



Sudjelovanje fotonaponskih elektrana u regulaciji frekvencije elektroenergetskog sustava

Tomislav Baškarad

Fakultet elektrotehnike i računarstva

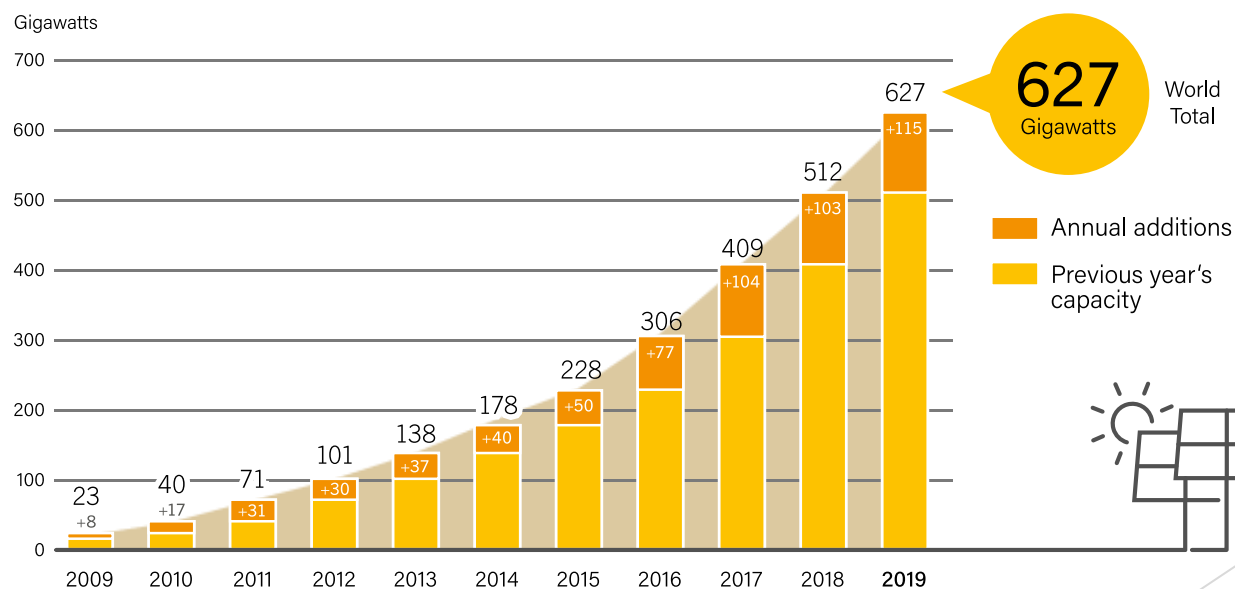
Sadržaj

- **Fotonaponske elektrane (FNE) u svijetu**
- **Utjecaj FNE na regulaciju frekvencije**
- **Mogućnosti sudjelovanja FNE u regulaciji frekvencije**
- **Problemi**
- **Ostvarena rješenja**
- **Zaključak**

Fotonaponske elektrane u svijetu

- **627 GW FNE na kraju 2019.:**
- **8% ukupne instalirane snage u svijetu**
- **3% ukupne proizvedene el. energije u svijetu**
- **Honduras, Italija, Grčka...oko 10% udjela FNE u proizvodnji el. energije**

Solar PV Global Capacity and Annual Additions, 2009-2019



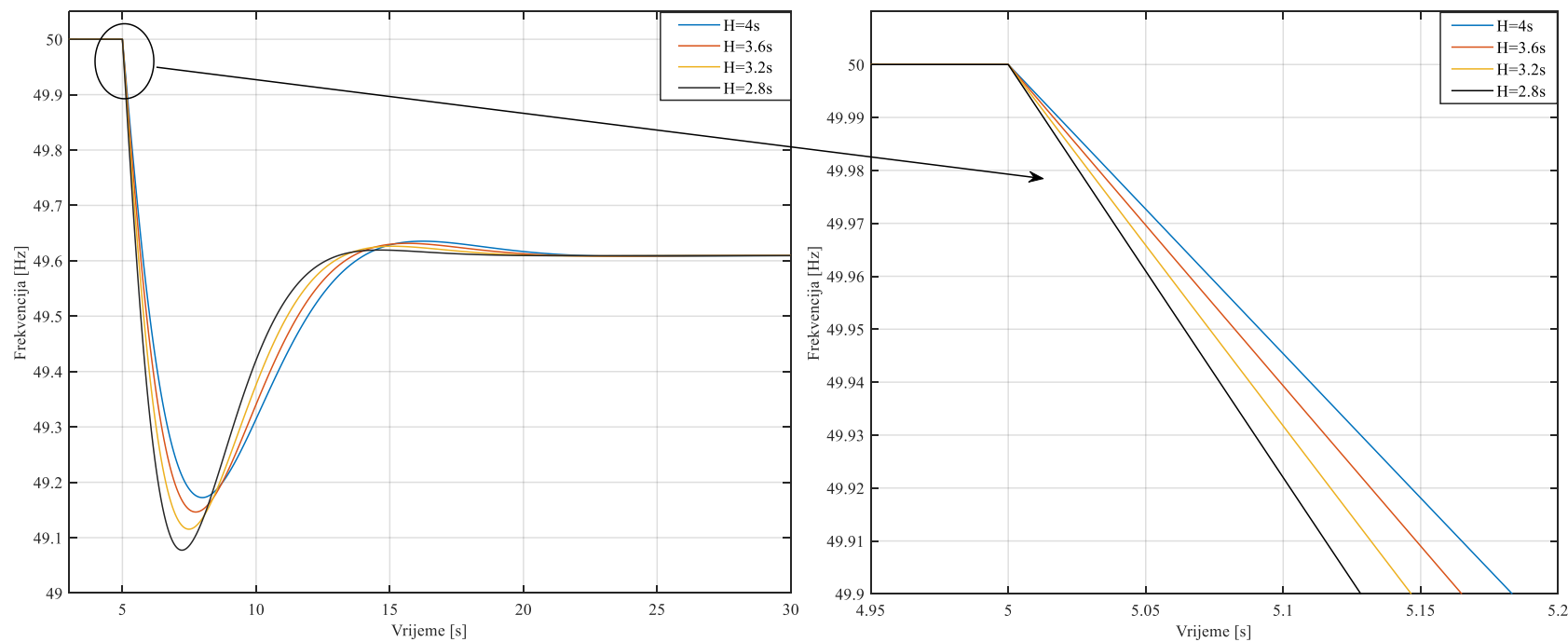
Utjecaj FNE na regulaciju frekvencije

- **Negativni utjecaji FNE na stabilnost frekvencije:**
 - FNE zamjenjuju konvencionalne SG → smanjuje se konstanta tromosti sustava
 - FNE nemaju rotirajućih dijelova → nemogućnost pružanja inercijskog odziva
 - Spojene na mrežu preko pretvarača → neosjetljivost na promjenu frekvencije
 - FNE rade s ciljem proizvodnje maksimalne snage → nema snage rezerve
 - Proizvodnja snage ovisna o vremenskim uvjetima → proizvodnja varijabilna i nepredvidljiva
 - Ne sudjeluju u pomoćnim uslugama sustava

Utjecaj FNE na regulaciju frekvencije

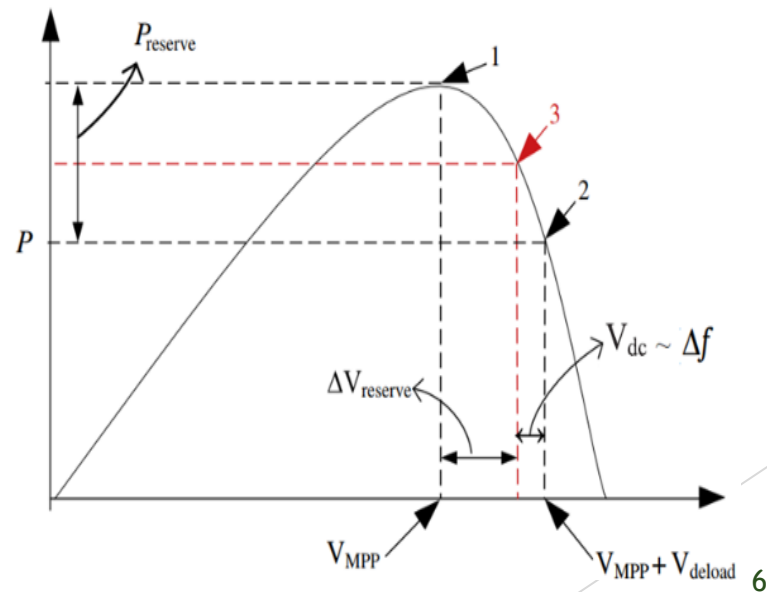
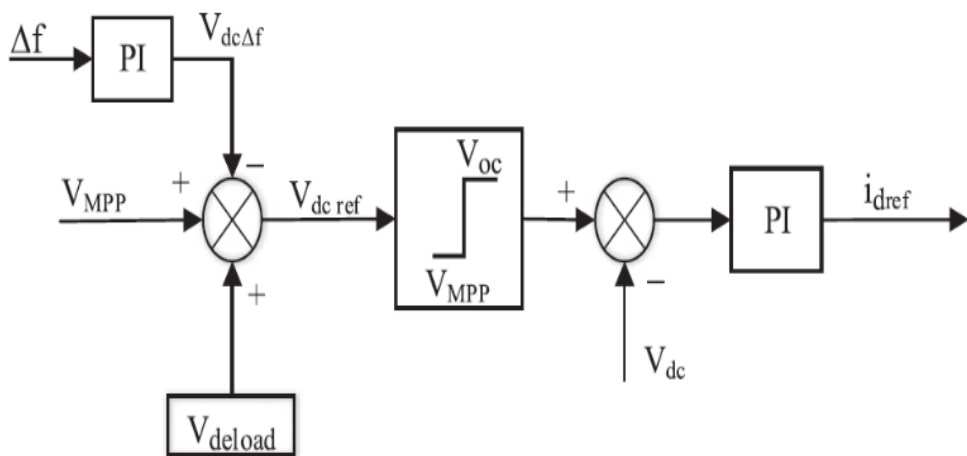
▪ Posljedice:

- Pojava većih iznosa ROCOF-a
- Niži minimum frekvencije tijekom poremećaja
- Povećanje odstupanja frekvencije u privremenom stacionarnom stanju



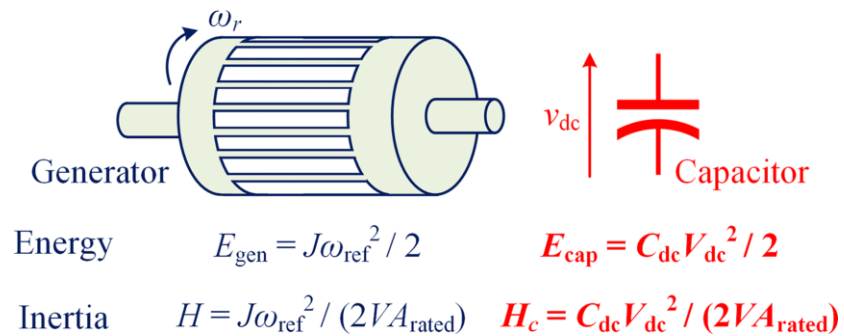
Mogućnosti sudjelovanja FNE u regulaciji frekvencije

- FNE mogu doprinijeti poboljšanju frekvencijskog odziva zahvaljujući brzom dinamičkom odzivu pretvarača
- Situacije pri kojima frekvencija pada
- Jedna od najzastupljenijih metoda: **rad FNE ispod MPP**



Mogućnosti sudjelovanja FNE u regulaciji frekvencije

- Pružanje virtualnog inercijskog odziva pomoću kondenzatora na DC-spoju



$$H_{\text{ekv}} = \frac{\Delta V_{\text{dc_max}} \cdot f_{\text{ref}}}{V_{\text{dc}} \cdot \Delta f_{r_max}} \frac{C_{\text{dc}} V_{\text{dc}}^2}{2VA_{\text{rated}}}$$

- Sposobnost regulacije frekvencije ograničena količinom apsorbirane ili otpuštene energije tj. kapacitetom kondenzatora.

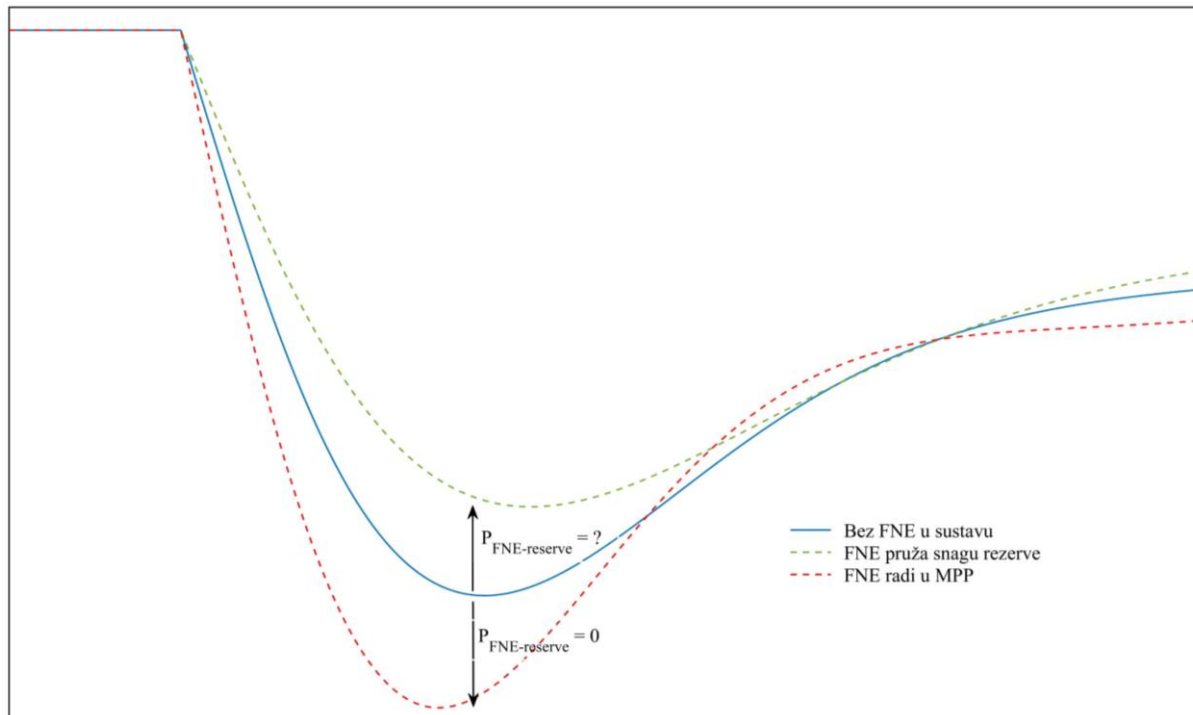
Problemi

1. **Koliki iznos dodatne snage (P_{reserve}) osigurati s obzirom na maksimalnu snagu P_{MPP} ?**
2. **Koliki iznos dodatne snage proizvesti s obzirom na iznos Δf ? Koeficijent statičnosti R ?**
3. **Koliko dugo vremenski zahtijevati rad ispod točke maksimalne snage?**

Ostvarena rješenja

1. Koliki iznos dodatne snage (P_{reserve}) osigurati s obzirom na maksimalnu snagu P_{MPP} ?

- Ključni pokazatelj: minimum frekvencije (f_{min})



Dobiti f_{min} kao funkciju u ovisnosti $P_{\text{FNE-reserve}}$ tj. $f_{\text{min}} = f(P_{\text{FNE-reserve}})$

Ostvarena rješenja

- **Problem:** nemoguće analitički riješiti diferencijalnu jednačbu frekvencijskog odziva

$$\Delta f(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{P_L(s)}{2Hs + D + \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{Hi}} HPP(s)_i + \sum_{i=1}^m \frac{1}{R_{Ti}} TPP(s)_i + \sum_{i=1}^k \frac{1}{R_{pvi}} PV(s)_i} \right\}$$

- **Rješenje:** aproksimacija frekvencijskog odziva temeljena na paraboličnoj funkciji
- **Cilj:** $f_s(t) = at^2 + bt + c$
- **Potrebno:** pronaći koeficijente a , b i c
- **Zašto parabola?** Minimum parabole jednoznačno i jednostavno određen:

$$f_{min}(t) = c - \frac{b^2}{4a}$$

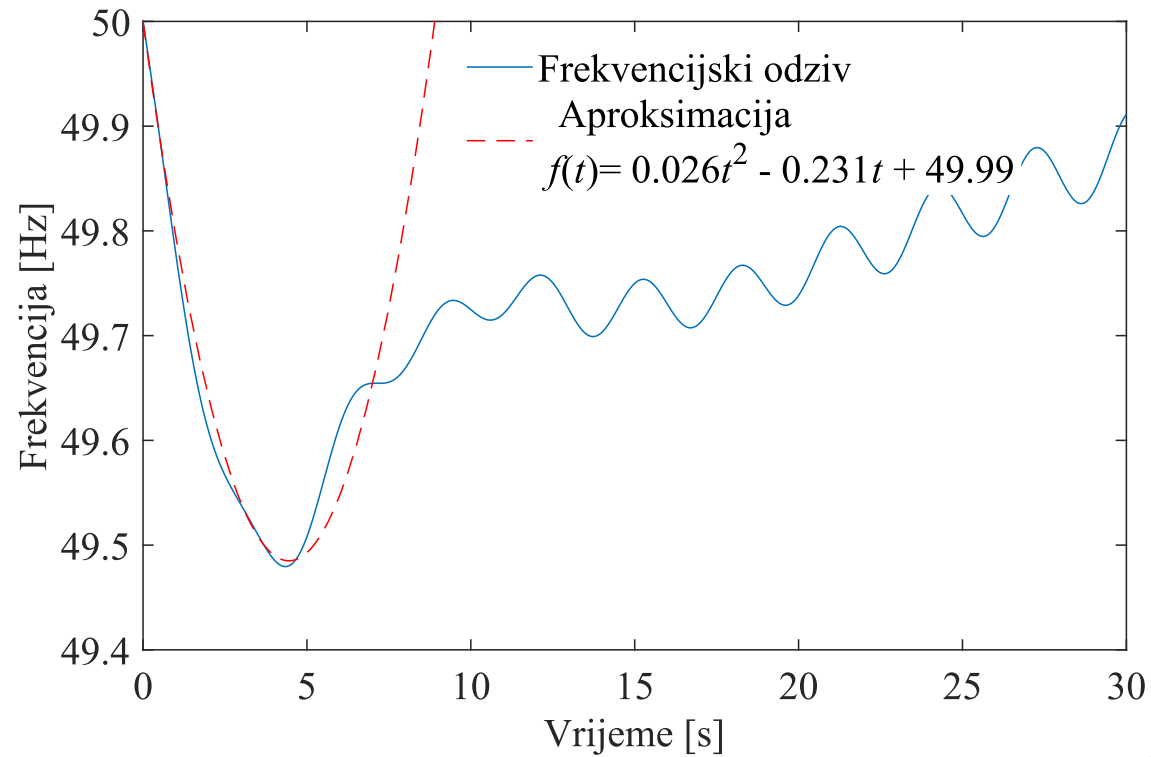
Ostvarena rješenja

- **Primjer dobivenih koeficijenata parabole u ovisnosti o H , P_L i P_r :**

$$a = \frac{12021.38P_L - 59.17P_r + 3.12H^2P_r - 354.72HP_r + 190120.56HP_L}{406875H^3 + 262367.03H^2 + 301596.95H + 50732.79}$$

$$b = \frac{-18930P_L + 122.8P_r + 390H^2P_r - 203437.5H^2P_L + 814.3HP_r - 409358.5HP_L}{406875H^3 + 262367.03H^2 + 301596.95H + 50732.79}$$

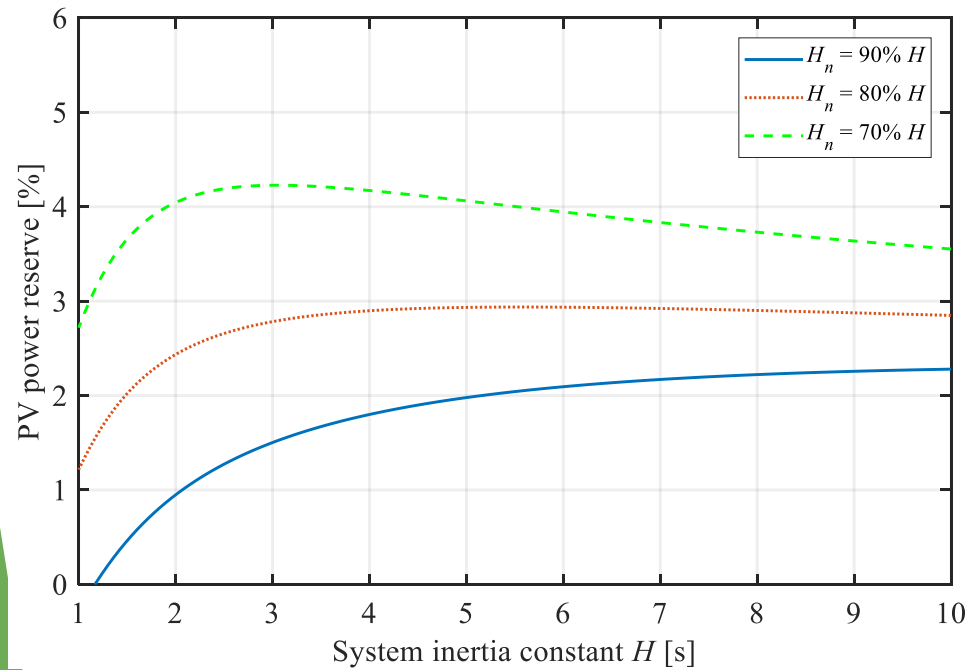
$$c = \frac{-14638.88P_L - 5.81P_r - 39.03H^2P_r - 74.61HP_r + 27539.20HP_L}{406875H^3 + 262367.03H^2 + 301596.95H + 50732.79}$$



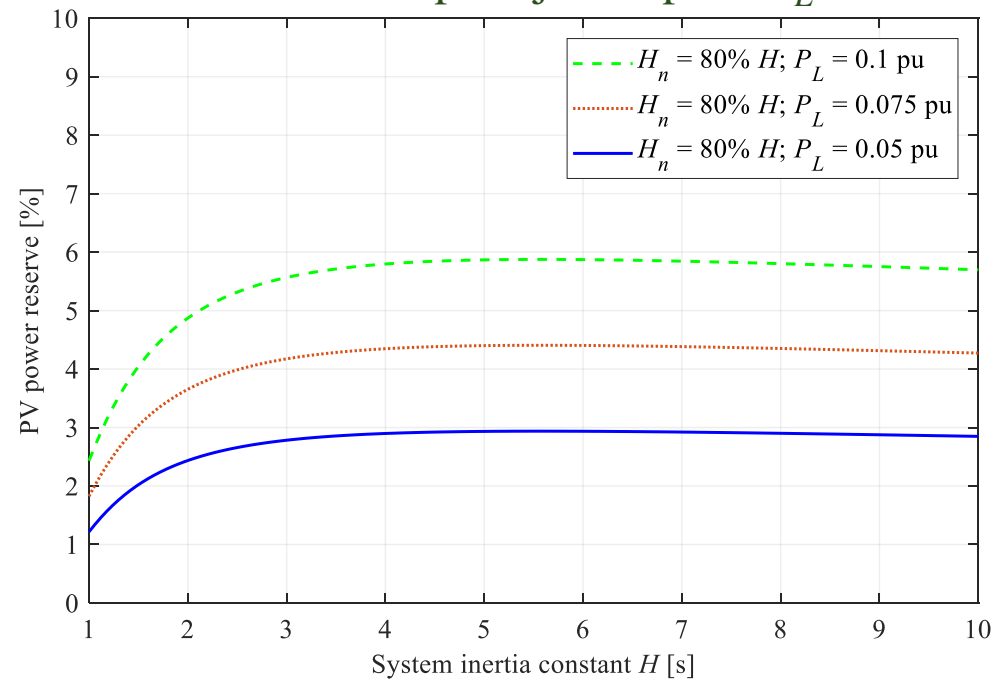
Ostvarena rješenja

Analiza potrebne snage rezerve FNE P_r :

S obzirom na smanjenje H



S obzirom na promjenu ispada P_L



Zaključak

- **Instalirani kapacitet FNE bliži se 10% ukupnom kapacitetu u svijetu**
- **Povećana integracija FNE u EES-u utječe na dinamiku i stabilnost frekvencije**
- **FNE imaju mogućnost značajno doprinositi regulaciji frekvencije**
- **Neriješena pitanja u vezi potrebne snage rezerve, vremena rasterećenja, promjene snage s obzirom na promjenu frekvencije...**
- **Razvijena metoda za analizu FNE snage rezerve pokazuje da potrebna snage rezerve ne prelazi 3% nazivne snage FNE**

Objavljeni radovi:

1. Baškarad, Tomislav; Kuzle, Igor; „Utjecaj fotonaponskih elektrana na stabilnost frekvencije u elektroenergetskom sustavu” // *14. savjetovanje HRO CIGRE*, Šibenik, Hrvatska, 2019
2. Baškarad, Tomislav; Kuzle, Igor; Đaković, Josip; Ilak, Perica; „Analysis of the Wind Generation Impact on Inertial and Primary Frequency Response of the Croatian Electric Power System” // *11th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, Cavtat, Hrvatska, 2018
3. Đaković, Josip; Krpan, Matej; Ilak, Perica; Baškarad, Tomislav; Kuzle, Igor; „Impact of wind capacity share, allocation of inertia and grid configuration on transient RoCoF: The case of the Croatian power system” // *International journal of electrical power & energy systems*, 121 (2020), 106075, 8 doi:10.1016/j.ijepes.2020.106075
4. Baškarad, Tomislav; Kuzle, Igor; Holjevac, Ninoslav; „Photovoltaic System Power Reserve Determination Using Parabolic Approximation of Frequency Response” // *IEEE Transactions on Smart Grid* (2021) doi:10.1109/tsg.2021.3061893
5. Baškarad, Tomislav; Holjevac, Ninoslav; Kuzle, Igor; Ivanković, Igor; Zovko, Nikolina; „ROCOF importance in electric power systems with high renewables share: A simulation case for Croatia” // *12th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, Paphos, Cyprus, 2020.

WINDLIPS izvještaji:

M19.2 Problemi i prijedlozi rješenja vezanih uz sudjelovanje OIE u pomoćnim uslugama sustava

I5.4. Prošireni modeli OIE s upravljivim odzivom

I10.4. Utjecaj OIE na smanjenje konstante tromosti sustava

I5.2. Matematički modeli tipova obnovljivih izvora energije

Hvala na pažnji