Croatian National Committee
CIRED
INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION

SEMINAR

Elektroenergetski sustav u uvjetima povećanog udjela uređaja energetske elektronike

OIE i inercijski odziv EES-a

prof. dr. sc. Igor Kuzle

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva

DYNASTY
ENSURING DYNAMIC STABILITY OF FUTURE INVERTER-BASED AC POWER NETWORKS

SGLab

Promjene koje utječu na frekvenciju

"The Stone Age did not end for lack of stone, and the Oil Age will end long before the world runs out of oil"
Ahmed Zaki Yamani (OPEC)

Električna vozila
Spremnici energije
Mikromreže
Odziv potrošnje

U ukupnoj proizvodnji električne energije u EU u 2024. godini:
VE 17% i SE 11%

Što je zajedničko novim tehnologijama?

Budući EES će se temeljiti na energetskoj elektronici s ogromnim brojem heterogenih subjekata

Problemi:

- Stabilnost sustava
- Oslanjanje isključivo na IK tehnologiju (pouzdanost)
- Kibernetička sigurnost

Utjecaj OIE na stabilnost EES-a

Inverteri odvajaju elektrane od frekvencijskih poremećaja u sustavu

Problemi s inverterskim sučeljem

Replacement of SG with PE

1. Reduction in grid inertia
2. Reduction in spinning reserves

1. Increased RoCoF
2. Increased nadir

Izvor: M. Krpan, 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 Renewable Power Generation, Vol. 12, No. 13, October 2018, pp. 1453-1461

• Inercija

Kada oba vozila voze istom brzinom, koje je teže zaustaviti?

- Predstavlja vrijeme tijekom kojeg proizvodna jedinica može davati nazivnu snagu svojom pohranjenom kinetičkom energijom bez pogonskog stroja. Inercija je proporcionalna ukupnoj rotirajućoj masi. Što je veća inercija, pojavit će se manje ubrzanje i manje odstupanje frekvencije nakon poremećaja. Veliki generatori koji s većom brzinom vrtnje imaju veći inercijski odziv od manjih jedinica ili jedinica s manjom brzinom vrtnje.
- Pri trenutnom ispadu proizvodne jedinice, sinkroni agregati koji su i dalje povezani s mrežom oslobađaju kinetičku energiju pohranjenu u njihovim rotirajućim masama (rotori generatora i turbina, vratila) i usporavaju pad frekvencije.
- Ova vrsta odziva naziva se **inercijski odziv**.

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2$$

E	kinetička energija uskladištena u rotirajućim masam, [MW·s]
J	moment inercije oko osi rotacije, [kg·m2]
ω	kutna brzina rotora, [rad/s].

Odziv frekvencije nakon poremećaja u EES-u

Tradicionalne regulacijske sheme postaju prespore u slučaju visoke penetracije OIE.

Izvor: J. McCalley. Transient frequency performance and wind penetration, https://pdfslide.net/documents/j-mccalley-transient-frequency-performance-and-wind-penetration.html

Kinetička energija i konstanta tromosti

- Na temelju količine energije pohranjene u rotirajućoj masi, može se odrediti koliko dugo generator može osigurati svoju nazivnu snagu isključivo iz pohranjene kinetičke energije:

$$H = \frac{E_0}{S} = \frac{J\omega_0{}^2}{2S}$$

H konstanta tromosti, [MW·s/MVA]
E_0 kinetička energija pri nazivnoj kutnoj brzini rotora ω_0, [MW·s]
S nazivna prividna snaga generatora, [MVA].

- Konstanta tromosti izražava se u sekundama. Označava vrijeme koliko dugo generator može napajati sustav nazivnom snagom koristeći samo svoju kinetičku energiju.
- Na primjer, konstanta tromosti od 5 s znači da generator može napajati sustav nazivnom snagom tijekom 5 s koristeći samo energiju pohranjenu u svojim rotirajućim masama.

Nadomjesna konstanta tromosti

- Najznačajniji utjecaj na dinamičko vladanje agregata
- Problem je podatak o ukupnoj zamašnoj masi mD_{Σ}^2

$$H = \frac{1}{2}\left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 \frac{n^2 mD_{\Sigma}^2}{4 \cdot S_n}$$

Tip proizvodne jedinice	*H (s)*	
Turboagregati		
(a) 3000 o/min (dvopolni)	2.5 - 6.0	starije izvedbe turboagregata (ispod 200 MW) *H*=6
		turboagregati (oko 300 MW) *H*=5
		novije izvedbe turboagregata (preko 500 MW) *H*=3.5
(a) 1500 o/min (četveropolni)	4.0 - 10.0	
Hidroagregati	2.0 - 4.0	

Vjetroagregati				
S (MVA)	J_t (10^6 kgm^2)	J_g (kgm^2)	Ω_r (rpm)	*H* (s)
1	1.121	70	24	4.44
2	4.924	130	18	5.21
5	34.83	200	12	6.01

Kolika je kritična inercija?

- **Kritična inercija** je minimalna razina tromosti sustava potrebna kako bi se osiguralo da agregati koji su u pričuvi imaju dovoljno vremena za aktivaciju te da bi se spriječio djelovanje prvog stupnja podfrekvencijskog rasterećenja nakon velikih poremećaja.
- ENTSO-E: Operateri prijenosnih sustava imaju pravo odrediti da izvori spojeni preko invertera moraju biti sposobni osigurati sintetičku inerciju (3,5 s)

Izvor: A. Ulbig, T. S. Borsche, and G. Andersson, “Impact of low rotational inertia on power system stability and operation,” IFAC Proc. Vol., vol. 19, pp. 7290-7297, 2014.

Centar inercije (COI)

$$H_{area} = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i H_i}{\sum_{i=1}^{n} S_i}$$

Source: J. Đaković, M. Krpan, P. Ilak, T. Baškarad, I. Kuzle. 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, Vol. 121, 2020, 106075

Održivi frekvencijski odziv sustava

Brzi frekvencijski odziv (engl. Fast Frequency Response - FFR) je snaga injektirana u mrežu (ili preuzeta iz mreže) kao reakcija na promjenu frekvencije tijekom poremećaja kako bi smanjilo maksimalno odstupanje frekvencije ili početna brzina promjene frekvencije.

Uključuje dodatnu snagu dobivenu korištenjem kinetičke energije vjetroagregata te druge brzo djelujuće izvore snage iz FN elektrana, spremnika energije i superondenzatora.

Izvor: White Paper. Fast Frequency Response Concepts and Bulk Power System Reliability Needs, NERC Inverter-Based Resource Performance Task Force (IRPTF), March 2020

Emulacija brzog inercijskog odziva iz VE i FN

SEMINAR

Elektroenergetski sustav u uvjetima povećanog udjela uređaja energetske elektronike

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2$$

$$H = \frac{J\omega_r^2}{2S_{base}}$$

$$H = \frac{C_{DC}V_{DC}^2}{2S_{base}}$$

$$E_V = \frac{1}{2} C_{DC} V_{DC}{}^2$$

Virtual Inertia Emulation

Izvor: M. Beus, M. Krpan, I. Kuzle, H. Pandžić and A. Parisio, “A Model Predictive Control Approach to Operation Optimization of an Ultracapacitor Bank for Frequency Control,” IEEE Transactions on Energy Conversion, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 36, no. 3, September 2021, pp. 1743-1755.

Vrste invertera

S gledišta upravljanja u AC mrežama, pretvarači snage mogu se klasificirati kao:

- **Mrežom napajani pretvarači** (engl. grid-following), moraju biti sinkronizirani s naponom mreže u točki priključenja i ne mogu raditi u otočnom načinu rada. Pretvarači sa strujnim izvorom.
- **Podržavajući pretvarači** (engl. grid-supporting), također moraju biti sinkronizirani s naponom mreže u točki priključenja, ali imaju mogućnost pružanja pomoćnih usluga na temelju lokalnih mjerenja,
- **Pretvarači koji formiraju mrežu** (engl. grid-forming).
  - VSM – topologija temeljena na jednadžbi
  - SYNCHRONVERTERS ili VSG – topologija temeljena na statičnosti
  - INDUCVERTERS – Pretvarači bez PLL-a s automatskom sinkronizacijom korištenjem lokalnih informacija o frekvenciji struje. Pretvarači s naponskim izvorom.

Izvor: B. Barać, M. Krpan, T. Capuder, I. Kuzle. Modeling and Initialization of a Virtual Synchronous Machine for Power System Fundamental Frequency Simulations, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 160116-160134, 2021.

DYNASTY
ENSURING DYNAMIC STABILITY OF FUTURE INVERTER-BASED AC POWER NETWORKS

SGLab

Hvala

Prof. dr. sc. Igor Kuzle
voditelj Laboratorija za napredne elektroenergetske mreži
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Zavod za visoki napon i energetiku
igor.kuzle@fer.hr