Implementacija izvora fleksibilnosti i naprednih algoritama upravljanja za podršku modernim elektroenergetskim sustavima s visokim udjelom obnovljivih izvora energije

Radni paket WP4

Razvoj hibridnih poluvodičkih energetskih pretvarača

Isporučevina D.4.1.

Izrada i testiranje simulacijskog modela hibridnog energetskog pretvarača u programskom paketu MATLAB/Plecs

Instrument financiranja: Izvor 581 – Mehanizam za oporavak i otpornost
Poziv: IP-UNIST-05
Početak projekta: 1. listopada 2025.
Trajanje projekta: 48 mjeseci

Korisnik: FESB

Razina diseminacije		
PU	Javno	✓
CO	Povjerljivo, samo za članove projekta	

Funded by the European Union
NextGenerationEU

Informacije o isporučivom dokumentu

Administrativne informacije o dokumentu	
Akronim projekta:	FLEXsys
Broj projekta:	IP-UNIST-05
Broj isporučivog dokumenta:	D.4.1.
Puni naslov:	Izrada i testiranje simulacijskog modela hibridnog energetskog pretvarača u programskom paketu MATLAB/Plecs
Kratki naslov:	Simulacija i testiranje hibridnog energetskog pretvarača u MATLAB/Plecsu
Identifikator dokumenta:	FLEXsys2-D4.1.pdf
Korisnik:	FESB
Verzija izvješća:	V1.0
Ugovorni datum:	
Datum predaje izvješća:	01/10/2026
Razina diseminacije:	PU
Tip dokumenta:	Izvješće
Vodeći autor(i):	B. Terzić; G. Majić
Koautor(i):	
Ključne riječi:	Hibridni pretvarač, simulacijski model
Status:	konačna verzija

Zapisnik promjena

Datum	Verzija	Autor/Urednik	Sažetak promjena
01/10/2026	v1.0	FESB	Konačna verzija

Sadržaj

Informacije o isporučivom dokumentu 2
1 Hibridni energetski pretvarač 8
1.1 Struktura sustava 8
1.2 Mrežni AC/DC pretvarač 9
1.3 Baterijski DC/DC pretvarač 12
1.4 Fotonaponski DC/DC pretvarač 13
2 Simulacijski model i rezultati 14
2.1 Simulacijski model 14
2.2 Simulacijski rezultati 17
3 Zaključak 25

Popis slika

Slika 1.1 Osnovna energetska struktura hibridnog energetskog pretvarača 8
Slika 1.2 Shema energetskog kruga mrežnog AC/DC pretvarača 9
Slika 1.3 Rezultirajući vektori napona mreže (u_s) i struje filtera (i_f) u mirujućem αβ sustavu i rotirajućem *dq* sustavu 10
Slika 1.4 Blokovska shema VOC sustava upravljanja mrežnog AC/DC pretvarača 11
Slika 1.5 Načelna shema energetskog i regulacijskog kruga baterijskog pretvarača 12
Slika 1.6 Načelna shema energetskog i regulacijskog kruga fotonaponskog pretvarača 13
Slika 2.1 Simulacijski model hibridnog energetskog pretvarača u MATLAB/Plecs-u 14
Slika 2.2 Unutrašnjost bloka VOC 16
Slika 2.3 Unutrašnjost bloka Battery stack 16
Slika 2.4 Mrežni naponi i struje tijekom kombiniranog punjenja baterija 17
Slika 2.5 Radna i jalova snaga u točki priključenja na mrežu tijekom kombiniranog punjenja baterija 18
Slika 2.6 Filtrirani napon i struja baterija tijekom kombiniranog punjenja baterija 18
Slika 2.7 Napon i struja fotonaponskih modula tijekom kombiniranog punjenja baterija 19
Slika 2.8 Mrežni naponi i struje tijekom pražnjenja baterija 20
Slika 2.9 Radna i jalova snaga u točki priključenja na mrežu tijekom pražnjenja baterija 20
Slika 2.10 Filtrirani napon i struja baterija tijekom pražnjenja baterija 21
Slika 2.11 Napon i struja fotonaponskih modula tijekom pražnjenja baterija 21
Slika 2.12 Mrežni naponi i struje tijekom odabranog ciklusa 22
Slika 2.13 Radna i jalova snaga u točki priključenja na mrežu tijekom odabranog ciklusa 23
Slika 2.14 Filtrirani napon i struja baterija tijekom odabranog ciklusa 23
Slika 2.15 Napon i struja fotonaponskih modula tijekom odabranog ciklusa 24

Popis tablica

Tablica 2.1 Parametri LCL filtra 15

Popis kratica

PWM – modulacija širine impulsa (eng. *Pulse Width Modulation*)

VOC – naponski orijentiran sustav upravljanja (eng. *Voltage Oriented Control*)

SVM – prostorno vektorska modulacija (eng. *Space Vector Modulation*)

MPPT – algoritam praćenja točke maksimalne snage (eng. *Maximum Power Point Tracking*)

Sažetak

U ovom tehničkom izvještaju predstavljen je simulacijski model hibridnog energetskog pretvarača u programskom paketu MATLAB/Plecs. Simulacijski model hibridnog pretvarača obuhvaća mrežni AC/DC pretvarač, istosmjerni međukrug, baterijski DC/DC pretvarač te fotonaponski DC/DC pretvarač.

Mrežni AC/DC pretvarač sastoji se od dvorazinskog PWM izmjenjivača i LCL filtera te je u simulaciji implementirana upravljačko-regulacijska struktura VOC upravljanja istim.

Baterijski DC/DC pretvarač je dvosmjerni silazno-uzlazni pretvarač realiziran pomoću dva tranzistora i dvije povratne diode, te prigušnice na strani baterija.

Fotonaponski DC/DC pretvarač je uzlazni pretvarač koji je realiziran pomoću jednog tranzistora, jedne diode i prigušnice na strani fotonaponskih modula.

Također, modelirani su fotonaponski i baterijski moduli te su pritom korišteni parametri dostupnih fotonaponskih i baterijskih modula za koje je predviđeno da će biti korišteni pri realizaciji prototipa hibridnog pretvarača. Isto se može istaknuti i za ostale komponente sustava čiji su parametri bili neophodni pri izradi simulacijskog modela.

U izvještaju su dani rezultati testiranja simulacijskog modela u različitim stacionarnim i dinamičkim režimima rada sustava.

1 Hibridni energetski pretvarač

1.1 Struktura sustava

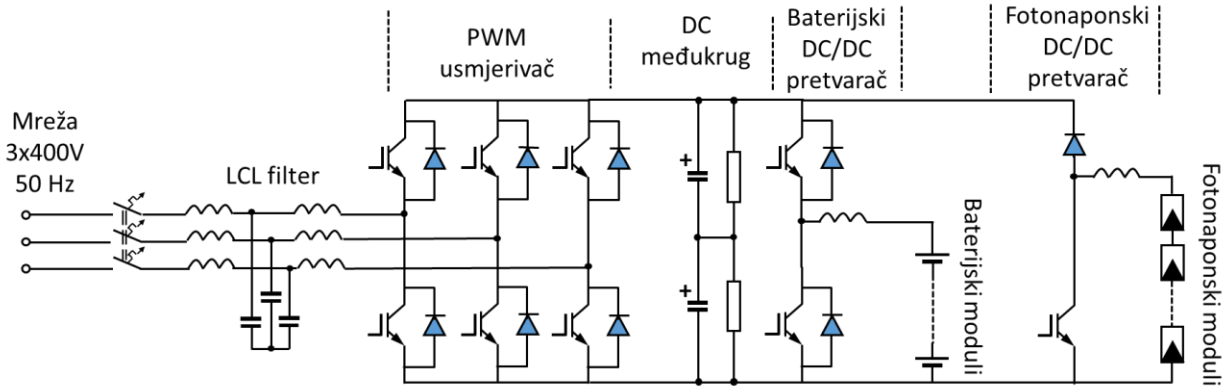
Osnovna energetska struktura hibridnog energetskog pretvarača prikazana je na slici 1.1. Hibridni pretvarač obuhvaća tri pretvarača: mrežni AC/DC pretvarač s istosmjernim međukrugom, baterijski DC/DC pretvarač te fotonaponski DC/DC pretvarač.

Mrežni pretvarač predstavlja energetsko sučelje sustava s mrežom te omogućava dvosmjerni tok energije. Ovaj pretvarač predstavljen je dvorazinskim PWM usmjerivačem s LCL filtrom pri čemu će biti implentiran VOC (eng. *Voltage Oriented Control*) sustav upravljanja pretvaračem.

Baterijski pretvarač služi za punjenje ili pražnjenje baterijskog spremnika energije, a realizira se pomoću dva tranzistora, dvije diode te prigušnice na strani baterija. Kada se baterije pune (tj. kada je smjer struje od pretvarača prema baterijama), pretvarač radi kao silazni te se upravlja samo gornjim tranzistorom. Pretvarač radi kao uzlazni kod pražnjenja baterija pri čemu se upravlja samo donjim tranzistorom. Ovakav način upravljanja moguć je ukoliko je napon istosmjernog međukruga veći od napona baterija.

Fotonaponski pretvarač sastoji se od tranzistora, diode i prigušnice na strani fotonaponskog modula, a radi kao uzlazni pretvarač. Pretvarač služi da bi se proizvedena energija fotonaponskih modula predala u istosmjerni međukrug.

Na slici su izostavljene upravljačko-regulacijske strukture pretvarača jer će iste biti predstavljene u nastavku ovog izvještaja prilikom opisa pojedinih dijelova sustava.

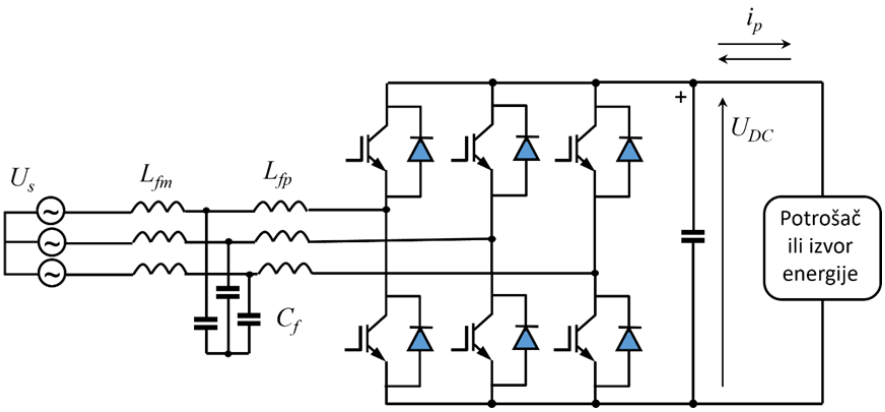


Slika 1.1 Osnovna energetska struktura hibridnog energetskog pretvarača

1.2 Mrežni AC/DC pretvarač

Na slici 1.2 prikazana je energetski krug mrežnog AC/DC pretvarača koji se u stručnoj literaturi često naziva i PWM usmjerivačem. Osnovne značajke i prednosti ovog pretvarača s IGBT tranzistorima u odnosu na ostale diodne ili tiristorske mrežne pretvarače su: praktički sinusan valni oblik mrežne struje (THD < 5%), mogućnost dvosmjernog toka energije koristeći samo jedan trofazni IGBT most, postizanje referentne vrijednosti faktora snage (cos φ) u točki priključka na mrežu u induktivnom ili kapacitivnom području (najčešće se odabire cos φ=1).

Energetski krug sastoji se od trofaznog LCL filtra, trofaznog IGBT mosta s povratnim diodama i kondenzatora na istosmjernoj strani. Na istosmjernoj strani spaja se potrošač ili izvor energije što određuje i smjer struje i_p , tj smjer energije kroz pretvarač iz mreže ili u mrežu.



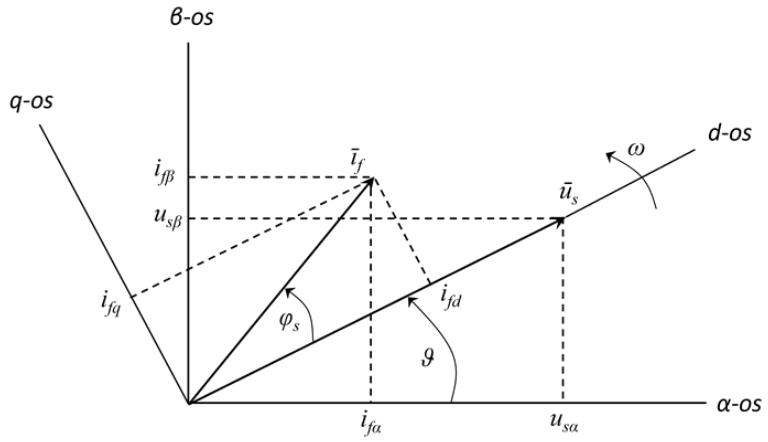
Slika 1.2 Shema energetskog kruga mrežnog AC/DC pretvarača

Ovaj AC/DC pretvarač je uzlazni pretvarač zahvaljujući prigušnicama u okviru LCL filtra koje u kombinaciji s odgovarajućim radom IGBT tranzistora i dioda omogućavaju upravljivost istosmjernog napona na vrijednostima većim od maksimalnih vrijednosti linijskog mrežnog napona. Drugim riječima, srednja vrijednost istosmjernog napona može se regulirati, ali samo ako je ta vrijednost veća od izlaznog napona trofaznog diodnog ispravljača, odnosno napon kondenzatora treba biti veći od maksimalnog napona koji bi bio u slučaju korištenja samo diodnog mosta, jer su na taj način diode reverzno polarizirane. U suprotnom bi diode stalno vodile i ne bi bilo moguće upravljanje.

Premda je za osnovni princip rada pretvarača nužna samo trofazna prigušnica (L-filter) na mrežnoj strani, danas se praktički uvijek koristi LCL ili LC filter. Tome je razlog filtriranje visokofrekvencijskih pulzacija struje pretvarača na mrežnoj strani budući se oni zatvaraju kroz kondenzatore LCL filtra, te se na taj način značajno poboljšava (smanjuje) ukupni faktor izobličenja struje mreže. S druge strane, nedostatak LCL filtra je što posjeduje rezonantnu frekvenciju koja može cijeli sustav učiniti nestabilnim ukoliko regulacijski krugovi nisu dobro podešeni.

U svrhu postizanja osnovnih karakteristika pretvarača (dvosmjerni tijek energije, željeni faktor snage u točki priključka na mrežu i približno sinusnu struju mreže), odabrana je metoda naponski orijentiranog sustava upravljanja (engl. *Voltage Oriented Control* - VOC) pretvaračem. VOC metoda upravljanja temelji se na transformaciji koordinata iz trofaznog *abc* koordinatnog sustava u dvofazni stacionarni αβ i rotirajući *dq* koordinatni sustav. Ova metoda osigurava visoku učinkovitost u stacionarnim i dinamičkim stanjima zahvaljujući brzoj unutarnjoj regulacijskoj petlji po struji o kojoj uvelike ovisi i stabilnost cjelokupnog sustava.

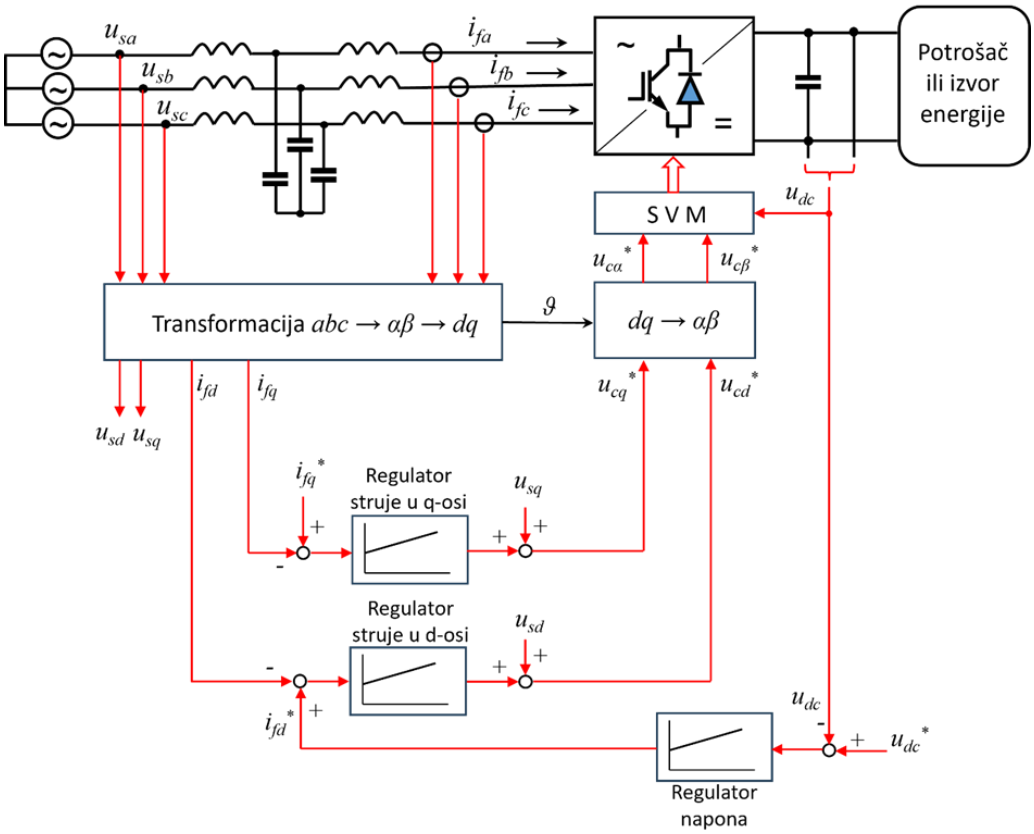
Struktura sustava upravljanja PWM usmjerivačem temelji se na vektorskoj regulaciji u sinkrono rotirajućem *dq* sustavu kojemu se *d*-os poklapa s vektorom napona mreže, tako da *dq* sustav rotira frekvencijom napona mreže. Na taj se način omogućuje regulacija po *d*- i *q*-komponentama struja koje su istosmjerne veličine, pa se mogu koristiti klasični PI regulatori. Na slici 1.3 prikazani su rezultirajući vektori napona mreže (u_s) i struje filtera (i_f) u mirujućem αβ sustavu i rotirajućem *dq* sustavu. Budući vektorski dijagram vrijedi samo za osnovni harmonik može se reći da je struja filtera približno i struja mreže.



Slika 1.3 Rezultirajući vektori napona mreže (u_s) i struje filtera (i_f) u mirujućem αβ sustavu i rotirajućem *dq* sustavu

Na slici 1.4 prikazan je blok dijagram sustava upravljanja PWM usmjerivačem. U sustavu upravljanja mjere se fazni naponi mreže, struje filtera na izmjeničnoj strani pretvarača i napon na istosmjernoj strani IGBT mosta. Potrebno je naglasiti da bi se sa stajališta sustava upravljanja umjesto struja filtera na strani pretvarača mogle mjeriti i mrežne struje. Međutim, koristi se mjerenje struja između LCL filtra i IGBT pretvarača iz praktičnih razloga s obzirom da je mjerenje struja na tom mjestu ionako nužno radi funkcija strujne zaštite IGBT mosta. Struktura sustava upravljanja je kaskadnog tipa s dvije unutrašnje regulacijske petlje po struji u *d*- i q-osi. Regulacijska petlja po struji u *d*-osi je unutrašnja petlja koja referentnu vrijednost dobiva od PI regulatora istosmjernog napona, što znači da je u kaskadnoj strukturi vanjska petlja izvedena po istosmjernom naponu koji se mjeri na kondenzatoru. Reguliranjem struja u *d*- i *q*-osi praktički se regulira posebno radna, a posebno jalova snaga, tj. može se postići željeni cos φ. Struja u *d*-osi (i_{fd}) je proporcionalna radnoj snazi, a struja u *q*-osi (i_{fq}) jalovoj snazi. Bez obzira da li se radna snaga uzima iz izmjenične mreže i predaje potrošaču na istosmjernoj strani pretvarača ili obrnuto, u svakom slučaju promjena te snage se događa na istosmjernoj strani što utječe na djelovanje PI regulatora istosmjernog napona. Pri svakoj promjeni radne snage regulator istosmjernog napona na svom izlazu mijenja referencu struje u *d*-osi, tj. referencu radne komponente struje mreže. S druge strane, na jalovu snagu ne utječe stanje sustava na istosmjernoj strani pretvarača, pa se referenca struje u *q*-osi, tj. referenca jalove komponente struje, zadaje proizvoljno i na taj način određuje cos φ u točki priključka na mrežu. Potrebno je naglasiti da se postavljena referenca jalove struje ponešto razlikuje u odnosu na stvarnu jalovu struju u točki priključka na mrežu zbog kapacitivne struje kroz kondenzatore LCL filtra. Tome je razlog što regulacijski krug struje mjeri struje između LCL filtra i IGBT mosta, a ne struju mreže, što znači da referenca jalove struje definira jalovu komponentu struje između LCL filtra i pretvarača u odnosu na napon mreže. U većini aplikacija se u točki priključka želi postići približno cos φ =1, pa se referenca jalove struje postavlja približno na 0. Izlazni signali PI regulatora struje u *d*- i *q*-osi definiraju reference napona u *d*- i *q*-osi. Na slici 1.4 može se primijetiti

da se izlaznim signalima regulatora dodaju signali mjerenih mrežnih napona u *d*- i *q*-osi (u_{sd}, u_{sq}). Na taj se način osigurava da je na početku rada usmjerivača (izlazni signali PI regulatora su jednaki nuli) napon IGBT mosta po iznosu i fazi jednak naponu mreže, što uvjetuje da početna struja filtera bude jednaka nuli i da nema velikih promjena struje u početnoj prijelaznoj pojavi. Nakon toga PI regulatori utječu samo na reguliranje razlike napona pretvarača u odnosu na napon mreže da bi se postigle zahtijevane referentne struje u obje osi. Izlazni signali PI regulatora struje korigirani s mjerenim mrežnim naponima u *d*- i *q*-osi predstavljaju referentne vrijednosti napona IGBT pretvarača u *d*- i *q*-osima. Za upravljanje trofaznim IGBT pretvaračem danas se koriste različite tehnike pulsno-širinske modulacije, a najčešće se koristi prostorno vektorska modulacija (engl. *Space Vector Modulation* – SVM), koja je primijenjena i kod ovog pretvarača. Ulazne veličine su željeni rezultirajući vektor napona na trofaznim stezaljkama (tj. njegove komponente u mirujućem αβ sustavu) i napon na istosmjernoj strani (u_{dc}).



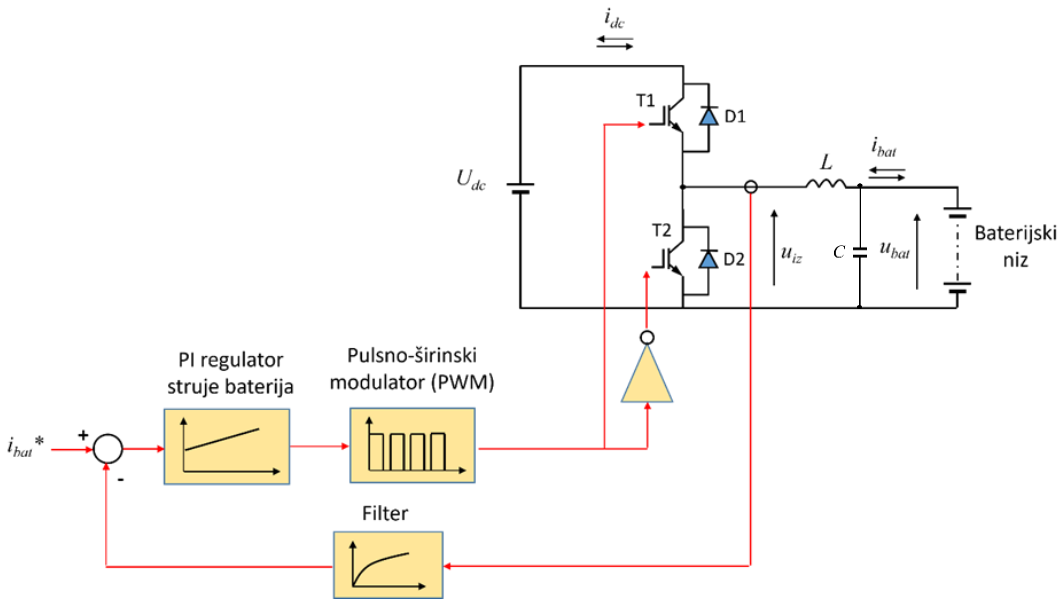
Slika 1.4 Blokovska shema VOC sustava upravljanja mrežnog AC/DC pretvarača

1.3 Baterijski DC/DC pretvarač

Baterijski DC/DC pretvarač je dvosmjerni silazno-uzlazni istosmjerni pretvarač čiji se princip rada temelji na principima rada silaznog i uzlaznog pretvarača ovisno o smjeru struje baterije, tj. smjeru energije. Kada je smjer struje prema baterijskim modulima, tj. moduli se pune s energijom, tada pretvarač radi kao silazni istosmjerni pretvarač pri čemu je napon na baterijama niži od ulaznog napona (istosmjernog međukruga). U takvom režimu rada upravlja se gornjim tranzistorom (T1), a struju vode tranzistor T1 i donja dioda (D2). U režimu pražnjenja baterija struja mijenja smjer, upravlja se donjim tranzistorom (T2), struju vode tranzistor T2 i gornja dioda (D1), a pretvarač radi kao uzlazni istosmjerni pretvarač gledajući s niskonaponske strane baterijskih modula. U svakom slučaju, u oba režima rada napon baterijskih modula treba biti manji od ulaznog napona.

Prigušnica na niskonaponskoj strani je nužna za ograničenje pulzacija struje kod režima punjenja baterija, dok je kod režima pražnjenja ta prigušnica nužna da bi uzlazni režim rada pretvarača uopće bio moguć. Prigušnica u kombinaciji s kondenzatorom predstavlja niskopropusni filter. Amplitude pulzacija struje baterije ovisne su o ulaznom naponu, naponu baterijskog niza, induktivitetu prigušnice i sklopnoj frekvenciji rada pretvarača.

Na slici 1.5 prikazana je načelna shema energetskog dijela i regulacijski krugovi dvosmjernog istosmjernog baterijskog pretvarača za punjenje i pražnjenje baterija. Za vrijeme punjenja baterijskog niza (silazni režim rada) uklapa se i isklapa tranzistor T1, a u periodima kada je tranzistor isklopljen struju preuzima dioda D2. Tijekom pražnjenja baterija (uzlazni režim rada) upravlja se tranzistorom T2, a kada je on isklopljen struja teče kroz diodu D1. Prelazak iz jednog u drugi režim odvija se vrlo jednostavno koristeći prikazani regulacijski krug struje baterije. Ukoliko je referenca struje baterije (i_{bat}*) pozitivna PI regulator struje, PWM modulator i NI logički sklop upravljaju s tranzistorima T1 i T2 tako da struja teče u baterije na način da struju vode tranzistor T1 i dioda D2. U slučaju negativne reference struje prikazani regulacijski krug omogućuje negativni smjer struje iz baterija, pri čemu struja teče kroz tranzistor T2 i diodu D1. U povratnoj vezi regulacijskog kruga postavlja se niskopropusni filter prvog reda radi smanjenja utjecaja visokofrekvencijskih pulzacija struje prigušnice na rad regulacijskog sustava.

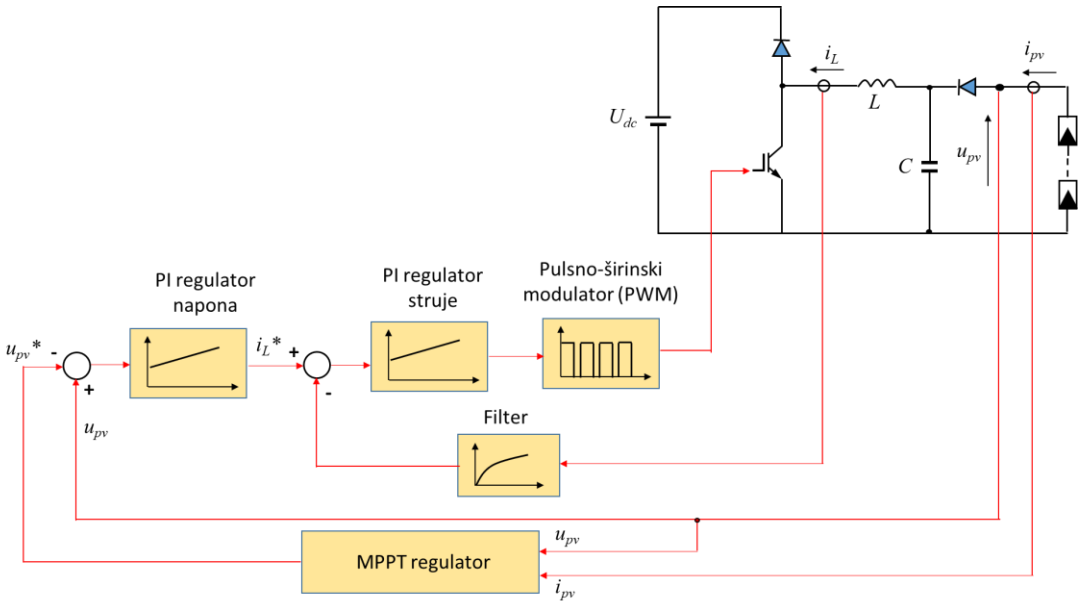


Slika 1.5 Načelna shema energetskog i regulacijskog kruga baterijskog pretvarača

1.4 Fotonaponski DC/DC pretvarač

Fotonaponski DC/DC pretvarač je uzlazni istosmjerni pretvarač koji energiju dobivenu iz fotonaponskih modula predaje u istosmjerni međukrug, a sastoji se od tranzistora, diode i prigušnice na strani fotonaponskog modula.

Na slici 1.6 prikazan je sustav upravljanja fotonaponskim pretvaračem koji se sastoji od 3 regulacijske petlje. Ulazni istosmjerni napon U_{dc} predstavlja napon istosmjernog međukruga fotonaponskog pretvarača. U vanjskoj regulacijskoj petlji nalazi se MPPT (eng. *Maximum Power Point Tracking*) regulator koji na temelju mjerenja napona (u_{pv}) i struje (i_{pv}) fotonaponskog niza primjenom posebnog algoritma traži radnu točku maksimalne radne snage fotonaponskih modula. Na svom izlazu definira referentnu vrijednost napona fotonaponskog niza (u_{pv}*) koji je ulazna veličina PI regulatora napona. Izlaz PI regulatora napona je referentna vrijednost struje prigušnice kojoj je srednja vrijednost jednaka struji fotonaponskog niza. PI regulator struje prigušnice se nalazi u unutarnjoj regulacijskoj petlji, a na svom izlazu daje upravljački signal koji preko pulsno-širinskog modulatora (PWM) upravlja tranzistorom fotonaponskog pretvarača. Struja prigušnice u sebi ima visokofrekvencijske pulzacije pa se njen mjerni signal filtrira filterom prvog reda.

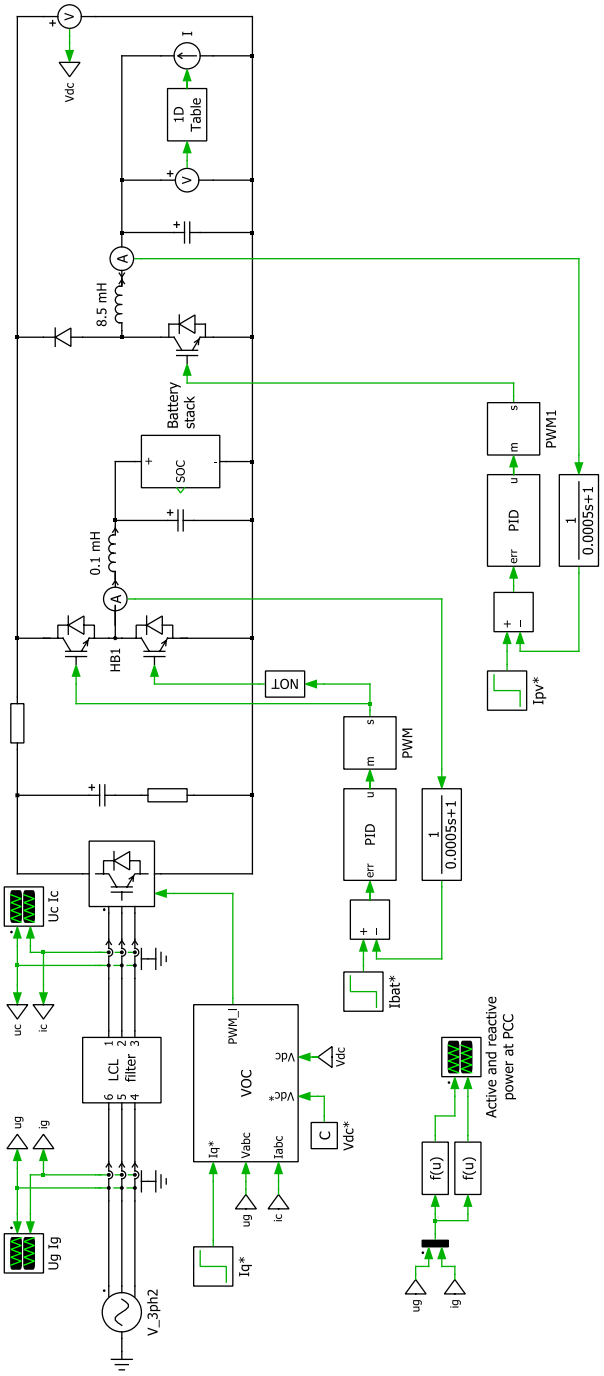


Slika 1.6 Načelna shema energetskog i regulacijskog kruga fotonaponskog pretvarača

2 Simulacijski model i rezultati

2.1 Simulacijski model

Na slici 2.1 prikazan je simulacijski model hibridnog pretvarača s baterijskim spremnikom energije i fotonaponskim modulom. Simulacijski model realiziran je u programskom paketu MATLAB/Plecs pri čemu MATLAB predstavlja okruženje u kojem se koriste blokovi biblioteka Plecs-a, specijaliziranog za simuliranje sustava energetske elektronike.



Slika 2.1 Simulacijski model hibridnog energetskog pretvarača u MATLAB/Plecs-u

Sustav je priključen na idealnu mrežu modeliranu trofaznim naponskim izvorom nazivnog linijskog napona 400 V i frekvencije 50 Hz.

Mrežni pretvarač spojen je na mrežu preko LCL filtra pri čemu su prigušnice filtra modelirane serijskim spojem induktiviteta i radnog otpora, a kondenzatori serijskim spojem kapaciteta i radnog otpora. Parametri LCL filtra dani su u tablici 3.1.

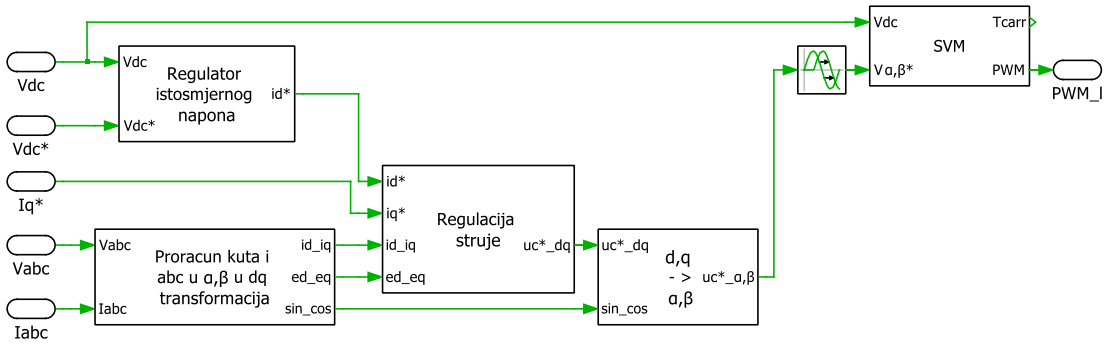
Tablica 2.1 Parametri LCL filtra

Simbol	Veličina	Iznos
L_{fg}	induktivitet prigušnice na strani mreže	0.3 mH
R_{fg}	radni otpor prigušnice na strani mreže	0.1 mΩ
L_{fc}	induktivitet prigušnice na strani pretvarača	0.5 mH
R_{fc}	radni otpor prigušnice na strani pretvarača	0.1 mΩ
C_f	kapacitet kondenzatora filtra	20 μF
R_{df}	serijski radni kondenzatora filtra	0.12 mΩ

Mrežni AC/DC pretvarač je trofazni dvorazinski PWM usmjerivač koji se sastoji od 6 IGBT tranzistora i njima paralelno spojenih (porednih) dioda. Model pretvarača preuzet je kao gotov blok iz biblioteke Plecs-a, a na slici 2.1. predstavljen je simbolom IGBT tranzistora i poredne diode.

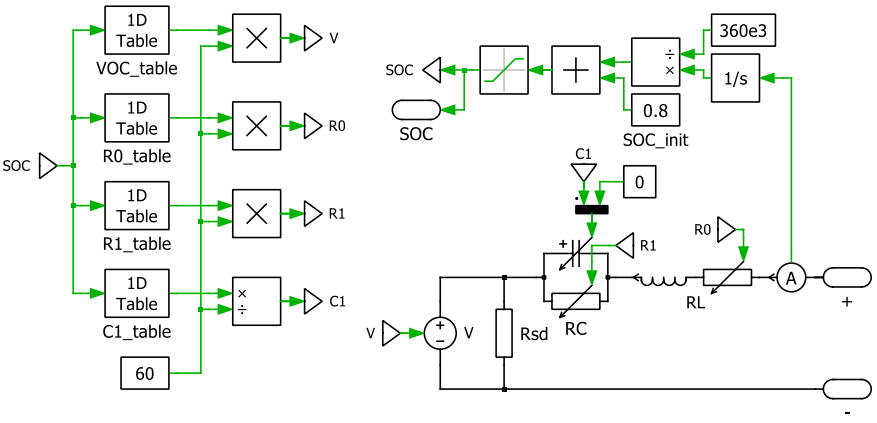
Upravljanje pretvaračem vrši se pomoću bloka *VOC* kojim je realizirana upravljačko-regulacijska struktura naponski orijentiranog sustava upravljanja opisanog u potpoglavlju 1.2, te metoda prostorno vektorske modulacije širine impulsa. Ulazi bloka *VOC* su referenca istosmjernog napona (Vdc*), mjereni istosmjerni napon (Vdc), referenca jalove struje (Iq*), mjereni mrežni napon (Vabc) koji se sastoji od tri mrežna fazna napona te mjerene struje na strani pretvarača (Iabc). Izlaz iz bloka *VOC* su upravljački signali za trofazni IGBT most. Za frekvenciju signala nosioca PWM modulacije odabran je iznos 10 kHz. Parametri PI regulatora *d* i *q* komponenti struja pretvarača te napona istosmjernog međukruga podešeni su primjenom analitičke metode simetričnog optimuma. Osnova ovog načina upravljanja je transformacija koordinata u dvoosni *dq* koordinatni sustav koji rotira kružnom frekvencijom rezultirajućeg vektora napona mreže, a *d*-os je orijentirana prema položaju navedenog vektora. Sama upravljačka struktura je kaskadnog karaktera, gdje se u unutarnjim povratnim petljama reguliraju *d* i *q* komponente struje na izmjeničnoj strani pretvarača, a u vanjskoj povratnoj petlji napon istosmjernog međukruga (preko *d*- komponente struje). Primjena ovakvog načina upravljanja omogućava odvojeno upravljanje radnom i jalovom snagom u točki priključenja na mrežu.

Unutrašnjost bloka *VOC* prikazana je na slici 2.2, a sastoji se od nekoliko blokova potrebnih za upravljanje usmjerivačem. Prvi blok je blok za pretvorbu veličina iz *abc* u *dq* sustav kojemu su ulazi naponi i struje u *abc* sustavu, a izlazi naponi i struje u *dq* sustavu te sinus i kosinus kuta između vektora mrežnog napona i referentne osi (faze *a* mrežnog napona). Drugi blok je regulator napona istosmjernog međukruga koji na ulazu prima referencu istosmjernog napona Vdc* i mjereni istosmjerni napon Vdc, a na izlazu daje referencu radne struje Id* koja ulazi u blok za upravljanje strujama u *d* i *q* osi. Osim struje Id*, taj blok na ulazu prima i referencu jalove struje Iq* koja se zadaje direktno te struje i napone u *dq* sustavu (dobivene iz bloka za pretvorbu veličina iz *abc* u *dq* sustav). Na izlazu ovog bloka nalazi se referenca vektora napona na izmjeničnoj strani PWM usmjerivača u *dq* sustavu uc_dq* . Ova referenca zajedno s kutom između vektora mrežnog napona i referentne osi ulazi u blok za transformaciju veličina iz *dq* sustava u αβ sustav. Nakon transformacije koordinata dobije se referenca vektora napona na izmjeničnoj strani usmjerivača u αβ sustavu. Ova referenca, zajedno s mjerenim istosmjernim naponom Vdc predstavlja ulaz u blok za generiranje upravljačkih signala pomoću prostorno-vektorske pulsno-širinske modulacije (SVM).



Slika 2.2 Unutrašnjost bloka *VOC*

Nakon PWM usmjerivača, na istosmjerni krug je spojen silazno-uzlazni baterijski DC/DC pretvarač realiziran pomoću dva IGBT tranzistora s antiparalelno spojenim diodama kojima se upravlja jednostavnim regulacijskim krugom kojim se regulira struja baterije, kao što je opisano u potpoglavlju 1.3 i prikazano na slici 1.5. Simulacijski model baterijskog niza od četiri ćelije je prikazan na slici 2.3. Model baterijskog modula (niza) realiziran je pomoću 4 „*look-up*“ tablice (*1D Table*) kojima je ulazna veličina stanje napunjenosti baterije (eng. state of charge – SOC). Ovisno o vrijednosti SOC-a, definiraju se napon baterijske ćelije (V), 2 otpora nadomjesne sheme (R0 i R1) te kapacitet (C1). Vrijednost SOC-a dobije se pomoću mjerene struje baterijskog niza, ali s obzirom da su izvršavane relativno kratke simulacije (reda veličine od nekoliko sekundi), SOC varijablu možemo smatrati konstantnom i jednakom početnoj vrijednosti (0.8, odnosno 80%). Budući da je SOC varijabla konstantna, ostale vrijednosti koje se računaju pomoću nje također možemo uzeti kao konstantne. Napon baterijskog niza iznosi 13.2 V, uz ekvivalentni serijski otpor od 1 mΩ.



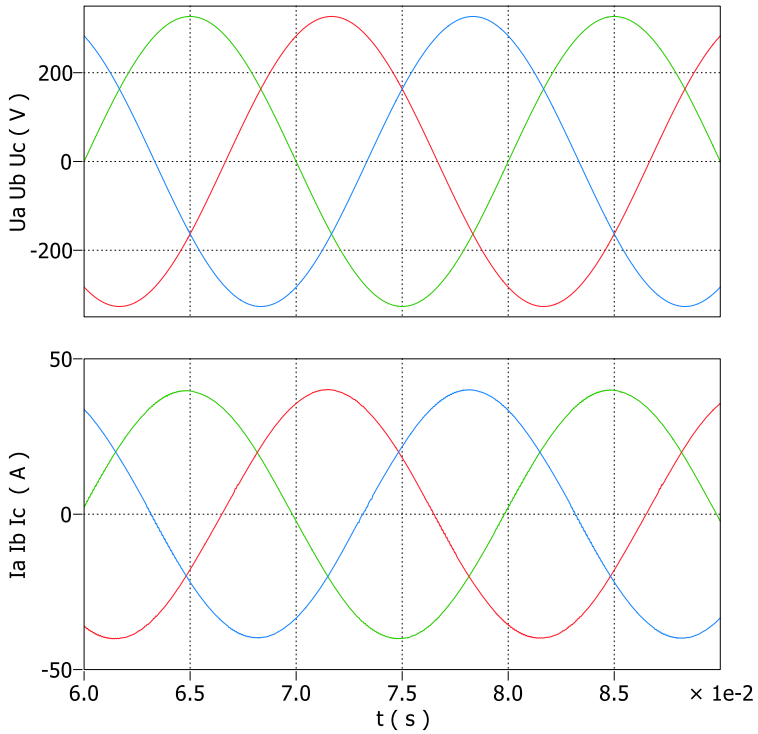
Slika 2.3 Unutrašnjost bloka *Battery stack*

Osim baterijskog DC/DC pretvarača kojim se napaja baterijski modul, na istosmjerni međukrug je spojen fotonaponski DC/DC pretvarač kojim se upravlja proizvedenom energijom iz fotonaponskog niza. Osnovni princip rada sustava upravljanja fotonaponskim pretvaračem je opisan u potpoglavlju 1.4. Treba napomenuti da je u simulacijskom modelu realizirano samo upravljanje strujom fotonaponskog niza. Fotonaponski niz modeliran je promjenjivim izovorm struje i „*look-up*“ tablicom u koju su uneseni podaci mjerenja na nizu od četiri serijski spojena fotonaponska modula SV60-285.

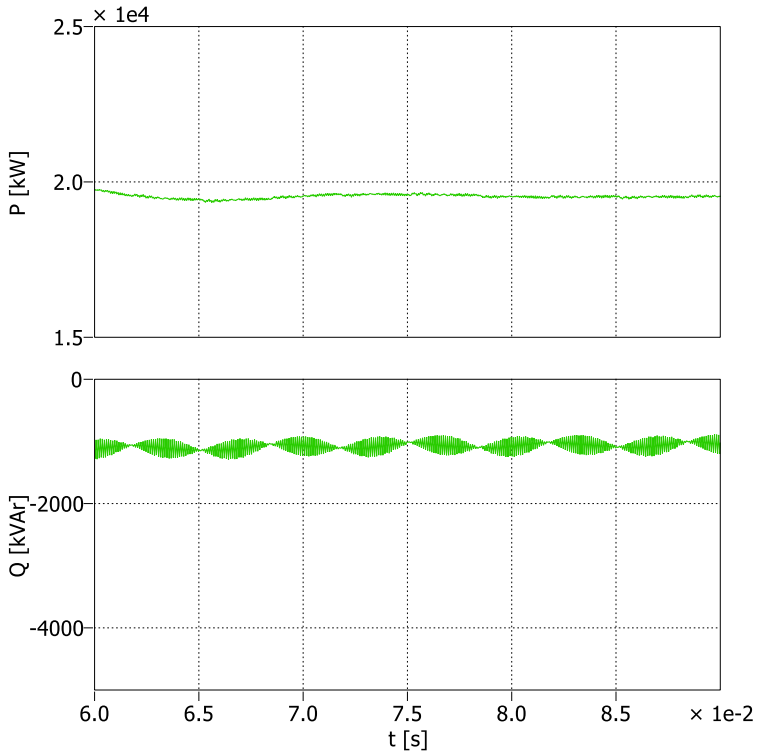
2.2 Simulacijski rezultati

U nastavku će biti prikazani simulacijski rezultati za nekoliko odabranih dinamičkih i stacionarnih režim rada sustava. Za promatrani hibridni pretvarač moguće je definirati nekoliko karakterističnih stacionarnih režima rada, a za neke od njih bit će dani rezultati. Navedeni režimi su: kombinirano punjenje baterija, pražnjenje baterija, vraćanje energije iz solarnih panela u mrežu te punjenje baterija isključivo pomoću fotonaponskih modula. Od dinamičkih stanja bit će prikazani rezultati za prijelaz iz režima punjenja baterija u režim njihovog pražnjenja te promjena izlazne snage fotonaponskih modula.

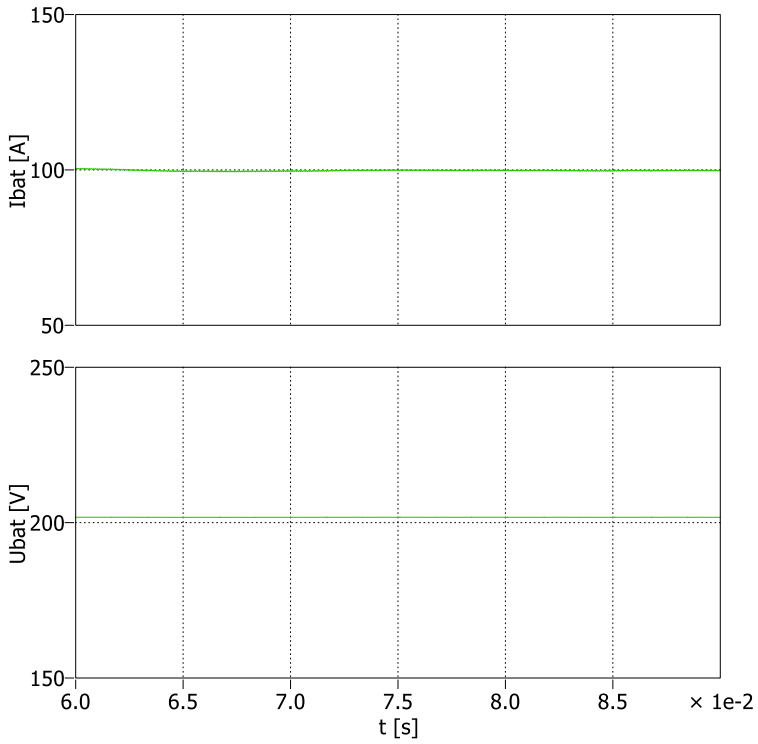
Za vrijeme kombiniranog punjenja baterija, energija dobivena iz mreže te energija dobivena iz fotonaponskih modula koriste se za punjenje baterija. Ovaj režim rada aktivira se pozitivnom referencom struje baterije čime se odabire tok energije prema baterijama. Na slici 2.4 prikazani su mrežni naponi i struje, a na slici 2.5 radna i jalova snaga u točki priključenja na mrežu tijekom kombiniranog punjenja baterija. Može se primijetiti da između istofaznih napona i struja postoji određeni fazni pomak, što je posljedica činjenice da se kod mrežnog pretvarača regulira struja između pretvarača i filtra te, iako je referenca *q* komponente struje postavljena na vrijednost nula, iz mreže teče struja prema kondenzatorima filtra. Iz istog razloga jalova snaga u točki priključenja na mrežu nije jednaka nuli. U odabranom sustavu predznaka, radna snaga ima pozitivni predznak ukoliko je tok snage od mreže prema hibridnom pretvaraču, a jalova snaga ako je smjer snage suprotan. Na slici 2.6 prikazani su filtrirani napon i struja baterija, a na slici 2.7 napon i struja fotonaponskih modula tijekom kombiniranog punjenja baterija. U ovoj simulaciji zadana je referenca struje baterija 100 A, a napon baterija iznosi 201.4 V pa je ukupna snaga punjenja 20.14 kW. Za fotonaponske module, referenca struje iznosi 8 A pri čemu napon iznosi 140 V. Jasno je da veći dio snage tijekom punjenja dolazi iz mreže (19.5 kW), a ostatak iz fotonaponskih modula (1.12 kW). Pritom dio snage koji dolazi iz mreže otpada na gubitke u LCL filteru i mrežnom pretvaraču.



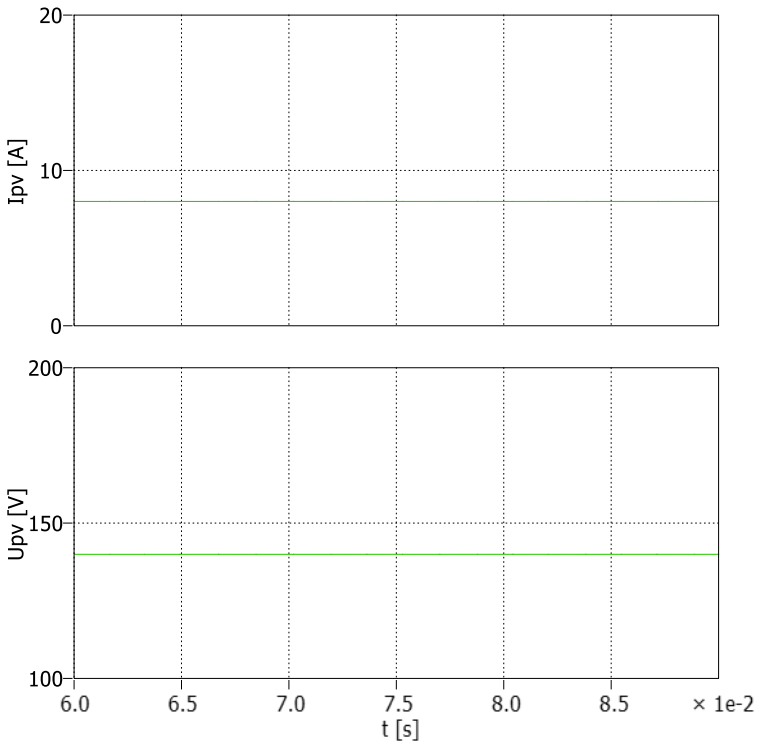
Slika 2.4 Mrežni naponi i struje tijekom kombiniranog punjenja baterija



Slika 2.5 Radna i jalova snaga u točki priključenja na mrežu tijekom kombiniranog punjenja baterija

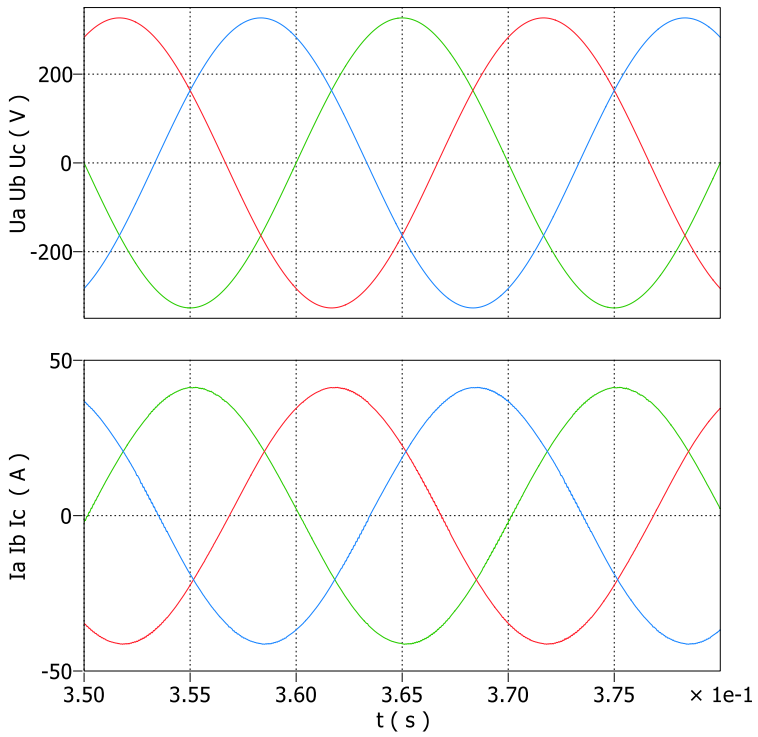


Slika 2.6 Filtrirani napon i struja baterija tijekom kombiniranog punjenja baterija

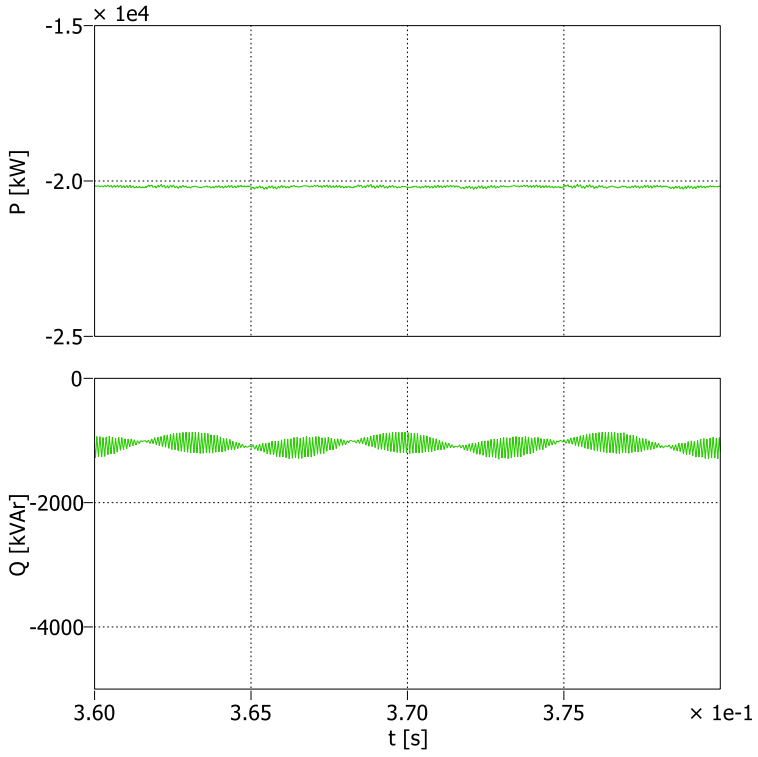


Slika 2.7 Napon i struja fotonaponskih modula tijekom kombiniranog punjenja baterija

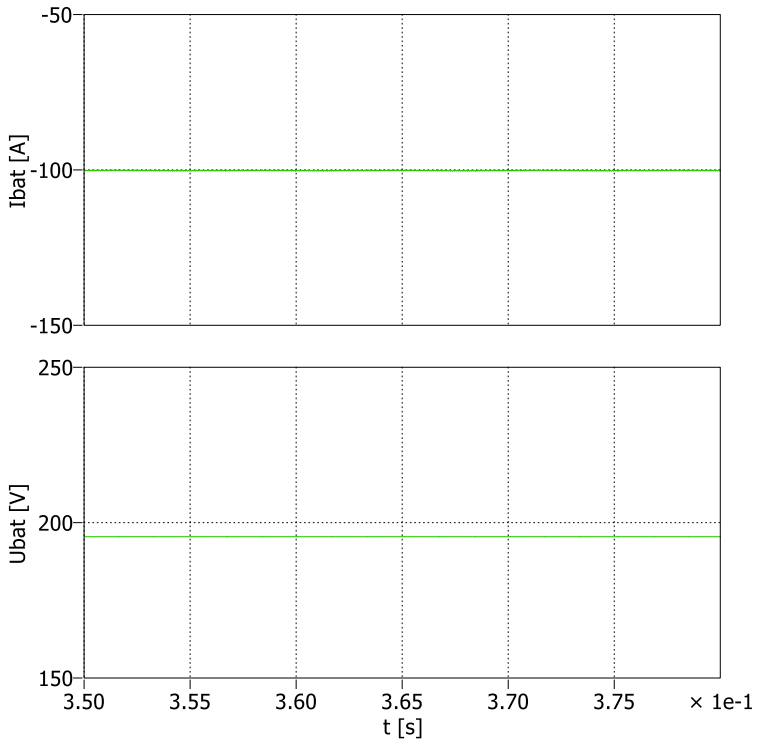
Pražnjenje baterija aktivira se negativnom referencom struje baterije čime se odabire tok od baterija prema mreži. Na slici 2.8 prikazani su mrežni naponi i struje, a na slici 2.9 radna i jalova snaga u točki priključenja na mrežu tijekom pražnjenja baterija. Između istofaznih napona i struja postoji fazni pomak od približno 180°. Iznos i predznak jalove snage ostaje isti kao i kod punjenja baterija, ali se mijenja predznak radne snage u točki priključenja na mrežu. Da bi održao istosmjerni napon na konstantnom iznosu, mrežni pretvarač mora prazniti kondenzatore u istosmjernom međukrugu. Na slici 2.10 prikazani su filtrirani napon i struja baterija, a na slici 2.11 napon i struja fotonaponskih modula tijekom pražnjenja baterija, U ovoj simulaciji zadana je referenca struje baterija -100 A, a napon baterija iznosi 195.5 V pa je ukupna snaga dobivena iz baterija 19.55 kW. Za fotonaponske module, iznosi reference struje i napon ostaju isti kao i kod punjenja baterija (8 A; 140 V). Radna snage u točki priključenja na mrežu iznosi 20.2 kW te, u ovom slučaju, gubitke u LCL filteru i mrežnom pretvaraču pokrivaju baterije.



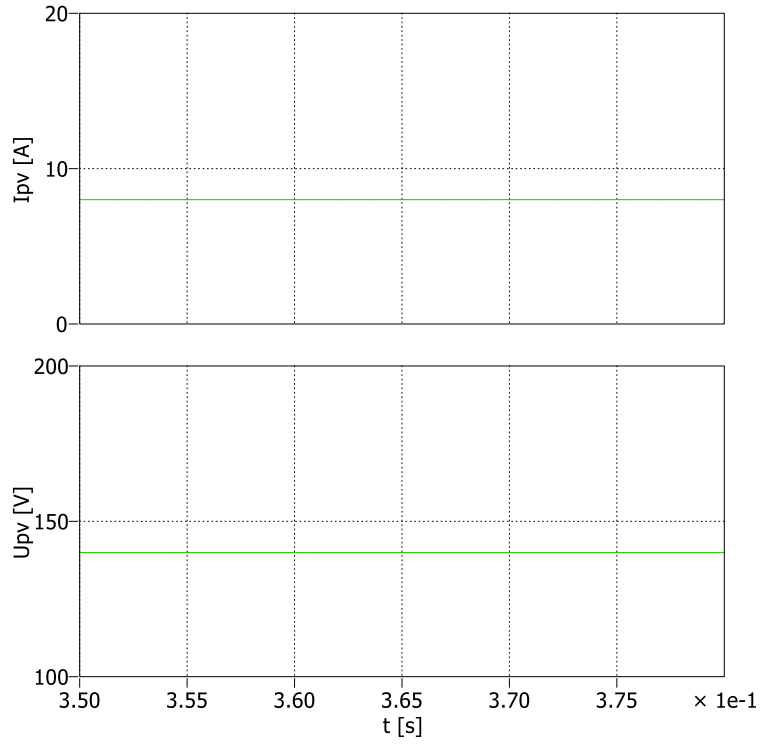
Slika 2.8 Mrežni naponi i struje tijekom pražnjenja baterija



Slika 2.9 Radna i jalova snaga u točki priključenja na mrežu tijekom pražnjenja baterija

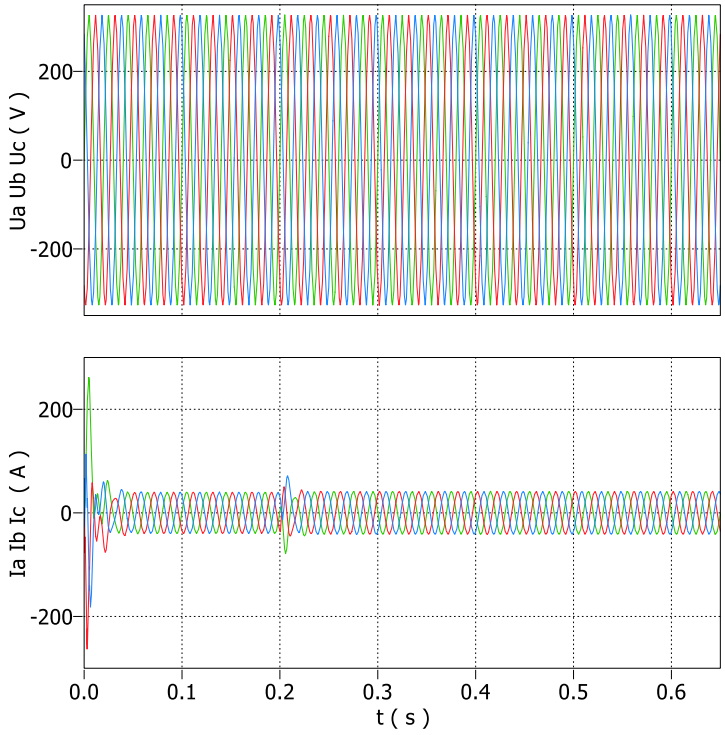


Slika 2.10 Filtrirani napon i struja baterija tijekom pražnjenja baterija

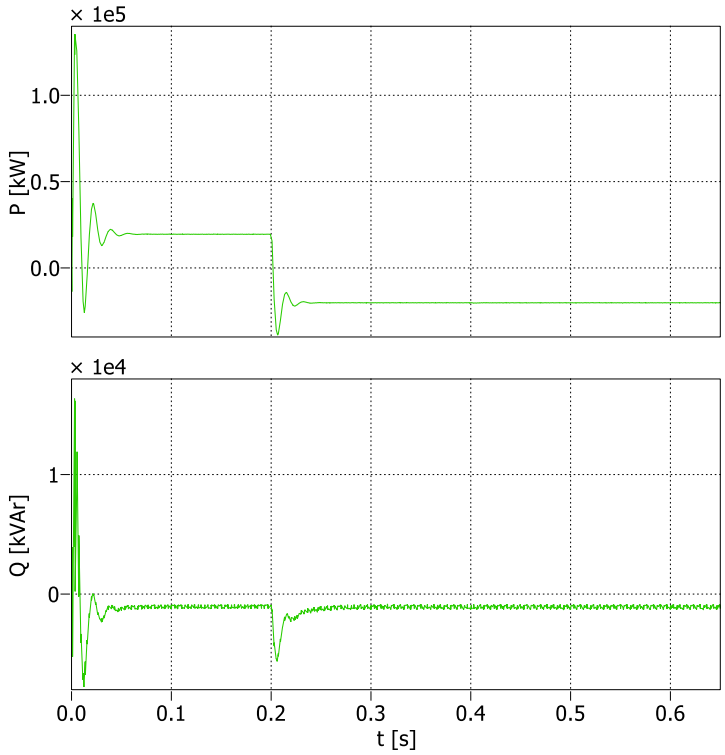


Slika 2.11 Napon i struja fotonaponskih modula tijekom pražnjenja baterija

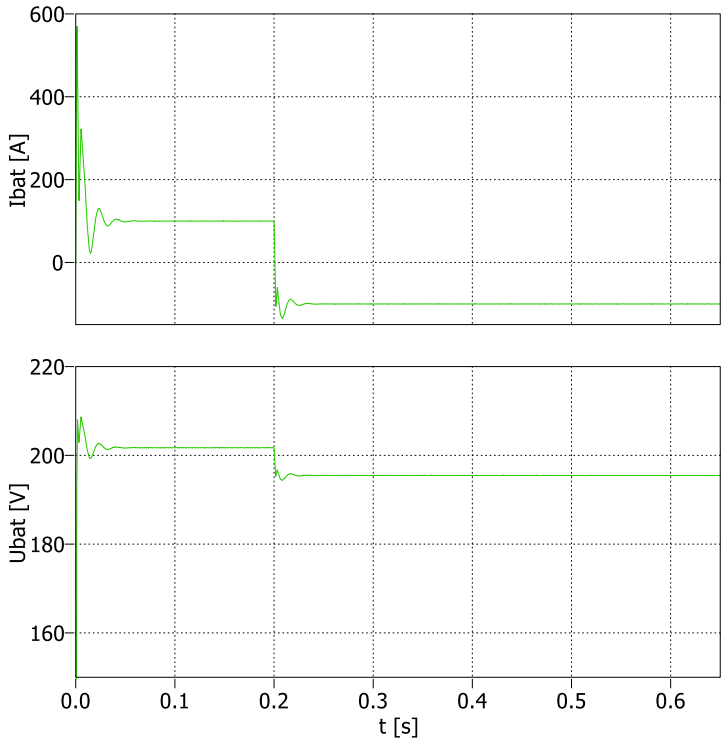
U nastavku izvještaja, bit će dani simulacijski rezultati prilikom prijelaza iz režima kombiniranog punjenja u režim pražnjenja baterija te pri promjeni izlazne snage fotonaponskih modula. Prijelaz iz režima punjenja u režim pražnjenja baterija nastupa promjenom reference struje baterije s 100 A na -100 A u t = 0.2 s, nakon čega se u t = 0.4 s mijenja refrenca struje fotonaponskih modula s 8 A na 9.3 A. Na slici 2.12 prikazani su mrežni naponi i struje, a na slici 2.13 radna i jalova snaga u točki priključenja na mrežu tijekom promatranog ciklusa rada sustava. Prijelaz iz režima punjenja u režim pražnjenja baterija odvija se unutar nekoliko perioda mrežnog napona pri čemu se nisu zabilježili značajniji iznosi promatranih veličina tijekom prijelazne pojave. Na slici 2.14 prikazani su filtrirani napon i struja baterija, a na slici 2.15 napon i struja fotonaponskih modula tijekom promatranog ciklusa rada sustava. Dinamika fotonaponskih modula je nešto sporija, što je za ovaj slučaj zadovoljavajuće s obzirom da se ne očekuje brza promjena izlazne snage fotonaponskih modula u realnim uvjetima.



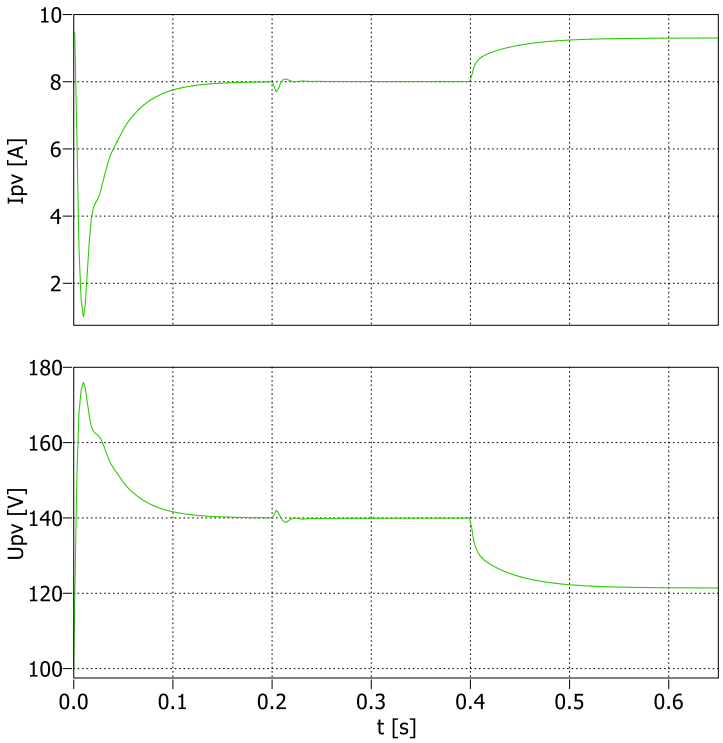
Slika 2.12 Mrežni naponi i struje tijekom odabranog ciklusa



Slika 2.13 Radna i jalova snaga u točki priključenja na mrežu tijekom odabranog ciklusa



Slika 2.14 Filtrirani napon i struja baterija tijekom odabranog ciklusa



Slika 2.15 Napon i struja fotonaponskih modula tijekom odabranog ciklusa

3 Zaključak

Cilj ovog tehničkog izvještaja je predstavljanje simulacijskog modela hibridnog energetskog pretvarača i analiza simulacijskih odziva u odabranim stacionarnim i dinamičkim režimima rada. Simulacijski model hibridnog pretvarača implementiran je u programskom paketu MATLAB/Plecs i obuhvaća energetske krugove i upravljačko-regulacijske strukture pojedinih dijelova pretvarača.

Na temelju predstavljenih simulacijskih rezultata možemo zaključiti da implementirane upravljačko-regulacijske strukture pojedinih dijelova sustava osiguravaju zadovoljavajuće ponašanje sustava u odabranim stacionarnim i dinamičkim režimima rada.