

Tomislav Baškarad
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
tomislav.baskarad@fer.hr

Igor Kuzle
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
igor.kuzle@fer.hr

UTJECAJ FOTONAPONSKIH ELEKTRANA NA STABILNOST FREKVENCIJE U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU

SAŽETAK

Integracija fotonaponskih elektrana u elektroenergetski sustav u stalnom je porastu te ukupna instalirana snaga u fotonaponskim elektranama u svijetu iznosila je oko 402 GW na kraju 2017. godine što je približno 100 GW više u odnosu na stanje krajem 2016. godine. U sustavima koji imaju visok udio proizvodnje električne energije iz fotonaponskih elektrana mogu se pojaviti problemi u održavanju frekvencijske stabilnosti. Neki razlozi zbog kojih fotonaponske elektrane negativno utječu na frekvencijsku stabilnost elektroenergetskog sustava su: nemaju rotirajućih dijelova koji bi mogli pružiti inercijski odziv; njihovim priključenjem na mrežu smanjuje se broj konvencionalnih sinkronih generatora u pogonu; rade s ciljem maksimalne proizvodnje snage; spojene su na mrežu preko pretvarača. Navedeni razlozi dovode do smanjenja tromosti sustava što se očituje u većoj brzini promjene frekvencije te u većem odstupanju frekvencije od nazivne vrijednosti tijekom poremećaja.

U radu je detaljno objašnjen utjecaj fotonaponskih elektrana na frekvencijsku stabilnost te su istražene mogućnosti i predloženi koncepti sudjelovanja fotonaponskih elektrana u regulaciji frekvencije.

Ključne riječi: Fotonaponska elektrana, stabilnost EES-a, regulacija frekvencije, konstanta tromosti

IMPACT OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS ON SYSTEM FREQUENCY STABILITY

ABSTRACT

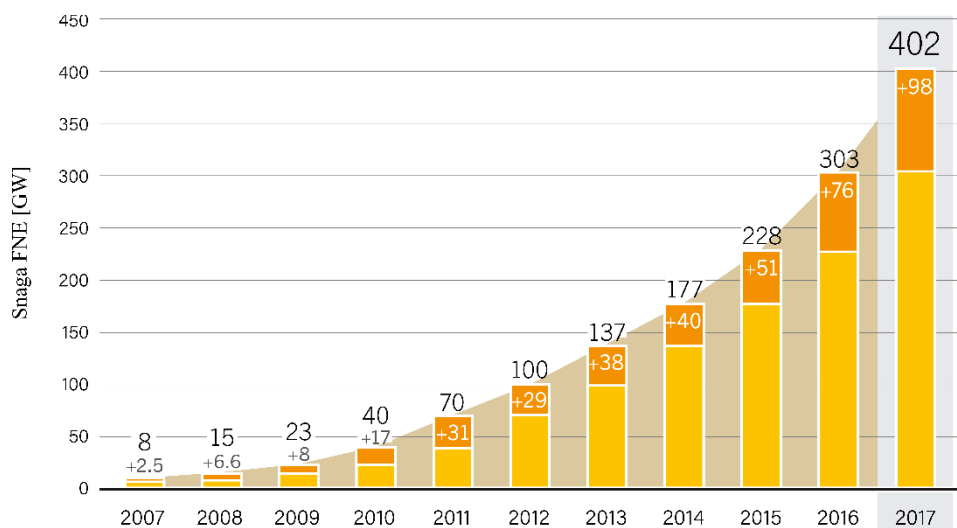
The integration of photovoltaic power plants is continuously increasing. At the end of 2017, the total installed photovoltaic capacity was 402 GW which is approximately 100 GW more than at the end of 2016. In power systems with a high share of photovoltaic power plants, problems with maintaining frequency stability can occur. Photovoltaic systems negatively affect on frequency stability because of: they do not have rotational parts, so they do not contribute to the overall system inertia; photovoltaic power plants are displacing conventional power plants; they usually operate in maximum power point tracking mode; they are connected to the power system via power converter. The above-mentioned reasons lead to decreasing in average system inertia and that is manifested in a larger rate of change of frequency and larger frequency deviations during a disturbance.

In this paper, the impact of photovoltaic power plants on system frequency stability is explained and their possibilities for participating in frequency control are investigated.

Key words: Photovoltaic power plants, electric power system stability, frequency control, inertia constant

1. UVOD

U posljednjih nekoliko godina, fotonaponske elektrane (FNE) postale su jedan od najpopularnijih izvora električne energije. Tijekom 2017. godine instalirano je oko 98 GW novih FNE što je bio najveći instalirani kapacitet te godine s obzirom na pojedinu vrstu elektrane. Ukupna instalirana snaga u FNE na kraju 2017. godine iznosila je 402 GW, što je približno 6% ukupne instalirane snage u svijetu te 50 puta više u odnosu na 2007. godinu. Prema [1] 29 država je imalo više od 1 GW instalirane snage u FNE u 2017. godini. Na slici 1 prikazana je promjena ukupne instalirane snage u FNE u razdoblju 2007.-2017. godine.



Sl. 1.: Promjena ukupne instalirane snage FNE u svijetu [1]

Izneseni podaci ukazuju na ubrzani i višestruki porast FNE te njihovu sve važniju ulogu u elektroenergetskom sustavu (EES). Visoke razine penetracije FNE mogu znatno utjecati na pouzdanost i stabilnost EES-a. S gledišta regulacije frekvencije, glavni problemi su princip rada i pogona te inherentna karakteristika FNE koji su značajno različiti nego kod konvencionalnih elektrana. S jedne strane FNE rade s ciljem proizvodnje maksimalne snage što znači da ne doprinose ukupnoj snazi rezerve potrebne za osiguravanje primarne regulacije frekvencije, s druge strane za razliku od konvencionalnih sinkronih generatora, FNE nemaju rotirajućih dijelova te ne mogu pružiti inercijski odziv tijekom poremećaja. Osim toga, proizvodnja iz FNE je varijabilna i sklona naglim propadima ili porastima snage u slučaju brzih promjena ozračenja što također stvara probleme operatoru sustava i utječe na vođenje EES-a. Moguće rješenje 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 FNE da aktivno sudjeluju u regulaciji frekvencije.

Struktura rada je sljedeća: u poglavlju 2 objašnjeni su problemi vezani uz regulaciju frekvencije sustava koje donosi povećana integracija FNE; u poglavlju 3 prikazane su mogućnosti sudjelovanja FNE u regulaciji frekvencije; poglavlje 4 donosi zaključak ovog rada.

2. REGULACIJA FREKVENCIJE SUSTAVA

Održavanje konstantne frekvencije sustava jedan je od glavnih uvjeta za stabilan i pouzdan rad EES-a. Konstantna frekvencija omogućava raspodjelu opterećenja na agregate tj. izradu voznih redova [2]. Osim toga, pouzdanost i kvaliteta rada velikog broja uređaja za proizvodnju i potrošnju električne energije osjetljiva je na promjenu frekvencije. 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 nihanja [3]:

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

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 [p.u.]; P_e je agregirana električna snaga generatora u EES-u [p.u.]; H_{sys} je ekvivalentna konstanta tromosti EES-a u sekundama.

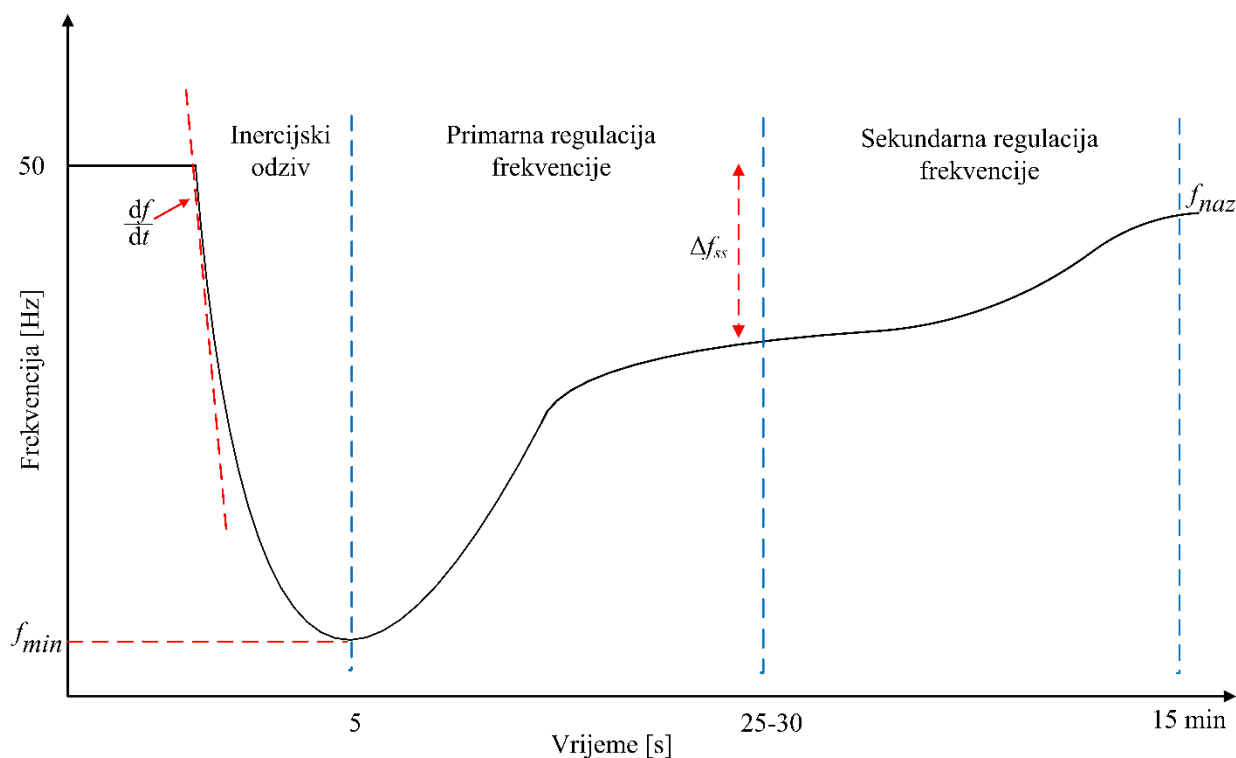
Ekvivalentna konstanta tromosti definirana je utjecajem konstanti tromosti pojedinih agregata u sustavu i može se izračunati prema:

$$H_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (2)$$

pri čemu su H_i i S_i konstanta tromosti i nazivna snaga generatora i , n je broj sinkronih jedinica spojenih na mrežu. Primjer frekvencijskog odziva sustava nakon poremećaja prikazan je na slici 2. Frekvencijski odziv karakteriziraju tri pokazatelja:

- df/dt - brzina promjene frekvencije (ROCOF) tj. početni nagib krivulje frekvencijskog odziva u trenutku neposredno nakon poremećaja $t=0^+$
- Δf_{ss} - odstupanje frekvencije od nazivne vrijednosti u privremenom stabilnom stanju (nakon primarne regulacije)
- f_{min} – minimalni iznos frekvencije tijekom poremećaja

S obzirom na vrijeme odziva, frekvencijski odziv može se podijeliti na tri faze: inercijski odziv, primarna regulacija frekvencije i sekundarna regulacija frekvencije.



Sl. 2.: Primjer frekvencijskog odziva nakon poremećaja

2.1. Utjecaj FNE na frekvencijski odziv

- *Inercijski odziv:*

Tijekom inercijskog odziva, u prvih nekoliko sekundi nakon poremećaja, u slučaju pada frekvencije, generatori injektiraju radnu snagu u mrežu koja dolazi iz kinetičke energije agregata, dok u slučaju porasta frekvencije, generatori apsorbiraju radnu snagu iz mreže što će se očitovati povećanjem kinetičke energije tj. brzine vrtnje agregata.

S obzirom na činjenicu da nemaju rotirajućih dijelova koji bi mogli smanjiti ili povećavati svoju kinetičku energiju, FNE ne doprinose inercijskom odzivu što će u sustavima s visokim udjelom proizvodnje iz FNE uzrokovati pojavu većih iznosa ROCOF-a. Činjenica koja dodatno narušava inercijski odziv sustava je ta da obnovljivi izvori energije pa time i FNE zamjenjuju u pogonu termoelektrane što utječe na smanjivanje ekvivalentne konstante tromosti jer termoelektrane su elektrane s najvećim vrijednostima konstante tromosti. Manja vrijednost ekvivalentne konstante tromosti uzrokovati će bržu promjenu frekvencije kada se u sustavu dogodi poremećaj ravnoteže između mehaničke i električne snage. Matematički gledano, brzina promjene frekvencije u početnom trenutku nakon poremećaja obrnuto je proporcionalna iznosu ekvivalentne konstante tromosti:

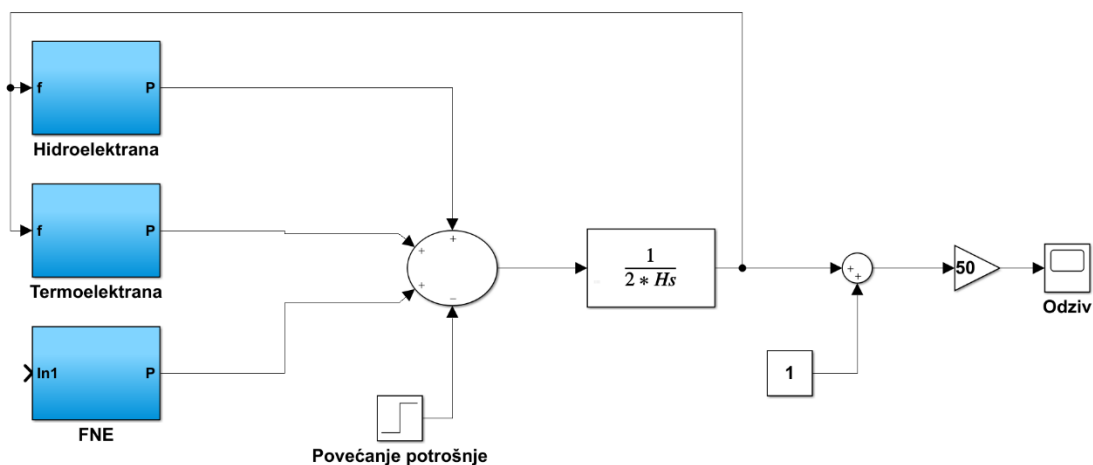
$$\frac{df}{dt_{t=0^+}} \sim \frac{1}{H_{sys}} \quad (3)$$

Povećanje broja FNE spojenih na mrežu preko energetskih pretvarača koji zamjenjuju konvencionalne sinkrone generatore smanjuje vrijednost ekvivalentne konstante tromosti prema [4]:

$$H_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} H_i S_i}{\sum_{i=1}^{n-k} S_i + \sum_{n-k}^n S_{pv,k}} \quad (4)$$

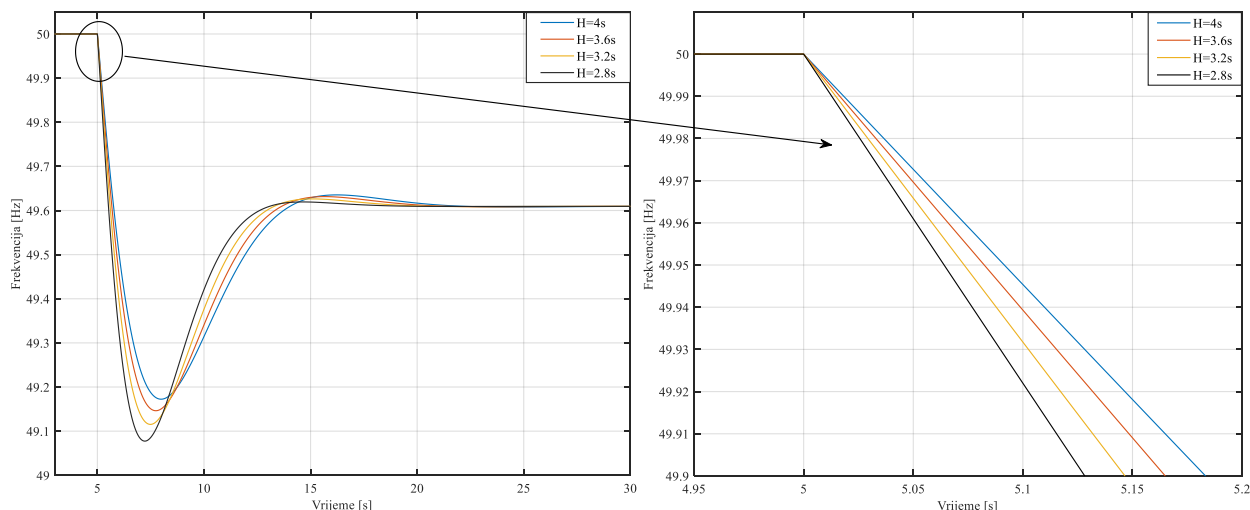
pri čemu je S_{pv} nazivna snaga FNE, k je broj spojenih FNE.

Za analizu inercijskog odziva i ROCOF-a pri smanjenim vrijednostima ekvivalentne konstante tromosti uslijed priključenja FNE u sustav, načinjen je jednostavni model elektroenergetskog sustava u MATLAB/Simulink-u prikazan na slici 3. Sustav se sastoji od hidroelektrane i termoelektrane koje su modelirane prema prijenosnim jednadžbama iz [3], te od FNE koja je modelirana kao izvor konstantne snage.



Sl. 3.: Model elektroenergetskog sustava u MATLAB/Simulink-u

Kao što je već rečeno, priključenjem velikog broja FNE u sustav smanjuje se vrijednost ekvivalentne konstante tromosti sustava, stoga simulirana su četiri slučaja: 1. bazni slučaj – $H=4s$; te tri slučaja uz smanjenje vrijednosti H od 10% - 2. slučaj $H=3.6s$; 3. slučaj $H=3.2s$; 4. slučaj $H=2.8s$. Na slici 4 prikazani su dobiveni rezultati simulacija. U tablici 1 prikazane su izračunate vrijednosti ROCOF-a i minimalne vrijednosti frekvencije za sve četiri slučaja.



Sl. 4.: Utjecaj promjene konstante tromosti H na frekvencijski odziv

Tablica 1. Iznosi ROCOF-a i minimalne frekvencije na slici 4

	$H = 4s$	$H = 3.6s$	$H = 3.2s$	$H = 2.8s$
ROCOF [Hz/s]	0.546	0.607	0.682	0.780
f_{min} [Hz]	49.17	49.15	49.12	49.08

Na slici 4 može se uočiti da konstanta tromosti ima izravan učinak na iznos ROCOF-a i minimalne frekvencije tijekom poremećaja, međutim ne utječe na iznos odstupanja frekvencije u privremenom stabilnom stanju.

- *Primarna regulacija frekvencije:*

Nakon inercijskog odziva, 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. Primarna regulacija frekvencije ostvaruje se na način da turbinski regulatori elektrana u slučaju pada frekvencije povećavaju dotok radnog medija kroz turbinu čime se povećava izlazna snaga elektrane, dok u slučaju porasta frekvencije smanjuju dotok radnog medija čime se smanjuje izlazna snaga elektrane.

S obzirom da FNE uobičajeno rade s ciljem proizvodnje maksimalne snage, to znači da za potrebe primarne regulacije frekvencije u slučaju pada frekvencije ne mogu proizvesti dodatnu potrebnu snagu. Ipak, u slučaju porasta frekvencije, FNE bi mogle smanjiti svoju proizvodnju te na taj način doprinijeti regulaciji frekvencije. Već navedena činjenica da FNE u EES-u zamjenjuju konvencionalne elektrane koje izlaze iz pogona pogoršava djelovanje primarne regulacije frekvencije. Jedan razlog je taj što se smanjuje ukupna snaga rezerve potrebna za osiguravanje primarne regulacije frekvencije, drugi razlog je povećanje ukupne statičnosti sustava što se očituje u povećanju odstupanja frekvencije od nazivne vrijednosti u privremenom stacionarnom stanju koje nastupa nakon završetka djelovanja primarne regulacije. Matematički gledano, analizirajući sustav prikazan na slici 3, odstupanje frekvencije od nazivne vrijednosti može se izračunati prema [3]:

$$\Delta f_{ss} = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R_{ek}} + D} \quad (5)$$

$$R_{ek} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (6)$$

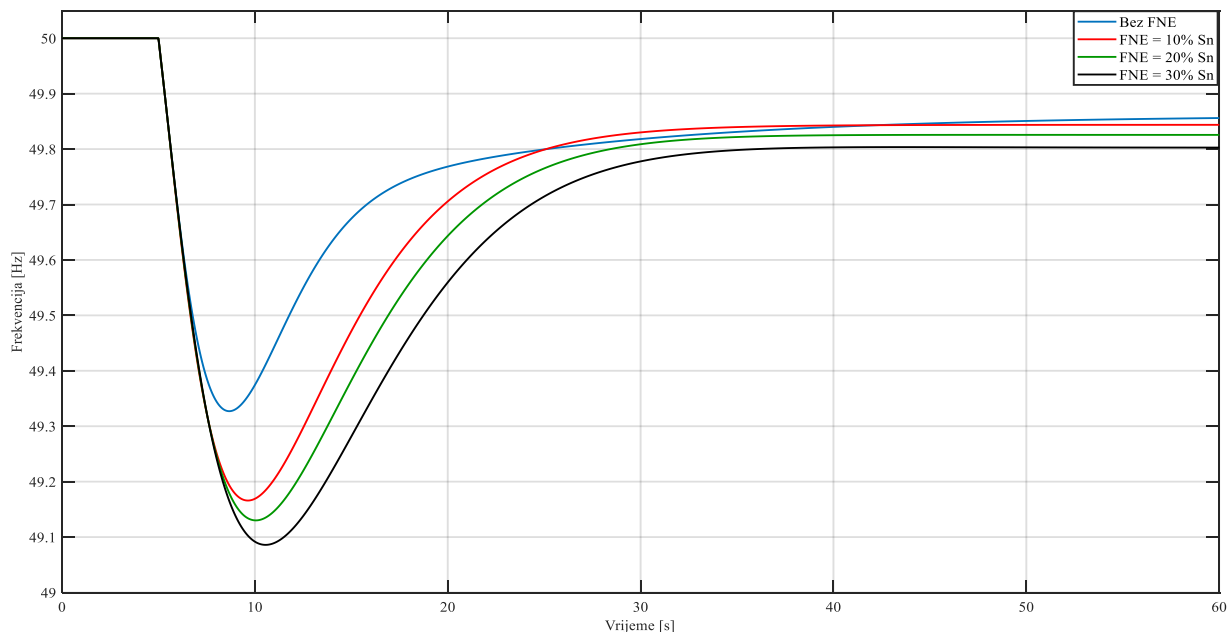
pri čemu je R_{ek} ekvivalentna statičnost sustava [Hz/MW], R_n statičnost turbinskog regulatora pojedinog generatora [Hz/MW], ΔP_L veličina poremećaja [MW], D je koeficijent osjetljivosti potrošnje na promjenu frekvencije [MW/Hz], n je broj generatora u sustavu.

Dakle, prema (5) i (6) vidljivo je da smanjivanje n , broja generatora u sustavu, povećava iznos R_{ek} što nadalje utječe na povećanje odstupanja frekvencije Δf_{ss} .

Za analizu utjecaja FNE na primarnu regulaciju frekvencije korišten je model EES-a prikazan na slici 2 uz napomenu da se blok Termoelektrana sastoji od više jedinica. Izvršene su simulacije za četiri slučaja:

1. bazni slučaj – Sustav bez FNE
2. slučaj – Sustav uz 10% udjela FNE – 1 termoelektrana izbačena iz pogona
3. slučaj – Sustav uz 20% udjela FNE – 2 termoelektrane izbačene iz pogona
4. slučaj – Sustav uz 30% udjela FNE – 3 termoelektrane izbačene iz pogona

Na slici 5 prikazani su dobiveni rezultati simulacija za sve četiri slučaja. U tablici 2 prikazani su iznosi odstupanja frekvencije i minimalne frekvencije tijekom poremećaja za sve četiri slučaja.



Sl. 5.: Frekvencijski odziva sustava s obzirom na promjenu udjela FNE u sustavu

Tablica 2. Iznosi odstupanja frekvencije i minimalne vrijednosti frekvencije na slici 5

	Bez FNE	FNE = 10% S_n	FNE = 20% S_n	FNE = 30% S_n
Δf_{ss} [mHz]	130	160	170	200
f_{min} [Hz]	49.33	49.17	49.13	49.07

Kao što je bilo očekivano, dobiveni rezultati simulacija prikazani na slici 5 pokazali su pogoršanje frekvencijskog odziva u vidu pojave povećanja odstupanja frekvencije i niže minimalne frekvencije tijekom poremećaja.

- *Sekundarna regulacija frekvencije*

Sekundarna regulacija mora preuzeti djelovanje od primarne regulacije najkasnije 30 sekundi nakon pojave odstupanja između proizvodnje i potrošnje. Njezine glavne zadaće su vraćanje frekvencije na nazivnu vrijednost, ostvarivanje utvrđenog programa razmjene snage između

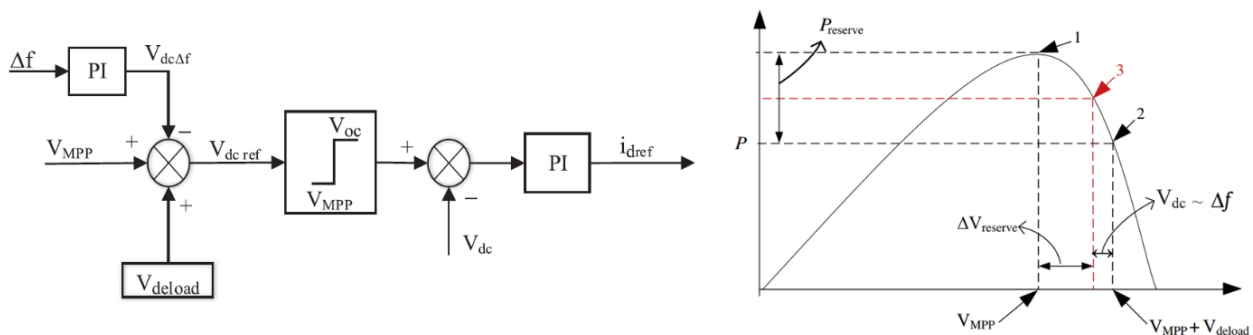
vlastitog elektroenergetskog sustava i susjednih elektroenergetskih sustava u interkonekciji te oslobađanje primarne rezerve za sljedeće poremećaje.

Proizvodnja snage iz FNE ovisna je o okolišnim uvjetima (ozračenje i temperatura) te u slučaju neočekivanih promjena vremenskih uvjeta i loše prognozirane proizvodnje, u sustavima s visokim udjelima proizvodnje iz FNE, mogu se pojaviti velika odstupanja plana i ostvarenja što stvara dodatne probleme operatoru prienosnog sustava prilikom uravnoteživanja EES-a. S obzirom da su to prije svega problemi vezani uz prognoziranje proizvodnje iz FNE, u radu nije analiziran utjecaj FNE na sekundarnu regulaciju frekvencije.

3. MOGUĆNOSTI SUDJELOVANJA FNE U REGULACIJI FREKVENCije

Problemi uslijed značajnog porasta udjela FNE u EES-u opisani u prethodnom poglavlju motiviraju istraživanja mogućnosti sudjelovanja FNE u regulaciji frekvencije. Zahvaljujući brzom odzivu pretvarača, FNE mogu reagirati na promjenu frekvencije u vremenskom okviru jednakom inercijskom odzivu sinkronih generatora što znači da mogu doprinijeti poboljšanju frekvencijskog odziva tijekom poremećaja ako bi imale upravljačke petlje koje bi omogućile sudjelovanje u regulaciji frekvencije [5].

Jedna od zastupljenijih ideja za omogućavanje FNE sudjelovanje u regulaciji frekvencije temelji se na radu FNE u točki ispod maksimalne snage kako bi se osigurala dodatna snaga koja bi se mogla injektirati u mrežu tijekom pada frekvencije. Uobičajeni koncept te ideje prikazan je na slici 6.



Sl. 6.: Upravljačka shema za sudjelovanje u regulaciji frekvencije [6]

Dodavanjem napona V_{doload} naponu V_{MPP} koji odgovara MPP (engl. Maximum Power Point) podešava se radna točka FNE u točku $V_{dcref} = V_{MPP} + V_{doload}$ 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 $V_{de\Delta f}$ koji smanjuje napon V_{dcref} što uzrokuje povećanje proizvodnje radne snage te na taj način FNE otpušta snagu rezerve u mrežu. S obzirom da je P - V krivulja "okomitija" na dijelu desno od MPP nego na lijevom dijelu, radna točka FNE podešava se u napon veći od napona u točki MPP jer se u tom slučaju za manju promjenu napona dobiva veća promjena snage. Međutim, prilikom ostvarivanja upravljačke sheme na slici 6 potrebno je razmotriti dodatna pitanja:

1. Koliki iznos dodatne snage ($P_{reserve}$ na slici 6) osigurati s obzirom na maksimalnu snagu P_{MPP} ?
2. Koliki iznos dodatne snage proizvesti s obzirom na iznos Δf ?
3. Koliko dugo vremenski zahtijevati rad ispod točke maksimalne snage?
4. Kakav utjecaj ima promjena okolišnih uvjeta (ozračenja i temperature) na gore navedena tri pitanja?

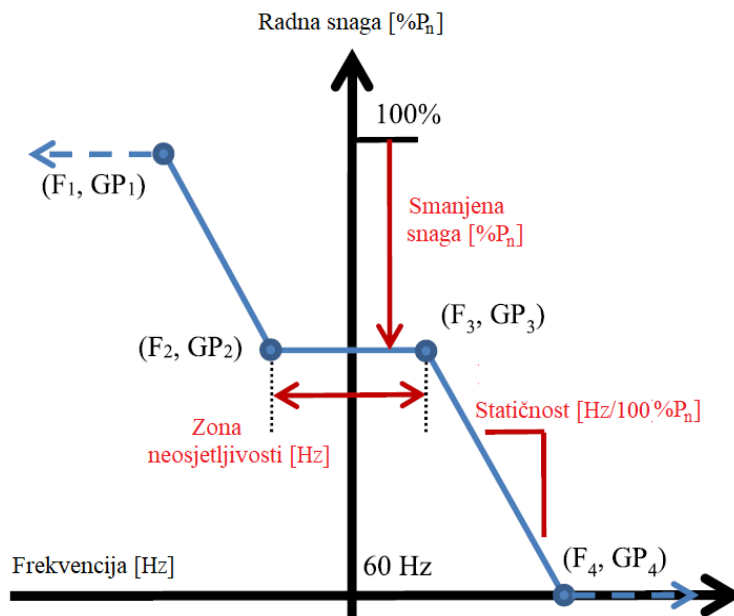
Razmatranje prvog pitanja, odnosno potrebnog iznosa dodatne snage, nije potrebno ako je ostvarena mogućnost sudjelovanja u regulaciji frekvencije bez potrebe za radom FNE u točki ispod MPP. To se može ostvariti koristeći kondenzator na DC spoju između DC/DC pretvarača i DC/AC izmjenjivača.

U radu [7] 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:

$$U_{dc} = \frac{2H_{dc}f_0}{C_{dc}U_{dc0}} (f-f_0) + U_{dc0} = K_{in}(f-f_0) + U_{dc0} \quad (7)$$

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. Jednaku funkciju koju obavlja kondenzator mogu obavljati velike baterije odnosno spremnici energije. Međutim, problem je cijena spremnika energije koja je još uvijek velika, a i njihov životni vijek je kraći nego FNE.

Primjer rješenja problema u drugom pitanju tj. definiranja iznosa dodatne snage u ovisnosti promjene frekvencije Δf može se pronaći u [8]. Korištenjem uobičajene $P-f$ karakteristike za regulaciju frekvencije predočene na slici 7, autori definiraju način rada FNE za potrebe regulacije frekvencije. Za krivulju $P-f$ potrebno je definirati nagib tj. statičnost, zonu neosjetljivosti i količinu snage rezerve (postotak smanjenja snage). Ispitivanja u radu su provedena za havajski EES. U scenarijama 20% i 70% udjela FNE u elektroenergetskom sustavu Havaja, rezultati su pokazali uštedu novca čak i u slučaju kada bi se vlasnicima FNE plaćali gubici nastali zbog proizvodnje u neoptimalnoj točki kako bi se omogućilo sudjelovanje u regulaciji frekvencije. Iznosi parametara korišteni u radu za simulacije su: zona neosjetljivosti 0.1 Hz; statičnost 1.25Hz/P_n; postotak smanjenja snage 50%.



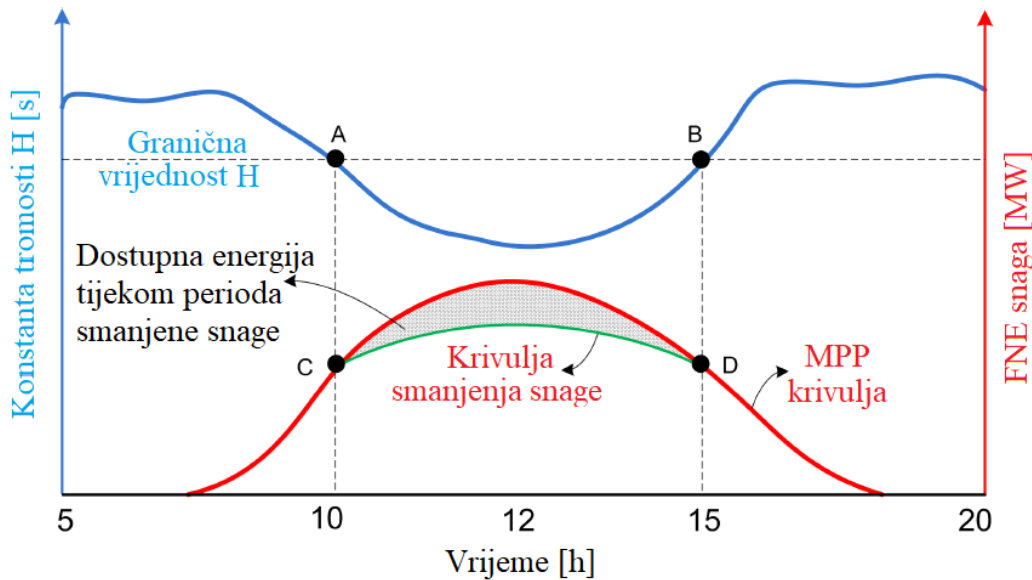
Sl. 7.: $P-f$ karakteristika regulacije frekvencije [8]

Rješenje za problem određivanja vremenskog intervala u kojem bi FNE radila ispod točke MPP predloženo je u [9]. S obzirom da rad u točki ispod maksimalne snage, tj. u neoptimalnoj točki, donosi dodatne troškove, autori predlažu strategiju regulacije frekvencije pomoću procjene ukupne tromosti u sustavu. Predloženo je da FNE sudjeluje 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. Iznos konstante tromosti procjenjuje se prema:

$$H_{\text{sys}} \sim \frac{P_1 - P_2}{\frac{df_1}{dt} - \frac{df_2}{dt}} \quad (8)$$

pri čemu su P_1 i P_2 izmjerene vrijednosti snage, df_1/dt i df_2/dt izmjerene vrijednosti ROCOF-a.

U radu je predloženo da u slučaju 10% smanjenja tromosti, FNE prelazi u neoptimalni pogon. Na slici 8 predočena je proizvodnja snage FNE u ovisnosti procijenjene vrijednosti konstante tromosti.



Sl. 8.: Proizvodnja snage FNE s obzirom na iznos konstante tromosti [9]

ZAKLJUČAK

U ovom radu razmatran je utjecaj visoke integracije FNE na frekvencijsku stabilnost EES-a te mogućnosti sudjelovanja FNE u regulaciji frekvencije. Nakon teorijskog razmatranja problema, u MATLAB/Simulink-u razvijen je jednostavni model EES-a pogodan za analizu frekvencijskog odziva sustava. Izvođenjem simulacija za različite udjele FNE u sustavu analiziran je utjecaj visoke integracije FNE na frekvencijski odziv sustava. Na dobivenim rezultatima simulacija može se uočiti pojava većih iznosa ROCOF-a, većeg odstupanja frekvencije od nazivne vrijednosti u privremenom stacionarnom stanju te nižih iznosa minimalne frekvencije tijekom poremećaja. S obzirom na dobivene rezultate može se zaključiti kako visoka integracija FNE utječe na pogoršanje i inercijskog odziva i primarne regulacije frekvencije. Kako bi se riješili navedeni problemi ili barem ublažili provode se istraživanja mogućnosti sudjelovanja FNE u regulaciji frekvencije. Ugradnjom dodatnih upravljačkih petlji, FNE bi mogle doprinijeti regulaciji frekvencije zahvaljujući brzom odzivu pretvarača koji omogućavaju reagiranje na promjenu frekvencije u vremenskom okviru jednakom inercijskom odzivu sinkronih generatora. Rješenje koje se najviše ističe je pogon FNE u neoptimalnoj radnoj točki tj. ispod točke maksimalne snage, međutim pri izvedbi tog rješenja potrebno je razmotriti dodatna pitanja jer takav pogon donosi dodatne troškove.

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] “REN21, 2018, Renewables 2018 Global Status Report,” Paris, 2018.
http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/17-8652_GSR2018_FullReport_web_final_.pdf
- [2] I. Kuzle, D. Bosnjak and S. Tesnjak, "An overview of ancillary services in an open market environment," *2007 Mediterranean Conference on Control & Automation*, Athens, 2007, pp. 1-6.
- [3] P. (Prabha) Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control*. McGraw-Hill, 1994.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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, 2018.
- [8] 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.
- [9] 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.