



# 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 te mala tromost sustava uzrokuje fluktuacije u naponu. Kako bi se postigla što veća iskoristivost fotonaponskog izvora, često se uparuje 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 baterijskog sustava pohrane energije. S obzirom na to da je riječ o sustavu male snage, niži ulazni napon karakterističan za male fotonaponske izvore je potrebno podići na razinu napona baterijskog sustava. Iz tog razloga, tip energetskog pretvarača je uzlazni. Poseban izazov predstavlja upravljanje uzlaznim pretvaračem na način da se postigne maksimalna proizvodnja električne energije iz fotonaponskog izvora. U tu svrhu potrebno je implementirati algoritam praćenja točke maksimalne snage (engl. *maximum power point tracking*) fotonaponskog izvora.

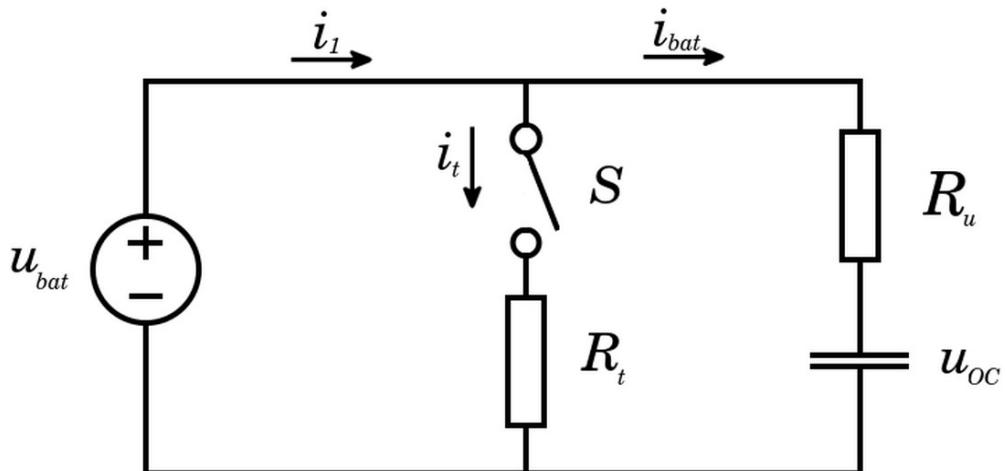
Zaključno, cilj je izvesti upravljački zakon koji omogućuje vođenje ovakvog sustava u svim režimima rada sustava te testirati njegovu funkcionalnost simulacijom u programskom okruženju *Matlab*, kao i praktičnom implementacijom uz pomoć stvarnih komponenti i razvojne pločice.

# 1. Baterijski sustav

Budući da većina trošila zahtjeva neprekidan izvor napajanja, sustavi za pohranu energije predstavljaju neizostavan dio mrežno odvojenih fotonaponskih sustava. U ovom slučaju, baterijski sustav ujedno djeluje kao glavno trošilo pa se cijeli sustav može promatrati kao fotonaponski napajani punjač baterije s mogućnošću priključenja dodatnog djelatnog trošila.

## 1.1. Modeliranje

Baterijski spremnik sačinjen je od Litij-ionskih baterija 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 1.1). Uz to postoji i mogućnost spajanja dodatnog djelatnog trošila  $R_t$ .



Slika 1.1: Načelna shema baterije i trošila

Kako bi smo mogli ispravno modelirati rad baterije i trošila, potrebno je definirati jednadžbu izlazne struje pretvarača  $i_1$ . Dioda  $D$  spriječava da struja  $i_1$  bude negativna.

$$\begin{aligned} i_1 &= i_t + i_{bat} \rightarrow i_1 = \frac{u_{bat}}{R_t} + \frac{u_{bat} - u_{oc}}{R_u} \\ i_1 &= \max\left(0, \frac{R_u + R_t}{R_t R_u} u_{bat} - \frac{1}{R_u} u_{oc}\right) \end{aligned} \quad (1.1)$$

Dodatno, potrebno je odrediti jednadžbu napona  $u_{oc}$  te prijenosnu funkciju u ovisnosti i izlaznom naponu pretvarača  $u_{bat}$ :

$$\begin{aligned} u_{oc} &= \frac{1}{C_{bat}} \int i_{bat}(t) dt = \frac{1}{C_{bat}} \int \frac{u_{bat} - u_{oc}}{R_u} dt \\ C_{bat} \frac{du_{oc}}{dt} &= \frac{u_{bat} - u_{oc}}{R_u} \\ U_{oc}(s) &= \frac{1}{C_{bat} R_u s + 1} U_{bat}(s) \end{aligned} \quad (1.2)$$

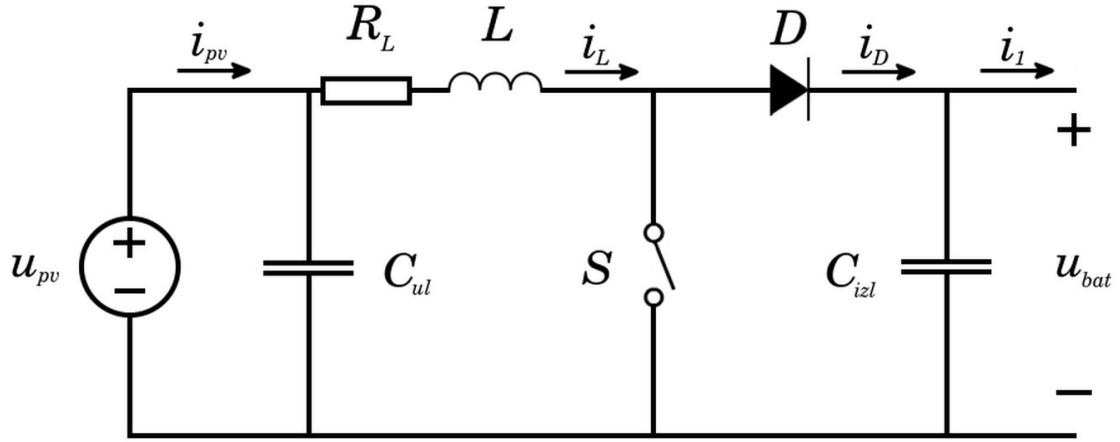
S obzirom na to da smo aproksimirali bateriju jednostavnim elektrilnim kapacitetom, ovisnost napona članka  $u_{oc}$  o pohranjenoj energiji  $E$  u bateriji je linearna te se predstavlja jednadžbom pravca:

$$u_{oc} = \frac{u_{ocmax} - u_{ocmin}}{E_{max} - E_{min}} (E - E_{min}) + u_{ocmin} \quad (1.3)$$

## 2. Istosmjerni uzlazni pretvarač

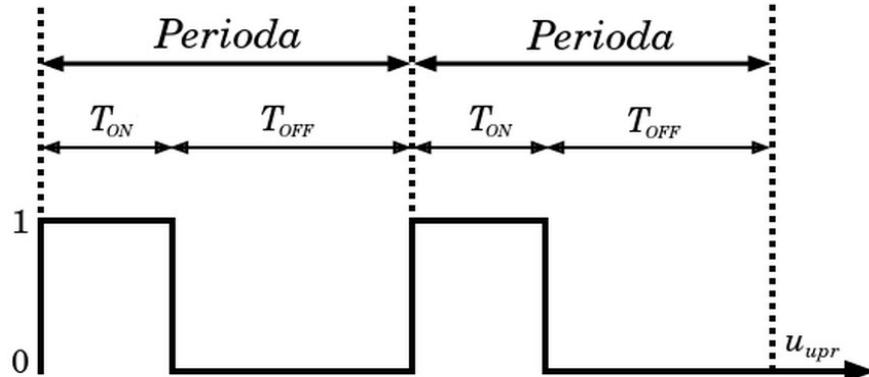
Energetska elektronika ima široku primjenu u fotonaponskim sustavima. S obzirom na to da takvi izvori energije mijenjaju izlazne karakteristike ovisno o sunčevom ozračenju površine, potreban je aktivni element regulacije kako bi se postigao odgovarajući izlazni napon uz visoku energetsku učinkovitost.

Istosmjerni uzlazni pretvarač (Slika 2.1) jedan je od temeljnih uređaja energetske elektronike koji na svom ulazu prima napon  $u_{pv}$ , a na svom izlazu povećava njegovu srednju vrijednost. Navedeno se postiže primjenom samo jednog aktivnog elementa – sklopke  $S$ . Sklopka, naječeće MOSFET pluvodički ventil (engl. Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor), svojim ukpanjem diktira kada će zavojnica  $L$  pohranjivati energiju, a kada će ju oslobađati.



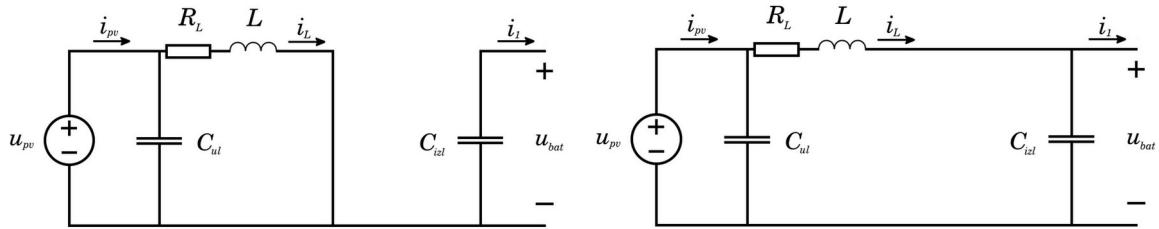
Slika 2.1: Načelna shema istosmjernog uzlaznog pretvarača

Rad sklopke se regulira upravljačkim signalom  $u_{pr}$  (Slika 2.2) visoke frekvencije, obično u rasponu od 100 do 500 kHz. Faktor vođenja  $D$  (engl. *duty cycle*) označava udio vremena tijekom jedne periode upravljačkog signala u kojem je sklopka uklopljena. Drugim riječima, faktor vođenja je omjer perioda  $T_{ON}$  i  $T_{OFF}$  (Slika 2.2). Ovakav način upravljanja, u kojem se koristi pravokutni upravljački signal konstantne frekvencije i promjenjive širine impulsa, naziva se modulacija širine impulsa (engl. *pulse-width modulation, PWM*).



Slika 2.2: Upravljački signal sklopke

Svojim uklapanjem ( $S=ON$ ) sklopka pretvara induktivitet  $L$  u trošilo koje pohranjuje energiju, a svojim isklapanjem ( $S=OFF$ ) isti pretvara u izvor energije (Slika 2.3).



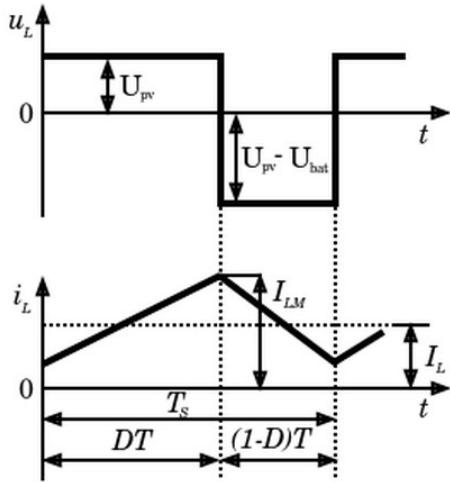
Slika 2.3: Lijevo: sklopka  $S=ON$  Desno: sklopka  $S=OFF$

Kada induktivitet  $L$  oslobađa 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. Nadalje, izlazni kapacitet  $C_{izl}$  je iznimno bitan u radu pretvarača zato što je u ovom vremenskom intervalu jedini izvor energije koji je spojen na izlaz. Funkcija mu je dakle smanjiti valovitost izlaznog napona  $u_{bat}$  i izbjegći pojavu pilastog napona. Dodatno, specifično za ovaj slučaj, imamo i ulazni kapacitet  $C_{izl}$  koji smanjuje oscilacije ulaznog napona  $u_{pv}$  uzrokovane iznimno malom tromosti fotonaponskog izvora.

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.

## 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 2.4). 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 isprazni u potpunosti pohranjenu energiju dok je sklopka  $S$  isključena.



Slika 2.4: Napon i struja zavojnice u kontinuiranom režimu rada pretvarača

Na slici (Slika 2.4) je vidljiv i faktor vođenja  $D$  (engl. *duty cycle*) koji označava udio vremena tijekom jedne periode preklapanja  $T_s$  u kojem je sklopka  $S$  uklopljena. Drugim riječima, faktor vođenja je omjer perioda  $T_{ON}$  i  $T_{OFF}$ . To znači da svaki ciklus preklapanja sklopke  $S$  možemo podijeliti na:  $DT_s$  i  $(1-D)T_s$ .

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:

- srednja vrijednost napona na induktivitetu  $L$  je jednaka nuli
- srednja vrijednost struje na izlaznom kapacitetu  $C_{izl}$  je jednaka nuli.

Matematički model ovog uzlaznog pretvarača (Slika 2.1) može se opisati u potpunosti s 3 diferencijalne jednadžbe tj. sustav je trećeg reda. Po jedna diferencijalna jednadžba za svaki spremnik energije u sustavu:  $C_{ul}$ ,  $L$  i  $C_{izl}$ . 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:

$$\begin{aligned}
L \frac{di_L}{dt} &= u_{pv} - R_L i_L \\
C_{ul} \frac{du_{pv}}{dt} &= i_{pv} - i_L \\
C_{izl} \frac{du_{bat}}{dt} &= -i_1
\end{aligned} \tag{2.1}$$

Za vremenski interval kad je skopka  $S$  isključena vrijede sljedeći odnosi:

$$\begin{aligned}
L \frac{di_L}{dt} &= u_{pv} - R_L i_L - u_{bat} \\
C_{ul} \frac{du_{pv}}{dt} &= i_{pv} - i_L \\
C_{izl} \frac{du_{bat}}{dt} &= i_L - i_1
\end{aligned} \tag{2.2}$$

Kako bi simulacija rada pretvarača bila što brža, potrebno je ujediniti izraze (2.1) s (2.2). Množenjem jednadžbi (2.1) s  $D$  i jednadžbi (2.2) s  $(1-D)$  te njihovim zbrajanjem, dobije se usrednjeni model pretvarača:

$$\begin{aligned}
L \frac{di_L}{dt} &= u_{pv} - R_L i_L - (1-D) u_{bat} \\
C_{ul} \frac{du_{pv}}{dt} &= i_{pv} - i_L \\
C_{izl} \frac{du_{bat}}{dt} &= (1-D) i_L - i_1
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Cilj nam je zapisati usrednjeni model (2.3) u prostoru stanja, međutim model je trenutno nelinearan. Sljedeći korak je provesti linearizaciju navedenog modela primjenom Taylorovog reda prvog stupnja. Prostor stanja se sastoji od 3 varijable stanja i 2 ulazne varijable:

$$\begin{bmatrix} \Delta i_L \\ \Delta u_{pv} \\ \Delta u_{bat} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta i_L \\ \Delta u_{pv} \\ \Delta u_{bat} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta d \\ \Delta i_1 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

Linearizacija se provodi u točki maksimalne snage fotonaponskog izvora za koju se mogu dobiti sljedeće vrijednosti:

$$\begin{aligned}
L \frac{di_L}{dt} = 0 &\rightarrow D_0 = \frac{U_{bat0} - U_{pv0} + R_L I_{L0}}{U_{bat0}} \\
C_{ul} \frac{du_{pv}}{dt} = 0 &\rightarrow I_{L0} = I_{pv0}
\end{aligned} \tag{2.5}$$

$$C_{izl} \frac{di_L}{dt} = 0 \rightarrow I_{10} = (1 - D_0) I_{L0}$$

Linearizacija jednadžbe struje zavojnice (2.3):

$$\begin{aligned}
a_{11} &= \left. \frac{\partial i_L}{\partial i_L} \right|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = -\frac{R_L}{L} \\
a_{12} &= \left. \frac{\partial i_L}{\partial u_{pv}} \right|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = \frac{1}{L} \\
a_{13} &= \left. \frac{\partial i_L}{\partial u_{bat}} \right|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = \frac{D_0 - 1}{L} \\
b_{11} &= \left. \frac{\partial i_L}{\partial d} \right|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = \frac{U_{bat0}}{L} \\
b_{12} &= \left. \frac{\partial i_L}{\partial i_1} \right|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = 0
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Linearizacija jednadžbe ulaznog napona (2.3) uz uvjet da u točki maksimalne snage vrijedi

$$\frac{dP_{pv}}{du_{pv}} = 0 \rightarrow \frac{\Delta i_{pv}}{\Delta u_{pv}} = -\frac{I_{pv0}}{U_{pv0}} \tag{2.7}$$

$$\begin{aligned}
a_{21} &= \left. \frac{\partial u_{pv}}{\partial i_L} \right|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = -\frac{1}{C_u} \\
a_{22} &= \left. \frac{\partial u_{pv}}{\partial u_{pv}} \right|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = -\frac{I_{pv0}}{C_u U_{pv0}} \\
a_{23} &= \left. \frac{\partial u_{pv}}{\partial u_{bat}} \right|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = 0 \\
b_{21} &= \left. \frac{\partial u_{pv}}{\partial d} \right|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = 0 \\
b_{22} &= \left. \frac{\partial u_{pv}}{\partial i_1} \right|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = 0
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Linearizacija jednadžbe izlaznog napona (2.3):

$$\begin{aligned}
a_{31} &= \frac{\partial u_{bat}}{\partial i_L} \Big|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = \frac{(1-D_0)}{C_{izl}} \\
a_{32} &= \frac{\partial u_{bat}}{\partial u_{pv}} \Big|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = 0 \\
a_{33} &= \frac{\partial u_{bat}}{\partial u_{bat}} \Big|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = 0 \\
b_{31} &= \frac{\partial u_{bat}}{\partial d} \Big|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = -\frac{I_{L0}}{C_{izl}}; \\
b_{32} &= \frac{\partial u_{bat}}{\partial i_1} \Big|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = -\frac{1}{C_{izl}};
\end{aligned} \tag{2.9}$$

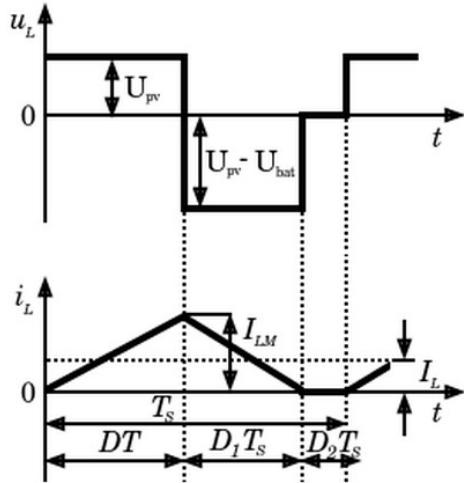
Konačan zapis modela uzlaznog pretvarača za kontinuirani režim rada u prostoru stanja je:

$$\begin{bmatrix} \Delta i_L \\ \Delta u_{pv} \\ \Delta u_{bat} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} & \frac{D_0-1}{L} \\ -\frac{1}{C_{ul}} & -\frac{I_{pv0}}{C_{ul}-U_{pv0}} & 0 \\ \frac{1-D_0}{C_{izl}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta i_L \\ \Delta u_{pv} \\ \Delta u_{bat} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{U_{bat0}}{L} & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{I_{L0}}{C_{izl}} & -\frac{1}{C_{izl}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta d \\ \Delta i_1 \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

Ode idu prijenosne

## 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  $T_S$  padne na nulu. Navedeno je vidljivo na dijagramu (Slika 2.5) valnih oblika napona  $u_L$  i struje zavojnice  $i_L$ . Također period u kojem sklopka ne vodi  $T_{OFF}$  nije više nije u potpunosti opisan s  $(1-D)T_S$  već je se definira u ovisnosti o postojanju struje zavojnice  $i_L$  na  $D_1 T_S$  i  $D_2 T_S$ .



Slika 2.5: Napon i struja zavojnice u diskotinuiranom režimu rada pretvarača

S obzirom na to da zavojnica krajem svake periode uklapanja  $T_s$  preda svu svoju energiju (Slika 2.5), zaključujemo da nema prijelazne pojave. To znači da se, za razliku od kontinuiranog režima rada, struja zavojnice  $i_L$  može izračunati algebarskim izrazom te diferencijalna jednadžba nije potrebna. Kako bi se dobio usrednjeni model pretvarača, potrebno je odrediti srednju vrijednost struje zavojnice  $i_L$ . Srednju vrijednost struje zavojnice  $i_L$  i faktor vođenja  $D_1$  mogu se odrediti iz maksimalne vrijednosti struje zavojnice  $I_{LM}$ :

$$\begin{aligned}
 I_{LM} &= \frac{U_{pv} DT_s}{L} = \frac{(U_{bat} - U_{pv}) D_1 T_s}{L} \\
 D_1 &= \frac{U_{pv}}{U_{bat} - U_{pv}} \cdot D \\
 \bar{i}_L &= \left( \frac{I_{LM} D T_s}{2} + \frac{I_{LM} D_1 T_s}{2} \right) \cdot \frac{1}{T_s} \\
 \bar{i}_L &= \frac{U_{pv} U_{bat} D^2 T_s}{(U_{bat} - U_{pv}) 2 L}
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Trenutni izraz za srednju vrijednost struje zavojnice (2.11) je nelinearan. Potrebno ga je linearizirati te primjeniti Laplaceovu transformaciju:

$$\begin{aligned}
\Delta i_L &= k_1 \Delta u_{pv} + k_2 \Delta u_{bat} + k_3 \Delta d \\
k_1 &= \frac{\partial i_L}{\partial u_{pv}} = \frac{U_{bat0}^2 D_0^2 T_s}{(U_{bat0} - U_{pv0})^2 2L} \\
k_2 &= \frac{\partial i_L}{\partial u_{bat}} = -\frac{U_{pv0}^2 D_0^2 T_s}{(U_{bat0} - U_{pv0})^2 2L} \\
k_3 &= \frac{\partial i_L}{\partial d} = \frac{U_{pv0}^2 U_{bat0} D_0^2 T_s}{(U_{bat0} - U_{pv0})^2 L} \\
I_L(s) &= k_1 U_{pv}(s) + k_2 U_{bat}(s) + k_3 D(s)
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Diferencijalne jednadžbe usrednjenog modela uzlaznog pretvarača u diskontinuiranom režimu rada:

$$\begin{aligned}
C_{ul} \frac{du_{pv}}{dt} &= i_{pv} - i_L \\
C_{izl} \frac{du_{bat}}{dt} &= i_D - i_1
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Jednadžba ulaznog napona ostaje ista kao i za kontinuirani režim rada, ali jednadžba izlaznog napona zabilježava promjenu (2.13). Struja kroz diodu  $i_D$  se naknadno u proračunu može supstituirati sa strujom zavojnice  $i_L$  uz relaciju  $i_D^- = \frac{u_{pv}}{u_{bat}} \cdot i_L^-$ .

Sljedeći korak je sastaviti model sustava u zapisu prostora stanja koji će imati samo dvije varijable stanja:  $u_{pv}$  i  $u_{bat}$ :

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_{pv} \\ \dot{u}_{bat} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{pv} \\ \Delta u_{bat} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta d \\ \Delta i_1 \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

Za linearizaciju jednadžbe ulaznog napona opet se koristi supsticija (2.7) koja vrijedi samo u točki maksimalne snage:

$$\begin{aligned}
a_{11} &= \left. \frac{\partial \dot{u}_{pv}}{\partial u_{pv}} \right|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = -\frac{1}{C_{ul}} \cdot \left( \frac{U_{bat0}^2 D_0^2 T_s}{(U_{bat0} - U_{pv0})^2 2L} + \frac{I_{pv0}}{U_{pv0}} \right) \\
a_{12} &= \left. \frac{\partial \dot{u}_{pv}}{\partial u_{bat}} \right|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = \frac{U_{pv0}^2 D_0^2 T_s}{(U_{bat0} - U_{pv0})^2 2L C_{ul}} \\
b_{11} &= \left. \frac{\partial \dot{u}_{pv}}{\partial d} \right|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = -\frac{U_{pv0} U_{bat0} D_0 T_s}{(U_{bat0} - U_{pv0}) L C_{ul}} \\
b_{11} &= \left. \frac{\partial \dot{u}_{pv}}{\partial i_1} \right|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = 0
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Linearizacija jednadžbe izlaznog napona:

$$\begin{aligned}
a_{21} &= \frac{\partial u_{bat}}{\partial u_{pv}} \Big|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = \frac{1}{C_{izl}} \cdot \left( \frac{U_{pv0} U_{bat0} D_0^2 T_S}{(U_{bat0} - U_{pv0})^2 2L} + \frac{I_{L0}}{U_{bat0}} \right) \\
a_{22} &= \frac{\partial u_{bat}}{\partial u_{bat}} \Big|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = -\frac{1}{C_{izl} U_{bat0}} \cdot \left( \frac{U_{pv0}^3 D_0^2 T_S}{(U_{bat0} - U_{pv0})^2 2L} + \frac{U_{pv0} I_{L0}}{U_{bat0}} \right) \\
b_{21} &= \frac{\partial u_{bat}}{\partial d} \Big|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = \frac{U_{pv0}^2 D_0^2 T_S}{(U_{bat0} - U_{pv0})^2 L C_{izl}} \\
b_{21} &= \frac{\partial u_{bat}}{\partial i_1} \Big|_{D_0, I_{L0}, I_{10}} = -\frac{1}{C_{izl}}
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Konačan zapis lineariziranog usrednjjenog modela u prostoru stanja:

### **3. Projektiranje regulacije sustava**

#### **3.1. Punjenje konstantnim naponom**

## Sažetak

Fotonaponski izvor povezan je s litij-ionskim baterijskim člankom putem istosmjernog ulaznog pretvarača koji podiže ulazni napon na odgovarajuću izlazni razinu. Projektirana je regulacijska petlja koja omogućuje maksimalno iskorištenje električne snage fotonaponskog izvora kada baterija nije napunjena, odnosno održavanje konstantnog izlaznog napona kada je baterija puna. Obrađeni su naponski i strujni način upravljanja pretvaračem. Ispravnost rada cjelokupnog modela sustava potvrđena je kroz simulacije, nakon čega je provedeno testiranje u stvarnim uvjetima primjenom komponenata male snage upravljanih razvojnom pločicom.

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

## Abstract

A photovoltaic source is connected to a lithium-ion battery via a direct current boost converter, which raises input voltage to a suitable output level. A control loop was designed to enable maximum power extraction from the photovoltaic source when the battery is not fully charged, and to maintain a constant output voltage once the battery is full. Both voltage mode and current mode control strategies for the converter were implemented. Operation of the full system model was confirmed through simulations, followed by real world testing using low power components controlled by a development board.

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