

Mogućnosti sudjelovanja fotonaponskih elektrana u pružanju pomoćnih usluga sustavu

Kvalifikacijski doktorski ispit

Tomislav Baškarad

Zavod za visoki napon i energetiku

Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva

Zagreb, Hrvatska

Email: tomislav.baskarad@fer.hr

Sažetak—Integracija obnovljivih izvora energije (OIE) u elektroenergetski sustav (EES) je u stalnom porastu zbog ciljeva smanjenja emisija ugljičnog dioksida. Fotonaponske elektrane (FNE) su jedan od najpopularnijih oblika OIE. Međutim, visok udio proizvodnje iz FNE unosi određene probleme u održavanju stabilnog i sigurnog rada EES-a. Frekvencijska stabilnost je narušena nedostatkom rotirajućih dijelova u FNE koji bi mogli pružiti inercijski odziv, te načinom rada s ciljem maksimalne proizvodnje snage čime se smanjuje ukupna snaga rezerve potrebna za osiguravanje primarne regulacije frekvencije. S obzirom da FNE rade na maksimalnoj snazi tijekom popodnevnih sati kada je opterećenje EES-a smanjeno, te da je njihova proizvodnja varijabilna i nepredvidljiva, u slučaju visokog udjela FNE u sustavu te nagle promjene u proizvodnji radne snage, može doći do narušavanja naponske stabilnosti. Navedeni problemi ukazuju na sve veću potrebu uključivanja FNE u aktivno sudjelovanje u pomoćnim uslugama sustava kako bi se moglo nastaviti sa dodatnim integracijama FNE u EES. U ovom radu prikazan je pregled literature koja se bavi istraživanjem mogućnosti sudjelovanja FNE u regulacijama frekvencije i napona.

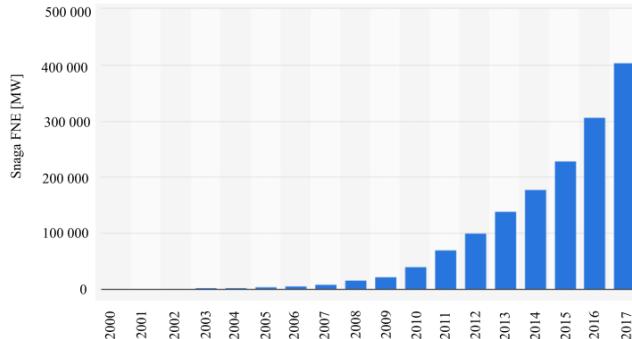
Ključne riječi—fotonaponske elektrane, model fotonaponske celije, regulacija frekvencije, regulacija napona, metode za proizvodnju maksimalne snage

POPIS OZNAKA I KRATICA

a	Faktor kvalitete diode.
C_{dc}	Kapacitet kondenzatora na DC spoju.
D	Faktor vođenja pretvarača.
f	Frekvencija mreže.
G	Ozračenje.
G_{STC}	Ozračenje pri STC (1000 W/m^2).
H	Konstanta tromosti agregata.
H_{sys}	Ekvivalentna konstanta tromosti EES-a.
I	Izlazna struja fotonaponske celije.
I_D	Struja diode.
I_{ks}	Struja kratkog spoja FN celije pri STC.
I_{mpp}	Struja FN celije u točki maksimalne snage.
I_{ph}	Fotostruja.
I_q	Jalova komponenta struje.
I_{Rp}	Struja kroz otpor u paraleli.
I_S	Struja zasićenja diode.
k	Boltzmanova konstanta ($1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$).
k_I	Temperaturni koeficijent struje kratkog spoja FN celije.
k_U	Temperaturni koeficijent napona praznog hoda FN celije.
N_S	Broj spojenih FN celija u seriji.
P	Radna snaga.

I. UVOD

Proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora energije (OIE) je u stalnom porastu. Republika Hrvatska je preuzeila obvezu povećanja uporabe energije iz obnovljivih izvora pri čemu bi u 2020. godini udio energije iz obnovljivih izvora u bruto neposrednoj potrošnji trebao iznositi najmanje 20 posto [1]. Ukupna instalirana snaga u fotonaponskim elektranama (FNE) u svijetu je iznosila oko 415 GW na kraju 2017. godine, slika 1, što je približno 6% ukupne instalirane snage u svijetu i 50 puta više u odnosu na 2006. godinu [2]. Porast integracije FNE negativno utječe na stabilnost frekvencije elektroenergetskog sustava (EES) jer s jedne strane zamjenjuju konvencionalne sinkrone generatore koji se isključuju iz pogona te se time smanjuje rotirajuća kinetička energija EES-a, dok s druge strane FNE su spojene na mrežu



Slika 1. Ukupna instalirana snaga FNE u svijetu od 2000.-2017. godine [3]

preko sučelja energetske elektronike čime su u potpunosti neosjetljive na promjene mrežne frekvencije. Sve navedeno utječe na smanjenje tromosti sustava što se očituje u većoj brzini promjene frekvencije i maksimalnom odstupanju frekvencije od nazivne vrijednosti pri poremećajima. Uz frekvencijsku stabilnost, ugroženom postaje i naponska stabilnost u situacijama visokog udjela FNE u sustavu. Spajanjem velikog broja FNE na distribucijsku mrežu, mijenja se dosadašnji karakter mreže te ona postupno postaje aktivna mreža što znači da tokovi snaga ovise o trenutnoj potrošnji i proizvodnji distribuiranih izvora. U trenucima malog opterećenja i velike proizvodnje FNE, napon u pojedinim dijelovima mreže poraste. Osim toga, proizvodnja iz FNE je varijabilna i sklona naglim propadima ili porastima snage u slučaju brzih promjena ozračenja što također negativno utječe na održavanje naponske stabilnosti. Jedno od uvijek mogućih rješenja za navedene probleme je ograničavanje maksimalne proizvodnje radne snage iz FNE ili jednostavno smanjivanje broja instaliranih FNE, međutim to je u suprotnosti cilju smanjenja emisija stakleničkih plinova kojeg su mnoge zemlje u svijetu podržale. Dakle, bolje rješenje je razvijanje tehnologije i omogućavanje OIE da aktivno sudjeluju u regulaciji frekvencije i napona što dovodi i do nužnosti prilagođavanja mrežnih pravila.

U ovom radu prikazane su mogućnosti sudjelovanja FNE u pomoćnim uslugama sustava. Struktura rada je sljedeća: u poglavljiju II, FN ćelija je matematički detaljno modelirana u ovisnosti o električnim i okolišnim parametrima; poglavljje III donosi pregled metoda za maksimalnu proizvodnju snage iz FN modula, tzv. MPPT (engl. Maximum power-point tracking) metode; problematika sudjelovanja FNE u regulaciji frekvencije te prikaz mogućih rješenja su predstavljeni u poglavljiju IV; poglavljje V se bavi problematikom sudjelovanja FNE u regulaciji napona; u poglavljju VI je dan zaključak i prijedlog nastavka istraživanja.

II. MATEMATIČKI MODEL FOTONAPONSKE ĆELIJE

Fotonaponska (FN) ćelija je napravljena od poluvodičkih materijala koji pretvaraju energiju sunčevog zračenja u električnu energiju. Temeljena na električnim svojstvima poluvodičkih materijala, FN ćelija se može prikazati kao strujni izvor. Postoji nekoliko načina modeliranja FN ćelije, međutim dva najzastupljenija modela su: jednodiodni model (engl. single diode model) i dvodiodni model (engl. double diode model). Dvodiodni model općenito je prihvacen kao najtočniji model, pogotovo u uvjetima niskog ozračenja. Ovaj je model pogotovo važan pri optimizaciji procesa proizvodnje FN ćelije. S druge strane, kada je istraživanje fokusirano na proizvodnju električne energije FNE, koristi se

jednodiodni model jer se proizvodnja električne energije razmatra pri visokim vrijednostima ozračenja [4]. Osim u točnosti, navedeni modeli se razlikuju i u broju parametara uključenih u proračun strujno-naponske karakteristike FN ćelije. Dvodiodni model se sastoји od 7 parametara koje je potrebno izračunati dok se jednodiodni model sastoјi od 5 parametara te je stoga proces simulacije modela i identifikacije parametara dosta jednostavniji u slučaju jednodiodnog modela [5].

A. Dvodiodni model FN ćelije

Shema dvodiodnog modela FN ćelije je prikazana na slici 2. te s obzirom na sliku 2, može se napisati izraz za struju FN ćelije:

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{Rp} \quad (1)$$

pri čemu su: I [A] – izlazna struja FN ćelije, I_{ph} [A] – fotostruja, I_{D1} [A] – struja diode D_1 , I_{D2} [A] – struja diode D_2 . I_{Rp} [A] – struja kroz paralelno spojeni otpornik. Struje dioda D_1 i D_2 :

$$I_{D1} = I_{S1} \cdot \left(e^{\frac{q(U+IR_S)}{a_1 k T}} - 1 \right) \quad (2)$$

$$I_{D2} = I_{S2} \cdot \left(e^{\frac{q(U+IR_S)}{a_2 k T}} - 1 \right) \quad (3)$$

pri čemu su: I_{S1} [A] – struja zasićenja diode D_1 , I_{S2} [A] – struja zasićenja diode D_2 , q – naboј elektrona ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C), k – Boltzmanova konstanta ($1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K), T [K] – temperatura FN ćelije, U [V] – izlazni napon FN ćelije, a_1 , a_2 – faktori kvalitete diode D_1 i D_2 . Struja I_{S2} predstavlja gubitke zbog rekombinacijske struje u osiromašenom sloju [6]. Struja kroz paralelno spojeni otpornik:

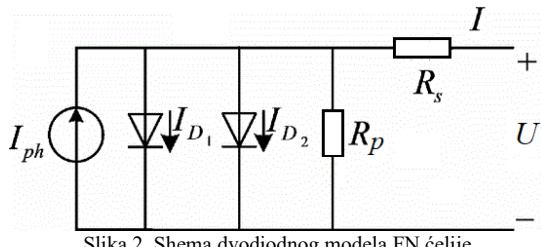
$$I_{Rp} = \frac{U + IR_S}{R_p} \quad (4)$$

pri čemu su: R_s [Ω] – serijski spojeni otpornik koji predstavlja gubitke zbog prolaska struje kroz različite slojeve ćelije. Ovisi uglavnom o spoju metalne baze s p i n slojem poluvodiča; R_p [Ω] – paralelno spojeni otpornik koji predstavlja gubitke zbog lutajućih struja (engl. leakage current). Ovisi uglavnom o procesu proizvodnje FN ćelije. Uvrštavajući izraze (2), (3) i (4) u (1), dobiva se izraz (5) koji opisuje $I-U$ karakteristiku fotonaponske ćelije [7]:

$$I = I_{ph} - I_{S1} \cdot \left(e^{\frac{q(U+IR_S)}{a_1 k T}} - 1 \right) - I_{S2} \cdot \left(e^{\frac{q(U+IR_S)}{a_2 k T}} - 1 \right) - \frac{U + IR_S}{R_p} \quad (5)$$

Ovaj model omogućuje točniju simulaciju FN ćelije, međutim kako je ranije navedeno, zahtijeva izračun ili poznavanje sedam parametara, I_{S1} , I_{S2} , I_{ph} , a_1 , a_2 , R_s , R_p , što dodatno usložnjava proces simulacije. Iako se faktor kvalitete diode uobičajeno računa u linearnom dijelu krivulje $\ln(I)/U$ pomoću izraza (6) [8], kako bi djelomično pojednostavili proračune, autori u [6] predlažu vrijednosti za $a_1 = 1$, $a_2 = 2$.

$$a = \frac{q}{kT} \left(\frac{dU}{d \ln(\frac{I}{I_S})} \right) \quad (6)$$



Slika 2. Shema dvodiodnog modela FN ćelije

B. Jednodiodni model FN ćelije

Ovaj model je pojednostavljeni prikaz $I-U$ karakteristike FN ćelije. Izведен je iz Shockleyeve jednadžbe za diodu uključujući pritom faktor diode a za aproksimaciju učinka rekombinacije u kvazineutralnom području i u osiromašenom sloju. Na slici 3 je prikazana shema jednodiodnoga modela FN ćelije te s obzirom na sliku, može se napisati izraz za struju FN ćelije:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \quad (7)$$

Struja I_D je predstavljena Shockley jednadžbom koja povezuje struju diode u p-n spoju s naponom diode U_D :

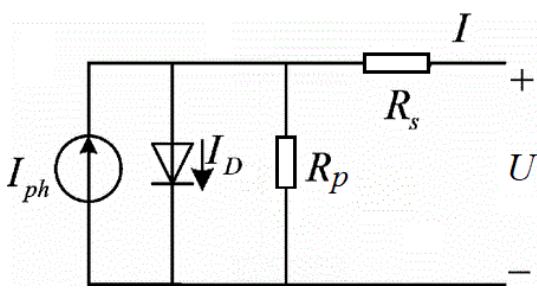
$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{q U_D}{a k T}} - 1 \right) \quad (8)$$

pri čemu su : I_S [A] – struja zasićenja diode; vrijednost faktora kvalitete diode a se nalazi u intervalu od 1 do 2. Za diode u kojima dominira rekombinacija u kvazineutralnom području, koristi se vrijednost $a=1$, dok za diode u kojima dominira rekombinacija u osiromašenom sloju, koristi se vrijednost $a=2$ [4]. Koristeći izraz za struju diode (8) te uvrštavanjem u (7) dobiva se izraz (9) koji opisuje $I-U$ karakteristiku fotonaponske ćelije [9]:

$$I = I_{ph} - I_S \cdot \left(e^{\frac{q(U+IR_S)}{a k T}} - 1 \right) - \frac{U + IR_S}{R_p} \quad (9)$$

Kao što je ranije navedeno, ovaj model se sastoji od 5 nepoznatih parametara I_S , I_{ph} , a , R_s , R_p , koje je potrebno izračunati kako bi model što realnije predstavljao karakteristiku FN ćelije. Promatraljući analizirane modele, tri problema se mogu izdvojiti:

- Karakteristika $I-U$ je izrazito nelinearna i zapisana u implicitnom obliku
- Pet ili sedam nepoznatih parametara koje je potrebno izračunati, a proizvođači najčešće prilažu samo tri podatka: I_{ks} - struju kratkog spoja, U_{ph} - napon praznog hoda, te vrijednosti u točki maksimalne snage I_{mpp} i U_{mpp}
- Ovisnost $I-U$ karakteristike o temperaturi i ozračenju



Slika 3. Shema jednodiodnog modela FN ćelije

S obzirom da se jednodiodni model pokazao sasvim pogodnim za korištenje u simulacijama proizvodnje snage FN polja [4], navedeni problemi će biti analizirani samo za taj model.

Jednadžba (9) je zapisana u implicitnom obliku, međutim zanemarivanjem parametra R_p , može se vrlo jednostavno dobiti eksplisitni oblik jednadžbe $U=f(I)$:

$$U = \frac{a k T}{q} \ln \frac{I_{ph} - I}{I_S} - I \cdot R_s \quad (10)$$

Ako se parametar R_p ne može zanemariti, dobivanje eksplisitnog oblika postaje prilično složen i zahtijevan zadatak koji se ipak može riješiti korištenjem Lambert W funkcije:

$$U = I \cdot (R_p + R_s) - R_p \cdot (I_{ph} - I_s) - a \cdot \frac{k T}{q} \cdot W \left[\frac{q \cdot I_S \cdot R_p}{a \cdot k T} \cdot e^{-\frac{q \cdot R_p \cdot (I_{ph} - I_s)}{a \cdot k T}} \right] \quad (11)$$

pri čemu W označava Lambert W funkciju koja je definiran kao inverzna funkcija od funkcije:

$$f(w) = w e^w \quad (12)$$

Detaljan izvod se može pronaći u [10].

Različite metode za identifikaciju nepoznatih parametara modela mogu se pronaći u literaturi. Metode se mogu klasificirati prema korištenoj tehnici za analitičke metode, numeričke metode i heurističke metode; drugi način klasificiranja je prema korištenim podacima: podaci temeljeni na eksperimentalnoj dobivenoj karakteristici te podaci dobiveni od proizvođača. U radu [11] predstavljena je metoda identifikacije parametara temeljena na podacima iz tablica koristeći Newton-Raphson metodu. Metoda zahtijeva postavljanje početnih vrijednosti za R_s i R_p te iteracijskom metodom uz postavljene uvjete postiže korekciju vrijednosti parametara. Iako iteracijske metode postižu točnije rezultate, često se izbjegavaju jer imaju problem konvergencije koja je osjetljiva na postavljanje početnih vrijednosti uslijed čega metode često divergiraju. Zbog navedenog problema, autori često predlažu ne-iteracijske metode. Jedna od takvih metoda predložena je u [12]. Autori prvo definiraju novi parametar koji povezuje faktor kvalitete diode i napon praznog hoda uz temperaturni koeficijent. Nakon toga, postavljaju skup analitičkih jednadžbi te na temelju podataka dobivenih od proizvođača (I_{ks} , U_{ph} , I_{mpp} , U_{mpp} , k_I , k_U) na prilično jednostavan način izračunavaju pet potrebnih parametara. U radu [13] autori koriste nagibe krivulje $I-U$ u točkama struje kratkog spoja i napona praznog hoda za izračun potrebnih parametara. Detaljna analiza brojnih metoda za identifikaciju parametara te njihova usporedba sa simulacijskim i eksperimentalnim rezultatima napravljena je u [14].

Kako bi model FN ćelije bio u potpunosti određen, potrebno je još odrediti ovisnost parametara o temperaturi i ozračenju. U velikoj većini radova, faktor kvalitete diode, serijski i paralelno spojeni otpornik smatraju se konstantnim tj. neovisnim o promjenama temperature i ozračenja. Dakle, jedini parametri koji se razmatraju ovisno o promjenama temperature i ozračenja su struja zasićenja diode i fotostruja. Autori u [11] predlažu sljedeće relacije:

$$I_S = \frac{I_{ks} + k_I(T-298) - \frac{U_{ph} + k_U(T-298) - [I_{ks} + k_I(T-298)] \cdot R_s}{R_p}}{e^{\frac{q[U_{ph} + k_U(T-298)]}{N_A \cdot a \cdot k T}}} \quad (13)$$

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{STC}} \left[I_S \left(e^{\frac{q(U_{ph} + k_U(T - 298))}{N_S A k T}} - 1 \right) + \frac{U_{ph} + k_U(T - 298)}{R_p} \right] \quad (14)$$

pri čemu su: G [W/m²] – ozračenje, G_{STC} [W/m²] – ozračenje pri standardnim uvjetima testiranja, I_{ks} [A] – struja kratkog spoja pri STC, U_{ph} [V] – napon kratkog spoja pri STC, T [K] – temperatura, k_I [mA/K] – temperaturni koeficijent struje, k_U [mV/K] – temperaturni koeficijent napona, N_S – broj spojenih ćelija u seriji. U radu [15], autori zanemaruju paralelno spojeni otpornik, te predlažu sljedeće jednostavnije relacije:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{STC}} [I_{ks} + k_I(T - 298)] \quad (15)$$

$$I_S = \frac{I_{ks} + k_I(T - 298)}{e^{\frac{q(U_{ph} + k_U(T - 298))}{N_S A k T}} - 1} \quad (16)$$

Uvrštavajući izraze (15) i (16) u izraz (9) dobiva se izraz (17) koji opisuje realnu FN ćeliju u ovisnosti o promjeni temperature i ozračenja:

$$I = \frac{G}{G_{STC}} [I_{ks} + k_I(T - 298)] - \frac{I_{ks} + k_I(T - 298)}{e^{\frac{q(U_{ph} + k_U(T - 298))}{N_S A k T}} - 1} \left(e^{\frac{q(U + I R_S)}{N_S A k T}} - 1 \right) - \frac{U + I R_S}{R_p} \quad (17)$$

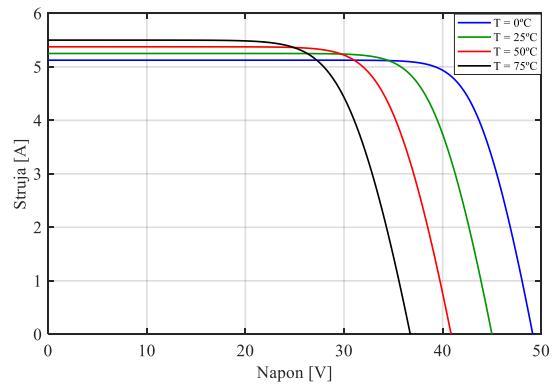
Koristeći izraz (17) simulirane su korištenjem MATLAB-a $I-U$ i $P-U$ karakteristike fotonaponskog modula 180 W ZED mono-kristal s obzirom na promjene temperature i ozračenja [16]. Parametri [17] navedenog FN modula su prikazani u tablici 1.

Tablica 1. Parametri FN modula 180 W ZED mono-kristal [17]

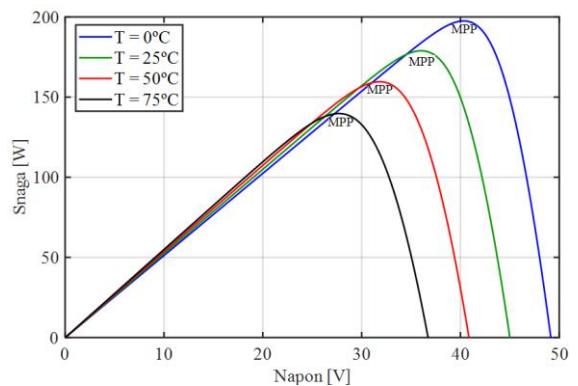
Tehnologija	Kristalni silicij
Broj ćelija u seriji	72
Napon praznog hoda U_{oc}	45 V
Struja kratkog spoja I_{sc}	5.25 A
Napon pri maksimalnoj snazi U_{mp}	36.31 V
Struja pri maksimalnoj snazi I_{mp}	4.98 A
Maksimalna snaga P_{mp}	180 W
Struja zasićenja I_s	1.6595 nA
Temperatura pri STC	25°C
Sunčev ozračenje pri STC	1000 W/m ²

Na slikama 4 i 5 prikazan je utjecaj promjene temperature na $I-U$ i $P-U$ karakteristiku FN modula. Može se uočiti kako povećanje temperature FN modula poveća struju kratkog spoja ($U=0$, vrijednosti na y-osi) te smanjuje napon praznog hoda ($I=0$, vrijednosti na x-osi), slika 4. Smanjenje napona dosta je značajnije nego povećanje struje kratkog spoja, stoga se i ukupna proizvedena snaga smanjuje, što je vidljivo na slici 5.

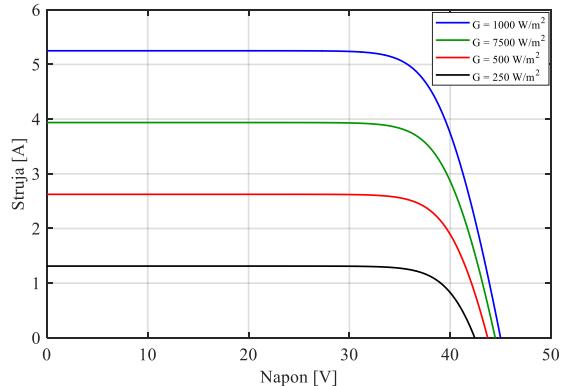
Na slikama 6 i 7 prikazan je utjecaj promjene ozračenja na $I-U$ i $P-U$ karakteristiku FN modula. Smanjenje ozračenja smanjuje struju kratkog spoja (linearna ovisnost) i napon praznog hoda (logaritamska ovisnost) (slika 6) te stoga i ukupna snaga FN modula značajno se smanjuje (slika 7).



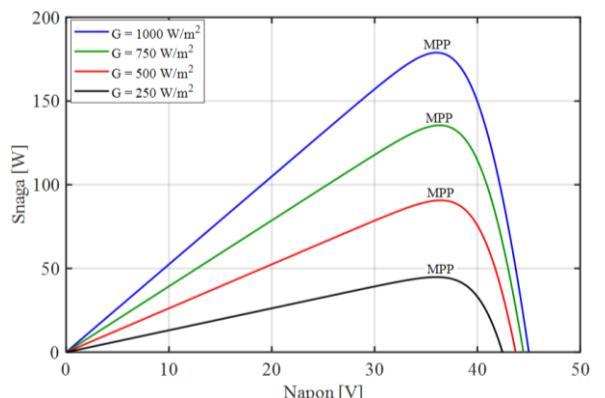
Slika 4. Utjecaj promjene temperature na $I-U$ karakteristiku [16]



Slika 5. Utjecaj promjene temperature na $P-U$ karakteristiku [16]



Slika 6. Utjecaj promjene ozračenja na $I-U$ karakteristiku [16]



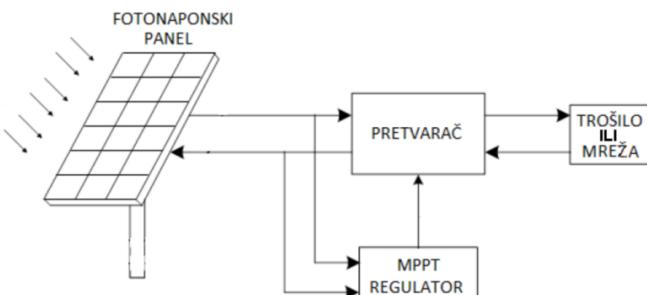
Slika 7. Utjecaj promjene ozračenja na $P-U$ karakteristiku [16]

III. METODE ZA PRAĆENJE TOČKE MAKSIMALNE SNAGE

Fotonaponski modul ima nisku učinkovitost pretvorbe sunčeve energije u električnu energiju pa da bi se spriječili dodatni gubici i time još niža učinkovitost, nastali zbog rada FN modula u neoptimalnoj točki tj. zbog proizvodnje snage manje nego dostupne, razvijene su metode za proizvodnju maksimalne snage FN modula tzv. MPPT metode. U uvjetima ravnomjernog ozračenja FN modula, na $P-U$ karakteristici postoji točno jedna točka maksimalne snage proizvodnje. Međutim, točka maksimalne snage (engl. MPP) se mijenja ovisno o temperaturi i sunčevom zračenju kao što se vidi na slikama 5 i 7. Potrebno je stoga, da bi se proizvodila maksimalna snaga, kontinuirano podešavati FN modul u radnu točku maksimalne snage. MPPT algoritam je primijenjen u istosmjernom pretvaraču koji je sastavni dio energetskog pretvarača preko kojega se FNE priključuje na EES [18]. Na slici 8 prikazana je blokovska shema FN sustava. Postoje brojne MPPT metode i mogu se podijeliti na različite načine kao npr. prema brzini konvergencije, cijeni, broju potrebnih senzora, učinkovitosti, osjetljivosti na promjene okolišnih uvjeta itd.[19]. Jedna od uobičajenih podjela je podjela na izravne i neizravne metode. Neizravne metode zahtijevaju poznavanje parametara i karakteristike FN modula, dok za izravne metode nije potrebno poznavati karakteristike FN modula [20]. Neke od neizravnih metoda su: metoda napona praznog hoda (engl. Fractional Open-Circuit Voltage), metoda struje kratkog spoja (engl. Fractional Short-Circuit Current), metoda preglednih tablica (engl. Look-up Table) i dr. Neke od izravnih metoda su: metoda perturbacije (engl. Perturb and Observe), metoda inkrementalne vodljivosti (engl. Incremental Conduantance), metode temeljene na neizrazitoj logici (engl. Fuzzy Logic), metode temeljene na neuronskim mrežama (engl. Neural Network) i dr. Među najjednostavnije metode spadaju metoda napona praznog hoda i metoda struje kratkog spoja. Metoda napona praznog hoda temelji se na prepostavci konstantnog odnosa maksimalnog napona U_{mpp} i napona praznog hoda U_{ph} :

$$U_{mpp} = k \cdot U_{ph} \quad (18)$$

Koefficijent k iznosi $0.65 - 0.8$ prema [21], dok prema [22] iznosi $0.71 - 0.78$. Napon praznog hoda se određuje tako što se periodično isključuje opterećenje na 10-50 ms svake minute, te se mjeri U_{ph} , zatim se na temelju izmjerjenog praznog hoda, i koefficijenta k , određuje napon radne točke modula. Kako bi se spriječili gubici energije zbog periodičnog isključivanja opterećenja, može se koristiti pilot ćelija, koja će predstavljati karakteristiku cijelog modula, te se na njoj mjeri napon U_{ph} .



Slika 8. Blokovski prikaz FN sustava [18]

Prednosti su jeftina i jednostavna izvedba koja zahtijeva samo uređaj za mjerjenje napona, a nedostaci su mala efikasnost s obzirom da se radna točka praktično nikad ne nalazi točno u točki maksimalne snage, te činjenica da koefficijent k nije jednoznačan. Poboljšanja ove metode predložena su u [23] i [24]. U [23] autori metodom linearne ekstrapolacije $P-U$ točnije određuju U_{mpp} , a uz to metoda ne zahtijeva isključivanje opterećenja kako bi se izmjerio napon praznog hoda. U [24] predloženo je računanje U_{mpp} bez mjerjenja napona praznog hoda i koefficijenta k . Metoda struje kratkog spoja se temelji na prepostavci konstantnog odnosa struje I_{mpp} , koja odgovara točki maksimalne snage, i struje kratkog spoja I_{ks}

$$I_{mpp} = k_1 \cdot I_{ph} \quad (19)$$

Mjerenjima je utvrđeno da koefficijent k_1 iznosi $0.78 - 0.92$ prema [25]. Nakon što se odredi struja kratkog spoja, uz poznavanje koefficijenta k_1 , određuje se struja I_{mpp} pri kojoj je izlazna snaga panela maksimalna. Prednosti metode su jeftina i jednostavna izvedba koja zahtijeva samo uređaj za mjerjenje struje, a nedostaci su da je često potreban dodatni prekidač kojim se krajevi panela dovode u kratki spoj da bi se izmjerila struja kratkog spoja, mala učinkovitost, te činjenica da koefficijent k_1 nije jednoznačan. Modifikacija ove metode je predložena u [26] u kojoj autori predlažu izračun struje kratkog spoja bez potrebe dodatnog prekidača i isključivanja pretvarača. Struja kratkog spoja se računa prema:

$$I_{ks} = C_t \cdot C_s \cdot I_{ks0} \quad (20)$$

pri čemu su C_t i C_s temperaturni koefficijent i koefficijent promjene struje kratkog spoja s obzirom na promjenu ozračenja, I_{ks0} je struja kratkog spoja pri standardnim uvjetima.

Zasigurno jedna od najzastupljenijih metoda u literaturi je metoda perturbacije. Metoda se temelji na promatrjanju omjera promjene snage i napona tj. derivacije dP/dU te u ovisnosti o predznaku derivacije se određuje sljedeći korak [27]. Tablica 2 prikazuje tri moguće situacije ove metode.

Tablica 2. Metoda perturbacije

$\frac{dP}{dU} = 0$	Radna točka se nalazi u točki maksimalne snage
$\frac{dP}{dU} > 0$	Radna točka se nalazi lijevo od točke maksimalne snage te je potrebno napon povećati u sljedećem koraku
$\frac{dP}{dU} < 0$	Radna točka se nalazi desno od točke maksimalne snage te je potrebno napon smanjiti u sljedećem koraku

Prednosti ove metode su jednostavna i jeftina implementacija, a nedostaci su da zapravo metoda nikada ne postiže MPP točku nego kontinuirano oscilira oko nje, a u slučaju promjene okolišnih uvjeta, algoritam može donijeti pogrešne odluke o smjeru promjene napona [28]. Vrijednost koraka promjene napona je veoma važna u ovoj metodi. Ako je vrijednost koraka promjene napona prevelika, algoritam će brzo konvergirati prema MPP, međutim pojavljuju se velike oscilacije oko MPP. Ako je vrijednost koraka promjene napona premalena, oscilacije će biti smanjene, međutim i brzina konvergencije algoritma će također biti smanjena [29].

Kako bi se riješili navedeni nedostaci metode perturbacije, brojna poboljšanja metode su predložena u literaturi. Autori u [30] predlažu korištenje promjenjivog koraka promjene napona umjesto uobičajeno korištenog konstantnog koraka promjene napona. Zaključeno je da promjena snage postaje sve manja i manja kako se radna točka približava MPP, stoga u svakom sljedećem koraku algoritma predložena je promjena koraka napona prema (21):

$$\Delta D(k+1) = \left| \frac{\Delta P}{\Delta U} \right| \cdot \Delta D(k) \quad (21)$$

pri čemu je ΔD promjena faktora vođenja (engl. duty cycle) pretvarača kojim se utječe na promjenu napona FN modula. Do sličnog zaključka su došli i autori u [31], međutim oni predlažu promjenu koraka napona prema (22):

$$C(k) = N \cdot \log_{10} \left| \frac{\Delta P}{\Delta U} \right| \quad (22)$$

pri čemu je N konstanta te u radu je predložena vrijednost $N=0.5$. Kako bi se osigurala brza konvergencija prema MPP, obje metode su primijenjene u kombinaciji s metodom napona praznog hoda na način da se početna točka odredi tom metodom, a nakon toga se primjenjuje modificirana metoda perturbacije. Također, obje navedene metode uvelike smanjuju oscilacije oko MPP. Primjenjenost metode perturbacije u kombinaciji s drugim metodama je predložena i u [32]. Umjesto promjene napona u svakom koraku, u ovoj metodi se koristi promjena koraka struje kako bi se ubrzala konvergencija, nadalje, kako bi se radna točka u početku što prije približila MPP koristi se metoda struje kratkog spoja za određivanje početne radne točke, te da bi se eliminirale oscilacije oko MPP, primjenjuje se metoda perturbacije s promjenjivim korakom. Ova metoda se pokazala učinkovitom pri brzim promjenama okolišnih uvjeta. Modificirana metoda u [33] također se temelji na promatranju promjene struje. Metoda se temelji na minimiziranju razlike $I_{mpp} - I_{pv}$, pri čemu I_{mpp} označava vrijednost struje na izlazu iz MPPT regulatora, a I_{pv} označava trenutnu vrijednost struje. Razlika se šalje u PI regulatora koji određuje potrebni korak promjene faktora vođenja. Ovom se metodom minimiziraju oscilacije oko MPP. U radu [34] autori modificiraju metodu perturbacije kako bi riješili problem pogrešne odluke o smjeru promjene napona koja se dogodi u uvjetima brze promjene sunčevog zračenja. Problem je riješen na način da se početno odredi razina ozračenja G pomoću izmijerenih vrijednosti napona i struje u radnoj točki, te pomoći izračunate vrijednosti G , računa se točka P_{mpp} . Nakon toga, u svakom sljedećem koraku algoritma, uspoređuje se trenutna snaga P i P_{mpp} te ako je $P > P_{mpp}$, to je znak da je došlo do promjene ozračenja. Predložena modificirana metoda u [35] ima veliku brzinu konvergencije prema MPP. Metoda se temelji na činjenici da se svi maksimumi $P-U$ karakteristike s obzirom na različite iznose ozračenja nalaze unutar intervala $0.7U_{ph} - 0.8U_{ph}$, pri čemu U_{ph} predstavlja napon praznog hoda. S obzirom na navedenu činjenicu, algoritam potragu za MPP vrši samo u tih 10% intervala napona praznog hoda.

Metoda inkrementalne vodljivosti je metoda koja je također široko zastupljena u literaturi. Metoda je prvenstveno razvijena kako bi se uklonile ili smanjile oscilacije oko MPP u metodi perturbacije. Potrebni smjer promjene napona dobiva se usporedbom povećanja vodljivosti s trenutnom vodljivosti [36]. Nakon što se postigne jednaka vrijednost,

algoritam ne mijenja napon sve dok se ne naruši jednakost. U tablici 3 su prikazane tri moguće situacije ove metode.

Tablica 3. Metoda inkrementalne vodljivosti

$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U}$	Radna točka se nalazi u točki maksimalne snage te nije potrebno mijenjati napon
$\frac{dI}{dU} > -\frac{I}{U}$	Radna točka se nalazi lijevo od točke maksimalne snage te je potrebno napon povećati u sljedećem koraku
$\frac{dI}{dU} < -\frac{I}{U}$	Radna točka se nalazi desno od točke maksimalne snage te je potrebno napon smanjiti u sljedećem koraku

Glavni nedostaci ove metode su teža primjenjivost algoritma zbog postojanja nazivnika koji može poprimiti vrijednost nula; problem određivanja veličine koraka promjene napona, te također i ova metoda može imati probleme zbog brze promjene okolišnih uvjeta. Stoga i ova metoda ima brojne modifikacije i poboljšanja kako bi se riješili navedeni nedostaci. Jedna od modifikacija metode je predložena u radu [37]. Karakteristika $P-U$ je podijeljena na dva dijela, bliži i daleki dio od MPP. Kada se radna točka nalazi daleko od MPP, koristi se maksimalni fiksni korak promjene napona C_{Pmax} kako bi se ubrzala konvergencija prema MPP. U trenutku kada se radna točka približi MPP, primjenjuje se promjenjivi korak promjene napona C_P prema (23):

$$C_P = C_{Pmax} \left| \frac{dP_{pv}}{dU_{pv}} \right| \quad (23)$$

Autori u [38] upravljanjem faktorom vođenja uzlaznog pretvarača (engl. boost converter) modificiraju metodu inkrementalne vodljivosti i postižu proizvodnju maksimalne snage iz FN modula. Promjena faktora vođenja ΔD računa se prema (24):

$$\Delta D = \frac{(1-D)\Delta U_0 - \Delta U_{pv}^*}{U_0} \quad (24)$$

$$\Delta U_{pv}^* = \frac{\Delta P_{pv}}{U_{pv} \frac{dI_{pv}}{dU_{pv}} + I_{pv}} \quad (25)$$

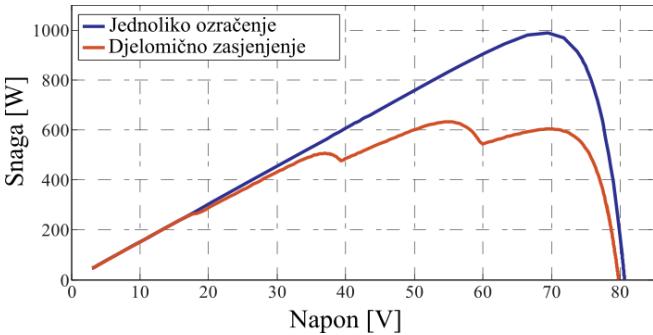
pri čemu je U_0 napon na izlazu pretvarača. U usporedbi sa metodom koja ima fiksni korak promjene napona, ova metoda je pokazala brži odziv pri promjenama okolišnih uvjeta. Rad koji se također temelji na promjeni faktora vođenja za poboljšanje metode inkrementalne vodljivosti je predstavljen u [39]. Promjena koraka faktora vođenja se računa prema (26):

$$D(k) = D(k-1) \pm N \cdot \left| \frac{P(k) - P(k-1)}{U(k) - U(k-1)} \right| \quad (26)$$

pri čemu je N faktor skaliranja iznosa u intervalu 0.06-0.12. Složeniji algoritmi brže pronalaze točku maksimalne snage, ali i zahtijevaju moćnije računalne sustave za realizaciju. Neke metode koje se temelje na složenijim algoritmima su: metoda temeljena na neizrazitoj logici [40] čija je prednost što ne zahtijeva precizne ulazne podatke kao ni precizni matematički model, a također nelinearnost sustava ne predstavlja problem [41]; metoda temeljena na primjeni neuronskih mreža [42] koja se koristi za rješavanje složenih problema koristeći aproksimacije parametara. Ulazni podaci mogu biti napon praznog hoda, struja kratkog spoja, temperatura, ozračenje i dr. dok izlazni podaci su referentni signali kao npr. signal faktora vođenja pretvarača [43]. S

obzirom da svaki FN modul ima drugčiju karakteristiku, metoda mora biti prilagođena posebno za svaki FN modul. Postoje i složene metode temeljene na vjerojatnosti i stohastici: metoda temeljena na optimizaciji rojem čestica (engl. Particle Swarm Optimization) [29], metoda temeljena na ponašanju kolonije mrava u pretraživanju područja (engl. Ant colony optimization based MPPT) [29], metoda temeljena na ponašanju riba u potrazi za hranom (engl. Artificial Fish Swarm Algorithm) [44].

Najveći problem za MPP algoritme predstavlja zasjenjenje FN modula. U uvjetima djelomičnog zasjenjenja FN modula u sustavu, koji su spojeni serijski i paralelno u nizove, FN moduli koji su zasjenjeni proizvode manje električne energije nego ostali moduli koji nisu zasjenjeni, a može doći i do pojave da zasjenjeni FN moduli postanu potrošači dijela električne energije koju proizvede ostali FN moduli. Zbog navedenoga, statička karakteristika snage FN sustava umjesto jednoga može imati nekoliko ekstrema, slika 9, te zbog toga je potrebno prilagoditi ili unaprijediti MPP algoritme kako bi uspješno pronalazili pravi maksimum. Izvrstan pregled i opširna analiza MPP metoda za uvjete djelomičnog zasjenjenja FN modula se nalazi u [45].



Slika 9. P-U karakteristika u uvjetima jednolikog ozračenja i djelomičnog zasjenjenja [45]

IV. REGULACIJA FREKVENCIJE

Održavanje konstantne frekvencije u EES veoma je važno zbog velikog broja uređaja za proizvodnju i potrošnju električne energije čija pouzdanost i kvaliteta rada je osjetljiva na promjene frekvencije. Osim toga, konstantna frekvencija omogućava raspodjelu opterećenja na agregate tj. izradu voznih redova [46]. Frekvencijsku stabilnost EES-a osiguravaju sinkroni generatori koji su izravno povezani na mrežu te je njihova mehanička brzina vrtnje povezana s mrežnom frekvencijom. Brzina promjene frekvencije (engl. ROCOF – rate of change of frequency) uglavnom je ovisna o ravnoteži proizvodnje i potrošnje radne snage i ekvivalentnoj konstanti tromosti cijelog sustava te je definirana jednadžbom njihanja [47]:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H_{sys}} (P_m - P_e) \quad (27)$$

pri čemu su ω_r električna frekvencija generatora u jediničnoj vrijednosti (p.u.); P_m je agregirana mehanička snaga na vratilu turbine u EES-u u p.u.; P_e je agregirana električna snaga generatora u EES-u u p.u.; H_{sys} je ekvivalentna konstanta tromosti EES-a u sekundama. Ekvivalentna konstanta tromosti

definirana je utjecajem konstanti tromosti pojedinih agregata u sustavu i može se izračunati prema [48] :

$$H_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (28)$$

pri čemu su H_i i S_i konstanta tromosti i nazivna snaga generatora i , n je broj sinkronih jedinica spojenih na mrežu. Manja vrijednost ekvivalentne konstante tromosti će uzrokovati bržu promjenu frekvencije kada se u sustavu dogodi poremećaj ravnoteže između mehaničke i električne snage. Povećanje broja obnovljivih izvora energije spojenih na mrežu preko frekvencijskih pretvarača koji zamjenjuju konvencionalne sinkrone generatore smanjuje vrijednost ekvivalentne konstante tromosti [49]:

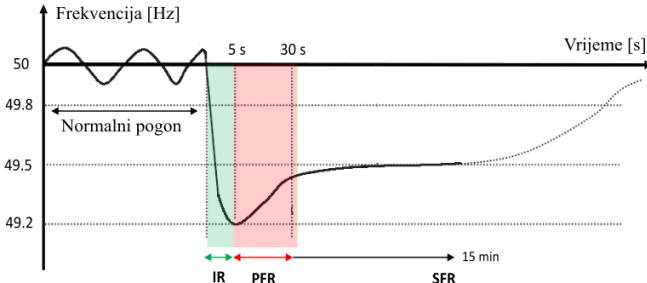
$$H_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} H_i S_i}{\sum_{i=1}^{n-k} S_i + \sum_{n-k}^n S_{pv,k}} \quad (29)$$

pri čemu S_{pv} općenito može označavati nazivnu snagu elektrane iz grupe OIE, a u ovom radu označava nazivnu snagu FNE, k je broj spojenih FNE. Dakle, sve većom integracijom FNE u sustav smanjuje se stabilnost EES-a. Dodatni problem je i taj što FNE ne sudjeluju u pomoćnim uslugama sustava što povećava zahtjeve na fleksibilnost preostalih konvencionalnih jedinica koje zbog smanjene tromosti sustava zbog čega dolazi do pojave većih vrijednosti ROCOF-a tijekom poremećaja, trebaju reagirati u kraćem vremenu. Općenito, frekvencijski odziv sustava, slika 10, nakon poremećaja može se podijeliti na tri glavne faze s obzirom na vrijeme odziva: inercijski odziv (IR), primarna regulacija frekvencije (PFR) i sekundarna regulacija frekvencije (SFR).

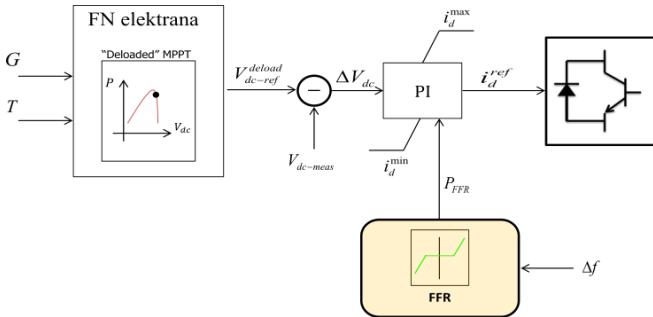
Tijekom inercijskog odziva, u prvih nekoliko sekundi nakon poremećaja, u slučaju pada frekvencije generatori će injektirati radnu snagu u mrežu koja dolazi iz kinetičke energije agregata, dok u slučaju porasta frekvencije, generatori će apsorbirati radnu snagu iz mreže što će se očitovati povećanjem kinetičke energije tj. brzine vrtnje agregata. U narednih 20-25 sekundi djeluje primarna regulacija frekvencije čiji je cilj uravnotežiti proizvodnju i potrošnju radne snage te stabilizirati frekvenciju na nekoj vrijednosti različitoj od nazivne. Djeđovanjem sekundarne regulacije frekvencija se vraća na nazivnu vrijednost [50].

Kao što je navedeno, FNE nisu obvezne sudjelovati u regulaciji frekvencije, međutim sve većim brojem FNE u sustavu, operatori elektroenergetskih sustava će u bliskoj budućnosti morati revidirati mrežna pravila. U nastavku poglavila dan je pregled literature koja se bavi istraživanjem mogućnosti sudjelovanja FNE u regulaciji frekvencije.

S obzirom da FNE nema rotirajućih dijelova koji bi mogli smanjiti ili povećavati svoju kinetičku energiju i tako doprinositi inercijskom odzivu, autori u [48] zaključuju da se pojam inercijski odziv ne može primjenjivati za FNE, te predlažu novi pojam „Brzi frekvencijski odziv“ (engl. FFR - Fast Frequency Response). FFR upravljanje se može postići dodavanjem dodatne petlje, kao na slici 10, koja omogućuje FNE da reagira na promjenu frekvencije. Ovakav način upravljanja, u kojem je promjena snage karakterizirana iznosom statičnosti, veoma je sličan primarnoj regulaciji sinkronih generatora, a brzi odziv pretvarača omogućuje reagiranje FNE u vremenskom okviru jednakom inercijskom odzivu sinkronih generatora. Prema slici 11, blok FN elektrana s obzirom na ozračenje G i temperaturu T , generira



Slika 10. Frekvencijski odziv sustava [48]

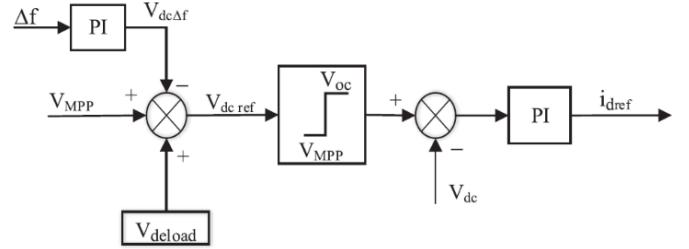


Slika 11. Upravljačka shema za brzi frekvencijski odziv (FFR) [48]

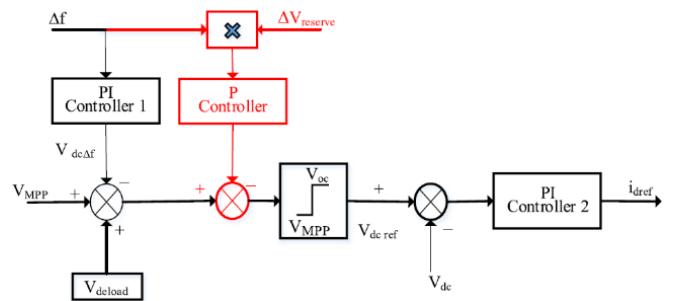
potrebni referentni napon V_{ref}^{deload} , veći nego optimalna vrijednost, za rad FNE u točki ispod maksimalne snage (engl. deloaded), kako bi se osigurala raspoloživost određenog iznosa radne snage potrebnog za regulaciju frekvencije u slučaju nastanka poremećaja. Taj referentni napon se uspoređuje sa stvarnim trenutnim naponom FNE, te razlika je ulazni signal u PI regulator koji pri devijacijama frekvencije na ulaz još prima i signal vrijednosti potrebne radne snage za regulaciju frekvencije P_{FFR} , te generira referentni signal struje i_d^{ref} kojim se regulira radna snaga FNE.

Sličnu upravljačku shemu, slika 12, predložili su autori u [51]. Dodavanjem napona V_{deload} naponu V_{mpp} koji odgovara MPP podešava se radna točka FNE u točku $V_{dcref} = V_{mpp} + V_{deload}$ u kojoj FNE proizvodi radnu snagu manju od maksimalne te na taj način se osigurava snaga rezerve. Pri odstupanju frekvencije od nazivne vrijednosti, generira se dodatni signal V_{dcAf} koji smanjuje napon V_{dcref} što uzrokuje povećanje proizvodnje radne snage te na taj način FNE otpušta snagu rezerve u mrežu.

Međutim, problem predloženog upravljanja je što ne uzima u obzir količinu preostale rezerve pojedine FNE, stoga svaka FNE će proizvesti jednaku vrijednost radne snage za regulaciju frekvencije iako vrijednosti rezerve nisu jednake za svaku FNE te stoga pojedine FN jedinice će prije doseći MPP te neće biti u mogućnosti za daljnju regulaciju frekvencije. Navedeni problem je riješen u [52] dodavanjem upravljačkog signala koji predstavlja vrijednost preostale rezerve $\Delta V_{reserve}$, slika 13.



Slika 12. Upravljanje FN elektranom u pogonu sa smanjenom snagom [51]



Slika 13. Modificirano upravljanje koje uzima u obzir količinu dostupne snage rezerve [52]

U [53] autori ostvaruju virtualni inercijski odziv analogan sinkronim generatorima dodavanjem regulacijske petlje koja mjeri frekvenciju sustava te na temelju ROCOF-a i pojačanja K kojeg nazivaju virtualnom konstantom tromosti, izvode brojne simulacije kako bi dobili vezu između vrijednosti K i injektirane snage ΔP . Zaključeno je da ovisnost nije linearna. Općenito, radna i jalova snaga između točki 1 i 2 opisani su izrazima (30) i (31):

$$P = \frac{U_2^2}{Z} \cos \Theta - \frac{U_1 \cdot U_2}{Z} \cos(\Theta + \delta) \quad (30)$$

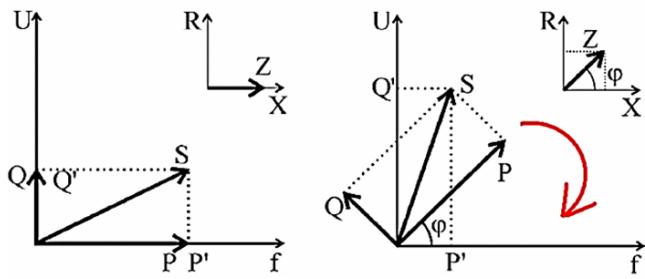
$$Q = \frac{U_2^2}{Z} \sin \Theta - \frac{U_1 \cdot U_2}{Z} \sin(\Theta + \delta) \quad (31)$$

pri čemu su napon u točki 1: $U_1 e^{j\theta}$; napon u točki 2: $U_2 e^{j\delta}$; impedancija voda: $Z e^{j\Theta}$. U prijenosnim mrežama, uz pretpostavke da je $X \gg R$, tj. kut $\Theta = 90^\circ$, te da je $\sin \delta = \delta$, dobiva se ovisnost radne snage o kutu opterećenja (32), te ovisnost promjene napona o jalovoj snazi (33):

$$P \cong \frac{U_1 U_2}{X} \delta \quad (32)$$

$$U_1 - U_2 \cong \frac{X}{U_1} Q \quad (33)$$

U distribucijskim mrežama, navedene pretpostavke više ne vrijede te frekvencija i napon ovise i o radnoj i o jalovoj snazi i to ovisi o omjeru R/X . Istraživanje provedeno u [54] analizira regulaciju frekvencije mikromreže u otočnom pogonu. Kako bi za distribucijsku mrežu dobili izraze analoge kao za prijenosnu mrežu, autori koristeći transformacijsku matricu (34) rotiraju sustav u situaciju kada je $X \gg R$, kao što je prikazano na slici 14.



Slika 14. Metoda virtualne radne i jalove snage [54]

$$\begin{bmatrix} P' \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (34)$$

pri čemu su P' transformirana virtualna radna snaga i Q' transformirana virtualna jalova snaga. Promatraljući izraz (34) i sliku 14, može se zaključiti da u slučaju $X << R$ radna snaga P odgovara virtualnoj snazi Q' , dok u slučaju $X >> R$ radna snaga $P = P'$. Pretpostavljajući malu vrijednost kuta snage, dobivaju se karakteristike $P' = f(f)$, te $Q' = f(U)$. Radna i jalova snaga se izračunaju pomoću izmjerenih vrijednosti struje i napona, te nakon toga se transformiraju u P' i Q' . Dobivena statička karakteristika $P' = f(f)$ je:

$$f - f_0 = -k_p \frac{X}{Z} (P - P_0) + k_p \frac{R}{Z} (Q - Q_0) \quad (35)$$

pri čemu su f_0 , P_0 , Q_0 nazivne vrijednosti frekvencije, radne snage i jalove snage.

S obzirom na mogućnost jako brzog odziva pretvarača, u [55] je predložena metoda brze regulacije snage. FNE radi u točki ispod maksimalne snage. Autori prvo predlažu procjenu trenutne dostupne vrijednosti maksimalne snage da bi znali s koliko rezerve raspolažu. S obzirom da je proces procjene maksimalne snage pomoću izraza (17) dugotrajan i pri tom zahtijeva moćne računale sustave, autori su predložili funkciju (36) za izračun maksimalne snage:

$$P_{mpp} = f(G, T) = d + a_1 T + a_2 T^2 + b_1 G + b_2 G^2 + c T G \quad (36)$$

Prednost je što je dovoljno samo jednom izračunati koeficijente te se nakon izračuna koeficijenti spremaju u memoriju pretvarača i koriste u stvarnom vremenu za procjenu dostupne maksimalne snage za određeni trenutak. Na sličan način je ostvarena i brza regulacija aktivne snage. Koristeći prostornu tj. trilinearnu interpolaciju podataka iz 3D tablice (P_{mpp} , G , T) dobiva se vrijednost napona te time i željeni iznos radne snage za izmjerene vrijednosti temperature i ozračenja.

Rad [56] također predlaže aproksimativnu formulu (37) za izračun željene snage rezerve kako bi se izbjegli dugotrajni procesi proračuna izraza (17) te dobila brza regulacija snage. Predložena je metoda kvadratne aproksimacije snage u funkciji napona za rad FN elektrane u MPP, i za sudjelovanje u regulaciji frekvencije:

$$P_{grid}(U_{PVref}) = aU_{PVref}^2 + bU_{PVref} + c - P_{grid}^{ref} \quad (37)$$

pri čemu $P_{grid}^{ref} = 0$ u slučaju rada u načinu MPP, te $P_{grid}^{ref} = k$ za željenu snagu rezerve. U radu se analiziraju dva načina rada FNE. Za slučaj pada frekvencije predlaže se regulacija pomoću karakteristike statičnosti (38), a za slučaj porasta

frekvencije u slučajevima ispada potrošnje ili povećanja ozračenja, predložena je metoda smanjivanja snage na način da se radna točka FNE podesi u točku napona koji je veći od U_{mpp} . Iznos promjene snage tijekom sudjelovanja u regulaciji frekvencije uzimajući u obzir iznos statičnosti $s\%$:

$$\Delta P_{FSM} = [P_{mpp}(G, T) - P_{pv}(G, T, \Delta P)] \cdot \frac{f_0 - f_{meas}}{\Delta f_{meas}} \cdot s\% \quad (38)$$

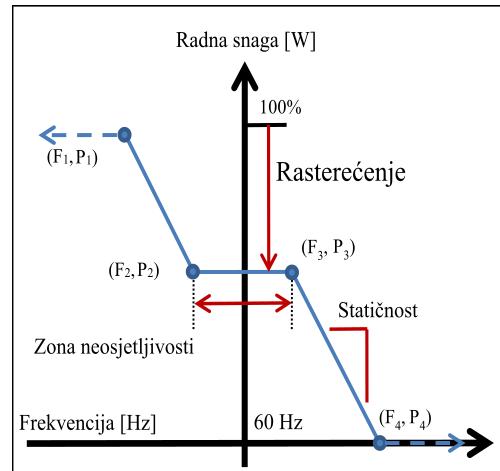
Kako je snaga FNE izravno povezana s ozračenjem, tako s naglom promjenom ozračenja dolazi do velikih promjena snage, što stvara dodatni problem EES-u. Stoga, autori u [57] predlažu ograničenje brzine povećanja snage s obzirom na nagle promjene ozračenja i temperature prema (39).

$$\Delta P_{PRL} = [P_{mpp}(G, T) - P_{pv}(G, T, \Delta P)] \cdot \frac{1}{1 + \tau} \quad (39)$$

pri čemu je τ vremenska konstanta za ograničenje brzine promjene snage.

Osim problema koje uzrokuju nagle promjene okolišnih uvjeta, problem zasjenjenja FN modula je još jedan ozbiljni problem koji utječe na nagle promjene proizvedene snage FNE. Rad [58] se temelji na smanjivanju negativnog učinka na regulaciju frekvencije kojeg proizvode velike FNE u trenucima naglog zasjenjenja. Predloženo je da različiti dijelovi FNE rade u pogonu sa smanjenom snagom kako bi se omogućilo da se zadrži jednak količina rezerve tijekom zasjenjenja. Zaključeno je da u radu s konstantnom rezervom od 15%, FN elektrana gubi oko 7% energije na dan, dok u radu s predloženom promjenjivom rezervom, gubici su manji od 2% u danu. FNE radi ispod točke maksimalne snage, a to se određuje svakih 10 minuta na temelju predviđenih vrijednosti ozračenja i temperature te se na taj način minimiziraju troškovi povezani uz rad sa smanjenom proizvodnjom radne snage.

Korištenjem uobičajene $P-f$ karakteristike za regulaciju frekvencije predočene na slici 15, u [59] definiran je rad FNE za potrebe regulacije frekvencije. Za krivulju $P-f$ potrebno je definirati nagib tj. statičnost, zonu neosjetljivosti i količinu rezerve snage. Ispitivanja su provedena za havajski EES. U scenarijama 20% i 70% udjela FNE u elektroenergetskom sustavu Havaja, rezultati su pokazali uštedu novca i u slučaju kada bi se vlasnicima FNE plaćali gubici nastali zbog proizvodnje u neoptimalnoj točki kako bi se omogućilo sudjelovanje u regulaciji frekvencije.



Slika 15. $P-f$ karakteristika regulacije frekvencije [56]

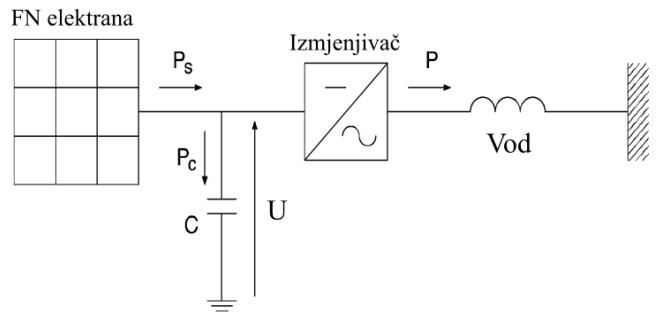
Još jedno provedeno istraživanje mogućnosti sudjelovanja FNE u regulaciji frekvencije na stvarnom EES-u je urađeno u [60]. Simulacija je provedena za Istočni elektroenergetski sustav Sjeverne Amerike za 5% udjela FNE u ukupnoj proizvodnji. Pokazano je da se sudjelovanjem FNE u inercijskom odzivu može značajno smanjiti vrijednost maksimalnog odstupanja frekvencije tijekom poremećaja, te sudjelovanjem u primarnoj regulaciji smanjuje se maksimalno odstupanje frekvencije u privremenom stabilnom stanju. Naravno, inercijski i frekvencijski odziv ovise o dostupnoj rezervi snage. FNE također mogu doprinijeti poboljšanju frekvencijskog odziva u situacijama ispada potrošnje tako što će povećati radni napon te time smanjiti proizvodnju radne snage. FNE pokazuje bolje inercijske i frekvencijske odzive od VE zbog tog što nema rotirajućih dijelova te su vremenske konstante manje.

S obzirom da velika većina metoda zahtijeva rad FNE u radnoj točki ispod maksimalne snage, tj. u neoptimalnoj točki, te takav način donosi dodatne troškove, autori u [61] predlažu strategiju regulacije frekvencije pomoću procjene ukupne tromosti u sustavu. FNE će sudjelovati u inercijskom odzivu samo kada procijenjena vrijednost ukupne tromosti nije dovoljna da održi sustav stabilnim u slučaju poremećaja. U toj situaciji, FNE će raditi u točki ispod maksimalne snage, dok će u jutarnjim i večernjim satima raditi u MPP. U radu je predloženo da u slučaju 10% smanjenja tromosti, FNE prelazi u neoptimalni pogon. Mogućnost pružanja inercijskog odziva bez potrebe za radom FNE ispod MPP je predstavljena u [62]. Slika 16 prikazuje sustav koji se sastoji od FNE, pretvarača i super-kondenzatora. FNE proizvodi *dc* snagu P_S koju pretvarač pretvara u *ac* snagu P , a super-kondenzator služi da apsorbira razliku $P_C = P_S - P$. U radu [63] FNE sudjeluje u regulaciji frekvencije koristeći kondenzator na DC spoju pomoću kojeg je ostvarena mogućnost sudjelovanja u inercijskom odzivu, tzv. virtualni inercijski odziv. Pri odstupanju frekvencije od nazivne vrijednosti, kondenzator će apsorbirati ili otpustiti energiju podešavanjem vrijednosti napona prema (40):

$$U_{dc} = \frac{2H_{dc}f_0}{C_{dc}U_{dc0}} (f - f_0) + U_{dc0} \quad (40)$$

pri čemu je U_{dc} napon kondenzatora pri promjeni frekvencije, U_{dc0} nazivni napon kondenzatora, C_{dc} kapacitet kondenzatora, H_{dc} virtualna konstanta tromosti kondenzatora, f frekvencija mreže, f_0 nazivna frekvencija. Sposobnost regulacije frekvencije je u ovom slučaju ograničena količinom apsorbirane ili otpuštene energije tj. kapacitetom kondenzatora. U [64] je vrlo detaljno izvedena mogućnost inercijskog odziva pomoću kondenzatora na DC spoju koristeći analogiju svojstva tromosti kod konvencionalnih generatora.

Jednaku funkciju koju obavlja kondenzator u navedenim radovima, mogu obavljati velike baterije odnosno spremnici energije. Iako je cijena spremnika energije još uvek velika, a i njihov životni vijek je kraći nego FNE, provedena su istraživanja mogućnosti regulacije frekvencije takvih hibridnih sustava. Kako je cijena spremnika energije povezana s kapacitetom, većina radova se bazira na određivanju optimalnog kapaciteta spremnika. Rad [65] predlaže algoritam za određivanje potrebne veličine spremnika energije u sustavu kako bi se prigušile oscilacije frekvencije. Algoritam ovisi o ukupnoj tromosti u sustavu te



Slika 16. Sudjelovanje u regulaciji frekvencije pomoću kondenzatora [62]

očekivanom propadu snage FNE zbog naglog smanjenja ozračenja. Jako opširna istraživanja bazirana na hibridnom sustavu FNE, spremnika energije i kondenzatora uz detaljno modeliranje svih komponenti sustava se mogu pronaći u [66] i [67].

V. REGULACIJA NAPONA

U sustavima s visokim udjelom FNE u proizvodnji električne energije pojavljuje se problem regulacije napona. Naime, tijekom popodnevnih sati, s jedne strane je opterećenje EES-a nisko, dok s druge strane FNE najčešće rade na nazivnoj snazi što dovodi do pojave povišenih napona. Dodatni problem je osjetljivost proizvodnje FNE na promjene ozračenja što uzrokuje isprekidanosti i oscilacije proizvedene snage te dolazi do pojave velikih oscilacija napona. Nadalje, u većini EES-a se zahtijeva od FNE isključenje s mreže prilikom pojave kvara, što zapravo može dovesti do nastanka još većeg problema u situacijama visokog udjela FNE u sustavu. Zbog navedenih problema, sve više se razmatra pitanje sudjelovanja FNE u regulaciji napona. Ova usluga naziva se još i usluga regulacije jalove snage (*U/Q* regulacija), a svrha joj je regulacija tokova jalove snage s ciljem održavanja propisanih naponskih razina [68]. Nekoliko država je stoga revidiralo svoja mrežna pravila, kao Njemačka, Italija i Japan, u kojima se zahtijeva od distribuiranih izvora prolazak kroz kvar u uvjetima niskog napona kako bi mogli injektirati jalovu snagu te tako poduprijeti oporavak napona tijekom kvara [69]. Uobičajena rješenja za regulaciju napona su kondenzatorske baterije, prigušnice, automatski regulatori napona, međutim, navedeni uređaji imaju spor odziv u usporedbi s FN pretvaračima koji bi potencijalno mogli pružiti brži i fleksibilniji odziv generirajući ili apsorbirajući jalovu snagu [70]. Nedostatak FN pretvarača u usporedbi sa sinkronim generatorima je nemogućnost podnošenja struja većih od nazivnih vrijednosti zbog loše toplinske izdržljivosti bipolarnih tranzistora [71]. U literaturi ne postoji značajan broj konkretnih rješenja, i većina radova je temeljen na simulacijama ili općenito samo predloženim idejama kao npr. ograničenje radne snage uz porast napona, ograničenje brzine promjene radne snage, kompenzacija jalove snage s obzirom na funkciju $Q(U)$, kompenzacija jalove snage s obzirom na faktor snage odnosno funkciju $PF(P)$. S obzirom da pretvarač ima najznačajniju ulogu u regulaciji jalove snage u FN sustavu, analiza pretvarača je zastupljena u većini radova. Mogućnosti pretvarača da proizvode jalovu snagu se razlikuju s obzirom na tip i samu izvedbu pretvarača. Najbolji pretvarači su sposobni da proizvedu bilo koju vrijednost jalove snage u

skladu sa zahtjevima automatske regulacije faktora snage [72]. U [73] dan je pregled topologija pretvarača za FN sustave, analiziran je njihov utjecaj na pouzdanost, cijenu, učinkovitost te su predstavljene strukture upravljanja za jednofazne i trofazne pretvarače. Autori u [74] prikazuju mogućnosti rada FN pretvarača kroz četiri kvadranta, slika 17. Ključni faktor koji određuje sposobnost pretvarača u regulaciji napona je broj kvadranta u kojem mogu raditi. Pogon u dva kvadranta uključuje proizvodnju radne snage uz proizvodnju ili potrošnju jalove snage i to je trenutno najčešća i sasvim dovoljna regulacija napona. Pogon u 3. i 4. kvadrantu je moguć uz ugradnju spremnika energije. Autori analizirajući utjecaj FNE velikih snaga na regulaciju napona u distribucijskoj mreži razmatraju mogućnost korištenja pretvarača s 10% većom prividnom snagom, te zaključuju da to omogućuje povećanje kapaciteta jalove snage do 46% u uvjetima proizvodnje maksimalne radne snage (41):

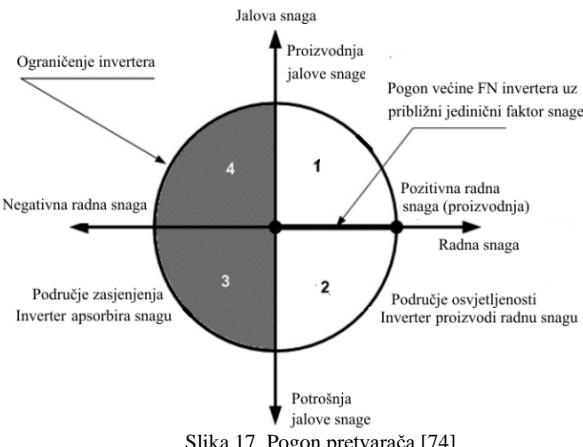
$$S = 1.1P \rightarrow Q_1 = \sqrt{(1.1P)^2 - P^2} = 0.458P \quad (41)$$

Međutim, nedostatak je porast gubitaka pretvarača koji rastu uz pad faktora snage.

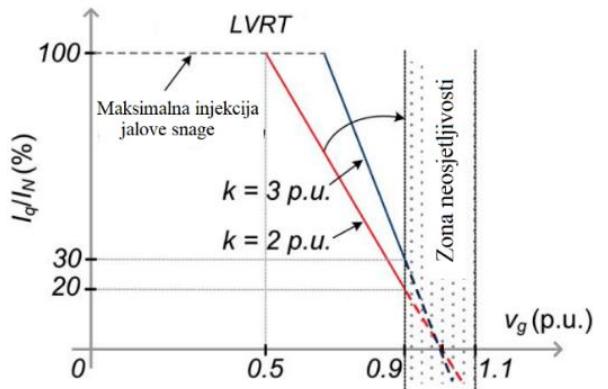
Testiranje svojstava FN pretvarača dizajniranih za pogon u skladu s mrežnim pravilima njemačkog EES-a koji dopušta sudjelovanje FN pretvarača u regulaciji napona je provedeno u [70]. Testiranja su provedena kako bi se istražile mogućnosti FN pretvarača koje trenutno još nisu zahtijevane U.S. mrežnim pravilima. Ispitivanja su provedena u uvjetima povišenog i sniženog napona. Dobivenim simulacijama i rezultatima je potvrđeno povećanje učinkovitosti distribucijskog sustava i osiguranje većeg toka radne snage u slučaju kada je omogućena U/Q regulacija. Budući da revizija mrežnih pravila s obzirom na U/Q regulaciju postaje sve potrebnija, neki operatori EES-a su promjenili zahtjeve za pogon distribuiranih izvora pa time i FNE. U radu [75] se navodi kako je u Italiji za sve elektrane snage veće od 6 kW obvezna sposobnost prolaska kroz kvar tijekom sniženog napona (engl. Low-voltage ride-through), dok u Njemačkoj su FNE dužne injektirati jalovu snagu tijekom LVRT prema slici 18. Vrijednost koeficijenta k se može izračunati prema:

$$k = \frac{(I_q - I_{q0}) I_N}{(1 - v_g)} \quad (42)$$

pri čemu su I_q iznos jalove struje tijekom kvara, I_{q0} iznos jalove struje prije kvara, v_g je trenutni napon tijekom kvara u p.u., I_N nazivna struja. S obzirom da FNE rade u normalnom



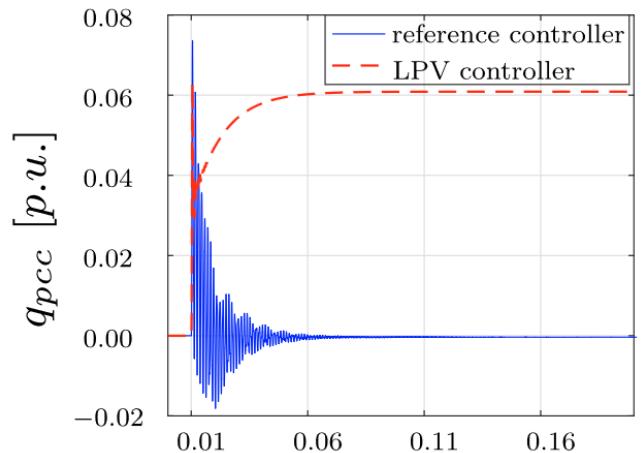
Slika 17. Pogon pretvarača [74]



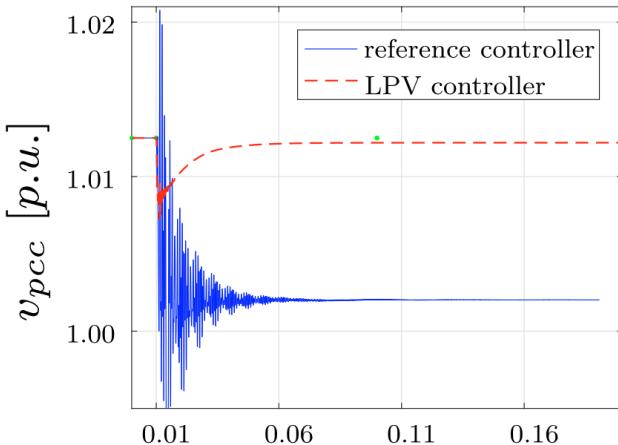
Slika 18. Zahtjevi za injekciju jalove snage tijekom LVRT [75]

pogonu uz jedinični faktor snage, slijedi da je $I_{q0} = 0$ te minimalna vrijednost k treba iznositi 2 p.u. Autori u ovom radu predlažu četiri strategije injekcije jalove snage koje se mogu uzeti u obzir tijekom promjene mrežnih pravila: kontrola konstantne radne snage, kontrola konstantne radne struje, kontrola maksimalne struje i kontrola optimizacije topline.

Neke konkretnije stvari su predstavljene u [76] gdje autorи u radu predlažu održavanje naponske stabilnosti u točki priključenja na EES (engl. PCC – point of common coupling) koristeći tehniku sustava s promjenjivim linearnim parametrima (engl. LPVS linear parameter-varying system) budući da je većina regulatora FNE tipično bazirana na linearizaciji oko jedne ili nekoliko radnih točki nelinearne $I-U$ karakteristike te se regulatori ne ponašaju zadovoljavajuće u slučajevima kada je radna točka udaljena od tih točki. Nelinearni model FNE kao i sve ostale nelinearnosti cijelog sustava su transformirane u LPVS. U usporedbi s ostalim regulatorima, LPVS regulator ostvaruje bolju regulaciju jalove snage, slika 19, te time i naponsku stabilnost, slika 20. Može se vidjeti da oba regulatora postižu stabilnu vrijednost u stacionarnom stanju, međutim, LPV regulator ostvaruje bolje i brže prigušenje, te postiže zahtijevanu vrijednost u stacionarnom stanju, dok referentni regulator ima odstupanje u stacionarnom stanju



Slika 19. Jalova snaga pretvarača [76]



Slika 20. Napon pretvarača u PCC [76]

Algoritam koji upravljanjem radnom snagom regulira DC napon je predstavljen u [77]. Prema (43) ako se želi postići održavanje konstantnog napona U_{ref} , snaga FNE treba iznositi P_{ref} :

$$P_{ref} = \frac{U_{ref}^2}{R_L} \quad (43)$$

pri čemu je R_L otpor opterećenja. U situacijama kada je maksimalna snaga FNE veća nego P_{ref} moguće je održavati regulaciju DC napona, međutim regulacija nije moguća u situacijama kada je vrijednost R_L toliko mala da je zahtijevana snaga veća nego što je može proizvesti FNE. Nedostatak ove metode je izračun opterećenja R_L čija brzina promjene bi trebala biti sporija nego brzina konvergencije upravljačke petlje.

Problem zasjenjenja velikih FNE je analiziran u [78]. Predložena je odvojena regulacija radne i jalove snage svakog FN modula. Jalova snaga svakog FN modula se sinkronizirano kontrolira kako bi se smanjile pojave povišenog napona na pretvaraču zbog nesimetrične proizvodnje radne snage FNE.

Od složenijih tehnika, u [79] se primjenjuje metoda genetskog algoritma (engl. GA-genetic algorithm) u U/Q regulaciji kako bi se održavala stabilnost EES-a i smanjili gubici sustava. Validacija metode je provedena za tri slučaja u sustavu IEEE 14; osnovni slučaj uz spojenu FNE, slučaj ispada generatora, te slučaj prekida dvostrukog voda. Autori u [80] predlažu automatski prilagodljivi regulator (engl. auto-adaptive) za upravljanje jalovom snagom kako bi se omogućilo FNE sudjelovanje u pomoćnim uslugama sustava. Regulator je temeljen na postupku optimizacije i teoriji Lyapunove funkcije. Tijekom razdoblja nedovoljnog ozračenja za proizvodnju radne snage, regulator upravlja FN pretvaračem da proizvodi jalovu snagu jednaku nazivnoj snazi FNE. Uz pojavu dovoljnog ozračenja za proizvodnju radne snage, regulator automatski smanjuje injekciju jalove snage.

VI. ZAKLJUČAK

U ovom radu razmatrana je problematika sudjelovanja fotonaponskih elektrana u pružanju pomoćnih usluga sustavu. U uvodu su predstavljeni problemi i poteškoće s kojim se susreću operatori elektroenergetskih sustava s visokim udjelom fotonaponskih elektrana. Kako bi se uopće mogle ispitivati mogućnosti sudjelovanja fotonaponskih elektrana u regulaciji frekvencije i napona potrebno je poznavati detaljno $I-U$ ili $P-U$ karakteristiku fotonaponske elektrane stoga su u prvom dijelu rada predstavljeni detaljni matematički modeli fotonaponske celijske. S obzirom da je gotovo isključivo za sve predložene metode regulacije frekvencije i napona potrebno poznavati maksimalnu točku proizvodnje FNE, u poglavljima prije središnjih poglavljia vezanih uz regulacije frekvencije i napona predstavljene su najčešće korištene metode za praćenje točke maksimalne snage. U središnjem dijelu rada prikazan je pregled literature koja se bavi analiziranjem i ispitivanjem mogućnosti sudjelovanja fotonaponskih elektrana u regulacijama frekvencije i napona. Pregledom literature utvrđeno je da je trenutno u svijetu istraživanja puno veća pozornost usmjerena na istraživanje mogućnosti sudjelovanja FNE u regulaciji frekvencije za razliku od sudjelovanja FNE u regulaciji napona i jalove snage za koje postoji tek nekoliko radova s predloženim konkretnim rješenjima.

S nastavkom rasta udjela FNE u elektroenergetskom sustavu, predstavljeni problemi će postajati sve izraženiji, stoga nastavak istraživanja će biti usmjerен prema upravljačkim algoritmima za omogućavanje sudjelovanja FNE u regulacijama frekvencije i napona, ali i razvijanju novih MPPT metoda.

ZAHVALA

Istraživanje je provedeno u sklopu projekta WINDLIPS – WIND energy integration in Low Inertia Power System Hrvatske zaklade za znanost, br. HRZZ-PAR-02-2017-03.

LITERATURA

- [1] Ministarstvo gospodarstva, "Nacionalni akcijski plan za obnovljive izvore energije do 2020. godine," Zagreb, 2013.
- [2] S. Philipps and W. Warmuth, "Photovoltaics Report," 2018.
- [3] "• Global cumulative installed solar PV capacity 2017 | Statistic." [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/280220/global-cumulative-installed-solar-pv-capacity/>. [Accessed: 01-Feb-2019].
- [4] M. C. di Piazza and G. Vitale, *Photovoltaic Sources: Modeling and Emulation*. Spring Publishing Company, Incorporated 2012.
- [5] M. Hejri, H. Mokhtari, M. R. Azizian, M. Ghandhari, and L. Soder, "On the Parameter Extraction of a Five-Parameter Double-Diode Model of Photovoltaic Cells and Modules," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, no. 3, pp. 915–923, May 2014.
- [6] Z. Salam, K. Ishaque, and H. Taheri, "An improved two-diode photovoltaic (PV) model for PV system," in *2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India*, 2010, pp. 1–5.
- [7] K. Ishaque, Z. Salam, and H. Taheri, "Accurate MATLAB Simulink PV System Simulator Based on a Two-Diode Model," *J. Power Electron.*, vol. 11, no. 2, pp. 179–187, Mar. 2011.
- [8] S. Karboyan, J. G. Tartarin, and B. Lambert, "Analysis of barrier inhomogeneities in AlGaN/GaN HEMTs' Schottky diodes by I-V-T measurements," *undefined*, 2013.
- [9] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, May 2009.

- [10] M. Taciu, "PV cells I-V characteristic. Explicit equation with three parameters and its simplified forms," in *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2017, pp. 709–714.
- [11] D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, "PV panel model based on datasheet values," in *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2007, pp. 2392–2396.
- [12] E. I. Batzelis and S. A. Papathanassiou, "A Method for the Analytical Extraction of the Single-Diode PV Model Parameters," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 504–512, Apr. 2016.
- [13] A. Orioli and A. Di Gangi, "A procedure to calculate the five-parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules on the basis of the tabular performance data," *Appl. Energy*, vol. 102, pp. 1160–1177, Feb. 2013.
- [14] S. Shongwe and M. Hanif, "Comparative Analysis of Different Single-Diode PV Modeling Methods," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 5, no. 3, pp. 938–946, May 2015.
- [15] Jing Jun Soon and K.-S. Low, "Optimizing photovoltaic model parameters for simulation," in *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2012, pp. 1813–1818.
- [16] T. Baškarad and I. Kuzle, "Modeliranje fotonaponske elektrane," in *13. Simpozij o sustavu vodenju EES-a HRO CIGRE, Rovinj, 5.-7. studenoga 2018.*, pp. 1–10.
- [17] M. F. Nayan and S. M. S. Ullah, "Modelling of solar cell characteristics considering the effect of electrical and environmental parameters," in *2015 3rd International Conference on Green Energy and Technology (ICGET)*, 2015, pp. 1–6.
- [18] D. Vulin, M. Štefok, and D. Pelin, "Pregledni prikaz algoritama za praćenje točke maksimalne snage u fotonaponskim sustavima," in *PLIN2013 / Pero Raos ; Zlatko Tonković - Osijek : Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2013, 164-171.*
- [19] P. S. Khalane, D. A. Patil, and C. Remadevi, "Literature survey of various maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems," in *2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)*, 2017, pp. 836–840.
- [20] M. S. Ngan and C. W. Tan, "A study of maximum power point tracking algorithms for stand-alone Photovoltaic Systems," in *2011 IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC)*, 2011, pp. 22–27.
- [21] Y. T. Tan, "IMPACT ON THE POWER SYSTEM WITH A LARGE PENETRATION OF PHOTOVOLTAIC GENERATION A thesis submitted to Department of Electrical Engineering and Electronics," no. February, 2004.
- [22] S. Sumathi, L. Ashok Kumar, and P. Surekha, *Solar PV and Wind Energy Conversion Systems*. 2015.
- [23] Sivaramakrishnan S, "Linear extrapolated MPPT - an alternative to fractional open circuit voltage technique," in *2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE)*, 2016, pp. 1–4.
- [24] S. Baroi, P. C. Sarker, and S. Baroi, "An Improved MPPT Technique – Alternative to Fractional Open Circuit Voltage Method," in *2017 2nd International Conference on Electrical & Electronic Engineering (ICEEE)*, 2017, pp. 1–4.
- [25] P. Gaur, Y. P. Verma, and P. Singh, "Maximum power point tracking algorithms for photovoltaic applications: A comparative study," in *2015 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS)*, 2015, pp. 1–5.
- [26] A. Sayal, "MPPT techniques for photovoltaic system under uniform insolation and partial shading conditions," in *2012 Students Conference on Engineering and Systems*, 2012, pp. 1–6.
- [27] A. Dandoussou, M. Kamta, L. Bitjoka, P. Wira, and A. Kuitché, "Comparative study of the reliability of MPPT algorithms for the crystalline silicon photovoltaic modules in variable weather conditions," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 213–224, May 2017.
- [28] M. A. Eltawil and Z. Zhao, "MPPT techniques for photovoltaic applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 25, pp. 793–813, Sep. 2013.
- [29] M. A. Husain, A. Tariq, S. Hameed, M. S. Bin Arif, and A. Jain, "Comparative assessment of maximum power point tracking procedures for photovoltaic systems," *Green Energy Environ.*, vol. 2, no. 1, pp. 5–17, Jan. 2017.
- [30] Q. Yang and Q. Wang, "An Improving Control Method of CTV +P&O on Photovoltaic Power Generation Maximum Power Point Tracking," in *2013 5th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, 2013, pp. 285–288.
- [31] F. Zhang, K. Thanapalan, A. Procter, S. Carr, and J. Maddy, "Adaptive Hybrid Maximum Power Point Tracking Method for a Photovoltaic System," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 2, pp. 353–360, Jun. 2013.
- [32] S. K. Kollimalla and M. K. Mishra, "Variable Perturbation Size Adaptive P&O MPPT Algorithm for Sudden Changes in Irradiance," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 718–728, Jul. 2014.
- [33] A. Satif, L. Hlou, and R. Elgouri, "An Improved Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Systems," in *2018 Renewable Energies, Power Systems & Green Inclusive Economy (REPS-GIE)*, 2018, pp. 1–6.
- [34] M. Bodur and M. Ermis, "Maximum power point tracking for low power photovoltaic solar panels," in *Proceedings of MELECON '94. Mediterranean Electrotechnical Conference*, pp. 758–761.
- [35] M. Kamran, M. Mudassar, M. R. Fazal, M. U. Asghar, M. Bilal, and R. Asghar, "Implementation of improved Perturb & Observe MPPT technique with confined search space for standalone photovoltaic system," *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, Jun. 2018.
- [36] K. Boudaraia, H. Mahmoudi, A. Abbou, and M. Hilal, "Buck converter MPPT control of a photovoltaic system," in *2016 5th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, 2016, pp. 783–787.
- [37] Institute of Electrical and Electronics Engineers. and R. Institute of Control, *ICCAS 2012 : 2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems : October 17 (Wed.)-21 (Sun.)*, 2012, ICC Jeju, Korea. IEEE, 2012.
- [38] P. Lousuwankun and N. Jantharamin, "Photovoltaic Module Maximum-Power-Point Tracking with Step-Size Variation," in *2018 International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST)*, 2018, pp. 1–4.
- [39] Fangru Liu, Shanxu Duan, Fei Liu, Bangyin Liu, and Yong Kang, "A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 7, pp. 2622–2628, Jul. 2008.
- [40] Zhanghong, Lishengzhu, Zhangxionan, and Xiaylan, "MPPT control strategy for photovoltaic cells based on fuzzy control," in *2016 12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD)*, 2016, pp. 450–454.
- [41] M. Veerachary, T. Senju, and K. Uezato, "Neural-network-based maximum-power-point tracking of coupled-inductor interleaved-boost-converter-supplied pv system using fuzzy controller," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, no. 4, pp. 749–758, Aug. 2003.
- [42] S. Saravanan and N. Ramesh Babu, "Maximum power point tracking algorithms for photovoltaic system – A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 192–204, May 2016.
- [43] F. Mancilla-David, F. Riganti-Fulginei, A. Laudani, and A. Salvini, "A Neural Network-Based Low-Cost Solar Irradiance Sensor," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 3, pp. 583–591, Mar. 2014.
- [44] S. Li, B. Zhang, T. Xu, and J. Yang, "A new MPPT control method of photovoltaic grid-connected inverter system," in *The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC)*, 2014, pp. 2753–2757.
- [45] F. Belhachat and C. Larbes, "A review of global maximum power point tracking techniques of photovoltaic system under partial shading conditions," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 92, pp. 513–553, Sep. 2018.
- [46] I. Kuzle, S. Tešnjak, and D. Bošnjak, "Pogon i vođenje elektroenergetskog sustava," in *8. Savjetovanje HRO CIGRE, Cavtat, 4.-8. studeni 2007.*, pp. 1–10.
- [47] P. (Prabha) Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control*. McGraw-Hill, 1994.
- [48] C. Rahmann, A. Castillo, C. Rahmann, and A. Castillo, "Fast Frequency Response Capability of Photovoltaic Power Plants: The Necessity of New Grid Requirements and Definitions," *Energies*, vol. 7, no. 10, pp. 6306–6322, Sep. 2014.
- [49] M. Krpan and I. Kuzle, "Introducing low-order system frequency response modelling of a future power system with high penetration of wind power plants with frequency support capabilities," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 12, no. 13, pp. 1453–1461, Oct. 2018.
- [50] M. Krpan, "Sudjelovanje vjetroelektrana u regulaciji frekvencije elektroenergetskog sustava," *Kvalifikacijski doktorski ispit*,

- [51] *Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb*, p. 19, 2018.
- [52] P. . Zarina, S. Mishra, and P. C. Sekhar, "Photovoltaic system based transient mitigation and frequency regulation," in *2012 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, 2012, pp. 1245–1249.
- [53] P. P. Zarina, S. Mishra, and P. C. Sekhar, "Exploring frequency control capability of a PV system in a hybrid PV-rotating machine-without storage system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 60, pp. 258–267, Sep. 2014.
- [54] Z. Jietan, Q. Linan, R. Pestana, L. Fengkui, and Y. Libin, "Dynamic frequency support by photovoltaic generation with 'synthetic' inertia and frequency droop control," in *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2017, pp. 1–6.
- [55] E. Dvorsky, L. Rakova, and P. Hejtmankova, "Primary and secondary frequency regulation with photovoltaic generators," in *2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 2015, pp. 174–178.
- [56] A. F. Hoke, M. Shirazi, S. Chakraborty, E. Muljadi, and D. Maksimovic, "Rapid Active Power Control of Photovoltaic Systems for Grid Frequency Support," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 5, no. 3, pp. 1154–1163, Sep. 2017.
- [57] H. Xin, Y. Liu, Z. Wang, D. Gan, and T. Yang, "A New Frequency Regulation Strategy for Photovoltaic Systems Without Energy Storage," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 985–993, Oct. 2013.
- [58] B.-I. Craciun, S. Spataru, T. Kerekes, D. Sera, and R. Teodorescu, "Power ramp limitation and frequency support in large scale PVPPs without storage," in *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2013, pp. 2354–2359.
- [59] C. Rahmann, C. Mayol, and J. Haas, "Dynamic control strategy in partially-shaded photovoltaic power plants for improving the frequency of the electricity system," *J. Clean. Prod.*, vol. 202, pp. 109–119, Nov. 2018.
- [60] J. Johnson, J. C. Neely, J. J. Delhotal, and M. Lave, "Photovoltaic Frequency-Watt Curve Design for Frequency Regulation and Fast Contingency Reserves," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 6, no. 6, pp. 1611–1618, Nov. 2016.
- [61] Y. Liu, J. R. Gracia, S. W. Hadley, and Y. Liu, "Wind/PV Generation for Frequency Regulation and Oscillation Damping in the Eastern Interconnection," Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN (United States), Dec. 2013.
- [62] R. Rajan and F. M. Fernandez, "Grid Inertia Based Frequency Regulation Strategy of Photovoltaic System Without Energy Storage," in *2018 International CET Conference on Control, Communication, and Computing (IC4)*, 2018, pp. 106–111.
- [63] N. Kakimoto, S. Takayama, H. Satoh, and K. Nakamura, "Power Modulation of Photovoltaic Generator for Frequency Control of Power System," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 4, pp. 943–949, Dec. 2009.
- [64] X. Lyu, Z. Xu, J. Zhao, and K. P. Wong, "Advanced frequency support strategy of photovoltaic system considering changing working conditions," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 2, pp. 363–370, Jan. 2018.
- [65] J. Fang, H. Li, Y. Tang, and F. Blaabjerg, "Distributed Power System Virtual Inertia Implemented by Grid-Connected Power Converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 8993, no. c, 2017.
- [66] A. Rahouma, R. El-Azab, A. Salib, and A. M. A. Amin, "Frequency response of a large-scale grid-connected solar photovoltaic plant," in *SoutheastCon 2015*, 2015, pp. 1–7.
- [67] J. C. Hernández, P. G. Bueno, and F. Sanchez-Sutil, "Enhanced utility-scale photovoltaic units with frequency support functions and dynamic grid support for transmission systems," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11, no. 3, pp. 361–372, Feb. 2017.
- [68] E. Bullich-Massagué, M. Aragüés-Peñaiba, A. Sumper, and O. Boix-Aragones, "Active power control in a hybrid PV-storage power plant for frequency support," *Sol. Energy*, vol. 144, pp. 49–62, Mar. 2017.
- [69] Igor Kuzle, Darjan Bosnjak, and Sejid Tesnjak, "An overview of ancillary services in an open market environment," in *2007 Mediterranean Conference on Control & Automation*, 2007, pp. 1–6.
- [70] L. S. Xavier, A. F. Cupertino, and H. A. Pereira, "Ancillary services provided by photovoltaic inverters: Single and three phase control strategies," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 70, pp. 102–121, Aug. 2018.
- [71] R. V. Ilyushin, A. V. Pazderin, and R. I. Seit, "Photovoltaic power plants participation in frequency and voltage regulation," in *2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED)*, 2018, pp. 1–7.
- [72] I. Mihovil, A. Marušić, J. Havelka, and I. Kuzle, "Operation chart study of multi-inverter photovoltaic power plant connected to medium voltage grid," in *11th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion.*, 2018, pp. 1–9.
- [73] L. Hassaine, E. OLIAS, J. Quintero, and V. Salas, "Overview of power inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 796–807, Feb. 2014.
- [74] M. M. Aly, M. Abdel-Akher, Z. Ziadi, and T. Senju, "Assessment of reactive power contribution of photovoltaic energy systems on voltage profile and stability of distribution systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 61, pp. 665–672, Oct. 2014.
- [75] Y. Yang, H. Wang, and F. Blaabjerg, "Reactive Power Injection Strategies for Single-Phase Photovoltaic Systems Considering Grid Requirements," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 6, pp. 4065–4076, Nov. 2014.
- [76] M. Theissen, K. Schaab, and O. Stursberg, "Voltage Stability of Power Grids with PV Plants using Robust LPV-Control," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 27, pp. 54–59, Jan. 2016.
- [77] S. M. Benmerabet, E. M. Berkouk, F. Akel, and A. Talha, "Photovoltaic power control for DC voltage regulation," in *2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, 2016, pp. 466–471.
- [78] Liming Liu, Hui Li, Yaosuo Xue, and Wenxin Liu, "Decoupled Active and Reactive Power Control for Large-Scale Grid-Connected Photovoltaic Systems Using Cascaded Modular Multilevel Converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 1, pp. 176–187, Jan. 2015.
- [79] S. Sor, M. F. B. M. Fauzi, and A. Hidenori, "Study on problems and effects of voltage and reactive power control in mass introduction of photo-voltaic (PV) generation towards power system," in *2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2015, pp. 1–5.
- [80] A. Cagnano, F. Torelli, F. Alfonzetti, and E. De Tuglie, "Can PV plants provide a reactive power ancillary service? A treat offered by an on-line controller," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 1047–1052, Mar. 2011.