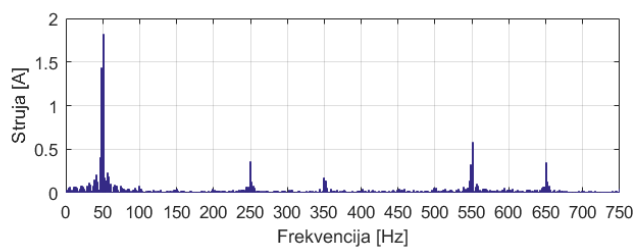
Talasni oblik ulazne struje pretvarača koji radi u režimu praznog hoda (u slučaju kada nije priključen motor) prikazan je na Slici 33. Fazni napon prikazan na slici sadrži harmonijska izobličenja izazvana nelinearnim potrošačima kao što su monofazna kompjuterska napajanja i fluorescentno osvetljenje u zgradi fakulteta. Iz tog razloga, ulazna fazna struja je izobličena usled izobličenja napona, i mala količina reaktivne snage se razmenjuje između pretvarača i mreže. Amplitudski spektar faznog napona je prikazan na Slici 34, a fazne struje na Slici 35.



Slika 33. Talasni oblik faznog napona i struje u režimu praznog hoda pretvarača



Slika 34. Amplitudski spektar faznog napona – rad pretvarača u praznom hodu

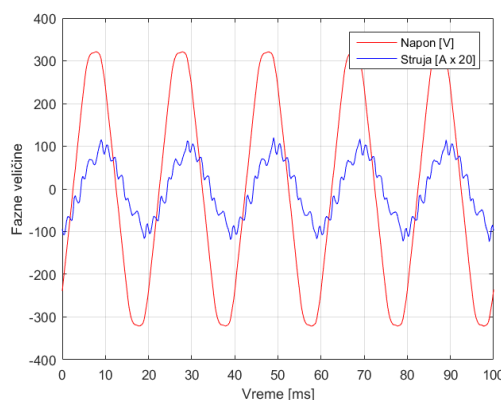


Slika 35 Amplitudski spektar fazne struje – rad pretvarača u praznom hodu

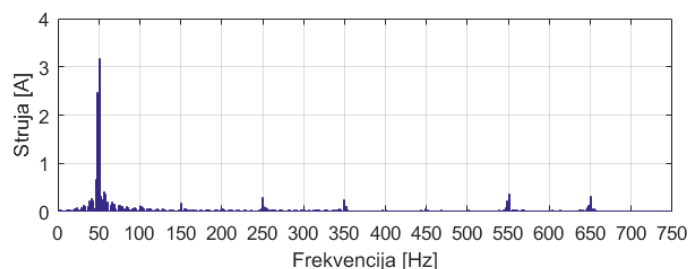
## 5.2 Motorni režim rada

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 snaga 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 energetsom pretvaraču (ispravljač, DC kolo i inverter). Na Slici 36 su prikazani napon napajanja i ulazna struja pretvarača. Amplitudski spektar faznog napona je praktično isti u svim režimima kao na Slici 34, a amplitudski spektar fazne struje za ovaj slučaj je prikazan na Slici 37. Vidi se da su osetno smanjeni harmonici koji se javljaju u struji napajanja (peti, sedmi, jedanaesti i trinaesti harmonik) u odnosu na prethodni slučaj.



Slika 36. Talasni oblici faznih veličina napona napajanja i struje na ulazu u pretvarač - pretvarač radi sa pozitivnom aktivnom snagom

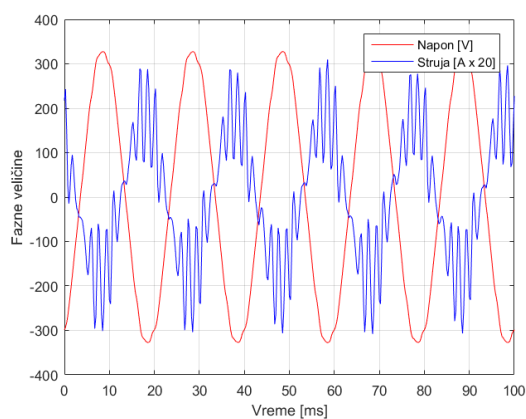


Slika 37. Amplitudski spektar fazne struje – rad pretvarača sa pozitivnom aktivnom snagom

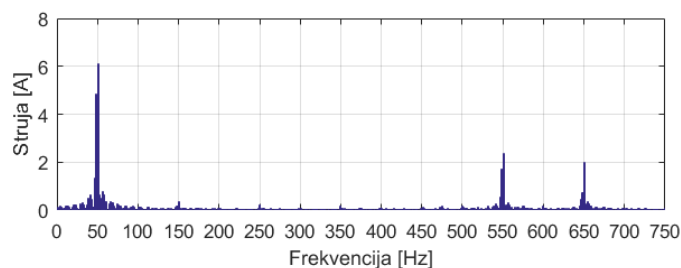
### 5.3 Generatorski režim rada

Glavna prednost aktivnog ispravljača je rad sa negativnom aktivnom snagom, rekuperacija energije. Talasni oblici ulaznih faznih napona i struja pri radu sa negativnom aktivnom snagom su prikazani na Slici 38, a amplitudski spektar mrežne struje na Slici 39. U ovom režimu, aktivnu snagu generiše

motor koji radi u režimu regenerativnog kočenja. Energija se invertorom konvertuje i snabdeva jednosmerno međukolo pretvarača i injektira u napojnu mrežu. nadoknađuje prolazi kroz inverter nazad u DC kolo pretvarača i injektira se u napojnu mrežu. Gubici snage u pretvaraču nadoknađuju se iz generisane snage motora, što rezultuje nešto manjim snagom koja se vraća u mrežu, od one koju motor zaista proizvodi u genetarorskom režimu rada.



Slika 38 . Talasni oblici faznih veličina napona napajanja i struje na ulazu u pretvarač - pretvarač radi sa negativnom aktivnom snagom

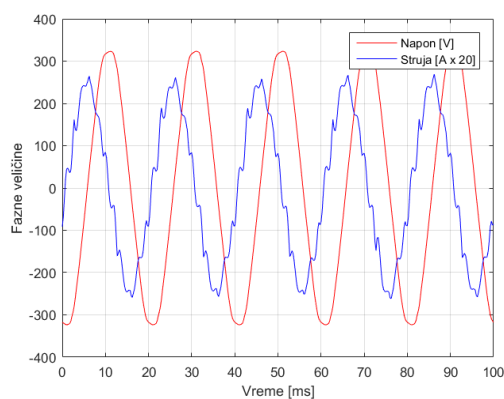


Slika 39. Talasni oblici faznih veličina napona napajanja i struje na ulazu u pretvarač - pretvarač radi sa negativnom aktivnom snagom

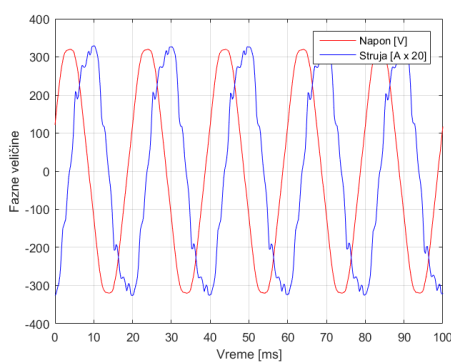
#### 5.4 Kompenzacija reaktivne snage na mestu gde je pretvarač povezan sa mrežom

Osim svoje glavne funkcije da snabdeva energijom potrošače ili da vrši rekuperaciju aktivne snage pogona, pretvarač sa aktivnim ispravljačem ima mogućnost da radi 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 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 Slici 40 i Slici 41 su prikazani talasni oblici faznih napona i struja 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 je inače podešena da bude jednaka nuli.



*Slika 40. Talasni oblici faznih veličina napona napajanja i struje na ulazu u pretvarač - pretvarač radi sa nultom aktivnom i negativnom reaktivnom snagom (kapacitivno opterećenje)*



*Slika 41. Talasni oblici faznih veličina napona napajanja i struje na ulazu u pretvarač - pretvarač radi sa nultom aktivnom i pozitivnom reaktivnom snagom (induktivno opterećenje)*

## 6 Zaključak

Rad se bavi povećanjem energetske efikasnosti industrijskih elektromotornih pogona, što je kompleksan problem, uvažavajući glavne segmente u kojima energetska efikasnost može i treba biti unapređena. Značajna ušteda energije može biti postignuta radom pogona u energetske 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 troškovi pri radu (što se tiče energije) 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 rezultuje manjim gubicima u motoru i pretvaraču, bez uticaja na ostale tehničke karakteristike pogona.

Primena regulisanih aktivnih ispravljača kao ulazne komponente energetskog pretvarača pruža još više mogućnosti za poboljšanje energetske efikasnosti. Rekuperacija energije kočenja 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 sinusoidalnom ulaznom 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 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 upotrebu ovakve topologije pretvarača u većem broju 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, Laposava Ristić, „Power converters on mining machines“, *18th INTERNATIONAL SYMPOSIUM on POWER ELECTRONICS – Ee 2015*, Novi Sad, Srbija, 28.-30. oktobar, 2015.
- [8] Laposava 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, Laposava 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/GH\\_2\\_0113\\_eng\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/012/68042012/att_97659/v1/GH_2_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)
- [20] *SINAMICS S120/S150 – List Manual – Edition 04/2014* ([https://cache.industry.siemens.com/dl/files/911/99682911/att\\_863921/v1/S120\\_S150\\_List\\_Manual\\_LH1\\_0414\\_eng.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/911/99682911/att_863921/v1/S120_S150_List_Manual_LH1_0414_eng.pdf), 07.09.2017.)
- [21] *SINAMICS S120 – Control Units and additional system components – Manual – Edition 04/2014* ([https://www.automatyka.siemens.pl/docs/docs\\_ia/S120-CU-and-components-0414-en.pdf](https://www.automatyka.siemens.pl/docs/docs_ia/S120-CU-and-components-0414-en.pdf), 07.09.2017.)
- [22] *SINAMICS S120 – Control Units and Supplementary System Components Manula 11/2009* ([http://www.industry.usa.siemens.com/datapool/us/dt/drives/docs/drv-sinamics\\_s120-cu\\_comp\\_manual.pdf](http://www.industry.usa.siemens.com/datapool/us/dt/drives/docs/drv-sinamics_s120-cu_comp_manual.pdf), 07.09.2017.)
- [23] *SINAMICS S120 – Function Manual* · 01/2012 ([https://cache.industry.siemens.com/dl/files/625/59737625/att\\_59993/v1/FH\\_1\\_012012\\_eng\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/625/59737625/att_59993/v1/FH_1_012012_eng_en-US.pdf), 07.09.2017.)

**Abstract.** The aim of this paper is to present, analyse and demonstrate the benefits of using an active bidirectional rectifier as a front end converter in the variable speed drive converter of an electric motor. The use of an active bidirectional rectifier allows for more advanced

operation of the drive, in terms of current waveshape, energy recovery during braking or generating mode of the motor. Also the compensation of the reactive power of consumers connected to the same common point of connection to network can be performed with the active bidirectional rectifier of the proposed drive. In addition to the basic drive topology with an active rectifier and corresponding control mode, the experimental results and results of the simulation on the model are given in several operating points of case study 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, Marko Šinik

Rad primljen u uredništvo: 16.06.2019. godine.

Rad prihvaćen: 22.12.2019. godine.