

Zahvala

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Mariju Vašku na stručnoj pomoći i savjetima prilikom izrade rada.

Posebnu zahvalnost upućujem svojoj obitelji na bezuvjetnoj podršci, razumijevanju i ohrabrenju tijekom cijelog studija.

Zahvaljujem se i prijateljima pa tako i kolegama na nesebičnoj pomoći, motivaciji i lijepim trenutcima koji su ovo razdoblje života učinili nezaboravnim.

Sadržaj

Uvod.....	5
1. Opis sustava.....	6
2. Fotonaponski izvor.....	7
2.1. Dimenzioniranje.....	7
3. Baterijski sustav.....	9
3.1. Modeliranje.....	9
4. Istosmjerni uzlazni pretvarač.....	11
4.1. Opis pretvarača.....	11
4.2. Naponski način upravljanja.....	14
4.2.1 Kontinuirani režim rada.....	14
4.2.2 Diskontinuirani režim rada.....	20
4.3. Strujni način upravljanja.....	25
4.3.1 Kontinuirani režim rada.....	25
4.3.2 Diskontinuirani režim rada.....	37
5. Upravljanje pretvaračem.....	42
5.1. Granica kontinuiranog režima rada.....	42
5.2. Upravljanje regulatorom s promjenjivim parametrima.....	43
5.3. Punjenje konstantnim naponom.....	44
5.3.1 Mjerni filter.....	44
5.3.2 Kontinuirani režim rada.....	45
5.3.3 Diskontinuirani režim rada.....	47
5.3.4 Simuliranje rada.....	49
5.4. Punjenje maksimalnom snagom.....	51
5.4.1 MPPT algoritam.....	52
5.4.2 Kontinuirani režim rada.....	57
5.4.3 Diskontinuirani režim rada.....	58
5.4.4 Simuliranje rada.....	59
6. Cjeloviti model procesa i regulacijske petlje.....	61
7. Rezultati.....	63
7.1. Simulacija 1.....	63
7.2. Simulacija 2.....	64
7.3. Simulacija 3.....	65
Zaključak.....	66
Literatura.....	67
Sažetak.....	68
Summary.....	69

Uvod

U današnje vrijeme sve je izraženija potreba za korištenjem obnovljivih izvora energije. Iako trenutno zauzimaju manji udio u globalnoj proizvodnji električne energije u usporedbi s fosilnim gorivima i nuklearnom energijom, obnovljivi izvori energije postaju sve primamljiviji zbog niske cijene po proizvedenoj jedinici električne energije te potencijala da omoguće energetsku neovisnost državama siromašnim prirodnim resursima.

U okviru obnovljivih izvora energije, fotonaponski sustavi su sve zastupljeniji zbog svoje niske cijene, modularnosti, jednostavnosti implementacije te činjenici da je sunčeva energija sveprisutna na Zemlji. Međutim, fotonaponski izvori proizvode istosmjernu struju, naponske razine ovise o sunčevom ozračenju i vanjskoj temperaturi, a mala tromost sustava uzrokuje fluktuacije u naponu. Kako bi se postigla što veća iskoristivost fotonaponskog izvora, često se uparaje s uređajima energetska elektronike i sustavima za pohranu energije.

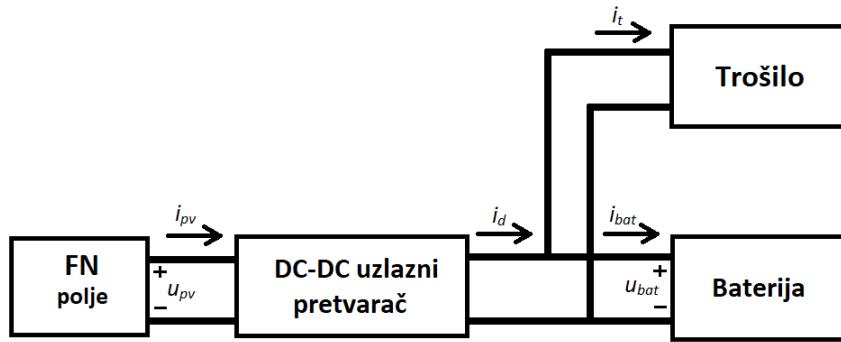
Ovaj diplomski rad bavi se projektiranjem i upravljanjem izoliranog energetskog sustava (engl. *off grid*) koji se sastoji od fotonaponskog izvora, istosmjernog pretvarača i spremnika energije. Budući da je riječ o sustavu male snage, niži ulazni napon karakterističan za fotonaponske izvore potrebno je povisiti na razinu napona spremnika energije. Iz tog razloga odabran je ulazni pretvarač kao odgovarajuće rješenje za prilagodbu naponskih razina. Poseban izazov predstavlja upravljanje ulaznim pretvaračem s ciljem da se postigne maksimalna proizvodnja električne energije iz fotonaponskog izvora. U tu svrhu potrebno je implementirati algoritam praćenja točke maksimalne snage fotonaponskog izvora (engl. *maximum power point tracking*).

Zaključno, cilj rada je izvesti učinkovit upravljački zakon koji omogućuje optimalno iskorištavanje energije fotonaponskog izvora uz istovremeno osiguranje pouzdanog i sigurnog punjenja spremnika energije. Za potrebe analize i verifikacije razvijen je matematički model cjelokupnog sustava, na temelju kojeg je u programskom okruženju *Matlab* provedena simulacija rada regulacijske petlje te potvrđena funkcionalnost predloženog upravljačkog rješenja

1. Opis sustava

Cilj rada jest analiza i razvoj sustava automatskog upravljanja kojim se osigurava potpuno upravljanje fotonaponskim izvorom s ciljem optimalnog iskorištenja proizvedene električne energije za punjenje baterijskog paketa na izlazu pretvarača. Sustav se sastoji od sljedećih komponenata (Slika 1.1):

- Fotonaponski izvor – spoj više fotonaponskih članaka u serijski spoj koji proizvodi manji napon od minimalnog napona baterijskog paketa
- Istosmjerni uzlazni pretvarač – izvedba bez galvanskog odvajanja s dodatnim električnim kapacitetom na ulazu u svrhu filtriranja valovitosti ulaznog napona
- Dodatno trošilo – djelatno trošilo koje se može uključiti ovisno o stanju napunjenosti baterijskog paketa
- Litij-ionska baterija – baterijski paket koji se sastoji od više baterijskih ćelija spojenih u seriju, čiji napon je u svakoj točci napunjenosti veći od maksimalnog napona fotonaponskog izvora



Slika 1.1: Idealizirana blokovska shema sustava

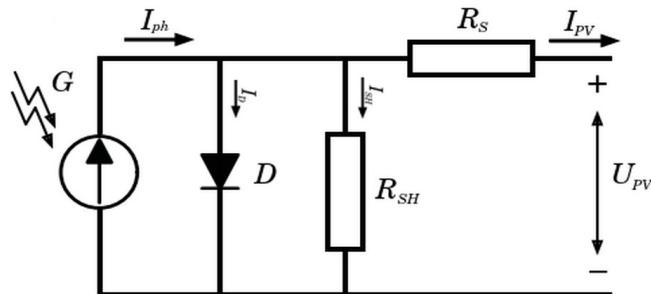
2. Fotonaponski izvor

Fotonaponski izvori su iznimno nelinearni izvori energije i kao takvi predstavljaju izazov sa stajališta sustava automatskog upravljanja. Njihovo ponašanje uvelike ovisi o trenutnim uvjetima okoline, zbog čega se izlazne karakteristike stalno mijenjaju. Glavna problematika je određivanje napona pri kojem izvor proizvodi maksimalnu snagu za zadano ozračenje.

2.1. Dimenzioniranje

Fotonaponski članci su poluvodički elektronički elementi koji pretvaraju sunčevo zračenje vidljivog i bliskog infracrvenog dijela elektromagnetskog spektra u električnu energiju kroz proces zvan fotonaponski efekt. Pojedinačni članci se serijski i paralelno spajaju u module.

Idealni solarni članak je PN spoj koji za vrijeme rada generira fotostruju suprotnog smjera toka struje koja protjeće kroz standardnu diodu [1]. Zato se može modelirati kao paralelni spoj idealnog strujnog izvora i idealne diode (Slika 2.1).



Slika 2.1: Nadomjesna shema fotonaponskog članka

Točnost modela se dodatno unaprjeđuje uvođenjem otpora R_s i R_{sh} :

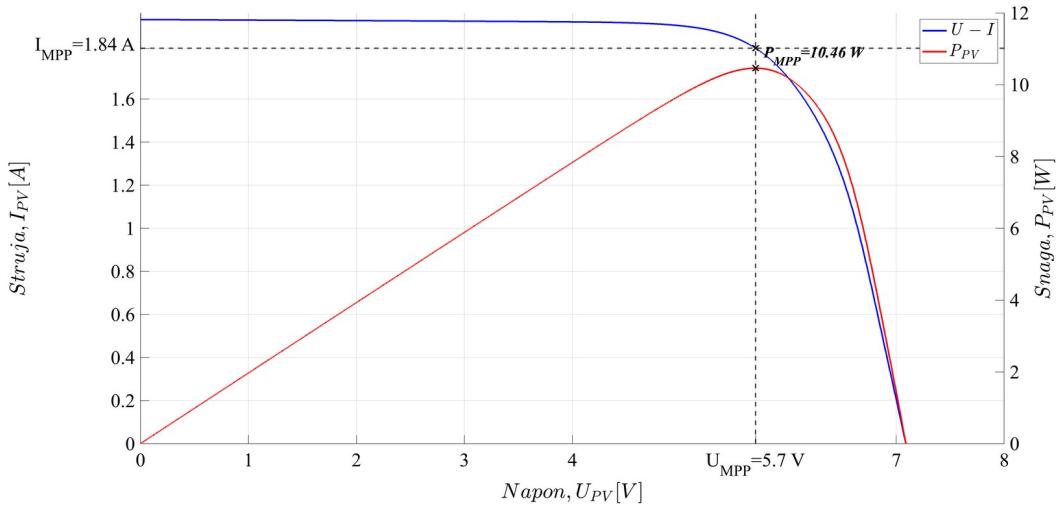
- R_s predstavlja unutarnje otpore strujnom toku unutar članka kao što su otpor kontakata i otpor materijala samog poluvodiča
- R_{sh} je paralelni otpor i predstavlja curenje kroz neidalnosti spoja

Programsko okruženje *Simulink* sadrži unaprijed definiran model fotonaponskog izvora, koji će se parametrizirati prema karakteristikama prikazanim u tablici (Tablica 1).

Tablica 1: Parametri fotonaponskog izvora

Parametar	Vrijednost	Parametar	Vrijednost
n_S	10	I_{SC}	1.97 A
n_P	1	U_{OC}	7.09 V
R_S	0.25 Ω	I_{PH}	1.97 A
R_{sh}	1 MΩ		

Dijagram (Slika 2.2) prikazuje naponsko-strujnu karakteristiku fotonaponskog modula kao i karakteristiku snage. Na obje karakteristike označena je točka proizvodnje maksimalne snage P_{MPP} fotonaponskog modula.



Slika 2.2: Prikaz naponsko-strujne karakteristike i karakteristike snage fotonaponskog izvora radnu točku: $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $t = 25^\circ\text{C}$

Tablica (Tablica 2) definira parametre modula za točku proizvodnje maksimalne snage P_{MPP} fotonaponskog modula.

Tablica 2: Parametri fotonaponskog izvora za rad u točki maksimalne snage pri ozračenju $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $t = 25^\circ\text{C}$

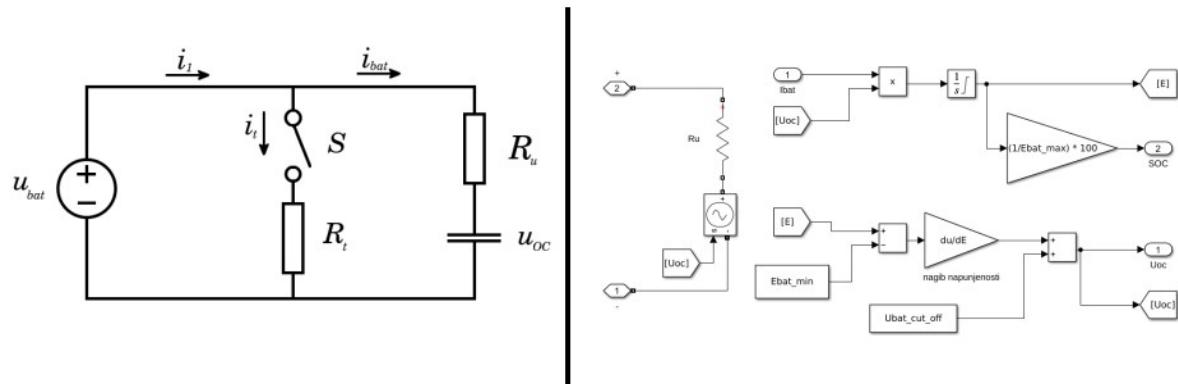
Parametar	Vrijednost
I_{MPP}	1.85 A
U_{MPP}	5.7 V
P_{MPP}	11 W

3. Baterijski sustav

Većina trošila zahtjeva neprekidan izvor napajanja pa sustavi za pohranu energije predstavljaju neizostavan dio mrežno odvojenih fotonaponskih sustava. U ovom radu sustav pohrane energije predstavlja primarni fokus, dok je trošilo sekundarnog značaja. Stoga se cjelokupni sustav može promatrati kao fotonaponski napajani punjač baterije s mogućnošću priključenja dodatnog djelatnog trošila.

3.1. Modeliranje

Baterijski spremnik sačinjen je od Litij-ionskih baterijskih članaka spojenih u seriju te se modelira kao realni naponski izvor. Ovakav model obuhvaća idealni naponski izvor aproksimiran električnim pločastim kondenzatorom napona u_{OC} u serijskoj vezi s unutarnjim otporom R_u (Slika 3.1). Uz to postoji i mogućnost spajanja dodatnog djelatnog trošila R_t .



Slika 3.1: Načelna shema baterije i trošila te odgovarajuća implementacija unutar Simulink programskog okruženja

Kako bismo mogli ispravno modelirati rad baterije i trošila, potrebno je definirati jednadžbu izlazne struje pretvarača i_1 koja je uvijek istog smjera zato što uzlazni pretvarač sadrži blokirajuću (Slika 4.1) diodu u smjeru izlaznog kruga. Definicija struje i_1 [2]:

$$\begin{aligned} i_1 &= i_t + i_{bat} \rightarrow i_1 = \frac{u_{bat}}{R_t} + \frac{u_{bat} - u_{oc}}{R_u} \\ i_1 &= \max(0, \frac{R_u + R_t}{R_t R_u} u_{bat} - \frac{1}{R_u} u_{oc}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Dodatno, potrebno je odrediti jednadžbu napona u_{oc} tj. prijenosnu funkciju u ovisnosti o izlaznom naponu pretvarača u_{bat} [2]:

$$\begin{aligned} u_{oc} &= \frac{1}{C_{bat}} \int i_{bat}(t) dt = \frac{1}{C_{bat}} \int \frac{u_{bat} - u_{oc}}{R_u} dt \\ C_{bat} \frac{du_{oc}}{dt} &= \frac{u_{bat} - u_{oc}}{R_u} \\ U_{oc}(s) &= \frac{1}{C_{bat} R_u s + 1} U_{bat}(s) \end{aligned} \quad (3.2)$$

S obzirom na to da smo aproksimirali bateriju jednostavnim električnim kapacitetom, ovisnost napona članka u_{oc} o pohranjenoj energiji E u bateriji je linearna te se predstavlja jednadžbom pravca:

$$u_{oc} = \frac{u_{ocmax} - u_{ocmin}}{E_{max} - E_{min}} (E - E_{min}) + u_{ocmin} \quad (3.3)$$

Za svrhu projektiranja upravljačke petlje potrebno je definirati prijenosnu funkciju ovisnosti izlazne struje pretvarača i_1 o izlaznom naponu u_{bat} . Laplaceovom transformacijom izraza (3.1) i uvrštavanjem prijenosne funkcije (3.2), dobije se:

$$I_1(s) = \left(\frac{R_u + R_t}{R_t R_u} - \frac{1}{R_u (R_u C_{bat} s + 1)} \right) U_{bat}(s) \quad (3.4)$$

Parametri baterije i trošila definirani su u tablici (Tablica 3).

Tablica 3: Parametri baterije i trošila

Parametar	Vrijednost	Parametar	Vrijednost
$U_{nominal}$	10.8 V	n_s	3
$U_{charged}$	12.6 V	n_p	1
U_{cutoff}	7.5 V	R_u	1 Ω
I_{charge}	4 A	R_t	100 kΩ
$I_{discharge}$	10 A	C	2118 F
E_{max}	15.3 Wh	E_{min}	0 Wh

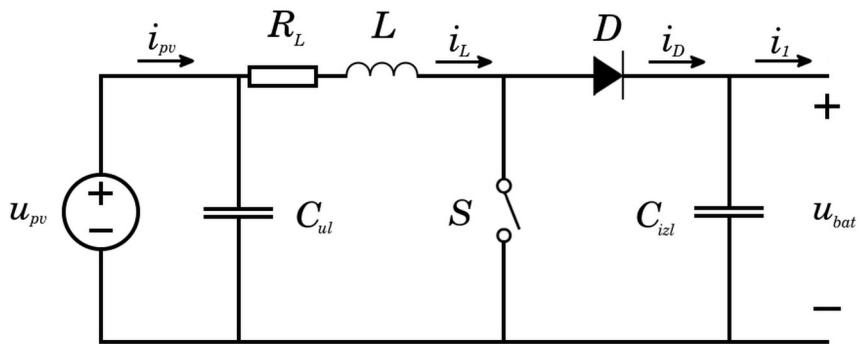
4. Istosmjerni uzlazni pretvarač

Energetska elektronika ima široku primjenu u fotonaponskim sustavima. S obzirom na to da količina proizvedene energije u potpunosti ovisi o uvjetima okoline, potreban je aktivni element regulacije kako bi se postigao odgovarajući izlazni napon uz visoku energetsku učinkovitost.

U nadolazećim potpoglavlјima cilj je izvesti matematički model koji opisuje rad uzlaznog istosmjernog pretvarača u svim njegovim režimima rada te projektirati regulaciju tako da se može omogućiti punjenje baterijskog sustava, ovisno o stanju napunjenošći, maksimalnom snagom i konstantnim naponom.

4.1. Opis pretvarača

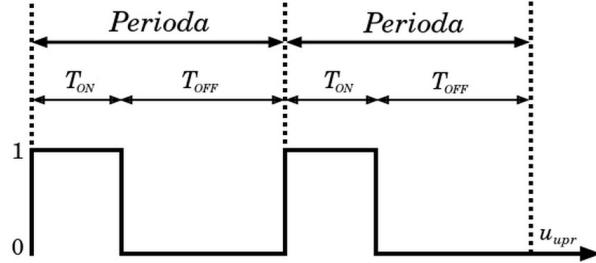
Istosmjerni uzlazni pretvarač (Slika 4.1) jedan je od temeljnih uređaja energetske elektronike koji na svom ulazu uzima napon U_{PV} , a na izlazu proizvodi napon U_{BAT} veće srednje vrijednosti. To se postiže primjenom samo jednog aktivnog elementa – sklopke S . Sklopka, najčešće MOSFET poluvodički ventil (engl. *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*), svojim uklapanjem diktira kada će zavojnica L pohranjivati energiju, a kada će ju oslobađati.



Slika 4.1: Načelna shema istosmjernog uzlaznog pretvarača

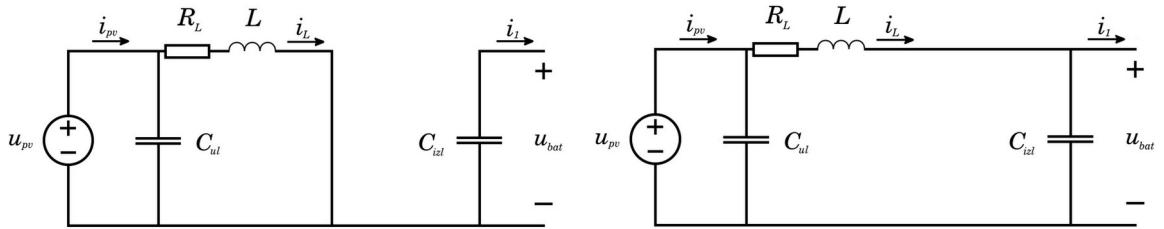
Rad sklopke S regulira se upravljačkim signalom u_{pr} (Slika 4.2) visoke frekvencije, obično u rasponu od 100-500 kHz. Faktor vođenja D (engl. *duty cycle*) označava udio vremena

tijekom jedne periode upravljačkog signala u_{pr} u kojem je sklopka uklopljena. Drugim riječima, faktor vođenja je omjer perioda T_{ON} i T_{OFF} (Slika 4.2). Ovakav način upravljanja, u kojem se koristi pravokutni upravljački signal konstantne frekvencije i promjenjive širine impulsa, naziva se modulacija širinom impulsa (engl. *pulse-width modulation, PWM*).



Slika 4.2: Upravljački signal sklopke

Svojim uklapanjem ($S=ON$) sklopka pretvara induktivitet L u spremnik energije, a svojim isklapanjem ($S=OFF$) isti pretvara u izvor energije (Slika 4.3). Kada induktivitet L oslobođa pohranjenu energiju ($S=OFF$) on inducira napon koji se zbraja na napon samog izvora U_{PV} te se na taj način postiže veći izlazni napon.



Slika 4.3: Lijevo: sklopka S=ON Desno: sklopka S=OFF

Izlazni kapacitet C_i iznimno je bitan u periodu punjenja induktiviteta L ($S=ON$). U tom periodu, izlazni kapacitet ponaša se kao izvor energije za trošilo spojeno na samom izlazu pretvarača. Stoga, glavna funkcija izlaznog kapaciteta je smanjivanje valovitosti izlaznog napona U_{BAT} .

Dodatno, specifično za rad uzlaznog pretvarača s fotonaponskim izvorom, u sklop (Slika 4.1) se dodaje i ulazni kapacitet C_u . U kontekstu pretvarača ulazni kapacitet služi za smanjivanje valovitosti ulaznog napona, ali u kontekstu automatskog upravljanja, uloga mu je omogućiti kontinuirano podešavanje ulaznog napona.

Parametri pretvarača definirani su tablicom (Tablica 4).

Tablica 4: Parametri istosmjernog uzlaznog pretvarača

Parametar	Vrijednost	Parametar	Vrijednost
L	$40 \mu H$	f	$100 kHz$
R_L	$100 m\Omega$	T	$10 \mu s$
C_u	$1500 \mu F$	C_i	$1200 \mu F$

U nadolazećim poglavljima razmotrit će se dvije metode upravljanja pretvaračem temeljene na modulaciji širinom impulsa (PWM):

- naponski način upravljanja – upravljački signal generira se usporedbom referentnog napona s pilastim (nosivim) naponom
- strujni način upravljanja – upravljački signal generira se usporedbom referentne i stvarne vrijednosti struje induktiviteta

Prednosti strujnog načina upravljanja u odnosu na naponski uključuju smanjenje reda sustava, mogućnost izbjegavanja nule u desnoj poluravnini (neminimalno-fazno vladanje sustava) te brži odziv na promjene referentne vrijednosti. Međutim, jedna od manih strujnog načina upravljanja jest pojava oscilacija pri vrijednostima faktora vođenja $D > 0.5$, koje se u ovom radu uklanjaju primjenom kompenzacijске rampe.

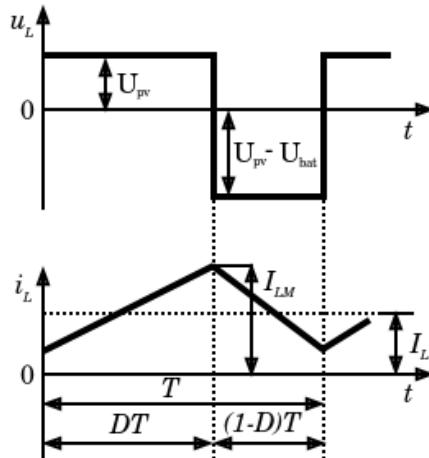
Zbog navedenih razloga, iako će se obraditi model pretvarača za oba načina upravljanja, za projektiranje regulacijske petlje koristit će se isključivo strujni način upravljanja.

4.2. Naponski način upravljanja

Pri naponskom načinu upravljanja uzlaznim pretvaračem, regulacijska petlja određuje referentnu vrijednost izlaznog napona $U_{BAT, ref}$ koju komparator uspoređuje s vrijednošću pilastog naponskog signala. Sjedište pilastog napona i pravca definiranog s $U_{BAT, ref}$ određuje trenutak isključenja poluvodičke sklopke S te se na taj način postiže modulacija širinom impulsa PWM (engl. *pulse width modulation*).

4.2.1 Kontinuirani režim rada

Kontinuirani (engl. *continuous conduction mode, CCM*) je jedan od dva režima rada istosmjernog uzlaznog pretvarača. Valni oblici napona u_L i struje zavojnice i_L prikazani su na dijagramu (Slika 4.4). Ono što je karakteristično za ovaj režim rada je to da struja zavojnice L nikad ne pada na nulu tijekom jednog ciklusa preklapanja sklopke S , tj. zavojnica ne potroši svu pohranjenu energiju prije kraja jedne periode T .



Slika 4.4: Napon u_L i struja i_L zavojnice u kontinuiranom režimu rada pretvarača

Na slici (Slika 4.4) je vidljiv i faktor vođenja D (engl. *duty cycle*) koji označava udio vremena tijekom jedne periode preklapanja T u kojem je sklopka S uklopljena. Drugim riječima, faktor vođenja je omjer perioda T_{ON} i T_{OFF} . To znači da se svaki ciklus preklapanja sklopke S može podijeliti na DT i $(1-D)T$.

Ako je pretvarač kontinuiranom režimu rada i u ustaljenom stanju, možemo reći da funkcionalno djeluje poput istosmjernog transformatora s većim brojem zavoja na sekundarnoj strani uz to da vrijedi sljedeće [3]:

- srednja vrijednost napona na induktivitetu L je jednaka nuli
- srednja vrijednost struje na izlaznom kapacitetu C_i je jednaka nuli.

Matematički model pretvarača (Slika 4.1) može se opisati u potpunosti s 3 diferencijalne jednadžbe tj. sustavom trećeg reda. Svaka diferencijalna jednadžba predstavlja jedan od spremnika energije u sustavu: C_u , L i C_i . Prvi korak je raspisati izvode za svako stanje sklopke zasebno – kada je uključena te kada je isključena. Tijekom vremenskog intervala kada je sklopka S uključena vrijede sljedeći odnosi:

$$\begin{aligned} L \frac{di_L}{dt} &= u_{pv} - R_L i_L \\ C_u \frac{du_{pv}}{dt} &= i_{pv} - i_L \\ C_i \frac{du_{bat}}{dt} &= -i_1 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Za vremenski interval kad je sklopka S isključena vrijedi:

$$\begin{aligned} L \frac{di_L}{dt} &= u_{pv} - R_L i_L - u_{bat} \\ C_u \frac{du_{pv}}{dt} &= i_{pv} - i_L \\ C_i \frac{du_{bat}}{dt} &= i_L - i_1 \end{aligned} \quad (4.2)$$

U praksi se model pretvarača za kontinuirani, odnosno diskontinuirani režim rada realizira usrednjavanjem izraza (4.1) i (4.2). Primjenom usrednjjenog modela gubi se valovitost struje zavojnice i_L i izlaznog napona U_{BAT} , no istodobno se značajno ubrzava vrijeme simulacije rada modela, čime se olakšava i projektiranje regulacijske petlje. Množenjem jednadžbi (4.1) s D i jednadžbi (4.2) s $(1-D)$, a zatim njihovim zbrajanjem, dobiva se usrednjeni model pretvarača:

$$\begin{aligned}
L \frac{di_L}{dt} &= u_{pv} - R_L i_L - (1-D) u_{bat} \\
C_u \frac{du_{pv}}{dt} &= i_{pv} - i_L \\
C_i \frac{du_{bat}}{dt} &= (1-D) i_L - i_1
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Ako u model pretvarača uključimo i strujni krug na izlazu pretvarača, izlazna struja i_L se supstituirira izrazom (3.1) uz uvjet da sustav dobije još jednu varijablu stanja:

$$L \frac{di_L}{dt} = u_{pv} - R_L i_L - (1-D) u_{bat} \tag{4.4}$$

$$C_u \frac{du_{pv}}{dt} = i_{pv} - i_L \tag{4.5}$$

$$C_i \frac{du_{bat}}{dt} = (1-D) i_L - \frac{R_u + R_t}{R_t R_u} u_{bat} + \frac{1}{R_u} u_{oc} \tag{4.6}$$

$$C_{bat} \frac{du_{oc}}{dt} = \frac{1}{R_u} u_{bat} - \frac{1}{R_u} u_{oc} \tag{4.7}$$

Prikaz sustava u prostoru stanja matrični je zapis matematičkog modela koji daje jasan uvid u energetske spremnike dinamičnog sustava. Usrednjeni model (4.3) može se prikazati pomoću zapisa u prostoru stanja, međutim model je trenutno nelinearan. Sljedeći korak je provesti linearizaciju modela primjenom Taylorovog reda prvog stupnja. Prostor stanja sastoji se od četiri varijable stanja i jedne ulazne varijable:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{\Delta i}_L \\ \dot{\Delta u}_{pv} \\ \dot{\Delta u}_{bat} \\ \dot{\Delta u}_{oc} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta i_L \\ \Delta u_{pv} \\ \Delta u_{bat} \\ \Delta u_{oc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \cdot [\Delta D] \\
[\Delta \dot{u}_{bat}] &= [c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4] \cdot \begin{bmatrix} \Delta i_L \\ \Delta u_{pv} \\ \Delta u_{bat} \\ \Delta u_{oc} \end{bmatrix} + d_1 \cdot [\Delta D]
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Linearizacija jednadžbe struje zavojnice (4.4):

$$\begin{aligned}
a_{11} &= \frac{\partial \dot{i}_L}{\partial i_L} = -\frac{R_L}{L} & a_{12} &= \frac{\partial \dot{i}_L}{\partial u_{pv}} = \frac{1}{L} \\
a_{13} &= \frac{\partial \dot{i}_L}{\partial u_{bat}} = \frac{D-1}{L} & b_1 &= \frac{\partial \dot{i}_L}{\partial D} = \frac{U_{bat}}{L}
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Jednadžbe ulaznog napona (4.5) uz uvjet da se linearizacija provodi oko točke maksimalne snage fotonaponskog izvora:

$$\begin{aligned}
\frac{dP_{pv}}{du_{pv}} &= 0 \rightarrow \frac{\Delta i_{pv}}{\Delta u_{pv}} = -\frac{I_{PV}}{U_{PV}} \\
a_{21} &= \frac{\partial u_{pv}}{\partial i_L} = -\frac{1}{C_u} & a_{22} &= \frac{\partial u_{pv}}{\partial u_{pv}} = -\frac{I_{PV}}{C_u U_{PV}}
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Linearizacija jednadžbe izlaznog napona (4.6):

$$\begin{aligned}
a_{31} &= \frac{\partial u_{bat}}{\partial i_L} = \frac{1-D}{C_i} & a_{33} &= \frac{\partial u_{bat}}{\partial u_{bat}} = -\frac{R_u + R_t}{C_i R_u R_t} \\
a_{34} &= \frac{\partial u_{bat}}{\partial u_{oc}} = \frac{1}{C_i R_u} & b_3 &= \frac{\partial u_{bat}}{\partial D} = -\frac{I_L}{C_i}
\end{aligned} \tag{4.11}$$

Linearizacija jednadžbe izlaznog kruga (4.7):

$$a_{33} = \frac{\partial u_{oc}}{\partial u_{bat}} = \frac{1}{C_{BAT} R_u} \quad a_{34} = \frac{\partial u_{oc}}{\partial u_{oc}} = -\frac{1}{C_{BAT} R_u} \tag{4.12}$$

Konačan zapis modela uzlaznog pretvarača za kontinuirani režim rada u prostoru stanja je:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{\Delta i}_L \\ \dot{\Delta u}_{pv} \\ \dot{\Delta u}_{bat} \\ \dot{\Delta u}_{oc} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} & \frac{D-1}{L} & 0 \\ -\frac{1}{C_u} & -\frac{I_{PV}}{C_u U_{PV}} & 0 & 0 \\ \frac{1-D}{C_i} & 0 & -\frac{R_u + R_t}{C_i R_u R_t} & \frac{1}{C_i R_u} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{BAT} R_u} & -\frac{1}{C_{BAT} R_u} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta i_L \\ \Delta u_{pv} \\ \Delta u_{bat} \\ \Delta u_{oc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{U_{BAT}}{L} \\ 0 \\ -\frac{I_L}{C_i} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [\Delta D] \\
[\Delta \dot{u}_{bat}] &= [0 \ 0 \ 1 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} \Delta i_L \\ \Delta u_{pv} \\ \Delta u_{bat} \\ \Delta u_{oc} \end{bmatrix} + 0 \cdot [\Delta D]
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Prijenosna funkcija usrednjenog modela uzlaznog pretvarača može se dobiti iz prostora stanja (4.13) primjenom formule (4.14). Prijenosna funkcija je bitna zato što opisuje odziv izlazne varijable na male promjene ulazne varijable oko radne točke oko koje je model lineariziran.

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (4.14)$$

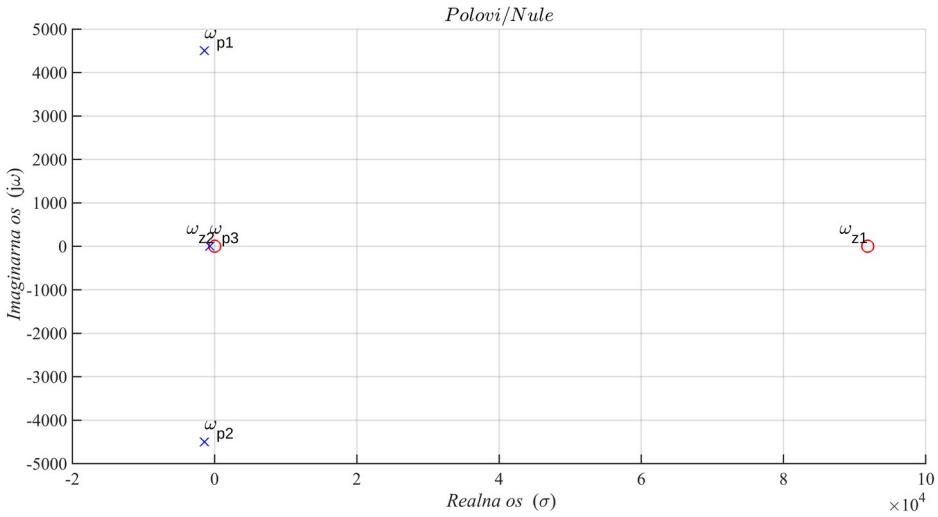
Konačna prijenosna funkcija sustava:

$$G(s) = \frac{U_{BAT}(s)}{D(s)} = \frac{k_6 s^3 + k_7 s^2 + k_8 s + k_9}{k_1 s^4 + k_2 s^3 + k_3 s^2 + k_4 s + k_5} \quad (4.15)$$

Trenutno prijenosna funkcija (4.15) je četvrtog reda, ali ako se pretpostavi da vrijednost kapaciteta baterije teži u beskonačnost $C_{BAT} \rightarrow \infty$, red prijenosne funkcije se smanji za jedan spremnik energije:

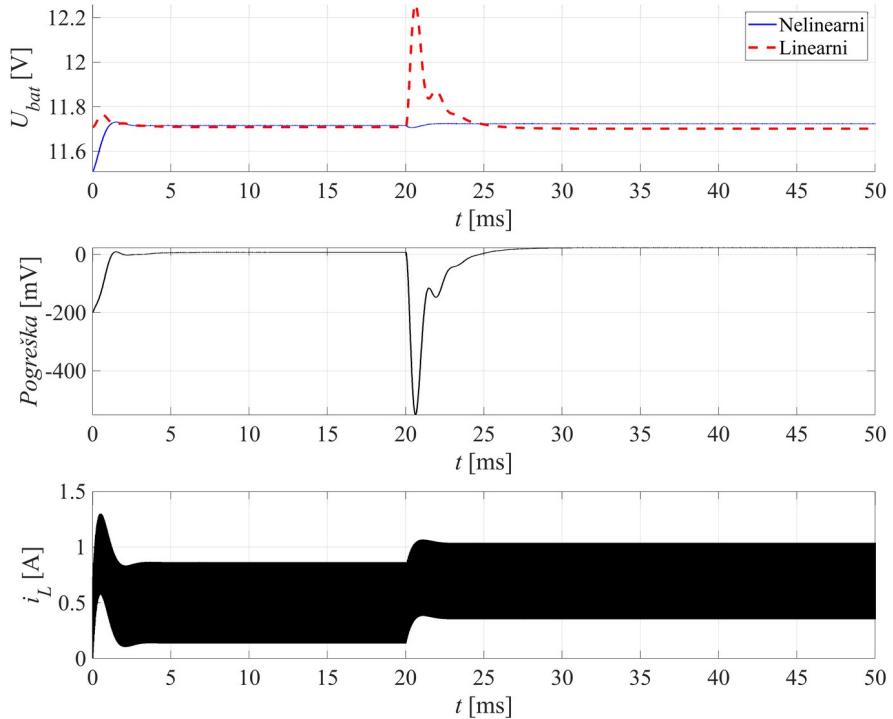
$$\begin{aligned} G_{CCM}(s) &= \frac{U_{BAT}(s)}{D(s)} = \frac{k_5 s^2 + k_6 s + k_7}{k_1 s^3 + k_2 s^2 + k_3 s + k_4} \\ k_1 &= C_i C_u L R_t R_u U_{PV} \\ k_2 &= C_u L R_t U_{PV} + C_u L R_u U_{PV} + C_i I_{PV} L R_t R_u + C_i C_u R_L R_t R_u U_{PV} \\ k_3 &= C_u R_t R_u U_{PV} D^2 - 2C_u R_t R_u U_{PV} D + I_{PV} L(R_t + R_u) + C_u R_L U_{PV} (R_u + R_t) \\ &\quad + R_t R_u U_{PV} (C_i + C_i) + R_t R_u (C_u U_{PV} + C_i I_{PV} R_L) \\ k_4 &= I_{PV} R_t R_u D^2 - 2I_{PV} R_t R_u D + U_{PV} (R_t + R_u) + I_{PV} R_L (R_t + R_u) + I_{PV} R_t R_u \\ k_5 &= -C_u I_L L R_t R_u U_{PV} \\ k_6 &= C_u R_t R_u U_{BAT} U_{PV} - I_L I_{PV} L R_t R_u - C_u D R_t R_u U_{BAT} U_{PV} - C_u I_L R_L R_t R_u U_{PV} \\ k_7 &= I_{PV} R_t R_u U_{BAT} (1 - D) - I_L R_t R_u (U_{PV} + I_{PV} R_L) \end{aligned} \quad (4.16)$$

Polovi sustava za naponski način upravljanja su konjugirano kompleksni tj. prigušenje sustava je $\zeta < 1$. Nazivnik se ne može zapisati kao umnožak zasebnih polova, a postoji i nula u desnoj poluravnini što onemogućuje zanemarivanje učinka nule (Slika 4.5).



Slika 4.5: Grafički prikaz polova i nula prijenosne funkcije $G_{CCM}(s)$ za parametre pretvarača definirane tablicom (Tablica 4)

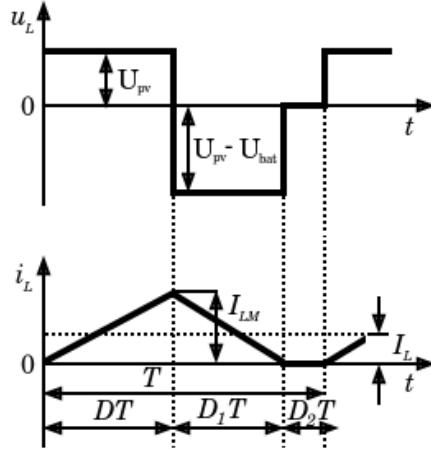
Snimanjem odziva lineariziranog modela pretvarača (4.16) i odziva nelinearnog modela ostvarenog realnim električnim komponentama, moguće je potvrditi kvalitetu pojednostavljenog modela i točnost same linearizacije (Slika 4.6).



Slika 4.6: Odziv izlaznog napona U_{BAT} nelinearnog modela pretvarača i lineariziranog usrednjjenog modela, pogreške linearizacije i struje zavojnice i_L nelinearnog modela na skokovitu pobudu $D(t) = 0.5275 + 0.1S(t - 0.02)$ uz parametre: $U_{PV} = 5.7$ V, $U_{BAT} = 11.7$ V, $L = 40 \mu H$, $R_L = 100 m\Omega$, $C_u = 1500 mF$, $C_i = 1200 mF$

4.2.2 Diskontinuirani režim rada

Diskontinuirani režim rada (engl. *discontinuous conduction mode, DCM*) pretvarača nastupa u trenutku kada struja zavojnice i_L krajem jedne periode uklapanja T padne na nulu (Slika 4.7). Ovakav način rada pojavljuje se pri malim opterećenjima pretvarača kada trošilo zahtjeva malu izlaznu struju i_L . Period u kojem sklopka S ne vodi (T_{OFF}) se sada dijeli u ovisnosti o postojanju struje zavojnice i_L na periode $D_1 T_S$ i $D_2 T_S$.



Slika 4.7: Napon u_L i struja i_L zavojnice u diskontinuiranom režimu rada pretvarača

Zavojnica krajem svake periode uklapanja T preda svu svoju energiju (Slika 4.7) što ujedno znači da prijelazna pojava punjenja struje zavojnice iz kontinuiranog režima rada (4.4) ovdje nije prisutna. Nadalje, to znači da struja zavojnice i_L više nije definirana diferencijalnom jednadžbom već algebarskim izrazom. Srednja vrijednost struje zavojnice i_L i faktor vođenja D_1 mogu se odrediti iz maksimalne vrijednosti struje zavojnice ILM :

$$\begin{aligned}
 I_{LM} &= \frac{U_{PV} DT}{L} = \frac{(U_{BAT} - U_{PV}) D_1 T}{L} \\
 D_1 &= \frac{U_{PV}}{U_{BAT} - U_{PV}} \cdot D \\
 i_L &= \left(\frac{I_{LM} DT}{2} + \frac{I_{LM} D_1 T}{2} \right) \cdot \frac{1}{T} \\
 \bar{i}_L &= \frac{U_{PV} U_{BAT} D^2 T}{2L(U_{BAT} - U_{PV})}
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

Trenutni izraz za srednju vrijednost struje zavojnice (4.17) je nelinearan te ga je potrebno linearizirati:

$$\begin{aligned}\Delta i_L &= k_1 \Delta u_{pv} + k_2 \Delta u_{bat} + k_3 \Delta d \\ k_1 &= \frac{\partial i_L}{\partial u_{pv}} = \frac{U_{BAT}^2 D^2 T}{2L(U_{BAT} - U_{PV})^2} \\ k_2 &= \frac{\partial i_L}{\partial u_{bat}} = -\frac{U_{PV}^2 D^2 T}{2L(U_{BAT} - U_{PV})^2} \\ k_3 &= \frac{\partial i_L}{\partial d} = \frac{U_{PV}^2 U_{BAT} D^2 T}{L(U_{BAT} - U_{PV})^2}\end{aligned}\tag{4.18}$$

Diferencijalne jednadžbe usrednjjenog modela ulaznog pretvarača u diskontinuiranom režimu rada:

$$C_{ul} \frac{du_{pv}}{dt} = i_{pv} - i_L \tag{4.19}$$

$$C_i \frac{du_{bat}}{dt} = i_D - i_1 \tag{4.20}$$

$$C_{bat} \frac{du_{oc}}{dt} = \frac{1}{R_u} u_{bat} - \frac{1}{R_u} u_{oc} \tag{4.21}$$

Jednadžba ulaznog napona (4.19) i jednadžba izlaznog kruga (4.21) ostaju iste kao i za kontinuirani režim rada, ali jednadžba izlaznog napona zabilježava promjenu (4.20). Pojavljuje se srednja struja diode i_D koja se opisuje na sljedeći način

$$\begin{aligned}I_{DM} &= \frac{(U_{BAT} - U_{PV}) D_1 T}{L} \\ i_D &= \frac{1}{T} \left(\frac{I_{DM} \cdot D_1 T}{2} \right) = \frac{U_{PV}^2 D^2 T}{2L(U_{BAT} - U_{PV})}\end{aligned}\tag{4.22}$$

Odnos struje kroz diodu i_D (4.22) i struje kroz zavojnicu i_L (4.17) može se opisati omjerom njihovih srednjih vrijednosti:

$$\frac{i_D}{i_L} = \frac{U_{PV}}{U_{BAT}} \tag{4.23}$$

Uvrštavanjem izraza izlazne struje i_L (3.1) i struje kroz diodu i_D (4.23) u (4.20) dobiju se konačne diferencijalne jednadžbe koje opisuju rad uzlaznog pretvarača u diskontinuiranom načinu rada:

$$\begin{aligned} C_{ul} \frac{du_{pv}}{dt} &= i_{pv} - i_L \\ C_i \frac{du_{bat}}{dt} &= \frac{U_{PV}}{U_{BAT}} i_L - \frac{R_u + R_t}{R_t R_u} u_{BAT} + \frac{1}{R_u} u_{oc} \\ C_{bat} \frac{du_{oc}}{dt} &= \frac{1}{R_u} u_{bat} - \frac{1}{R_u} u_{oc} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Zapisivanjem jednadžbi (4.24) u prostor stanja dobiva se model s tri varijable stanja, jednim ulazom i jednim izlazom:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \dot{u}_{pv} \\ \Delta \dot{u}_{bat} \\ \Delta \dot{u}_{oc} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta u_{pv} \\ \Delta u_{bat} \\ \Delta u_{oc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \cdot [\Delta D] \\ [\Delta \dot{u}_{bat}] &= [c_1 \ c_2 \ c_3] \cdot \begin{bmatrix} \Delta u_{pv} \\ \Delta u_{bat} \\ \Delta u_{oc} \end{bmatrix} + d_1 \cdot [\Delta D] \end{aligned} \quad (4.25)$$

Za linearizaciju jednadžbe ulaznog napona se koristi supstitucija (4.10) koja vrijedi samo u točki maksimalne snage te se struja zavojnice i_L supstituira izrazom (4.18):

$$\begin{aligned} a_{11} = \frac{\partial \dot{u}_{pv}}{\partial u_{pv}} &= -\frac{1}{C_u} \cdot \left(\frac{U_{BAT}^2 D^2 T}{2L(U_{BAT} - U_{PV})^2} + \frac{I_{PV}}{U_{PV}} \right) & b_1 = \frac{\partial \dot{u}_{pv}}{\partial d} &= -\frac{1}{C_u} \frac{U_{PV}^2 U_{BAT} D^2 T}{L(U_{BAT} - U_{PV})^2} \\ a_{12} = \frac{\partial \dot{u}_{pv}}{\partial u_{bat}} &= \frac{1}{C_u} \frac{U_{PV}^2 D^2 T}{2L(U_{BAT} - U_{PV})^2} \end{aligned} \quad (4.26)$$

Linearizacija jednadžbe izlaznog napona uz supstituciju struje zavojnice i_L izrazom (4.18):

$$\begin{aligned} a_{22} = \frac{\partial \dot{u}_{bat}}{\partial u_{bat}} &= -\frac{1}{C_i} \left(\frac{U_{PV}^3 D^2 T}{2U_{BAT} L(U_{BAT} - U_{PV})^2} + \frac{R_u + R_t}{R_t R_u} \right) \\ a_{21} = \frac{\partial \dot{u}_{bat}}{\partial u_{pv}} &= \frac{1}{C_i} \frac{U_{PV} U_{BAT} D^2 T}{2L(U_{BAT} - U_{PV})^2} & a_{23} = \frac{\partial \dot{u}_{bat}}{\partial u_{oc}} &= \frac{1}{C_i} \frac{1}{R_u} \\ b_2 = \frac{\partial \dot{u}_{bat}}{\partial D} &= \frac{1}{C_i} \frac{U_{PV}^3 D^2 T}{L(U_{BAT} - U_{PV})^2} \end{aligned} \quad (4.27)$$

Uvrštavanjem koeficijenata u ranje definiran (4.25) dobije se zapis usrednjjenog modela u prostor stanja:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_u} \left(\frac{U_{BAT}^2 D^2 T}{2L(U_{BAT} - U_{PV})^2} + \frac{I_{PV}}{U_{PV}} \right) & \frac{1}{C_u} \frac{U_{PV}^2 D^2 T}{2L(U_{BAT} - U_{PV})^2} & 0 \\ \frac{1}{C_i} \frac{U_{PV} U_{BAT} D^2 T}{2L(U_{BAT} - U_{PV})^2} & -\frac{1}{C_i} \left(\frac{U_{PV}^3 D^2 T}{2U_{BAT} L(U_{BAT} - U_{PV})^2} + \frac{R_u + R_t}{R_t R_u} \right) & \frac{1}{C_i} \frac{1}{R_u} \\ 0 & \frac{1}{C_{BAT} R_u} & -\frac{1}{C_{BAT} R_u} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

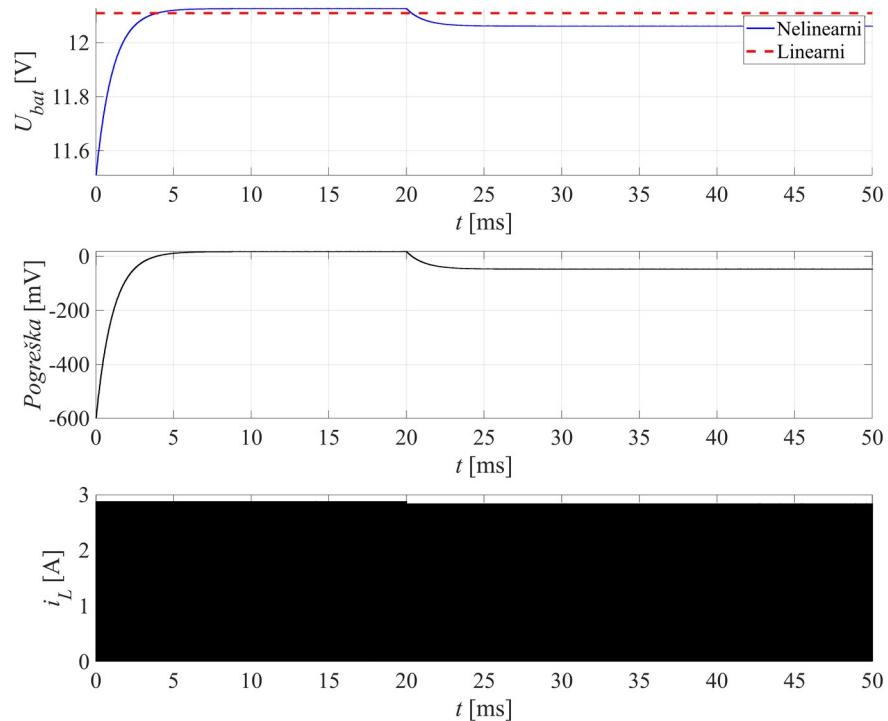
$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_u} \frac{U_{PV}^2 U_{BAT} D^2 T}{L(U_{BAT} - U_{PV})^2} \\ \frac{1}{C_i} \frac{U_{PV}^3 D^2 T}{L(U_{BAT} - U_{PV})^2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[\Delta \dot{u}_{bat}] = [0 \ 1 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} \Delta u_{pv} \\ \Delta u_{bat} \\ \Delta u_{oc} \end{bmatrix} + 0 \cdot [\Delta D]$$

S obzirom na to da se rješavanjem jednadžbe (4.14) dobije se prijenosna funkcija s koeficijentima predugačkim za praktični prikaz, oni će se izostaviti. Konačna prijenosna funkcija u simboličkom prikazu dana je izrazom:

$$G_{DCM}(s) = \frac{U_{BAT}(s)}{D(s)} = \frac{k_4 s + k_5}{k_1 s^2 + k_2 s + k_3} \quad (4.29)$$

Usporedba odziva izlaznog napon U_{BAT} lineariziranog modela i nelinearnog modela sačinjenog od realnih električnih komponenata vidljiva je na grafičkom prikazu (Slika 4.8).



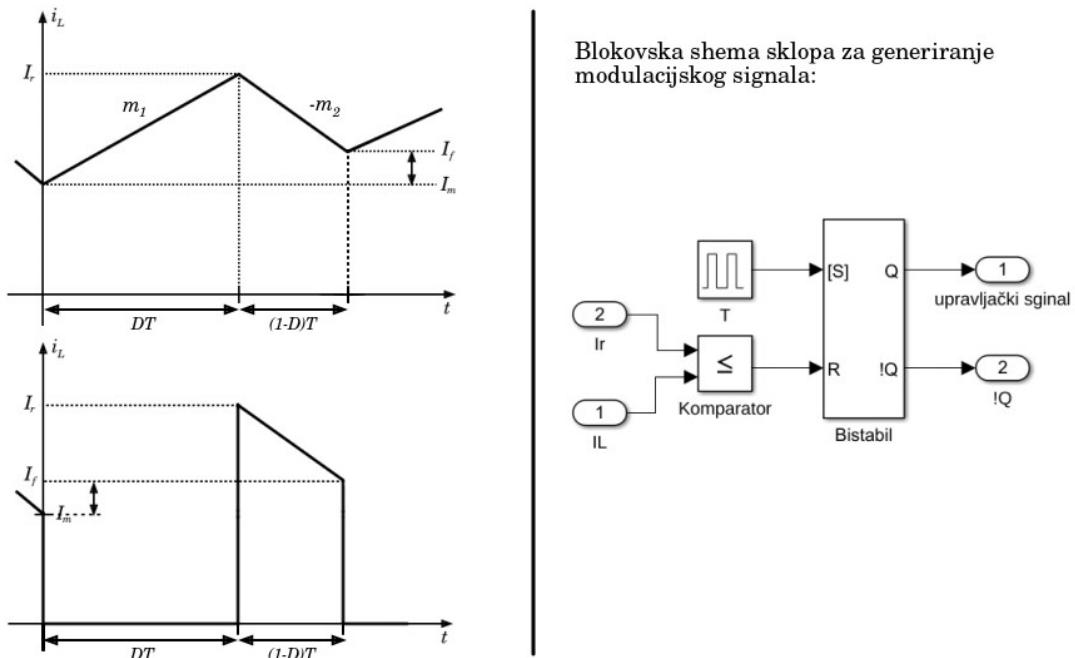
Slika 4.8: Odziv izlaznog napona U_{BAT} nelinearnog modela pretvarača i lineariziranog usrednjenoj modela, pogreške linearizacije i struje zavojnice i_L nelinearnog modela na skokovitu pobudu $D(t) = 0.5101 + 0.01S(t - 0.02)$ uz parametre: $U_{PV} = 5.7$ V, $U_{BAT} = 12.2$ V, $L = 10 \mu H$, $R_L = 100 m\Omega$, $C_u = 1500 \mu F$, $C_i = 1200 \mu F$

4.3. Strujni način upravljanja

Strujni način upravljanja temelji se na strujnom signalu zavojnice pretvarača. Na S ulaz bistabila postavlja se pulsni signal čija frekvencija diktira frekvenciju tranzistorske sklopke (Slika 4.9). U trenutku kad trenutna struja zavojnice nadmaši referentnu struju zavojnice, na ulaz R se prosljeđuje logička jedinica te time uzrokuje isključivanje tranzistorske sklopke. Na ovaj način na izlazu se proizvodi pulsni signal specifičnog faktora popunjenošću D i postiže se modulacija širinom impulsa (engl. *pulse width modulation*) [4].

4.3.1 Kontinuirani režim rada

Za ispravno modeliranje rada pretvarača u strujnom načinu rada iznimno su bitni valni oblici struje zavojnice i_L i struje kroz diodu i_{D1} (Slika 4.9). Minimalna struja zavojnice I_m predstavlja iznos struje početkom, dok I_f predstavlja iznos struje zavojnice na kraju svake periode uklapanja tranzistorske sklopke. Stoga, I_m služi za ispravno modeliranje prijelazne pojave punjenja induktiviteta električnom energijom.



Slika 4.9: Valni oblici struje zavojnice i_L i struje kroz diodu I_{D1} u kontinuiranom režimu rada strujno upravljanog pretvarača (lijevo) i blok shema generatora signala (desno)

Koristeći se valnim oblicima s dijagrama (Slika 4.9), možemo odrediti rastući nagib struje zavojnice u periodu DT te padajući nagib u periodu $(1-D)T$:

$$m_1 = \frac{I_r - I_m}{DT} = \frac{U_{PV}}{L} \quad m_2 = \frac{I_r - I_f}{(1-D)T} = \frac{U_{BAT} - U_{PV}}{L} \quad (4.30)$$

Iz prethodnih izraza moguće je odrediti faktor popunjenoosti D upravljačkog signala:

$$D = \frac{L}{T} \cdot \frac{I_r - I_m}{U_{PV}} \quad (4.31)$$

Međutim, ovakav upravljački zakon je problematičan u kontinuiranom režimu rada pretvarača (Slika 4.10). U stacionarnom stanju pri iznosima popunjenoosti upravljačkog signala $D > 0.5$, što je čest slučaj kod uzlaznog pretvarača, pojavljuje se nestabilnost. U takvim uvjetima, padajući nagib m_2 je znatno veći od rastućeg nagiba m_1 . Ako dođe do perturbacije signala struje zavojnice te se maksimum dostigne malo ranije ili kasnije naspram očekivanog, diktiranog faktorom popunjenoosti D u ustaljenom stanju, dolazi do odstupanja ΔI . Iznos odstupanja proporcionalno raste s povećanjem faktora D .

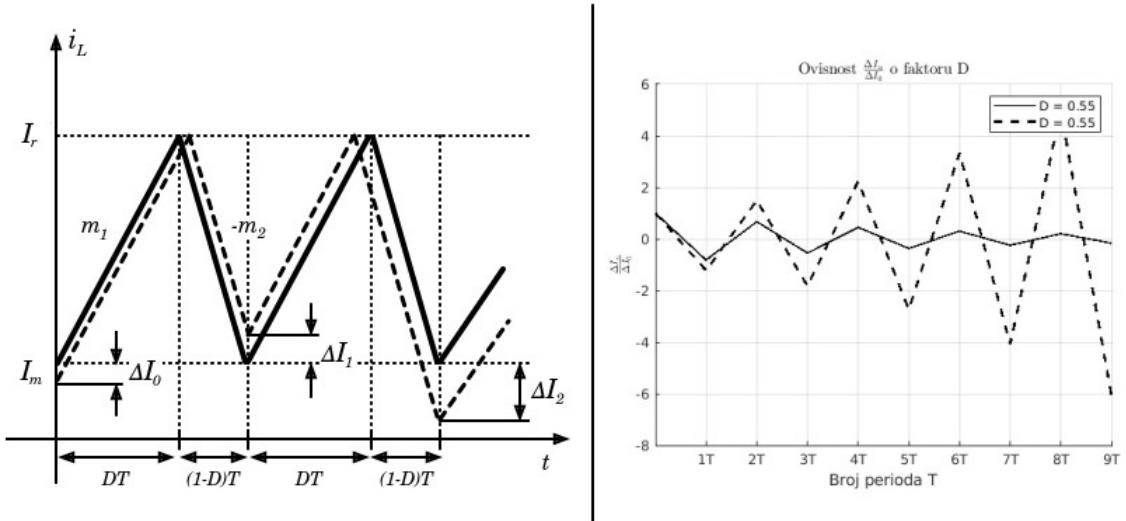
U stacionarnom stanju nema prijelazne pojave tj. minimalna struja I_m i konačna struja I_f su jednake pa se za izračun nagiba struje zavojnice koriste sljedeći izrazi:

$$m_1 = \frac{I_r - I_m}{DT} = \frac{U_{PV}}{L} \quad m_2 = \frac{I_r - I_m}{(1-D)T} = \frac{U_{BAT} - U_{PV}}{L} \quad (4.32)$$

Sada je moguće odrediti iznos odstupanja ΔI u ovisnosti o faktoru popunjenoosti D :

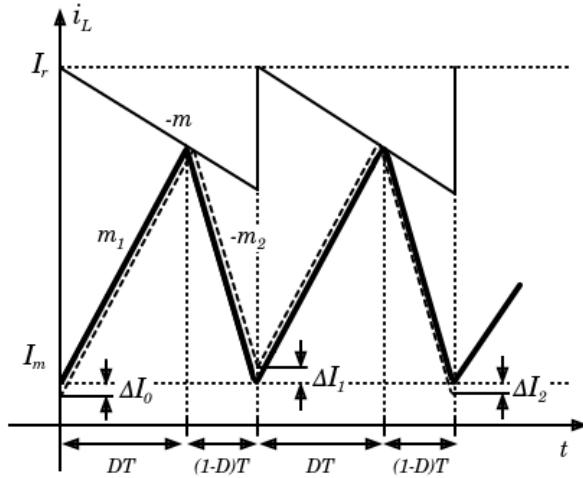
$$\begin{aligned} \frac{m_2}{m_1} &= \frac{D}{1-D} \\ \Delta I_0 &= m_1 \Delta t \quad ; \quad \Delta I_1 = -m_2 \Delta t \\ \Delta I_1 &= \left(-\frac{D}{1-D}\right) \cdot \Delta I_0 \Rightarrow \Delta I_n = \left(-\frac{D}{1-D}\right)^n \cdot \Delta I_0 \end{aligned} \quad (4.33)$$

Iz izvoda (4.33) je vidljivo da za iznose faktora $D > 0.5$, odstupanja ΔI svakom sljedećem periodom T rastu. To znači da bi svaku sljedeću periodu T , pogreška ΔI postajala sve veća i pojavila bi se pozitivna povratna veza.



Slika 4.10: Dijagram nestabilnog rada uzlaznog pretvarača u stacionarnom stanju za faktor popunjenošti $D > 0.5$ (lijevo) te dijagram ovisnosti odstupanja o iznosu faktora popunjenošti (desno)

Rješenje problema se postiže uvođenjem takozvane kompenzacijске rampe nagiba m (Slika 4.11) [4]. Za popunjenošti signalu $D > 0.5$, rampa smanjuje efektivni nagib m_2 i povećava efektivni nagib m_1 . Drugim riječima, ne utječe se na nagib struje zavojnice i_L u direktnom smislu, ali se zato izračunava nova vrijednost referentne struje I_r koja diktira kada će se resetirati bistabil što posljedično smanjuje nagib struje zavojnice.



Slika 4.11: Utjecaj kompenzacijске rampe na smanjivanje osculatornosti struje zavojnice i_L u kontinuiranom režimu strujno upravljanog uzlaznog pretvarača

Uvrštavanjem nagiba kompenzacijске rampe m u izraz (4.33) dobije se:

$$\begin{aligned} m_{1ef} &= m_1 + m & m_{2ef} &= m_2 - m \\ \frac{m_{2ef}}{m_{1ef}} &= \frac{D}{1-D} & & (4.34) \\ \Delta I_n &= \left(-\frac{m_2 - m}{m_1 + m} \right)^n \cdot \Delta I_0 \end{aligned}$$

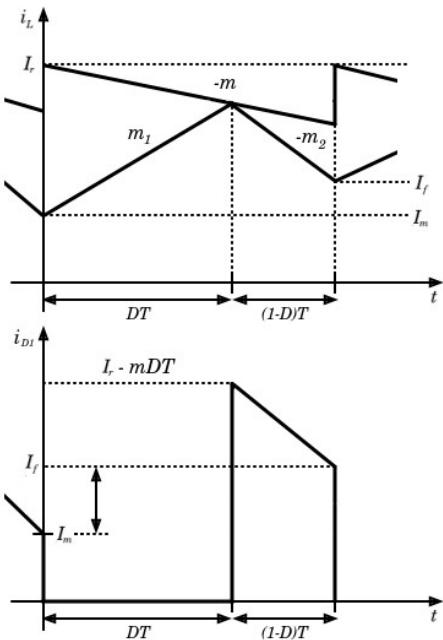
Ako želimo stabilizirati odstupanja struje ΔI tj. postići njihovo isčezavanje, izraz pod n -tom potencijom (4.34) mora zadovoljiti sljedeći uvjet:

$$\begin{aligned} -1 < \frac{m_2 - m}{m_1 + m} < 1 & (4.35) \\ m > \frac{m_2 - m_1}{2} & \quad m_2 > -m_1 \end{aligned}$$

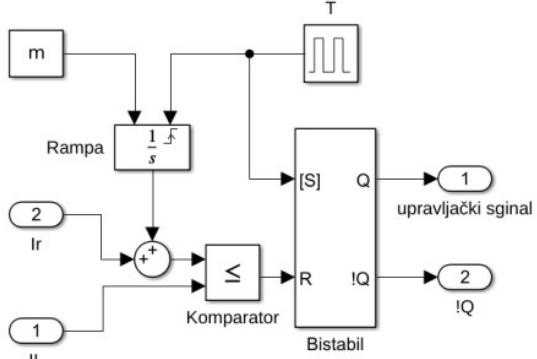
U praksi je potrebno izračunati nagib kompenzacijске rampe m za najgori slučaj tj. za najveću razliku između nagiba m_1 i m_2 . Supstituiranjem nagiba s izrazima pod (4.30) dobije se:

$$m > \frac{U_{BAT} - 2U_{PV}}{2L} \quad (4.36)$$

Na dijagramima (Slika 4.12) valnih oblika struje zavojnice i_L i struje kroz diodu i_{DI} vidljiv je utjecaj uvođenja kompenzacijске rampe koja također mijenja i strukturu sklopa za generiranje modulacijskog signala tranzistorske sklopke.



Blokovska shema sklopa za generiranje modulacijskog signala:



Slika 4.12: Valni oblici struje zavojnice \$i_L\$ i struje kroz diodu \$i_{DI}\$ u kontinuiranom režimu rada strujno upravljanog pretvarača s kompenzacijskom rampom (lijevo) i blok shema generatora signala (desno)

Uzimajući u obzir navedenu kompenzaciju rampu i promatrajući valne oblike struje zavojnice (Slika 4.12), mogu se odrediti novi izrazi za nagibe signala struje zavojnice:

$$m_1 = \frac{I_r - I_m}{DT - m} = \frac{U_{PV}}{L} \quad m_2 = \frac{I_r - I_f}{(1-D)T} - \frac{mD}{1-D} = \frac{U_{PV} - U_{BAT}}{L} \quad (4.37)$$

Faktor popunjenoosti \$D\$ u ovisnosti o nagibu \$m\$:

$$D = \frac{L}{T} \cdot \frac{I_r - I_m}{U_{PV} + mL} \quad (4.38)$$

Iz jednadžbi (4.37) moguće je odrediti struju zavojnice \$I_f\$ na kraju svake periode:

$$I_f = I_r - \frac{T}{L} (U_{BAT} - U_{PV}) (1 - D) - mDT \quad (4.39)$$

Supstitucijom (4.38) u (4.39) dobije se konačan izraz:

$$I_f = I_r - \frac{T}{L} (U_{BAT} - U_{PV}) + \frac{I_r - I_m}{U_{PV} + mL} (U_{BAT} - U_{PV} - mL) \quad (4.40)$$

Iz valnih oblika opisanih slikom (Slika 4.12) može se odrediti minimalna struja zavojnice \$I_m\$ koja opisuje prijelaznu pojavu punjenja induktiviteta električnom energijom:

$$\frac{dI_m}{dt} = \frac{I_f - I_m}{T} = \frac{1}{T} \frac{U_{BAT}}{U_{PV} + mL} (I_r - I_m) - \frac{1}{L} (U_{BAT} - U_{PV}) \quad (4.41)$$

Linearizacijom (4.41) oko radne točke primjenom Taylorovog reda dobije se:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_m(t) &= k_1 \cdot \Delta I_r(t) + k_2 \cdot \Delta I_m(t) + k_3 \cdot \Delta U_{PV}(t) + k_4 \cdot \Delta U_{BAT}(t) \\ k_1 &= \frac{\partial \dot{I}_m}{\partial I_r} = \frac{1}{T} \frac{U_{BAT}}{U_{PV} + mL} \quad k_3 = \frac{\partial \dot{I}_m}{\partial U_{PV}} = \frac{1}{L} - \frac{1}{T} \frac{U_{BAT}}{(U_{PV} + mL)^2} (I_r - I_m) \quad (4.42) \\ k_2 &= \frac{\partial \dot{I}_m}{\partial I_m} = -\frac{1}{T} \frac{U_{BAT}}{U_{PV} + mL} \quad k_4 = \frac{\partial \dot{I}_m}{\partial U_{BAT}} = \frac{1}{T} \frac{I_r - I_m}{U_{PV} + mL} - \frac{1}{L} \end{aligned}$$

Transformacija jednadžbe (4.42) u Laplaceovu domenu:

$$I_m(s) = \frac{k_1 \cdot I_r(s) + k_3 \cdot U_{PV}(s) + k_4 \cdot U_{BAT}(s)}{s - k_2} \quad (4.43)$$

Promatrajući dijagram (Slika 4.12) moguće je definirati srednju struju kroz diodu I_{D1} izračunom površine ispod krivulje i dijeljenjem iste sa periodom T :

$$I_{D1} = \frac{1}{T} \int i_{D1}(t) dt = \frac{1}{2} (I_r - mDT + I_f)(1 - D) \quad (4.44)$$

Supstituiranjem izraza (4.38) i (4.39) u (4.44) dobije se:

$$\begin{aligned} I_{D1} &= I_r - \frac{1}{2} \frac{T}{L} (U_{BAT} - U_{PV}) + \frac{I_r - I_m}{U_{PV} + mL} (U_{BAT} - U_{PV} - mL) - \frac{L}{T} \frac{I_r - I_m}{U_{PV} + mL} I_r \\ &\quad - \frac{1}{2} \frac{L}{T} \frac{(I_r - I_m)^2}{(U_{PV} + mL)^2} (U_{BAT} - U_{PV} - 2mL) \quad (4.45) \end{aligned}$$

Linearizacijom (4.45) oko radne točke primjenom Taylorovog reda dobije se:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{D1}(t) &= k_5 \Delta I_r(t) + k_6 \Delta I_m(t) + k_7 \Delta U_{PV}(t) + k_8 \Delta U_{BAT}(t) \\ k_5 &= \frac{\partial \dot{I}_{D1}}{\partial I_r} = 1 - \frac{L}{T} \frac{2(I_r - I_m)}{U_{PV} + mL} + \frac{U_{BAT} - U_{PV} - mL}{U_{PV} + mL} - \frac{L}{T} \frac{U_{BAT} - U_{PV} - 2mL}{(U_{PV} + mL)^2} (I_r - I_m) \quad (4.46) \\ k_6 &= \frac{\partial \dot{I}_{D1}}{\partial I_m} = \frac{L}{T} \frac{I_r}{U_{PV} + mL} - \frac{U_{BAT} - U_{PV} - mL}{U_{PV} + mL} + \frac{L}{T} \frac{U_{BAT} - U_{PV} - 2mL}{(U_{PV} + mL)^2} (I_r - I_m) \\ k_7 &= \frac{\partial \dot{I}_{D1}}{\partial U_{PV}} = \frac{T}{2L} + \frac{I_r - I_m}{(U_{PV} + mL)^2} \left(\frac{L}{T} I_r - U_{BAT} \right) + \frac{L}{2T} (I_r - I_m)^2 \frac{2U_{BAT} - U_{PV} - 3mL}{(U_{PV} + mL)^3} \\ k_8 &= \frac{\partial \dot{I}_{D1}}{\partial U_{BAT}} = -\frac{T}{2L} + \frac{I_r - I_m}{U_{PV} + mL} - \frac{L}{2T} \frac{(I_r - I_m)^2}{(U_{PV} + mL)^2} \end{aligned}$$

Primjenom Laplaceove transformacije na izraz (4.46) i supstituiranjem minimalne struje I_m izrazom (4.43) dobije se:

$$I_{D1}(s) = \left(k_6 + \frac{k_7 k_1}{s - k_2} \right) I_r(s) + \left(k_8 + \frac{k_7 k_3}{s - k_2} \right) U_{PV}(s) + \left(k_9 + \frac{k_7 k_4}{s - k_2} \right) U_{BAT}(s) \quad (4.47)$$

Naposljetku, moguće je odrediti jednadžbu izlaznog kruga:

$$C_i \frac{du_{BAT}}{dt} = i_{D1} - i_1 \quad (4.48)$$

Primjenom Laplaceove transformacije i supstituiranjem struje i_{D1} (4.47) i i_1 (3.4) moguće je dobiti izraz za ovisnost izlaznog napona pretvarača U_{BAT} o malim promjenama referentne struje I_r i ulaznog napona U_{PV} :

$$\left(C_i s + \frac{R_u + R_t}{R_t R_u} - \frac{1}{R_u (C_{BAT} R_u s + 1)} - k_9 - \frac{k_7 k_4}{s - k_2} \right) U_{BAT}(s) = \left(k_6 + \frac{k_7 k_1}{s - k_2} \right) I_r(s) + \left(k_8 + \frac{k_7 k_3}{s - k_2} \right) U_{PV}(s) \quad (4.49)$$

Rezultat je linearizirani usrenjednjeni model pretvarača koji se sastoji od dvije prijenosne funkcije trećeg reda. Prijenosna funkcija G_1 ovisnosti izlaznog napona U_{BAT} o malim promjenama referentne struje I_r te prijenosna funkcija G_2 ovisnosti izlaznog napona U_{BAT} o malim promjenama ulaznog napona U_{PV} (4.50).

$$G(s) = G_1(s) \cdot I_r(s) + G_2(s) \cdot U_{PV}(s) \quad (4.50)$$

$$G_1(s) = \frac{U_{BAT}(s)}{I_r(s)} = \frac{k_{13}s^2 + k_{14}s + k_{15}}{k_9s^3 + k_{10}s^2 + k_{11}s + k_{12}} \quad G_2(s) = \frac{U_{BAT}(s)}{U_{PV}(s)} = \frac{k_{16}s^2 + k_{17}s + k_{18}}{k_9s^3 + k_{10}s^2 + k_{11}s + k_{12}}$$

$$k_9 = C_{BAT} C_i R_t R_u$$

$$k_{10} = C_{BAT} R_u + C_i R_t + C_{BAT} R_t - C_{BAT} R_t R_u k_8 - C_{BAT} C_i R_t R_u k_2$$

$$k_{11} = C_{BAT} R_t R_u k_2 k_8 - C_{BAT} R_t R_u k_4 k_6 - C_i R_t k_2 - C_{BAT} R_u k_2 - C_{BAT} R_t k_2 - R_t k_8 + 1$$

$$k_{12} = R_t k_2 k_8 - R_t k_4 k_6 - k_2$$

$$k_{13} = C_{BAT} R_t R_u k_5$$

$$k_{14} = C_{BAT} R_t R_u k_1 k_6 - C_{BAT} R_t R_u k_2 k_5 + R_t k_5$$

$$k_{15} = R_t k_1 k_6 - R_t k_2 k_5$$

$$k_{16} = C_{BAT} R_t R_u k_7$$

$$k_{17} = C_{BAT} R_t R_u k_3 k_6 - C_{BAT} R_t R_u k_2 k_7 + R_t k_7$$

$$k_{18} = R_t k_3 k_6 - R_t k_2 k_7$$

Ako pretpostavimo da je kapacitet baterije na izlazu prtvarača beskonačan tj. da parametar $C_{BAT} \rightarrow \infty$, reducirani sustav se može opisati prijenosnim funkcijama drugog reda (4.51).

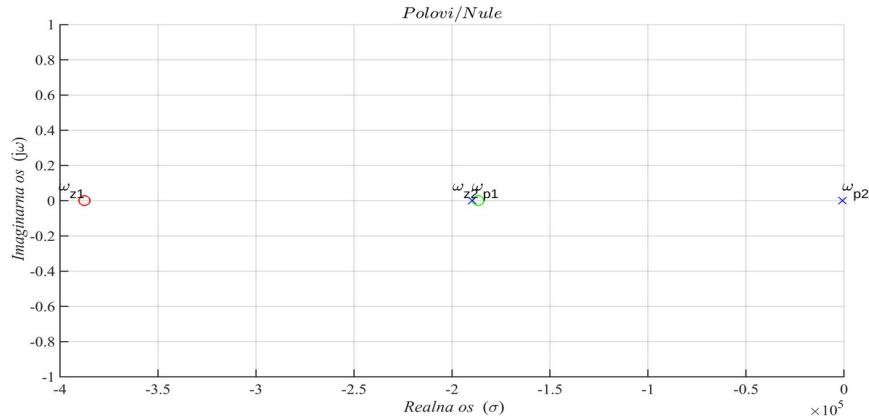
$$\begin{aligned}
G_{1,r}(s) &= \frac{U_{BAT}(s)}{I_r(s)} = \frac{k_{22}s + k_{23}}{k_{19}s^2 + k_{20}s + k_{21}} & G_{2,r}(s) &= \frac{U_{BAT}(s)}{U_{PV}(s)} = \frac{k_{24}s + k_{25}}{k_{19}s^2 + k_{20}s + k_{21}} \\
k_{19} &= C_i R_t R_u & k_{22} &= R_t R_u k_5 \\
k_{20} &= R_u + R_t - C_i R_t R_u k_2 - R_t R_u k_8 & k_{23} &= R_t R_u k_1 k_6 - R_t R_u k_2 k_5 \\
k_{21} &= R_t R_u k_2 k_8 - R_t R_u k_4 k_6 - R_t k_2 - R_u k_2 & k_{24} &= R_t R_u k_7 \\
& & k_{25} &= R_t R_u k_3 k_6 - R_t R_u k_2 k_7
\end{aligned} \tag{4.51}$$

Ako zapišemo prijenosne funkcije (4.51) u obliku standardnog zapisa PT2 sustava s jednom nulom u brojniku, možemo odrediti prigušenje te vrijednosti vremenskih konstanti sustava (4.52).

$$\begin{aligned}
G_{1,r}(s) &= \frac{U_{BAT}(s)}{I_r(s)} = K_1 \frac{1 + T_{z1}s}{T_n s^2 + 2\zeta T_n s + 1} \\
G_{2,r}(s) &= \frac{U_{BAT}(s)}{U_{PV}(s)} = K_2 \frac{1 + T_{z2}s}{T_n s^2 + 2\zeta T_n s + 1} \\
K_1 &= \frac{k_{23}}{k_{21}} & K_2 &= \frac{k_{25}}{k_{21}} \\
T_n &= \sqrt{\frac{k_{19}}{k_{21}}} & \zeta &= \frac{k_{20}}{2\sqrt{k_{19}k_{21}}} \\
T_{z1} &= \frac{k_{22}}{k_{23}} & T_{z2} &= \frac{k_{24}}{k_{25}} \\
T_{p1} &= \frac{T_n}{\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}} & T_{p2} &= \frac{T_n}{\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}}
\end{aligned} \tag{4.52}$$

S obzirom na to da je prigušenje navedenog sustava veće od jedan tj. $\zeta \gg 1$, polovi sustava nemaju imaginarnu komponentu te se nazivnik može zapisati kao umnožak polinoma prvog reda (4.53).

$$\begin{aligned}
G_{1,r}(s) &= \frac{U_{BAT}(s)}{I_r(s)} = K_1 \frac{1 + T_{z1}s}{(1 + T_{p1}s)(1 + T_{p2}s)} \\
G_{2,r}(s) &= \frac{U_{BAT}(s)}{U_{PV}(s)} = K_2 \frac{1 + T_{z2}s}{(1 + T_{p1}s)(1 + T_{p2}s)}
\end{aligned} \tag{4.53}$$



Slika 4.13: Grafički prikaz polova i nula prijenosnih funkcija $G_{1,r}(s)$ i $G_{2,r}(s)$ u kompleksnoj ravnini

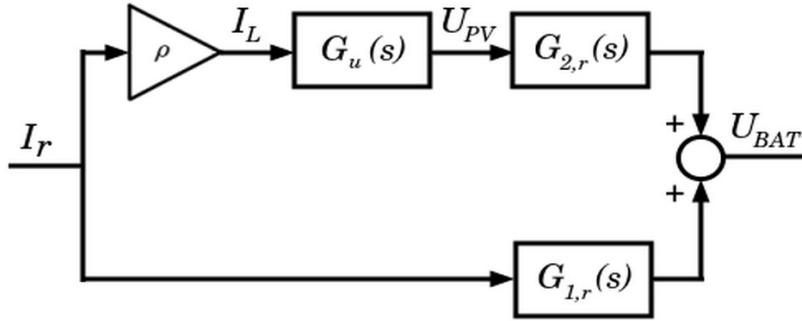
Kod prijenosne funkcije drugog reda s nulom u brojniku moguće je zanemariti nedominantni pol T_{p2} ako je dovoljno brži od dominantnog pola T_{p1} (Slika 4.13). Promatrajući grafički prikaz (4.53) vidljiva je dobra separacija dvaju polova.

Vrijednost induktiviteta L ima izravan utjecaj na pojavu neminimalno-faznog vladanja: s porastom induktiviteta nula T_z iz $G_{1,r}$ se pomiče prema desnoj poluravnini te se u tom slučaju ne može zanemariti. Nula u desnoj poluravnini nije optimalka zato što čini zadatok projektiranja regulacijske petlje znatno komplikiranijim. Kako bi se osigurala što veća stabilnost sustava (Slika 4.13) odabrana mala vrijednost induktiviteta L (Tablica 4). Važno je napomenuti da manje vrijednosti induktiviteta zauzvrat uzrokuju veću valovitost struje zavjonice I_L .

S obzirom na lokacije nula i nedominantnih polova, prijenosne funkcije $G_1(s)$ i $G_2(s)$ mogu se u konačnici zapisati u obliku PT1 članova:

$$G_{1,r}(s) = \frac{U_{BAT}(s)}{I_r(s)} = \frac{K_1}{(1+T_{p1}s)} \quad G_{2,r}(s) = \frac{U_{BAT}(s)}{U_{PV}(s)} = \frac{K_2}{(1+T_{p1}s)} \quad (4.54)$$

Sustav opisan prijenosnim funkcijama (4.53) je sustav s dva ulaza i jednim izlazom tj. takozvani MISO (engl. *multiple input single output*) sustav. Kako bi se mogle koristiti klasične metode projektiranja regulacijske petlje, potrebno je pretvoriti navedeni sustav u sustav s jednim ulazom i jednim izlaznom tj. u takozvani SISO (engl. *single input single output*) sustav (Slika 4.14) [4].



Slika 4.14: Blokovska shema cjelovitog lineariziranog modela

Nadalje, potrebno je odrediti utjecaj promjene referente struje I_r na ulazni napon U_{PV} uzlaznog pretvarača (Slika 4.14). Prijenosna funkcija ulaznog kruga uzlaznog pretvarača stavlja u odnos napon U_{PV} i struju zavojnice I_L . Moguće ju je dobiti iz diferencijalne jednadžbe na ulaznom kapacitetu pretvarača (4.55).

$$\begin{aligned} C_u \frac{du_{PV}}{dt} &= i_{PV} - i_L \\ C_u \Delta \dot{u}_{PV} &= \Delta i_{PV} - \Delta i_L \end{aligned} \quad (4.55)$$

Linearizirani odnos napona fotonaponskog izvora U_{PV} i njegove struje I_{PV} za malu promjenu oko odabrane radne točke može se aproksimirati izrazom:

$$i_{PV} - I_{PV0} = \frac{di_{PV}}{du_{PV}} (u_{PV} - U_{PV0}) \quad (4.56)$$

U jednadžbi (4.56) nagib pravca predstavlja inkrementalna vodljivost G_{PVincr} fotonaponskog izvora u odabranoj radnoj točki:

$$\Delta i_{PV} = G_{PVincr} \cdot \Delta u_{PV} \quad (4.57)$$

Supstituiranjem izraza (4.57) u (4.55) dobije se prijenosna funkcija ulaznog kruga pretvarača:

$$G_u(s) = \frac{U_{PV}(s)}{I_L(s)} = \frac{K_u}{1+T_u s} \quad (4.58)$$

$$K_u = \frac{1}{G_{PVincr}} \quad T_u = -\frac{C_u}{G_{PVincr}}$$

Na shematskom prikazu sustava također je vidljivo da je potrebno odrediti parametar ρ . Parametar predstavlja odziv struje zavojnice I_L na male promjene referentne struje I_r . Prema grafičkom prikazu struje zavojnice I_L (Slika 4.12) može se odrediti jednadžba srednje struje zavojnice:

$$I_{D1} = \frac{1}{T} \int i_L(t) dt \quad (4.59)$$

$$I_L = \frac{1}{T} (I_m D T + I_f (1-D) T + \frac{1}{2} (I_r - m D T - I_m) D T + \frac{1}{2} (I_r - m D T - I_f) (1-D) T)$$

Sljedeći korak je uvrstiti izraz za D (4.38) i izraz za I_f (4.40) u jednadžbu (4.59).

$$I_L = \frac{1}{2} \frac{L}{T} \frac{I_r - I_m}{U_{PV} + mL} I_m + \frac{1}{2} I_r - \frac{1}{2} mL \frac{I_r - I_m}{U_{PV} + mL}$$

$$+ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{L}{T} \frac{I_r - I_m}{U_{PV} + mL} \right) \left(I_r - \frac{T}{L} (U_{BAT} - U_{PV}) + \frac{I_r - I_m}{U_{PV} + mL} (U_{BAT} - U_{PV} - mL) \right) \quad (4.60)$$

Parcijalnim deriviranjem jednadžbe struje zavojnice (4.60) po referentnoj struci I_r dobije se izraz za faktor ρ [4]:

$$\rho = \frac{\partial I_L}{\partial I_r} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{L}{T} \frac{I_m - mL}{U_{PV} + mL} \right)$$

$$+ \frac{1}{2} \left[-\frac{1}{T} \frac{L}{U_{PV} + mL} \left(I_r - \frac{T}{L} (U_{BAT} - U_{PV}) + \frac{I_r - I_m}{U_{PV} + mL} (U_{BAT} - U_{PV} - mL) \right) \right]$$

$$+ \frac{1}{2} \frac{U_{BAT}}{U_{PV} + mL} \left(1 - \frac{L}{T} \frac{I_r - I_m}{U_{PV} + mL} \right) \quad (4.61)$$

Prijenosna funkcija cjelovitog modela pretvarača u kontinuiranom režimu rada po uzoru na blokovsku shemu (Slika 4.14):

$$G_{CCM}(s) = \frac{U_{BAT}(s)}{I_r(s)} = G_{1,r}(s) + \rho \cdot G_u(s) \cdot G_{2,r}(s) \quad (4.62)$$

$$G_{CCM}(s) = \frac{K_1(1+T_u s) + \rho K_u K_2}{(1+T_u s)(1+T_{p1} s)}$$

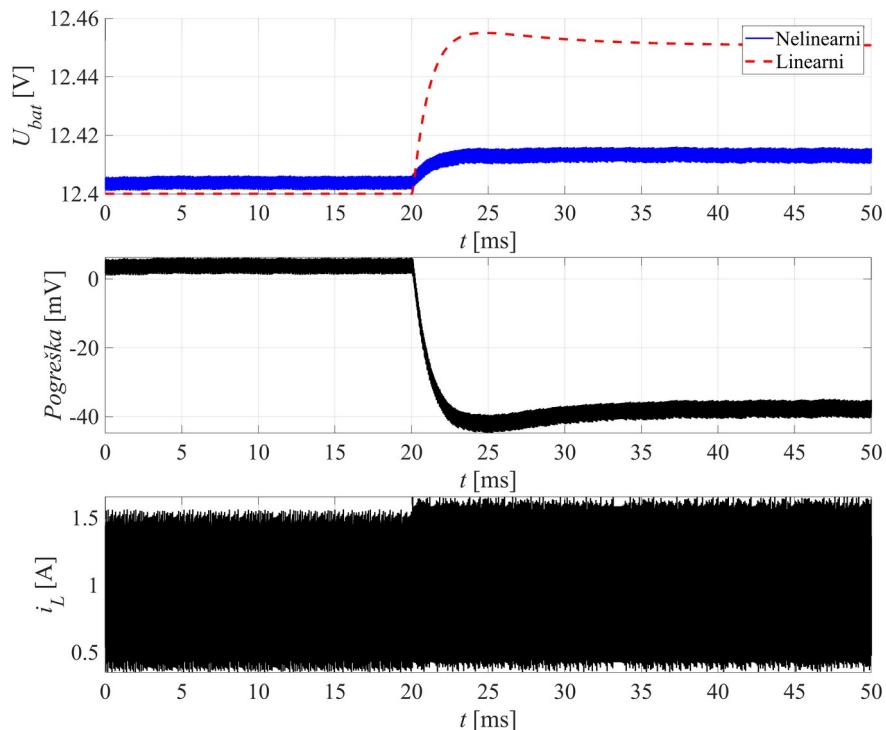
Konačna pojednostavljena prijenosna funkcija cjelovitog kontinuiranog modela:

$$G_{CCM}(s) = K \frac{1+T_z s}{(1+T_u s)(1+T_{p1} s)} \quad (4.63)$$

$$K = K_1 + \rho K_u K_2$$

$$T_z = \frac{K_1 T_u}{K_1 + \rho K_u K_2}$$

Kako bi se dokazalo da je izračunati linearni usrednjeni model uzlaznog pretvarača kvalitetan, potrebno je usporediti odziv na skokovitu pobudu s odzivom nelinearnog modela. Nelinearni model je ostvaren pomoću realnih električnih komponenata dostupnih u programskom paketu *Simulink*.

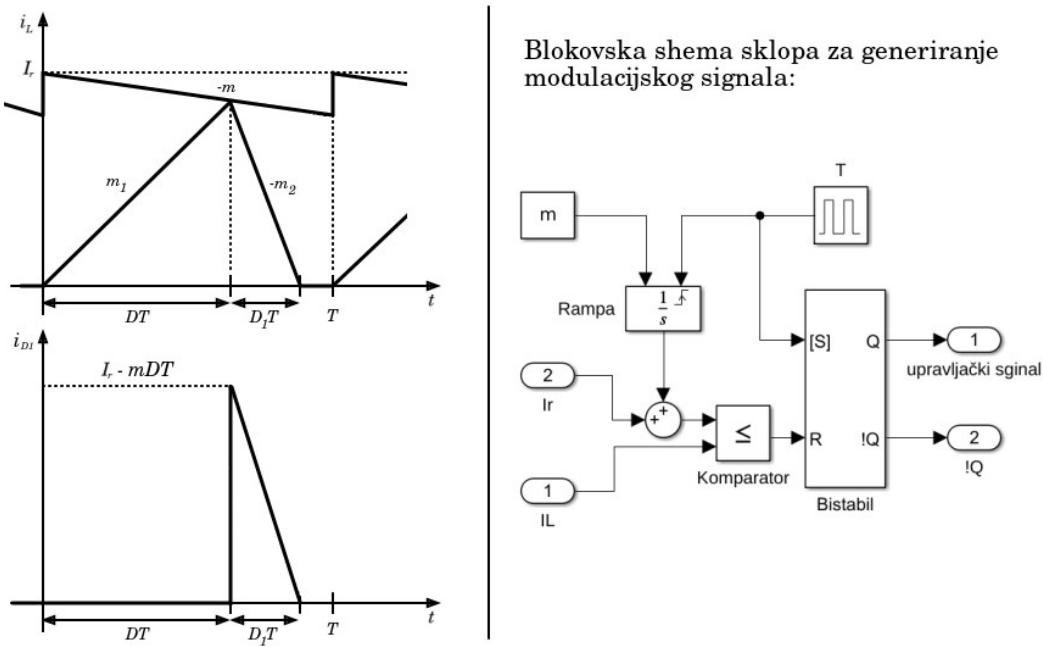


Slika 4.15: Odziv izlaznog napona U_{BAT} nelinearnog modela pretvarača i lineariziranog usrednjjenog modela, pogreške linearizacije i struje zavojnice i_L nelinearnog modela na skokovitu pobudu $I_r(t) = 1.469 + 0.05S(t - 0.01)$ uz parametre: $U_{PV} = 5.7$ V, $U_{BAT} = 12.4$ V, $m = 1.389 * 10^4$, $L = 60 \mu H$, $R_L = 100 m\Omega$, $C_u = 1500 \mu F$, $C_i = 1200 \mu F$

S obzirom na to da usrednjeni model (4.63) nije idealan te je nelinearni model teško postaviti u istu radnu točku kao i linearni, vidljiva je osjetna pogreška izlaznog napona U_{BAT} u odzivu na skokovitu pobudu (Slika 4.15).

4.3.2 Diskontinuirani režim rada

U diskontinuiranom režimu rada, struja zavojnice I_L krajem svake periode upravljačkog signala pada na nulu (Slika 4.16). To znači da kompenzacijска rampa nije potrebna. Međutim, u standardnom radu pretvarača, prijelazi između dvaju režima rada mogu biti česti te konstantno isključivanje i uključivanje kompenzacijске rampe u proračunu izlaznog napona mogu uzrokovati nepotrebne oscilacije. Stoga se kompenzacijска rampa zadržava i u proračunu modela pretvarača za diskontinuirani režim rada.



Slika 4.16: Valni oblici struje zavojnice i_L i struje kroz diodu i_{D1} u diskontinuiranom režimu rada strujno upravljanog pretvarača s kompenzacijskom rampom (lijevo) i blok shema generatora signala (desno)

Nagibi m_1 i m_2 za diskontinuirani režim rada se određuju prema valnim oblicima struje zavojnice I_L koji su vidljivi na dijagramu (Slika 4.16). Zato što se krajem svake periode zavojnica u potpunosti isprazni, nema prijelazne pojave punjenja zavojnice energijom. To znači da nema minimalne struje zavojnice I_m i struje I_f kao kod kontinuiranog režima rada (4.37) što čini proračun (4.64) znatno jednostavnijim

$$m_1 = \frac{I_r}{DT} - m = \frac{U_{PV}}{L} \quad m_2 = \frac{I_r}{D_1 T} - m = \frac{U_{BAT} - U_{PV}}{L} \quad (4.64)$$

Faktor vođenja D može se odrediti iz izraza za nagib m_1 :

$$D = \frac{L}{T} \frac{I_r}{U_{PV} + mL} \quad (4.65)$$

Faktor D_I predstavlja udjel periode T signala kada se vrijednost struje zavojnice I_L smanjuje te je veća od nule:

$$D_1 = \frac{L}{T} \frac{I_r - mDT}{U_{BAT} - U_{PV}} \quad (4.66)$$

Uvrštavanjem izraza (4.65) u (4.66) dobiva se konačan izraz za faktor D_I :

$$D_1 = \frac{L}{T} \frac{I_r U_{PV}}{(U_{BAT} - U_{PV})(U_{PV} + mL)} \quad (4.67)$$

Srednja struja kroz diodu I_{D1} određuje se prema valnom obliku struje na dijagramu (Slika 4.16):

$$I_{D1} = \frac{1}{T} \int i_{D1}(t) dt = \frac{1}{2} D_1 (I_r - mDT) \quad (4.68)$$

Supstituiranjem izraza (4.65) i (4.66) u (4.68) dobije se konačan izraz za određivanje srednje struje kroz diodu:

$$I_{D1} = \frac{L}{2T} \frac{I_r^2 U_{PV}^2}{(U_{BAT} - U_{PV})(U_{PV} + mL)^2} \quad (4.69)$$

Linearizacijom (4.69) oko radne točke primjenom Taylorovog reda dobije se:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{D1}(t) &= k_1 \Delta I_r(t) + k_2 \Delta U_{PV}(t) + k_3 \Delta U_{bat}(t) \\ k_1 &= \frac{\partial \dot{I}_{D1}}{\partial I_r} = \frac{L}{T} \frac{U_{PV}^2 I_r}{(U_{BAT} - U_{PV})(U_{PV} + mL)^2} \\ k_2 &= \frac{\partial \dot{I}_{D1}}{\partial U_{PV}} = \frac{LU_{PV} I_r^2}{2T} \frac{U_{PV}^2 + mL(2U_{BAT} - U_{PV})}{(U_{BAT} - U_{PV})^2 (U_{PV} + mL)^3} \\ k_3 &= \frac{\partial \dot{I}_{D1}}{\partial U_{bat}} = -\frac{L}{2T} \frac{I_r^2 U_{PV}^2}{(U_{BAT} - U_{PV})^2 (U_{PV} + mL)^2} \end{aligned} \quad (4.70)$$

Primjenjivanjem Laplaceove transformacije na (4.70) dobije se:

$$I_{D1}(s) = k_1 I_r(s) + k_2 U_{PV}(s) + k_3 U_{BAT}(s) \quad (4.71)$$

Jednadžba izlaznog strujnog kruga:

$$Gi \frac{du_{BAT}}{dt} = i_{D1} - i_1 \quad (4.72)$$

Supstituiranjem struje kroz diodu I_{D1} sa izrazom (4.71) i izlazne struje pretvarača I_l sa izrazom (3.4), primjenjuje se Laplaceova transformacija:

$$\left(C_i s + \frac{R_u + R_t}{R_u R_t} - \frac{1}{R_u (R_u C_{BAT} s + 1)} - k_3 \right) U_{BAT}(s) = k_1 I_r(s) + k_2 U_{PV}(s) \quad (4.73)$$

Jednadžba (4.73) opisuje sustav sa dva ulaza i jednim izlazom tj. sustav sačinjen od dvije prijenosne funkcije:

$$\begin{aligned} G_1(s) &= \frac{U_{BAT}(s)}{I_r(s)} = \frac{k_7 s + k_8}{k_4 s^2 + k_5 s + k_6} \\ G_2(s) &= \frac{U_{BAT}(s)}{U_{PV}(s)} = \frac{k_9 s + k_{10}}{k_4 s^2 + k_5 s + k_6} \\ k_4 &= C_{BAT} C_i R_t R_u & k_7 &= C_{BAT} R_t R_u k_1 \\ k_5 &= C_{BAT} R_u + C_i R_t + C_{BAT} R_t - C_{BAT} R_t R_u k_3 & k_8 &= R_t k_1 \\ k_6 &= 1 - R_t k_3 & k_9 &= C_{BAT} R_t R_u k_2 \\ & & k_{10} &= R_t k_2 \end{aligned} \quad (4.74)$$

Kao i kod proračuna modela za kontinuirani režim rada pretvarača (4.51), prepostavlja se da baterija u izlaznom krugu ima beskonačan električni kapacitet tj. da je $C_{BAT} = \infty$.

$$\begin{aligned} G_{1,r}(s) &= \frac{U_{BAT}(s)}{I_r(s)} = \frac{k_{13}}{k_{11}s + k_{12}} \\ G_{2,r}(s) &= \frac{U_{BAT}(s)}{U_{PV}(s)} = \frac{k_{14}}{k_{11}s + k_{12}} \end{aligned} \quad (4.75)$$

$$\begin{aligned} k_{11} &= C_i R_t R_u & k_{13} &= R_t R_u k_1 \\ k_{12} &= R_u + R_t - R_t R_u k_3 & k_{14} &= R_t R_u k_2 \end{aligned}$$

Prijenosne funkcije (4.75) je korisno zapisati u obliku standardnog zapisa PT1 sustava:

$$\begin{aligned} G_{1,r}(s) &= \frac{U_{BAT}(s)}{I_r(s)} = \frac{K_1}{1 + T_n s} & G_{2,r}(s) &= \frac{U_{BAT}(s)}{U_{PV}(s)} = \frac{K_2}{1 + T_n s} \\ K_1 &= \frac{k_{13}}{k_{12}} & T_n &= \frac{k_{11}}{k_{12}} \\ K_2 &= \frac{k_{14}}{k_{12}} \end{aligned} \quad (4.76)$$

Kako bi se dobila konačna prijenosna funkcija s jednim ulazom i jednim izlazom kao i za kontinuirani režim rada (Slika 4.14), potrebno je odrediti srednju struju zavojnice I_L i parametar ρ za diskontinuirani režim rada:

$$I_{D1} = \frac{1}{T} \int i_L(t) dt = \frac{1}{2T} \frac{L U_{BAT} U_{PV} I_r^2}{(U_{BAT} - U_{PV})(U_{PV} + mL)^2} \quad (4.77)$$

Parametar ρ se određuje iz jednadžbe srednje struje zavojnice I_L (4.77) [4]:

$$\rho = \frac{\partial I_L}{\partial I_r} = \frac{L}{T} \frac{U_{BAT} U_{PV} I_r}{(U_{BAT} - U_{PV})(U_{PV} + mL)^2} \quad (4.78)$$

Naposljetku, moguće je odrediti prijenosnu funkciju koja opisuje cijeloviti model pretvarača u diskontinuiranom režimu rada. Prijenosna funkcija $G_u(s)$ određena je izrazom (4.58) kao i za kontinuirani režim rada:

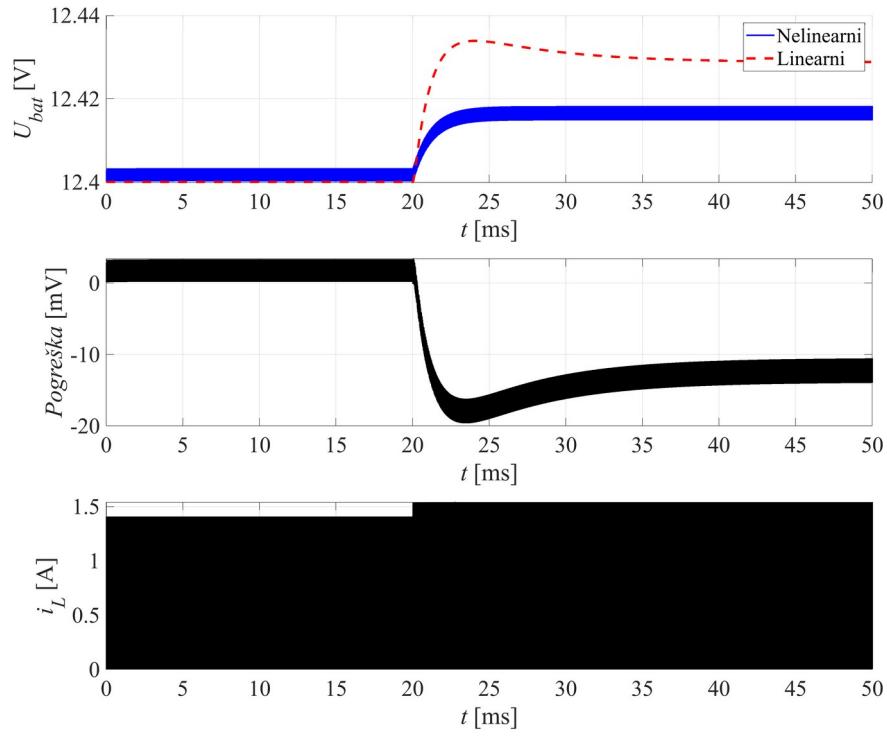
$$\begin{aligned} G_{DCM}(s) &= \frac{U_{BAT}(s)}{I_r(s)} = G_{1,r}(s) + \rho \cdot G_u(s) \cdot G_{2,r}(s) \\ G_{DCM}(s) &= \frac{K_1(1+T_u s) + \rho K_u K_2}{(1+T_n s)(1+T_u s)} \end{aligned} \quad (4.79)$$

Konačna pojednostavljena prijenosna funkcija cijelovitog modela:

$$G_{DCM}(s) = K \frac{1+T_z s}{(1+T_u s)(1+T_n s)} \quad (4.80)$$

$$K = K_1 + \rho K_u K_2 \quad T_z = \frac{K_1 T_u}{K_1 + \rho K_u K_2}$$

Točnost lineariziranog modela može se potvrditi usporedbom odziva s nelinearnim modelom (Slika 4.17).



Slika 4.17: Odziv izlaznog napona U_{BAT} nelinearnog modela pretvarača i lineariziranog usrednjjenog modela, pogreške linearizacije i struje zavojnice i_L nelinearnog modela na skokovitu pobudu $I_r(t) = 1.469 + 0.05S(t - 0.01)$ uz parametre: $U_{PV} = 5.7$ V, $U_{BAT} = 12.4$ V, $m = 2.082 * 10^4$, $L = 40$ μ H, $R_L = 100$ m Ω , $C_u = 1500\mu F$, $C_i = 1200\mu F$

Kao i kod kontinuiranog režima rada (Slika 4.15), a ovdje i izraženije, postoji značajna pogreška između nelinearnog i lineariziranog modela.

5. Upravljanje pretvaračem

Prethodna poglavlja detaljno su obradila strukturu, matematički model i različite režime rada istosmjernog uzlaznog pretvarača. Glavni cilj matematičkog modeliranja je postići model koji što vjernije prati odziv stvarnog sustava i time omogućuje primjenu klasične teorije automatskog upravljanja u svrhu projektiranja upravljačke petlje. Izazov pri upravljanju uzlaznim pretvaračem je postizanje stabilnog i učinkovitog prijenosa energije uz istovremeno ostvarenje maksimalnog iskorištenja fotonaponskog izvora uzimajući u obzir sigurno i kontrolirano punjenje baterije.

5.1. Granica kontinuiranog režima rada

Kako bi se mogao ispravno simulirati rad uzlaznog pretvarača potrebno je osmislti logiku koja može detektirati prijelaz iz kontinuiranog režima rada (4.63) u diskontinuirani režim rada (4.80). Mjerenje kada struja zavojnice i_L jednaka nuli nije dovoljno (engl. *zero crossing detection*) s obzirom na to da nam takva logika ne daje jasan trenutak kada sustav mijenja i koliko dugo se zadržava u pojedinom režimu rada.

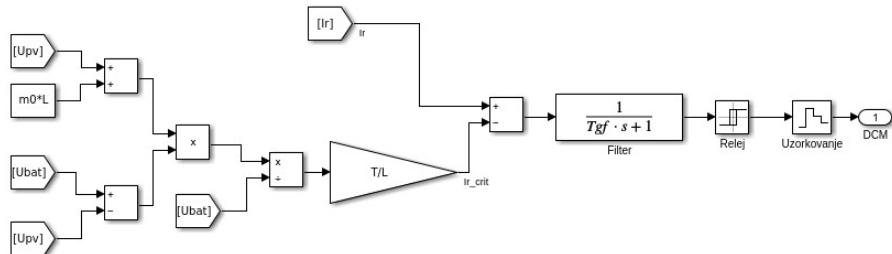
Rješenje problema je prepoznavanje kada je granični uvjet zadovoljen:

$$D_1 \leq 1 - D \quad (5.1)$$

Uvrštavanjem izraza (4.67) i (4.65) u (5.1), dobije se konačan izraz za granični uvjet:

$$\begin{aligned} I_r &\leq I_{r,crit} \\ I_{r,crit} &= \frac{T}{L} \frac{(U_{PV} + mL)(U_{BAT} - U_{PV})}{U_{BAT}} \end{aligned} \quad (5.2)$$

S obzirom na to da je uvjet (5.2) izведен pod pretpostavkom idealnog, usrednjjenog modela sustava, njegova direktna primjena u simulacijskom modelu rezultira osjetljivošću na oscilatornost referentne struje, što može uzrokovati neželjeno prebacivanje između CCM i DCM režima rada. Zbog toga je u simulacijskom modelu implementirana histereza uz filtriranje relevantnih signala, čime se postiže robusna detekcija radnog režima (Slika 5.1).

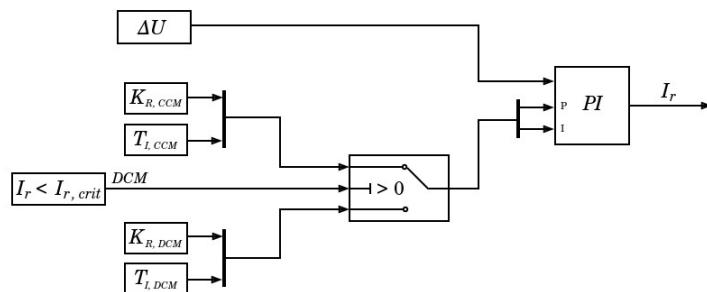


Slika 5.1: Simulink implementacija graničnog uvjeta

5.2. Upravljanje regulatorom s promjenjivim parametrima

Budući da uzlazni pretvarač pokazuje različitu dinamiku u kontinuiranom (CCM) i diskontinuiranom (DCM) načinu rada, potrebno je projektirati zasebne regulatore ovisno o načinu punjenja baterije na izlazu pretvarača. Međutim, promjene između tih regulatora, odnosno PI sklopova koji posjeduju vlastita stanja integratora, mogu uzrokovati trzaje u odzivu pretvarača prilikom promjene režima rada.

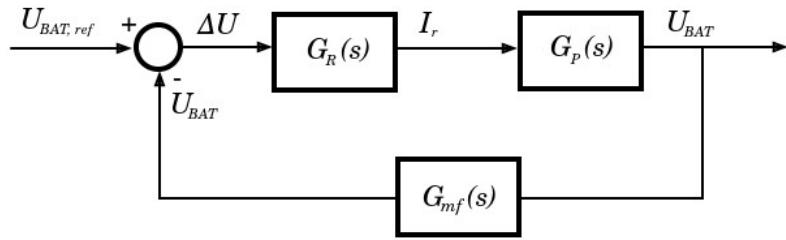
Kako bi se navedeni problem izbjegao, primjenjuje se metoda regulatora s promjenjivim parametrima (engl. *gain scheduling*), pri čemu se na temelju detektiranog režima rada (5.2) odabiru odgovarajući parametri regulatora (Slika 5.2).



Slika 5.2: Blokovska shema upravljanja s promjenjivim parametrima regulatora

5.3. Punjenje konstantnim naponom

Kada se baterija približi maksimalnom stanju napunjenošći, sustav prelazi u režim rada punjenja konstantnim naponom u kojem je cilj održavati izlazni napon U_{BAT} na zadanoj referentnoj vrijednosti U_{ref} . U ovom režimu rada izlazna struja pretvarača postupno opada, čime se smanjuje opterećenje baterijskih celija i sprječava njihovo prepunjjenje (Slika 5.3).



Slika 5.3: Idealizirana blok shema punjenja konstantnim naponom

Kako bi se opisani način punjenja realizirao, potreban je regulator izlaznog napona koji osigurava stabilno praćenje referentne vrijednosti unatoč promjenama ulaznog napona i radnih uvjeta pretvarača. Radna točka sustava pri punjenju konstantnim naponom definirana je tablicom (Tablica 5).

Tablica 5: Parametri lineariziranog sustava pri punjenju konstantnim naponom

Parametar	Vrijednost	Parametar	Vrijednost
G	800 W/m^2	SOC	98 \%
U_{PV0}	5.7 V	U_{BAT0}	12.4 V
U_{PVmin}	5.467 V	U_{BATmax}	12.6 V
$I_{PV0} = I_{r0}$	1.469 A	m_0	$2.0825 * 10^4$

5.3.1 Mjerni filter

U energetskoj elektronici mjerni filtri imaju čestu primjenu za smanjivanje oscilatornosti mјerenog napona uzrokovanih velikim frekvencijama rada poluvodičkih ventila. Iz tog razloga, u povratnu vezu se dodaje niskopropusni (*eng. low pass filter*) RC filter kako bi se smanjila valovitost mјerenog izlaznog napona $U_{BAT[4]}$.

lomna frekvencija filtra postavlja se na 2 kHz kako bi se smanjila amplituda oscilacija uzrokovanih frekvencijom preklapanja f_S upravljačke sklopke približno 30 dB. Prijenosna funkcija filtra:

$$G_{mf}(s) = \frac{1}{1+RCs} = \frac{1}{1+T_{mf}s} = \frac{1}{1+0.00008s} \quad (5.3)$$

5.3.2 Kontinuirani režim rada

Uvrštanjem parametara (Tablica 5) u prethodno definiran model izlaznog napona za kontinuirani režim rada (4.63) dobije se:

$$G_p(s) = \frac{K_p(1+T_zs)}{(1+T_us)(1+T_{p1}s)} \cdot \frac{1}{(1+T_{mf}s)} \quad (5.4)$$

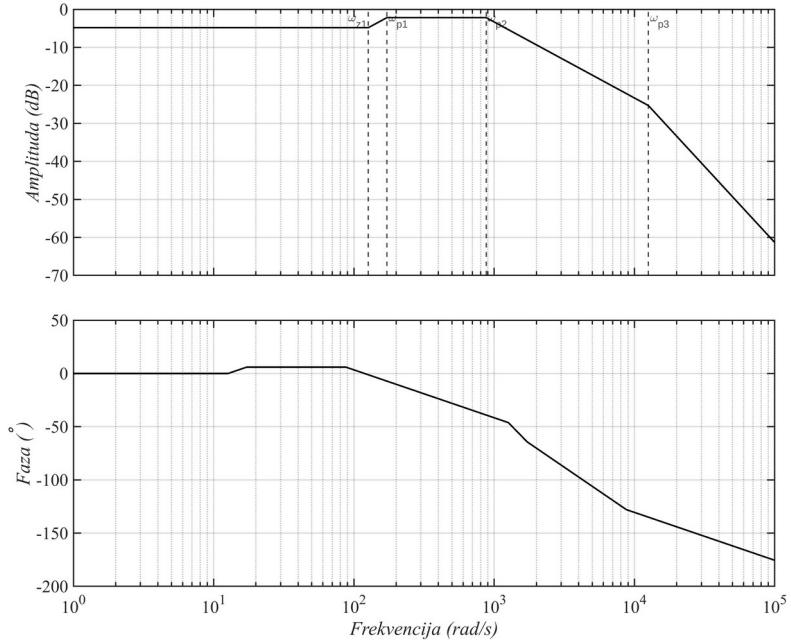
$$G_p(s) = \frac{0.5739(1+0.0079s)}{(1+0.0058s)(1+0.0011)(1+0.00008s)}$$

Upravljanje izlaznim naponom pretvarača zahitjava robustan regulator s malim nadvišenjem ($\sigma_m \approx 20\%$) i relativno velikim faznim osiguranjem ($\gamma_s \approx 60^\circ$). Kako bi se zadovoljili navedeni uvjeti koristit će se *PI* regulator (5.5) projektiran metodom simetričnog optimuma s korigiranim koeficijentom pojačanja.

$$G_R(s) = K_R \frac{1+T_I s}{T_I s} \quad (5.5)$$

Cilj simetričnog optimuma je postići simetričnu frekvencijsku karakteristiku sustava oko presječne frekvencije ω_c . Takvo oblikovanje frekvencijske karakteristike otvorenog kruga sustava daje dobar kompromis između stabilnosti i brzine odziva na poremećaj.

Presječna frekvencija je bitna zato što predstavlja točku najveće osjetljivosti sustava s obzirom na to da u toj točci sustav prelazi iz pojačavanja u atenuiranje signala. Promatrajući Bodéov dijagram otvorenog kruga za prijenosnu funkciju procesa (Slika 5.4) vidljivo je da se simetrija frekvencijske karakteristike oko presječne frekvencije može postići ako se ω_c postavi između ω_{p2} i ω_{p3} gdje se nalazi područje karakterizirano nagibom od -20 dB/dek.



Slika 5.4: Bodéov dijagram otvorenog kruga kontinuiranog modela izlaznog napona

Prema pravilima metode simetričnog optimuma, za maksimalno nadvišenje $\sigma_m = 20\%$ prijenosne funkcije zatvorenog kruga u odzivu na skokovitu pobudu, potrebno je fazno osiguranje od $\gamma_s = 70 - 20 = 50^\circ$. Koeficijent a određuje poziciju presječne frekvencije ω_c na nagibu -20 dB/dek [5]:

$$a = \frac{\gamma_s}{14} = 3.57 \quad (5.6)$$

Frekvencija presječne frekvencije ω_c i lomna frekvencija integratora regulatora ω_I :

$$\begin{aligned} \omega_c &= \frac{\omega_{p3}}{a} = 3519 s^{-1} \\ \omega_I &= \frac{\omega_c}{a} = 985 s^{-1} \end{aligned} \quad (5.7)$$

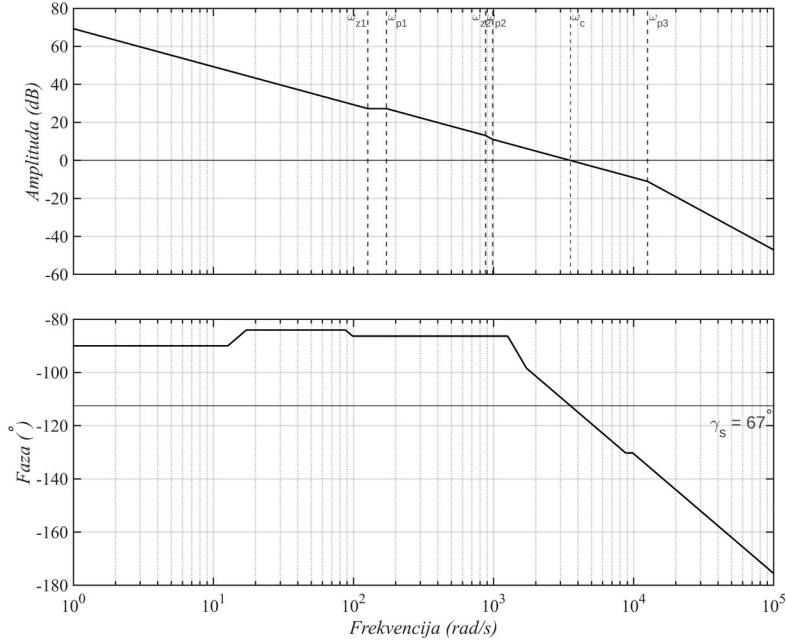
Kako bi se odredilo pojačanje regulatora K_R potrebno je znati pojačanje otvorenog kruga K_O . Koeficijent pojačanja otvorenog kruga se iščitava na frekvenciji $\omega = 1 s^{-1}$ s karakterističnim nagibom od -20 dB/dek:

$$K_o = -20 \log\left(\frac{\omega_I}{\omega_c}\right) - 40 \log\left(\frac{\omega_{p2}}{\omega_I}\right) - 20 \log\left(\frac{\omega_{p1}}{\omega_{p2}}\right) - 20 \log\left(\frac{1}{\omega_z}\right)$$

$$K_o = \frac{K_R K_p}{T_I} = 69.29 \text{ dB} = 2915.1 \quad (5.8)$$

$$T_I = 0.001 \quad K_R = 5.1562$$

Bodéov dijagram otvorenog kruga s regulatorom (Slika 5.5) pokazuje simetriju oko presječne frekvencije ne samo u nagibima -20 dB/dek već i -40 dB/dek.



Slika 5.5: Bodéov dijagram otvorenog kruga kontinuiranog modela izlaznog napona s regulatorom

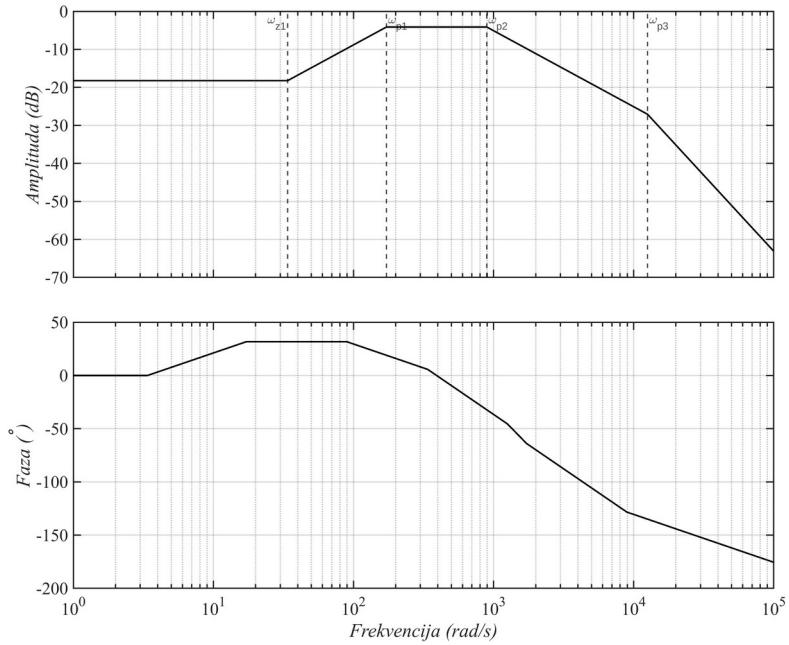
5.3.3 Diskontinuirani režim rada

Projektiranje regulatora provodi se na isti način kao i za kontinuirani način. Uvrštavanjem (Tablica 5) u model pretvarača za diskontinuirani režim rada (4.80) dobije se:

$$G_p(s) = \frac{K_p(1+T_z s)}{(1+T_u s)(1+T_n s)} \cdot \frac{1}{(1+T_{mf} s)} \quad (5.9)$$

$$G_p(s) = \frac{0.1225(1+0.0295 s)}{(1+0.0058 s)(1+0.0011)(1+0.00008 s)}$$

Frekvencijska karakteristika prijenosne funkcije procesa (5.9) vidljiva je na Bodéovom dijagramu otvorenog kruga (Slika 5.6).



Slika 5.6: Bodéov dijagram otvorenog kruga diskontinuiranog modela izlaznog napona

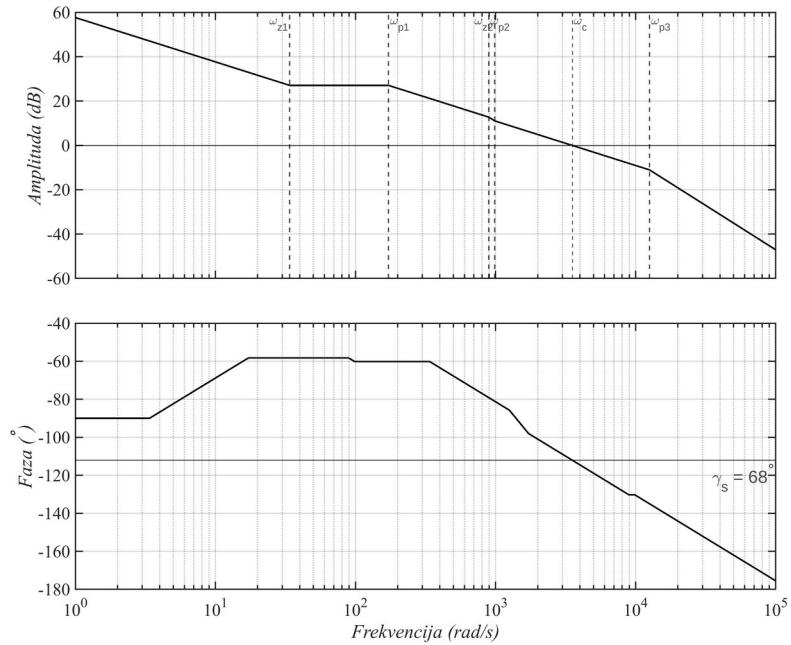
S obzirom na to da se bira isto nadvišenje i fazno osiguranje kao i kod kontinuiranog modela, diskontinuirani model ima istu presječnu frekvenciju ω_c i lomnu frekvenciju integratora ω_I (5.7) [5].

Pojačanje prijenosne funkcije otvorenog kruga dobiva se očitavanjem s dijagraama (Slika 5.7) te se naknadno mogu izračunati parametri regulatora:

$$K_O = \frac{K_R K_p}{T_I} = 57.66 \text{ dB} = 763.54 \quad (5.10)$$

$$T_I = 0.001$$

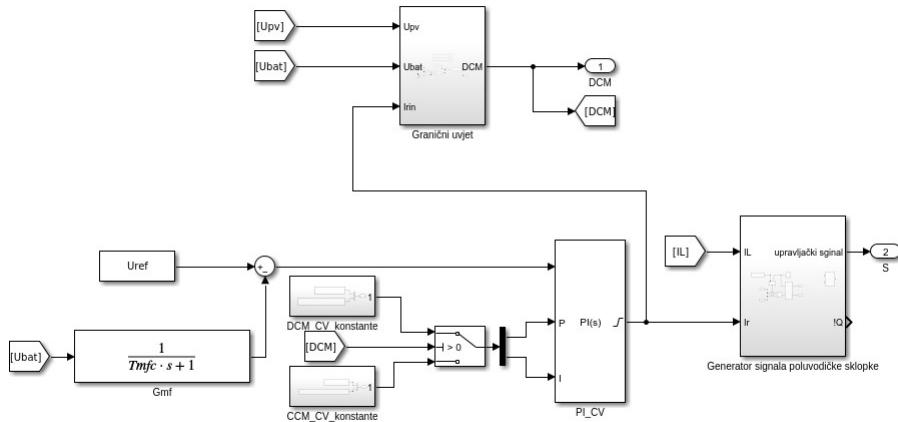
$$K_R = 6.324$$



Slika 5.7: Bodéov dijagram otvorenog kruga diskontinuiranog modela izlaznog napona s regulatorom

5.3.4 Simuliranje rada

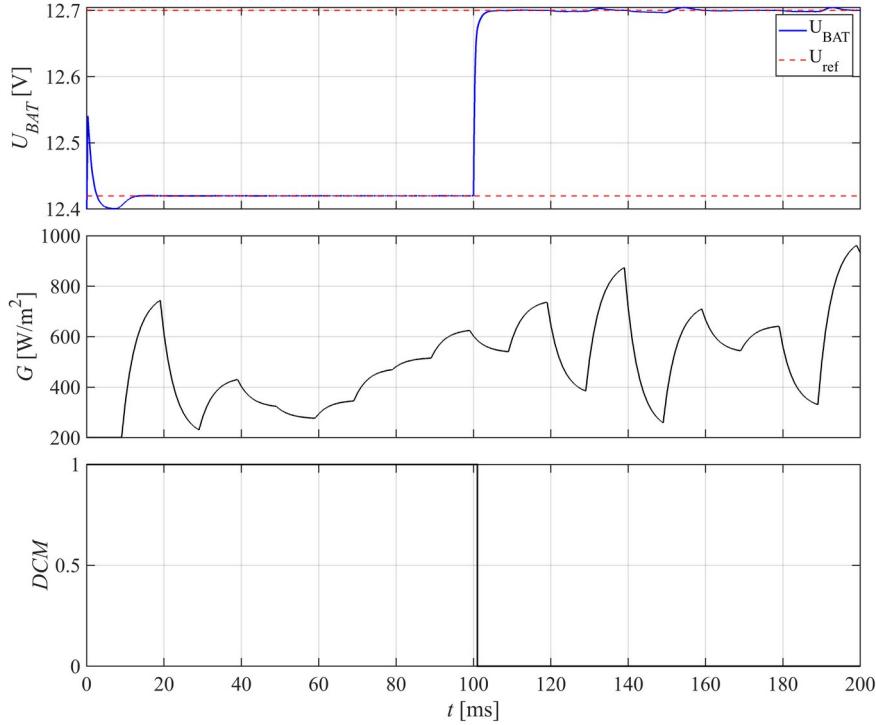
Simulacija rada sustava provedena je primjenom projektiranih parametara regulatora dobivenih izrazima (5.8) i (5.10) na nelinearni model uzlaznog pretvarača, baterije i fotonaponskog izvora realiziranih uz pomoć električnih komponenti dostupnih u programskom paketu *Simulink*. Regulacija (Slika 5.8) se sastoji od jednog regulatora s promjenjivim parametrima koji se mijenjaju ovisno o trenutnoj vrijednosti uvjeta (5.2) te generatora upravljačkog signala (Slika 4.12).



Slika 5.8: Blokovska shema regulacijske petlje za punjenje konstantnim naponom

Dodatno, izlaz regulatora ograničen je na maksimalnu vrijednost struje koju fotonaponski izvor može proizvesti ($I_{r, \max} = 1.97A$), pri čemu je za sprječavanje namatanja integratora primijenjena „Clamping“ metoda dostupna unutar samog PI Simulink bloka.

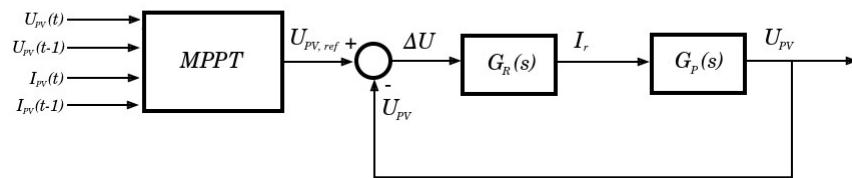
Odziv pretvarača za slučaj punjenja konstantnim naponom analiziran je pri promjenjivom sunčevom ozračenju fotonaponskog izvora. Signal ozračenja G generiran je kao nasumični stepenasti signal dodatno filtriran niskopropusnim filtrom. S obzirom na kratak vremenski period simulacije, signal ozračenja predstavlja nerealističan scenarij. Unatoč takvom signalu ozračenja, regulator uspijeva pratiti referentnu vrijednost i time prikazuje svoju robustnost. Radna točka pretvarača je opisana tablicom (Tablica 5), a dobiveni rezultati simulacije su vidljivi na dijagramu (Slika 5.9).



Slika 5.9: Valni oblici izlaznog napona U_{BAT} , filtriranog nasumičnog signala ozračenja G te logike prijelaza između CCM i DCM režima rada. Referentni napon U_{ref} zadan je skokovitom funkcijom $U_{ref} = 12.42 + 0.28(t - 0.1)$.

5.4. Punjenje maksimalnom snagom

Za punjenje maksimalnom snagom potreban je MPPT (engl. *maximum power point tracking*) algoritam, koji za trenutno ozračenje površine fotonaponskog izvora određuje referentnu vrijednost ulaznog napona $U_{PV,ref}$ s ciljem ostvarivanja maksimalne izlazne snage, a time i iskoristivosti (Slika 5.10).



Slika 5.10: Idealizirana blok shema punjenja maksimalnom snagom

Uz MPPT algoritam potreban je i regulator ulaznog napona U_{PV} koji prati referencu zadalu od strane algoritma. U narednim poglavljima izvest će se sinteza regulatora za pojedine režime rada u radnoj točki sustava opisanoj tablicom (Tablica 6)

Tablica 6: Parametri lineariziranog sustava pri punjenju maksimalnom snagom

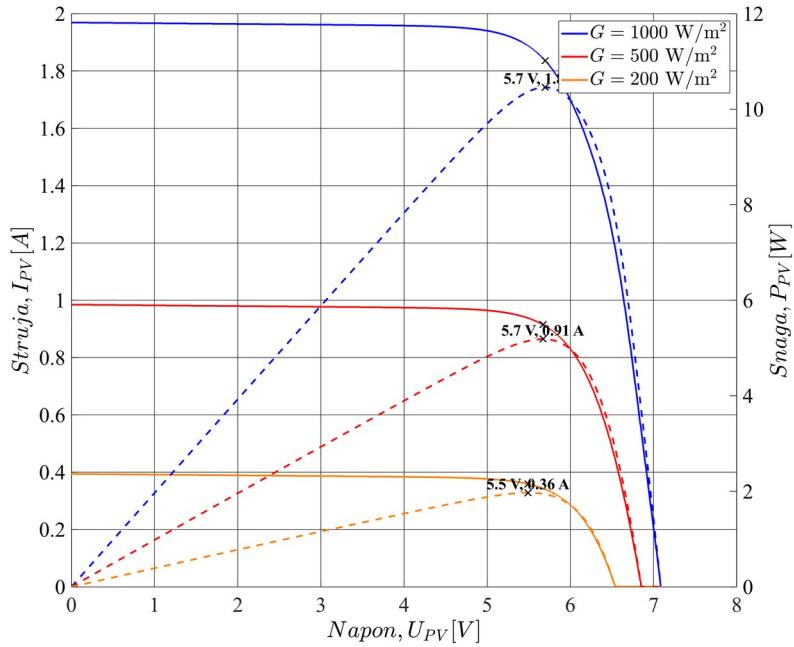
Parametar	Vrijednost	Parametar	Vrijednost
G	800 W/m^2	SOC	65 %
U_{PV0}	5.7 V	U_{PVmin}	5.1 V
$I_{PV0} = I_{r0}$	1.469 A	U_{BATmax}	12.6 V
U_{BAT0}	10.8 V	m_0	$3.0002 * 10^4$

Budući da MPPT algoritam predstavlja sporiju nadređenu petlju, dok regulator napona djeluje u bržoj unutarnjoj petlji, ukupno ponašanje sustava ovisi o međudjelovanju ovih dviju razina upravljanja, kao i o nelinearnoj dinamici energetskog pretvarača.

5.4.1 MPPT algoritam

Velika mana fotonaponskih izvora je njihova mala iskoristivost (oko 10-22% snage osunčanja na površinu) te je za njih karakterističan obrnuto proporcionalan i nelinearan odnos napona U_{PV} i struje I_{PV} . Najveća iskoristivost se postiže u točki maksimalne snage (engl. *maximum power point*).

S obzirom na to da pozicija točke maksimalne snage ovisi o trenutnom sunčevom ozračenju na površinu G (Slika 5.11) i temperaturi samog modula, potrebno je osmisliti upravljački zakon koji za trenutne uvjete u kojima se fotonaponski modul nalazi, pronalazi idealnu referentnu veličinu napona U_{ref} za koju se postiže maksimalna iskoristivost. Navedeno se postiže s algoritmom traženja maksimalne snage MPPT (engl *maximum power point tracking*).



Slika 5.11: Prikaz naponsko-strujne karakteristike i karakteristike snage fotonaponskog izvora opisanog tablicom (Tablica 1) za različita sunčeva ozračenja G

Postoje brojne tehnike praćenja maksimalne snage, a neke od njih su [6]:

- Perturb and observe (P&O) – jednostavna implementacija, mala računalna zahtjevnost, ali oscilira oko MPP i loše podnosi brze promjene ozračenja G
- Incremental conductance (IC) – može točno prepoznati MPP uz smanjene oscilacije oko ciljane točke, ali je implementacija složenija te je osjetljiviji na šum
- Fuzzy logic – omogućuje brzo praćenje i dobar rad s nelinearnostima sustava, visoka robusnost s obzirom na šum te mala oscilatornost oko MPP. Mana je ta što se dizajn algoritma temelji na heurističkim, iskustveno definiranim pravilima, a ne egzaktnoj matematičkoj formulaciji sustava

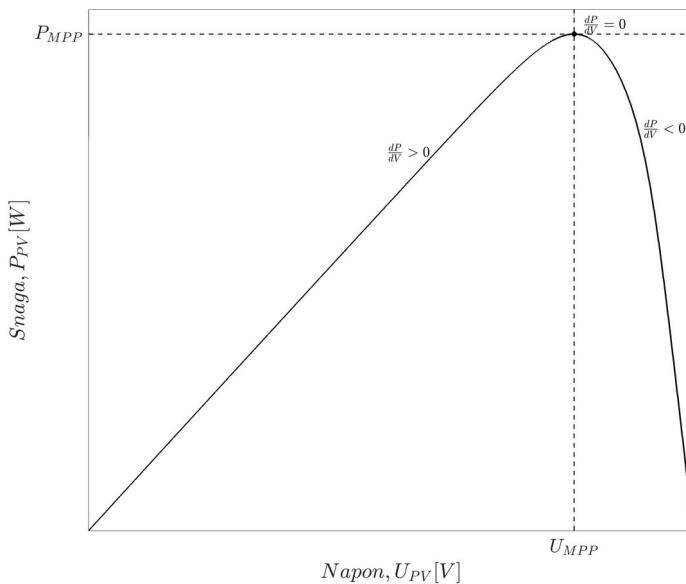
Za svrhe ovog rada koristit će se algoritam inkrementalne vodljivosti (engl. *Incremental conductance*). Algoritam se bazira na činjenici da je nagib karakteristike snage fotonaponskog izvora u točki maksimalne snage nula [6]:

$$\begin{aligned}\frac{dP_{PV}}{dU_{PV}} &= \frac{(dU_{PV} \cdot dI_{PV})}{dU_{PV}} = I_{PV} + U_{PV} \frac{dI_{PV}}{dU_{PV}} = 0 \\ \frac{dI_{PV}}{dU_{PV}} &= -\frac{I_{PV}}{U_{PV}}\end{aligned}\quad (5.11)$$

- $\frac{dI_{PV}}{dU_{PV}}$ - inkrementalna vodljivost izvora
- $\frac{I_{PV}}{U_{PV}}$ - trenutna vodljivost izvora

S obzirom na to da se u praksi nikad ne može postići uvjet (5.11) često se postavlja određena tolerancija koja smanjuje osciliranje algoritma oko točke maksimalne snage:

$$\frac{dI_{PV}}{dU_{PV}} = \pm \varepsilon \quad (5.12)$$

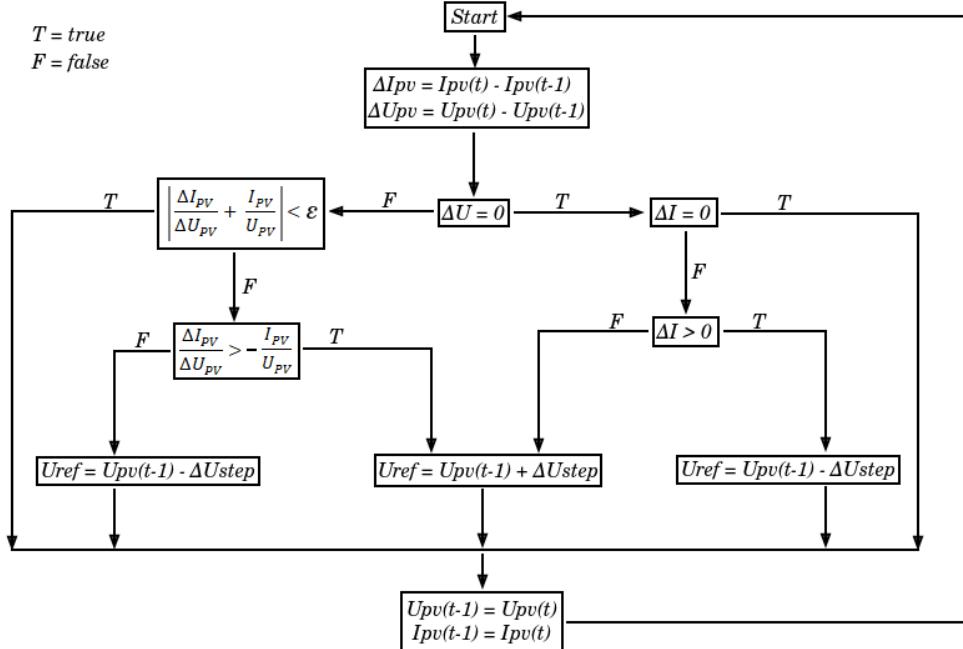


Slika 5.12: Prikaz nagiba (5.13) i njihovih predznaka na krivulji snage fotonaponskog izvora

Algoritam „zna” gdje se nalazi na krivulji snage fotonaponskog izvora tako što uspoređuje inkrementalnu vodljivost s trenutnom vodljivosti:

$$\frac{dI_{PV}}{dU_{PV}} > -\frac{I_{PV}}{U_{PV}} \quad ; \quad U_{PV} < U_{MPP} \quad \frac{dI_{PV}}{dU_{PV}} < -\frac{I_{PV}}{U_{PV}} \quad ; \quad U_{PV} > U_{MPP} \quad (5.13)$$

Dijagram toka algoritma za traženje točke maksimalne snage fotonaponskog izvora praćenjem inkrementalne vodljivosti vidljiv je na slici (Slika 5.13).



Slika 5.13: Dijagram toka algoritma inkrementalne vodljivosti

Dijagram toka (Slika 5.13) predstavlja definiciju algoritma, međutim implementacija se u praksi dosta razlikuje. Kod (Kod 5.1) prikazuje implementaciju algoritma inkrementalne vodljivosti u programskom jeziku *Matlab*. Implementacija se temelji na diskretnoj obradi uzoraka napona i struje fotonaponskog izvora, pri čemu se u svakom koraku izračunavaju inkrementi napona i struje te se na temelju njih određuje novi referentni napon pretvarača $U_{PV, ref}$.

Na početku funkcije definirani su ključni parametri algoritma, uključujući minimalni i maksimalni referentni napon, osjetljivost (ϵ), minimalni i maksimalni inkrement napona te pragove za detekciju vrlo malih promjena napona i struje. Time se osigurava numerička stabilnost i sprječava dijeljenje s vrlo malim vrijednostima.

Dodatno, u implementaciji je primijenjen varijabilni inkrement napona. Veličina koraka prilagođava se udaljenosti od točke maksimalne snage, čime se postiže brže približavanje točki maksimalne snage pri većim odstupanjima te smanjena oscilatornost u njegovoj blizini.

```

function Upvref = mppt_my3(Upv1, Upv2, Ipv1, Ipv2)
dU_small    = 0.01;      % sigurni inkrement
zero_thresh = 1e-4;      % ~ θ
epsilon     = 1e-3;      % osjetljivost
k_step      = 20;        % pojicanje za varijabilni pomak
step_min    = 0.01;      % minimalni pomak
step_max    = 0.2;        % maksimalni pomak
Umin        = 4.0;        % minimalni referentni napon
Umax        = 6.2;        % maksimalni referentni napon
I_dark      = 1e-3;      % struja zatamnjenja

Upvref = Upv2;

% Postavljanje granica na referentni napon
if Upvref < Umin
    Upvref = Umin;
elseif Upvref > Umax
    Upvref = Umax;
end

% Izvor je u praznom hodu i potrebno je smanjiti napon
if (Ipv1 <= I_dark) && (Ipv2 <= I_dark)
    Upvref = max(Umin, 0.9 * Upv2);
    return;
end

dUpv = Upv1 - Upv2;
dIpv = Ipv1 - Ipv2;

% Mali pomak ako nije zabilježena promjena
if (abs(dUpv) < zero_thresh) && (abs(dIpv) < zero_thresh)
    Upvref = clamp(Upv2 + step_min, Umin, Umax);
    return;
end

%  $dP/dU = I + U * dI/dU$ 
if abs(dUpv) > dU_small
    dIdU = dIpv / dUpv;
    dPdU = Ipv1 + Upv1 * dIdU;
else
    dPdU = (Ipv1 - Ipv2);
end

if abs(dPdU) > epsilon
    % varijabilni inkrement
    step_var = min(step_max, k_step * abs(dPdU));
    Upvref   = Upv2 + sign(dPdU) * step_var;
else
    % mali pomaci oko MPP
    dir = 1;
    if abs(dUpv) > zero_thresh
        dir = sign(dUpv);
        if dir == 0, dir = 1; end
    end
    Upvref = Upv2 + dir * step_min;
end

% Konačno osiguranje
Upvref = clamp(Upvref, Umin, Umax);

end

function y = clamp(x, lower, higher)
y = min(higher, max(lower, x));
end

```

Kod 5.1. Implementacija algoritma inkrementalne vodljivosti u programskom jeziku Matlab

5.4.2 Kontinuirani režim rada

Za razliku od punjenja konstantnim naponom, za prijenosnu funkciju procesa neće se koristiti izraz (4.63) već prijenosna funkcija ulaznog kruga pretvarača. S obzirom na to da će regulacijska petlja forsirati fotonaponski izvor da radi u točki maksimalne snage, potrebno je modificirati prijenosnu funkciju ulaznog napona koja se koristila ranije (4.57) za rad u točki maksimalne snage gdje vrijedi:

$$\frac{dP_{PV}}{dU_{PV}} = \frac{d(U_{PV} \cdot I_{PV})}{dU_{PV}} = 0 \quad (5.14)$$

Iz uvjeta se može odrediti ovisnost ulaznog napona U_{PV} o struji I_{PV} u točki maksimalne snage [2]:

$$\Delta I_{PV} = -\frac{I_{PV}}{U_{PV}} \Delta U_{PV} \quad (5.15)$$

Uvrštavanjem izraza (5.15) u (4.55) dobije se konačna prijenosna funkcija ulaznog kruga za rad u točki maksimalne snage:

$$Gu(s) = \frac{U_{PV}(s)}{I_L(s)} = \frac{K_u}{1+T_u s} \quad (5.16)$$

$$T_u = C_u \frac{U_{PV}}{I_{PV}} \quad K_u = -\frac{U_{PV}}{I_{PV}}$$

Izlaz regulatora bit će referentna struja I_r pa je potrebno dodati faktor ρ definiran izrazom (4.61) koji pretvara referentnu struju I_r u struju zavojnice I_L . Stoga, konačna prijenosna funkcija procesa za upravljanje ulaznim naponom U_{PV} pretvarača je definirana kao:

$$G_p(s) = \rho_{CCM} \cdot Gu(s) = \frac{\rho_{CCM} K_u}{1+T_u s} = \frac{K_p}{1+T_p s} \quad (5.17)$$

Uvrštavanjem parametara radne točke definirane tablicom (Tablica 6) u prijenosnu funkciju procesa dobije se:

$$G_p(s) = \frac{-2.193}{1+0.00582 s} \quad (5.18)$$

Kao i za metodu punjenja konstantnim naponom, koristit će se PI regulator. S obzirom na to da MPPT algoritam može uzrokovati česte promjene referentnog napona potrebno je

projektirati regulator koji ima brz odziv na poremećaj što će za posljedicu imati određenu količinu nadvišenja σ_m .

Zahtjevi dizajna regulatora mogu se zadovoljiti metodom tehničkog optimuma koji se parametrira na sljedeći način:

- T_I – postavlja se na vrijednost dominantne vremenske konstante procesa T_p
- K_R – izračunava se izjednačavanjem vremenske konstante prijenosne funkcije zatvorenog kruga sustava T_z i vremenske konstante procesa T_p

Navedeni postupak je vidljiv u izvodima (5.19).

$$T_I = T_p \quad \rightarrow \quad G_o(s) = G_R(s) \cdot G_p(s) = \frac{K_R K_p}{T_I s} \quad (5.19)$$

$$G_z(s) = \frac{G_o(s)}{1 + G_o(s)} = \frac{1}{1 + \frac{T_I}{K_R K_p} s} = \frac{1}{1 + T_z s}$$

$$T_z = \frac{T_I}{K_R K_p} = T_I \quad \rightarrow \quad K_R = \frac{1}{K_p}$$

Uvrštavanjem vrijednosti parametara radne točke navedenih tablicom (Tablica 6) dobije se:

$$T_I = 0.0058 \quad K_R = -0.456 \quad (5.20)$$

5.4.3 Diskontinuirani režim rada

Sinteza regulatora za diskontinuirani režim rada provodi se analogno postupku opisanom za kontinuirani režim rada. Razlika se očituje isključivo u matematičkom modelu pretvarača tj. za faktor ρ koristit će se izraz definiran za diskontinuirani režim rada (4.78). Izuzev navedenog, prijenosna funkcija procesa je identična:

$$G_p(s) = \rho_{DCM} \cdot G_u(s) = \frac{\rho_{DCM} K_u}{1 + T_u s} = \frac{K_p}{1 + T_p s} \quad (5.21)$$

Uvrštavanjem vrijednosti parametara u radnoj točki (Tablica 6) dobije se numerička prijenosna funkcija:

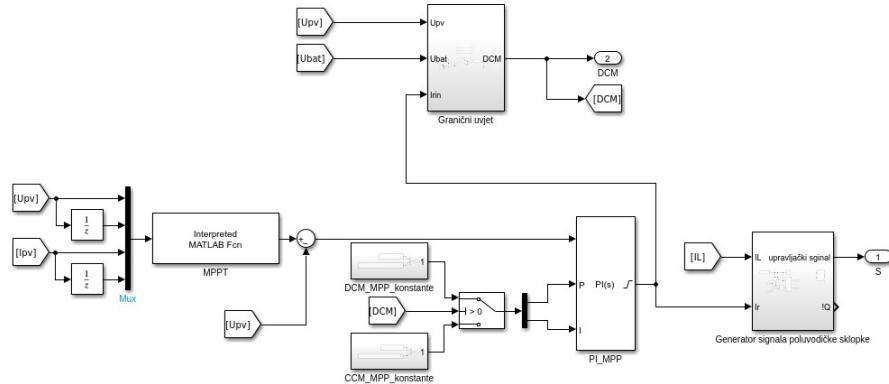
$$G_p(s) = \frac{-5.78}{1 + 0.00582 s} \quad (5.22)$$

Kao i za kontinuirani režim rada provodi se metoda tehničkog optimum za parametriranje regulatora:

$$T_I = 0.0058 \quad K_R = -0.173 \quad (5.23)$$

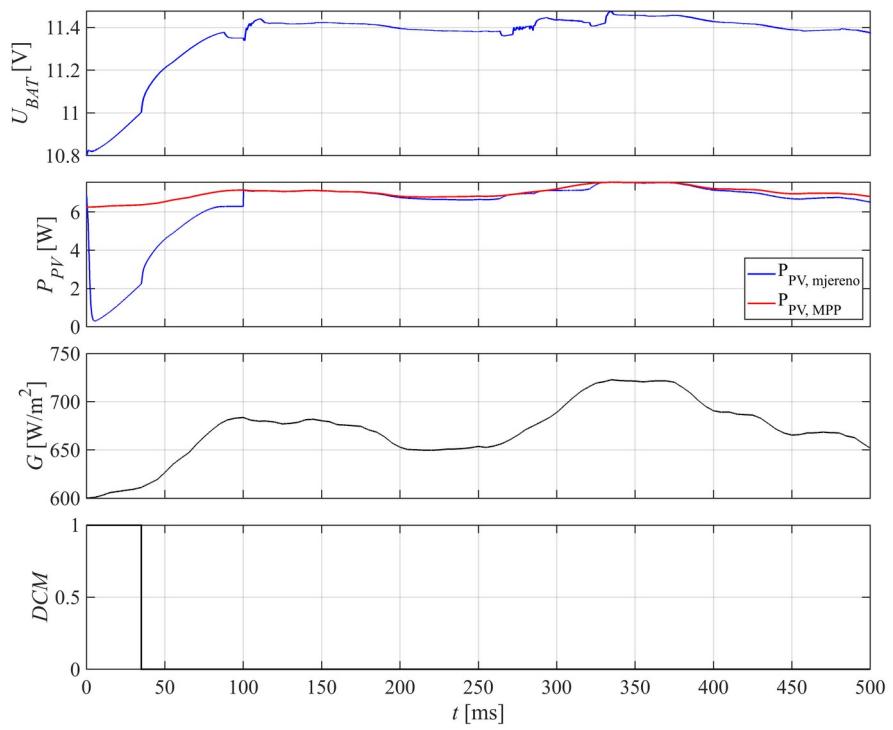
5.4.4 Simuliranje rada

Simuliranje rada sustava sa slučaj punjenja baterije maksimalnom snagom provodi se primjenom regulatora (5.20) i (5.23) na nelinearnom modelu pretvarača, baterije i fotonaponskog izvora. Topologija regulacijske petlje (Slika 5.14) analogna je za slučaj simuliranja rada sustava pri punjenju konstantnim naponom (Slika 5.8).



Slika 5.14: Blokovska shema regulacijske petlje za punjenje maksimalnom snagom

Odziv pretvarača za slučaj punjenja maksimalnom snagom analiziran je pri promjenjivom sunčevom ozračenju fotonaponskog izvora. Dijagram (Slika 5.15) odziva prikazuje postignutu snagu fotonaponskog izvora P_{PV} tijekom simulacije kao i maksimalnu ostvarivu snagu P_{MPP} za zadano sunčev ozračenje G . Na ovaj način se prikazuje svrha kao i kvaliteta MPPT algoritma. Također vidljivo je vrijeme porasta t_r potrebno da regulacijska petlja dođe do referentne vrijednosti ($t_r \approx 100 \text{ ms}$).



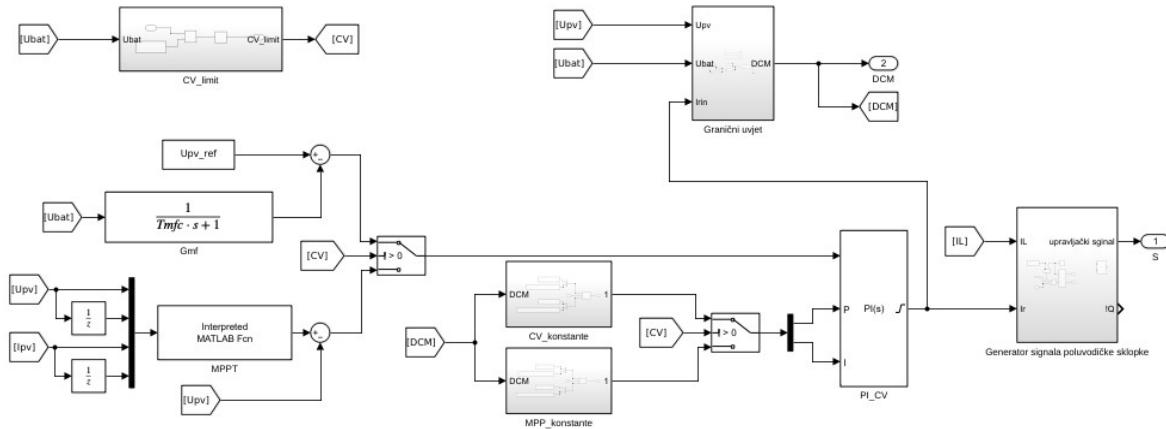
Slika 5.15: Valni oblici izlaznog napona U_{BAT} , snaga fotonaponskog izvora P_{PV} , filtriranog nasumičnog signala ozračenja G te logike prijelaza između CCM i DCM režima rada.

6. Cjeloviti model procesa i regulacijske petlje

Cilj konačne regulacijske petlje je optimalno punjenje baterijskog paketa, ovisno o stanju napunjenosti SOC (engl. *state of charge*):

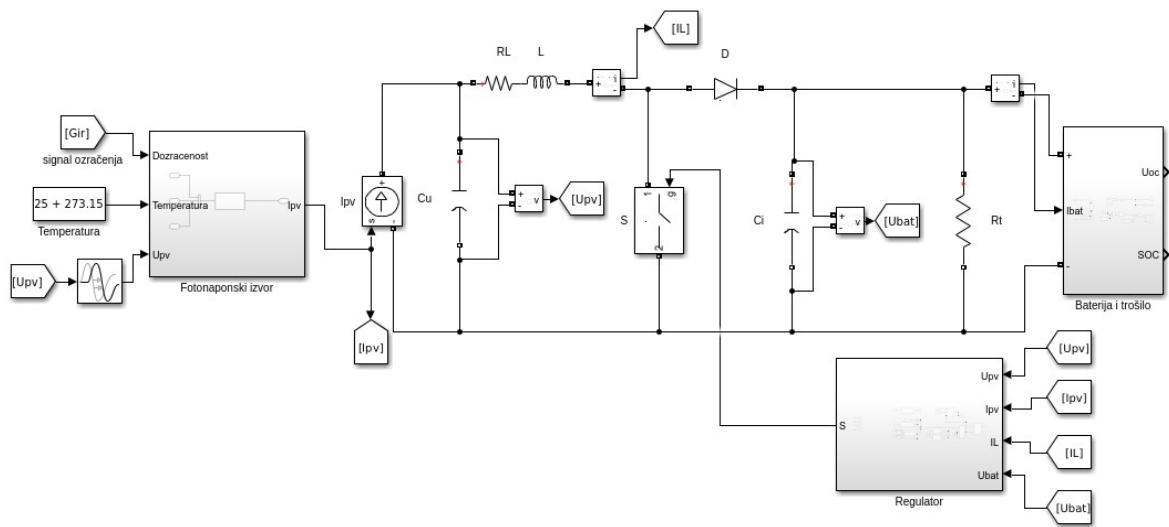
- SOC = 0 – 95 %: Punjenje maksimalnom snagom uz primjenu MPPT algoritma za određivanje optimalnog ulaznog napona pretvarača $U_{PV, ref}$
- SOC = 95 – 100 %: Punjenje konstantnim naponom zadavanjem konstantnog referentnog napona $U_{BAT, ref}$

Dodatno, regulator mora prilagoditi vlastiti izlaz trenutnom režimu rada uzlaznog pretvarača. Parametri PI regulatora (K_R i T_I) se dinamično podešavaju za kontinuirani i diskontinuirani režim rada. Stoga regulacijska petlja mora u svakom trenutku odabrati jednu od četiri moguće postavke ulaznih parametara. Konačna regulacijska petlja vidljiva je na slici (Slika 6.1).



Slika 6.1: Cjeloviti model regulacijske petlje

Spajanjem regulacijske petlje (Slika 6.1) na nelinearan sustav tj. na model procesa, dobiva se kompletna simulacijska shema sustava automatskog upravljanja (Slika 6.2).



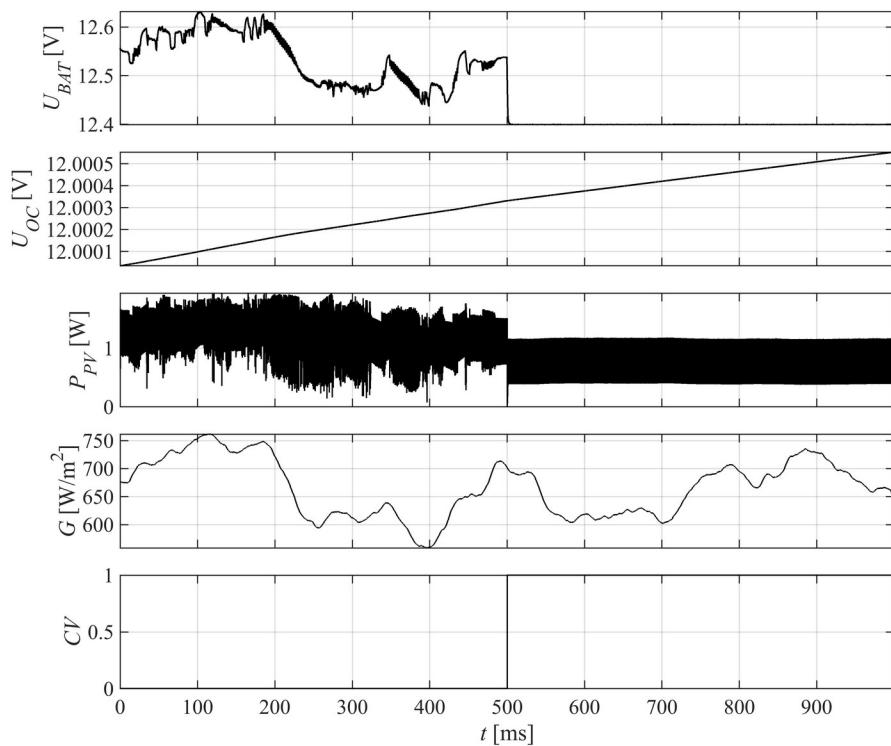
Slika 6.2: Cjeloviti model sustava koji se sastoji od nelinearnog uzlaznog pretvarača realiziranog pomoću električnih komponenata, modela fotonaponskog izvora, modela baterije i trošila te regulatora (regulacijske petlje)

7. Rezultati

Ovo poglavlje bavi se simuliranjem rada cjelovitog modela procesa (Slika 6.1) i cjelovitog modela regulacijske petlje (Slika 6.2). S obzirom na to da su prethodna poglavlja već pokazala pojedinačnu funkcionalnost regulacije punjenja konstantnim naponom (Slika 5.9) te punjenja maksimalnom snagom (Slika 5.15), cilj ovog poglavlja je prikazati prijelaze između dvaju načina rada. Simulacije su ograničene na kratki vremenski period zbog iznimne računalne zahtjevnosti simuliranja punog modela.

7.1. Simulacija 1

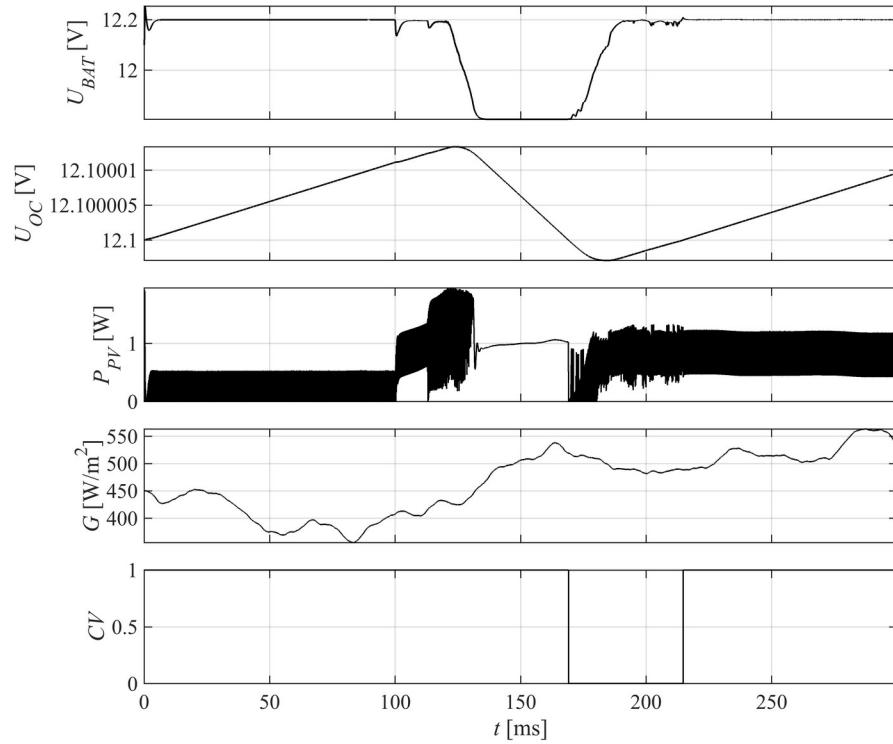
Dijagram prikazuje izlazne veličine pretvarača koji je upravljan regulacijskom petljom za punjenje maksimalnom snagom, a u trenutku 500 ms pretvarača počinje puniti konstantnim naponom ($U_{ref} = 12.4\text{ V}$) (Slika 7.1).



Slika 7.1: Valni oblik izlaznog napon U_{BAT} , unutarnjeg napona baterije U_{OC} , snage fotonaponskog izvora P_{PV} , signala ozračenja G i režima punjenja CV gdje je signal definiran kao $CV = H(t - 0.5)$

7.2. Simulacija 2

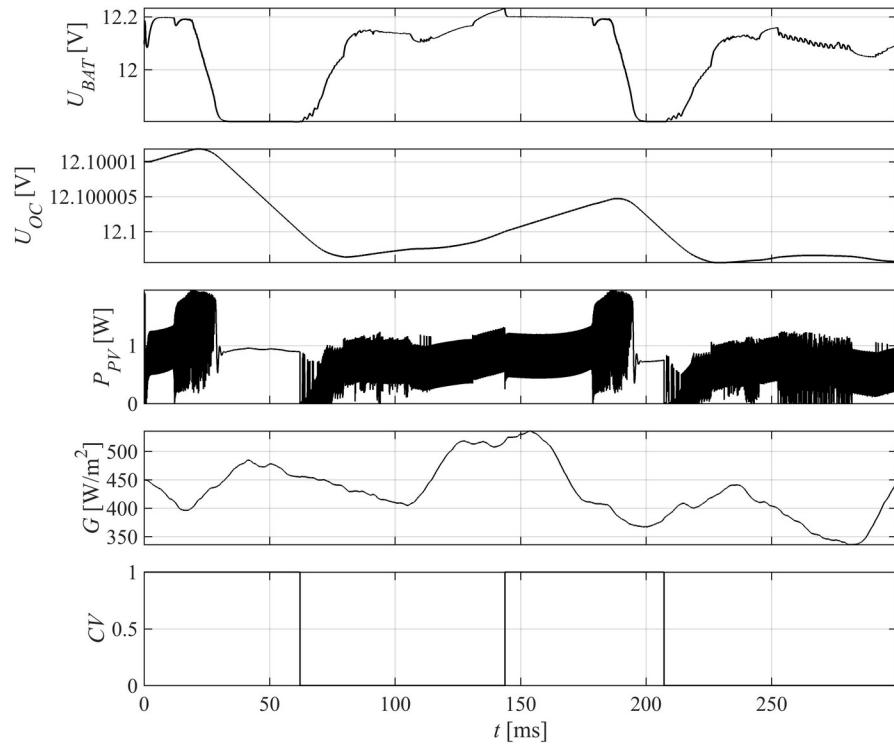
Simulacija prikazuje promjenu režima rada uslijed uključivanja djelatnog trošila u trenutku $t = 100 \text{ ms}$ (Slika 7.2). Trošilo ($R_t = 50 \Omega$) poveća zahtjev za energijom, zbog čega se dio energije mora osigurati iz baterijskog paketa. Pražnjenje baterijskog paketa uzrokuje početak punjenja maksimalnom snagom ($U_{CV, lim} = 12.1 \text{ V}$, $SOC \approx 96\%$).



Slika 7.2: Valni oblik izlaznog napona U_{BAT} , unutarnjeg napona baterije U_{OC} , snage fotonaponskog izvora P_{PV} , signala ozračenja G i režima punjenja CV

7.3. Simulacija 3

Simulacija prikazuje pretvarač s uključenim djelatnim trošilom ($R_t = 50 \Omega$) (Slika 7.3). Režim punjenja baterijskog paketa se više puta mijenja ovisno o odnosu unutarnjeg napona U_{OC} i limita preklapanja $U_{CV, ref}$ ($U_{CV, lim} = 12.1 V$, $SOC \approx 96\%$).



Slika 7.3: Valni oblik izlaznog napon U_{BAT} , unutarnjeg napona baterije U_{OC} , snage fotonaponskog izvora P_{PV} , signala ozračenja G i režima punjenja CV

Zaključak

Fotonaponski izvori izrazito su nelinearni izvori energije, što značajno povećava složenost njihova upravljanja. Proizvodnja energije kontinuirano se mijenja ovisno o trenutnom sunčevom ozračenju i temperaturi poluvodičkog materijala. Navedene značajke uvjetovale su odabir odgovarajućeg pretvarača energetske elektronike, kao i pažljivo projektiranje regulacijskih petlji.

Uzlastni pretvarači inherentno su skloni neminimalno-faznom ponašanju te, ovisno o strujnom ili naponskom upravljanju, mogu iskazivati izraženo oscilatorno ponašanje. Stoga su odabir metode upravljanja i pravilno dimenzioniranje elemenata pretvarača ključni čimbenici u projektiranju stabilnog i pouzdanog sustava.

Regulacija pretvarača koncipirana je tako da se, ovisno o struji zavojnice, prilagođava kontinuiranom (CCM) odnosno diskontinuiranom (DCM) režimu rada. U tu je svrhu definiran granični uvjet za detekciju prijelaza između režima rada. Kako bi se postigla robusna detekcija te spriječilo učestalo preklapanje režima rada, provedeno je filtriranje referentnih signala i implementirana histereza u logici graničnog uvjeta. Uz navedenu logiku primjenjena je metoda regulatora s promjenjivim parametrima (*gain scheduling*), čime su osigurane minimalne smetnje u odzivu sustava prilikom promjene režima rada.

Dodatno, parametri regulatora prilagođavaju se ovisno o stanju napunjenoosti baterijskog paketa, s ciljem povećanja iskoristivosti fotonaponskog izvora i osiguravanja sigurnog punjenja baterije. Povećana iskoristivost ostvaruje se primjenom režima punjenja maksimalnom snagom, koji implementira algoritam za praćenje točke maksimalne snage (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*). Na temelju trenutnih uvjeta sunčevog ozračenja i temperature, algoritam određuje optimalni referentni ulazni napon pretvarača.

Naposljetu, cjelokupni sustav i pripadajuća regulacijska petlja implementirani su u programskom okruženju za grafičko modeliranje *Simulink*, pri čemu su provedene odgovarajuće simulacije rada sustava radi potvrde funkcionalnosti i ispravnosti implementacije.

Literatura

- [1] Ramos, J.A., Campayo Martín, J.J., Zamora Belver, I., Larrañaga Lesaka, J., Zulueta Guerrero,E., Puelles Pérez, E., *Modelling of Photovoltaic Module*, 2010.
- [2] Car, M., *Upravljanje Obnovljivim Izvorima Energije*, 2019.
- [3] Šunde, V., Jakopović, Ž., Benčić, Z., *Osnove Učinske Elektronike*, 2012.
- [4] Bjažić, T., *Adaptivno Upravljanje Istosmjernim Uzlaznim Pretvornikom Napajanim Gorivnim Člankom*, 2010.
- [5] Crnošija, P., Bjažić, T., Nagy, T., Fruk, M., Maršić, D., *Design of Thermal Process Controller by using Bodé Plots of Open Loop Frequency Characteristics*, 2010.
- [6] Selman, N.H., Mahmood, J.R., *Comparison Between Perturb & Observe, Incremental Conductance and Fuzzy Logic MPPT Techniques at Different Weather Conditions*, 2016.

Sažetak

Fotonaponski izvor povezan je s litij-ionskim baterijskim člankom putem istosmjernog ulaznog pretvarača koji podiže ulazni napon na odgovarajuću izlaznu razinu. U radu su analizirani naponski i strujni način upravljanja pretvaračem te logika potrebna za učinkovito preklapanje između kontinuiranog i diskontinuiranog režima rada. Projektirana je regulacijska petlja koja omogućuje maksimalno iskorištenje energije sunčevog ozračenja iz fotonaponskog izvora kada baterija nije u potpunosti napunjena, odnosno održavanje konstantnog izlaznog napona nakon dostizanja određene napunjenosti baterije.

Ispravnost i funkcionalnost cjelokupnog modela sustava potvrđene su simulacijom rada u svim karakterističnim režimima rada, čime je verificirana učinkovitost predloženog upravljačkog rješenja.

Ključne riječi: fotonapon, litij-ionski članak, ulazni pretvarač, regulacijska petlja

Summary

The photovoltaic source is connected to a lithium-ion battery cell via a DC boost converter that increases the input voltage to the required output level. The thesis analyzes both voltage-mode and current-mode control of the converter, as well as the control logic required for efficient transition between continuous and discontinuous conduction modes. A control loop is designed to ensure maximum utilization of solar irradiation energy from the photovoltaic source when the battery is not fully charged, and to maintain a constant output voltage once a specified state of charge is reached.

The correctness and functionality of the overall system model are verified through simulations under all characteristic operating modes, thereby confirming the effectiveness of the proposed control strategy.

Keywords: photovoltaic, lithium-ion cell, boost converter, control loop