

Izazovi u integraciji vjetroelektrana s aspekta dinamičke stabilnosti sustava

MAG. ING.

Matej Krpan

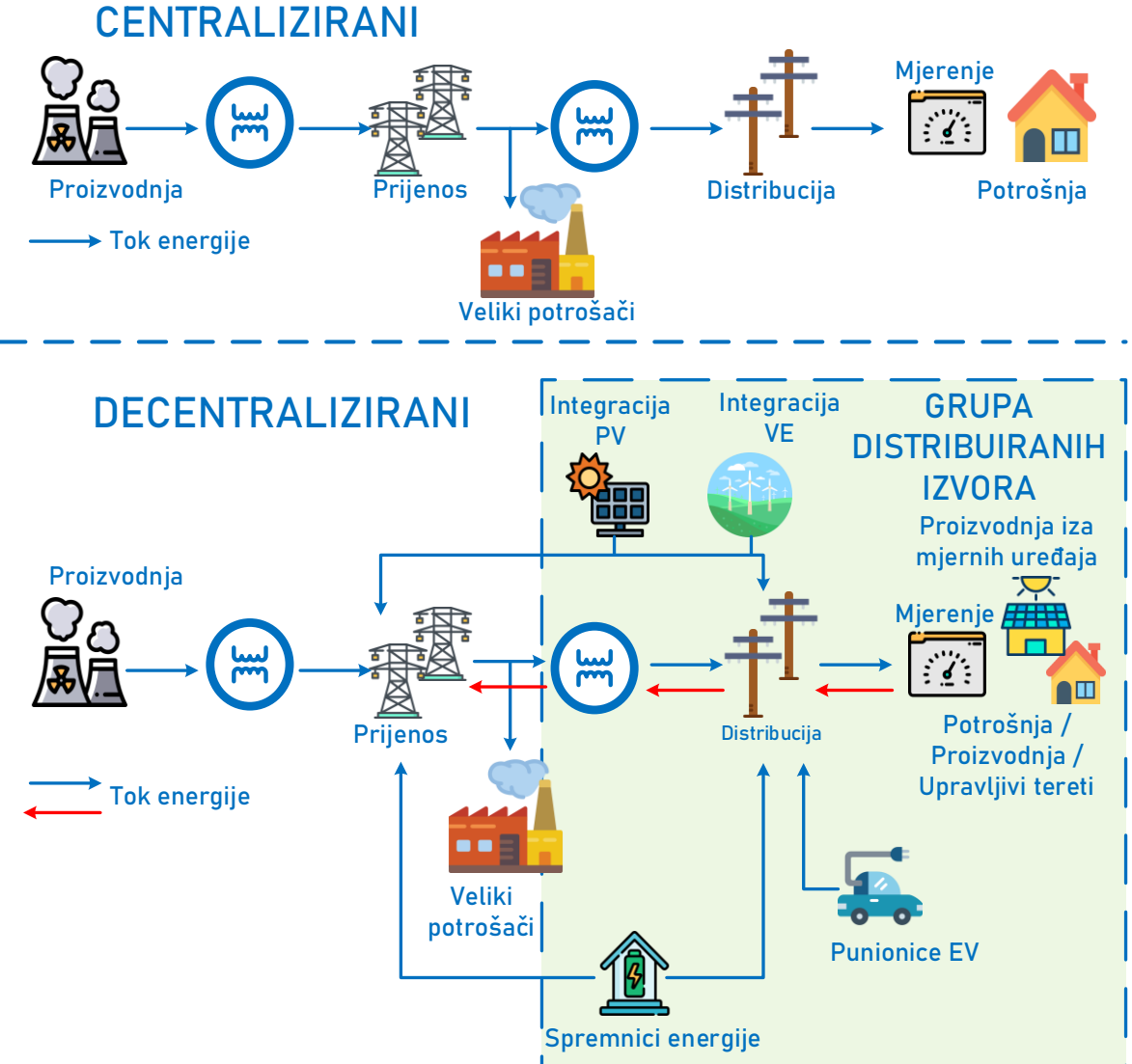
Izazovi u integraciji vjetroelektrana s aspekta dinamičke stabilnosti sustava

Uvod i motivacija

Promjena paradigme EES-a

Iz centraliziranog u
decentralizirani sustav

- OIE koji se spajaju preko energetske elektroničke pretvarača
- Distribuirana proizvodnja
- *Behind-the-meter* kupci s vlastitom proizvodnjom
- Električna vozila i statički spremnici energije



Dinamička stabilnost sustava

Problematika derivacija i integrala

- Promatranje dostatnosti energije (integrali)
- No, što je sa dostatnošću trenutne snage (derivacije)?

Renewable energy could power the world by 2050

Sep 22, 2016, 12:32pm EDT

Wi
alt
Aggres
energy
study

We Could Power The Entire World By Harnessing Solar Energy From 1% Of The Sahara

neet



Joule

Volume 1, Issue 1, 6 September 2017, Pages 108-121



Article

100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-Sector Energy Roadmaps for 139 Countries of the World

Mark Z. Jacobson ^{1, 5} ✉, Mark A. Delucchi ², Zack A.F. Bauer ³, Savannah C. Goodman ¹, William E. Chapman ¹, Mary A. Cameron ¹, Cedric Bozonnat ¹, Liat Chobadi ³, Hailey A. Clonts ¹, Peter Enevoldsen ⁴, Jenny R. Erwin ¹, Simone N. Fobi ¹, Owen K. Goldstrom ¹, Eleanor M. Hennessy ¹, Jingyi Liu ¹, Jonathan Lo ¹, Clayton B. Meyer ¹, Sean B. Morris ¹ ... Alexander S. Yachanin ¹

▲ "We can actually residential building
Olivas/PA



(Photo credit should read SVEN HOPPE/AFP/Getty Images)



Dinamička stabilnost sustava

2. Newtonov zakon – fizika ostaje ista, ali mijenjaju se parametri

- OIE koji se priključuju preko pretvarača
- Distribuirana proizvodnja
- Električna vozila



Mijenja se dinamička slika sustava

$$\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt}$$

$$\mathbf{T} = J \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt}$$

Jednadžba njihanja sustava

Sinkronizirajući efekt sinkronih strojeva i rotirajuća zamašna masa određuju inicijalnu stabilnost sustava

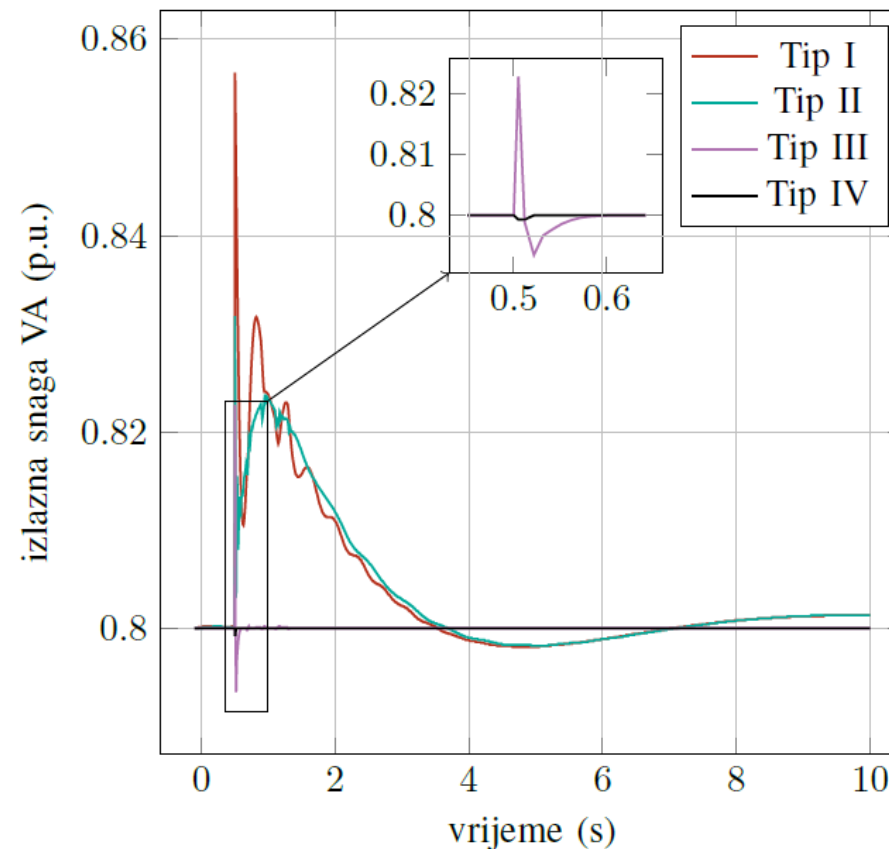
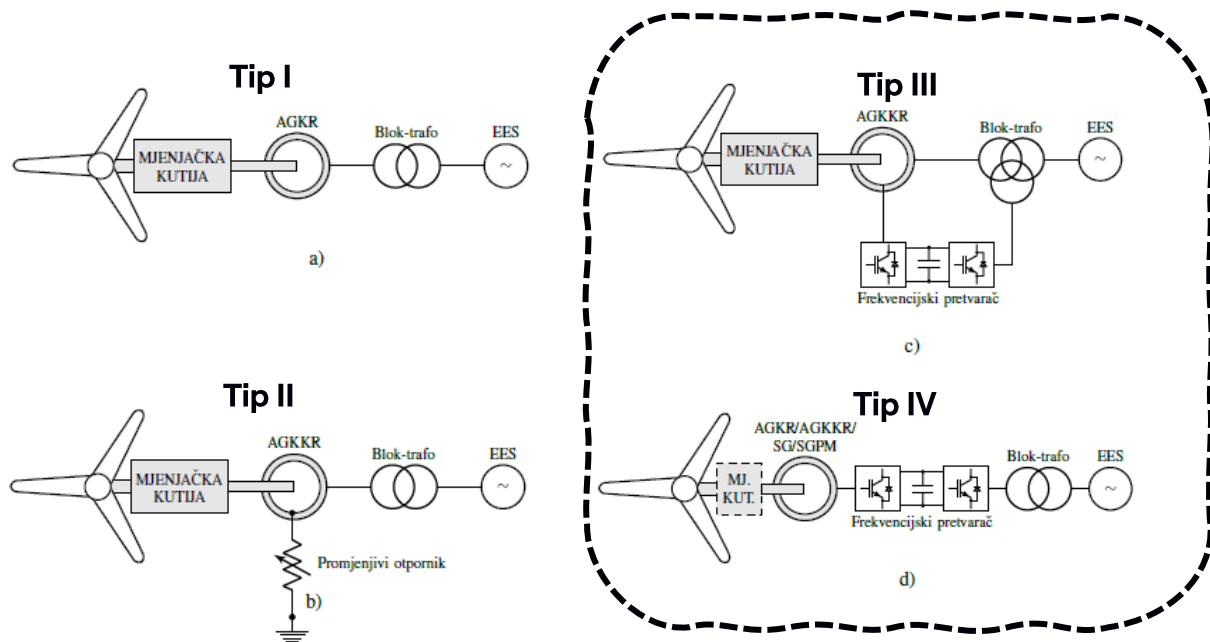
- Zamjena tradicionalnih sinkrono povezanih elektrana s elektranama priključenim preko pretvarača smanjuje tromost sustava, a time i njegovo otpornost na poremećaje proizvodnje i potrošnje
- OIE obično ne sudjeluju u primarnoj regulaciji frekvencije, ne doprinose tromosti sustava
- Povećava se brzina promjene frekvencije i odstupanje frekvencije -> zaštita i kaskadni raspad sustava

$$\bar{p}_g(t) - \bar{p}_l(t) = 2H \frac{d\bar{f}}{dt}$$



Vjetroelektrane

Moderni vjetroagregati nemaju
inercijski odziv niti sudjeluju u
primarnoj regulaciji frekvencije*

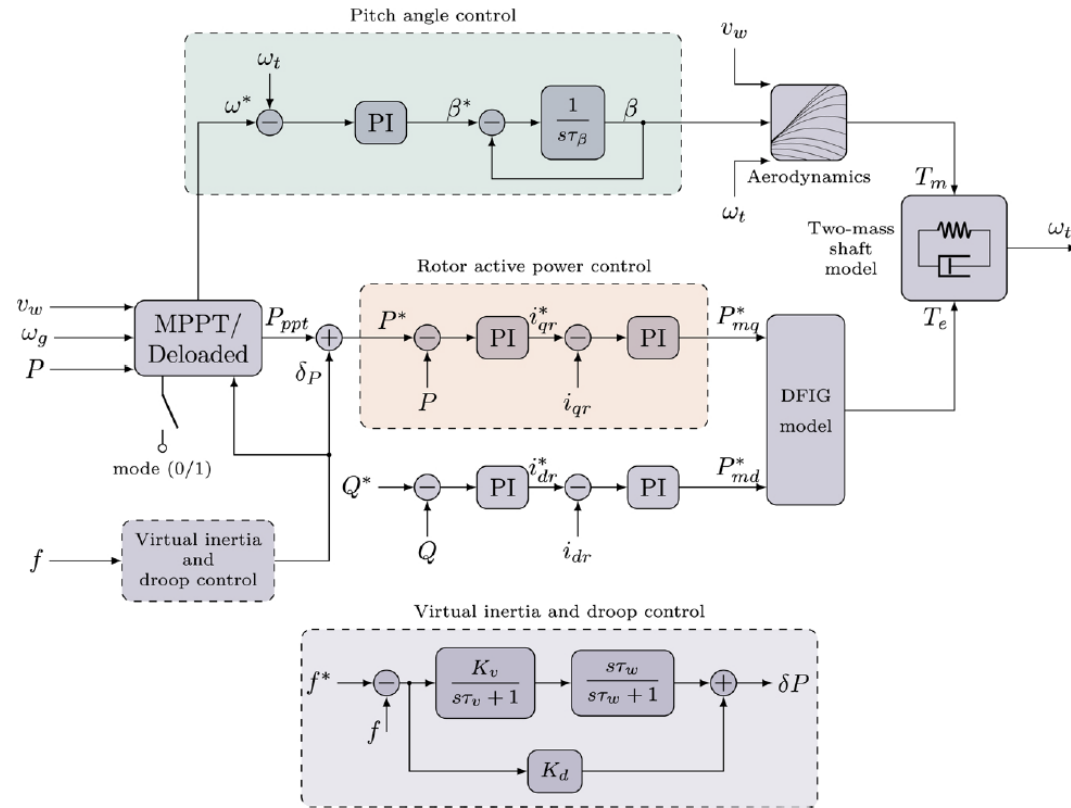


Inercijski odzivi različitih vrsta vjetroagregata

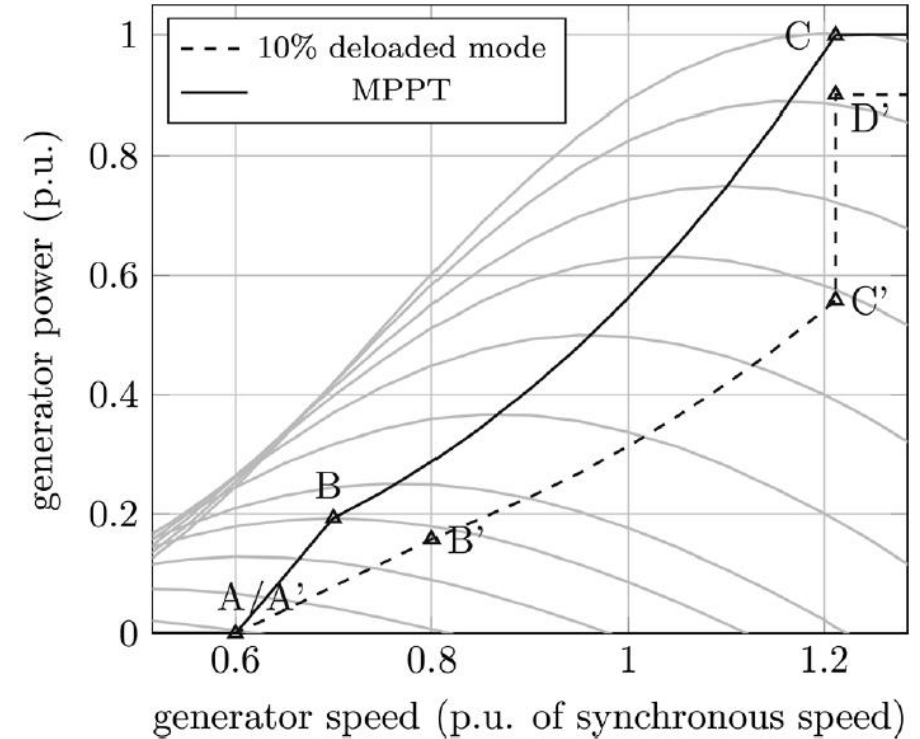
Vjetroelektrane

- Pružanje inercijskog odziva i primarne rezerve naprednim upravljanjem
- Vjetroatregati sadrže kinetičku energiju na račun zamašne mase rotora turbine
 - Konstanta tromosti 3 – 6 sekundi
 - Varijabilna kinetička energija

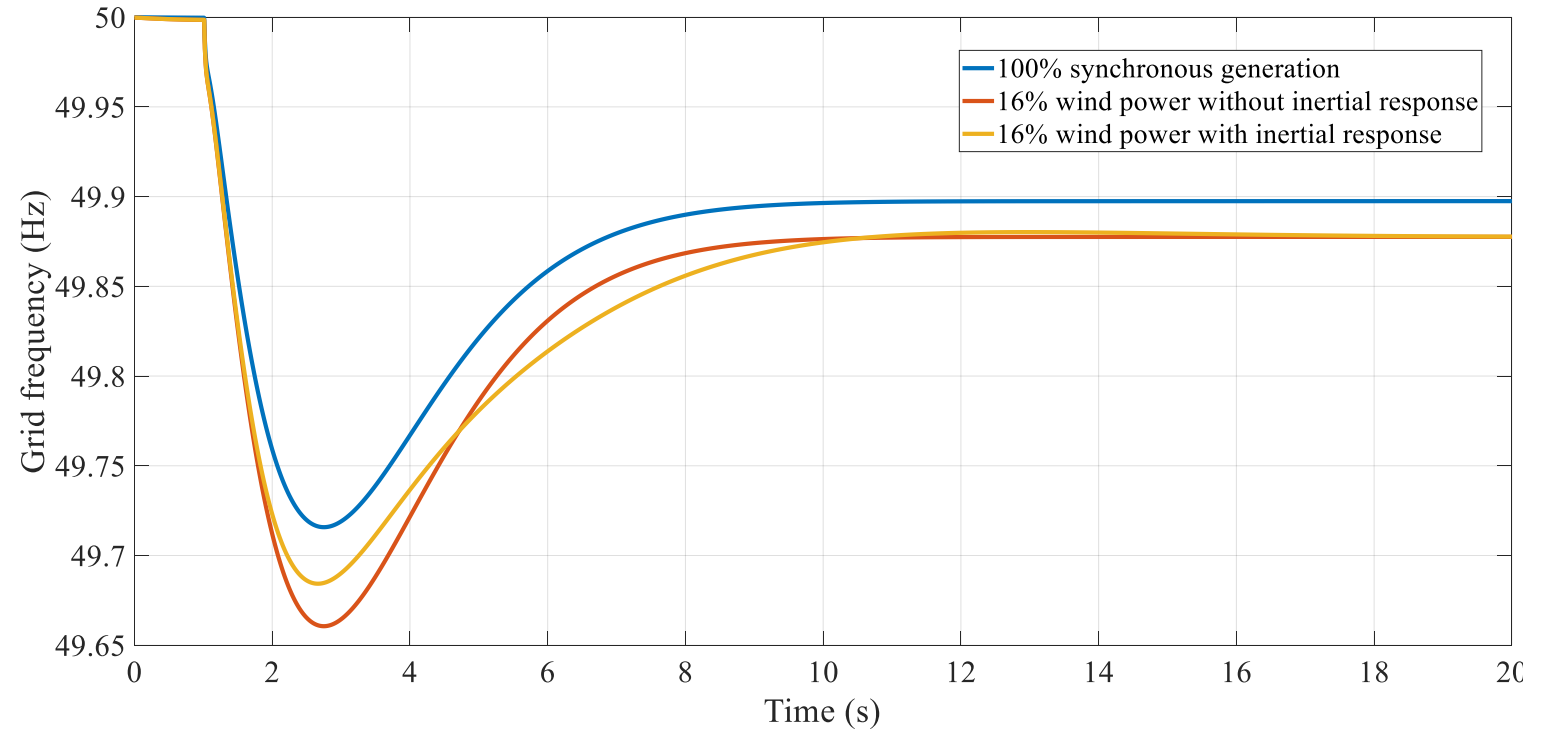
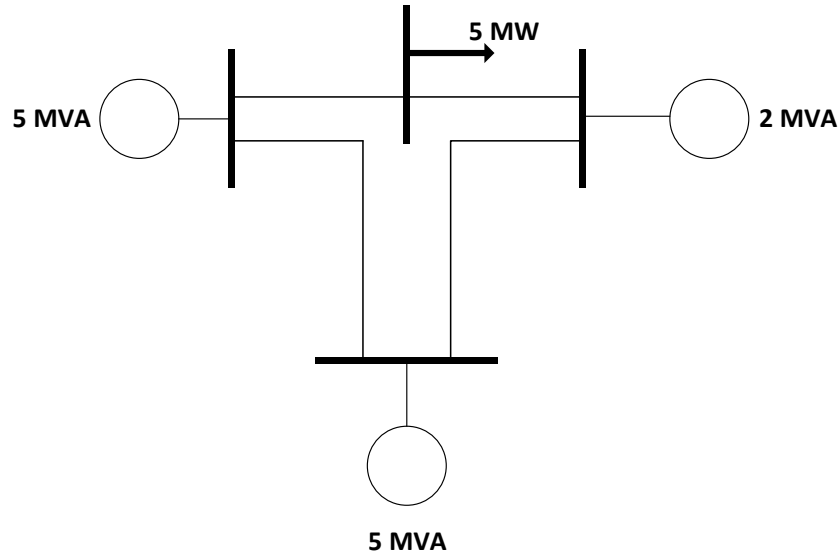




Model vjetroagregata s upravljačkim sustavom



Jedan od načina rasterećenja agregata za osiguranje rezerve



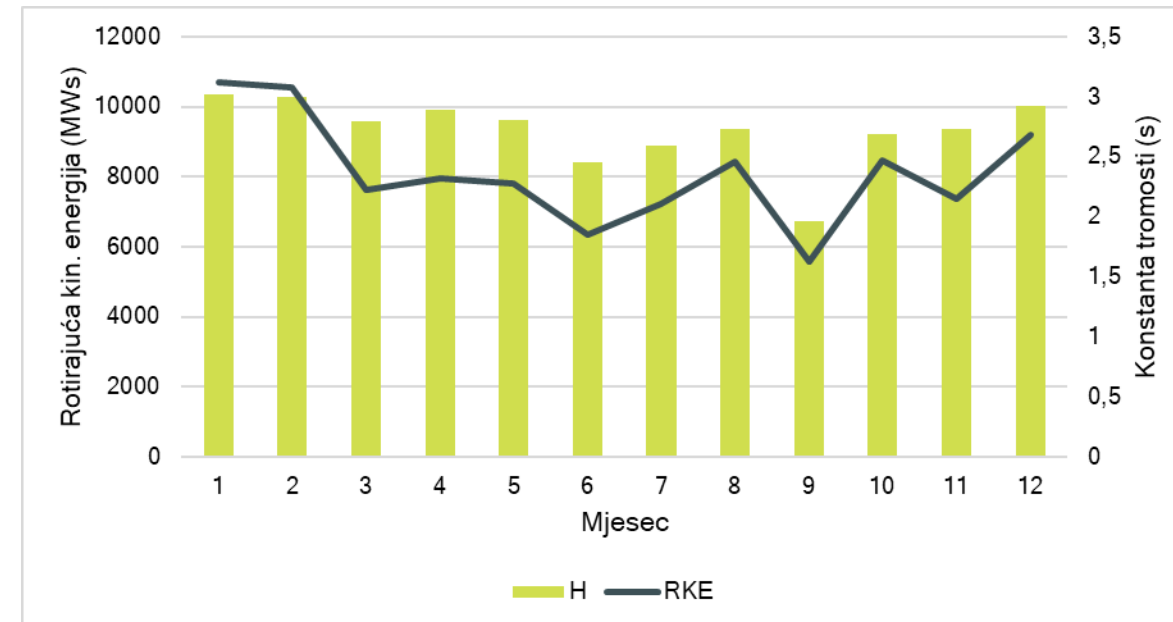
Izazovi u integraciji vjetroelektrana s aspekta dinamičke stabilnosti sustava

Problematika tromosti EES-a u Hrvatskoj, Europi i Svijetu

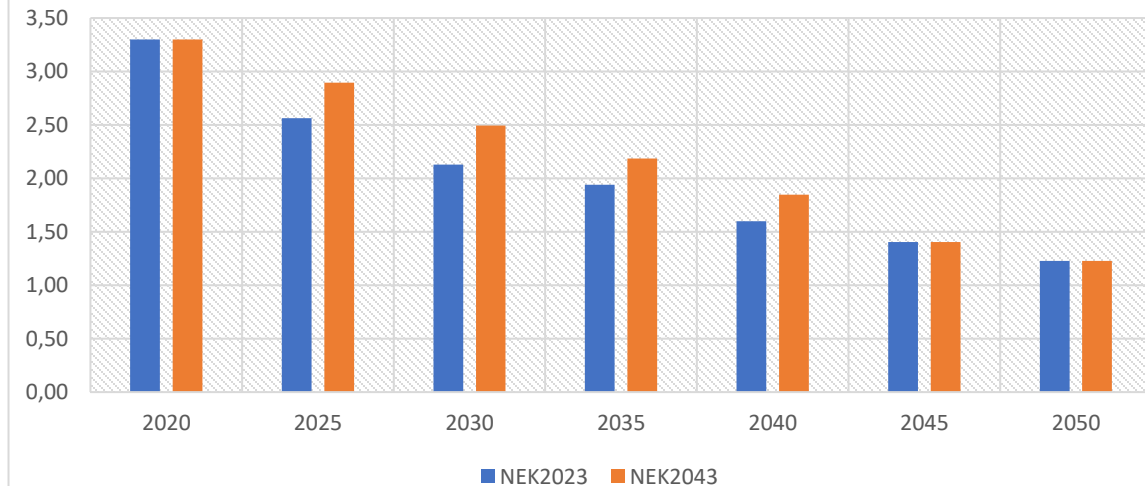
Hrvatska

Mali sustav dobro povezan s
ostatkom kontinentalne Europe

- Aspekt tromosti hrvatskog sustava nije toliko bitan u globalnoj slici
- Hoće li lokalna tromost postat bitna u daljnjoj budućnosti?
- Ne zahtijeva se pružanje sintetičke tromosti



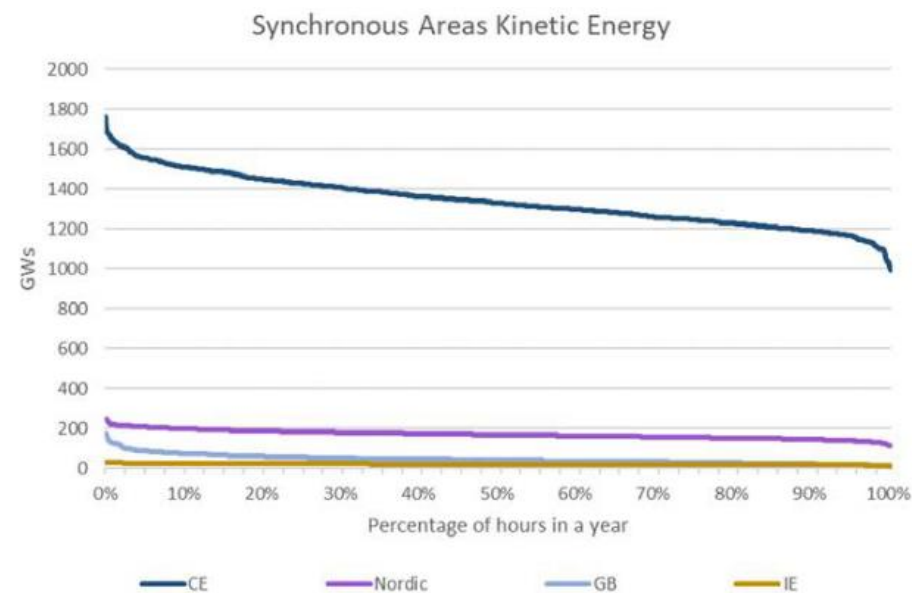
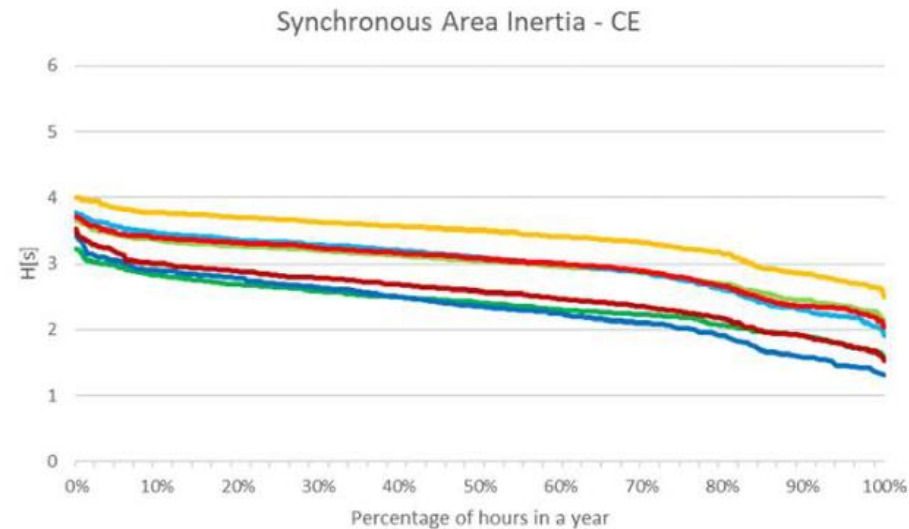
System inertia constant [s] (Capacity base)



Europa (ENTSO-E)

Ne očekuju se veći problemi u bližoj budućnosti u normalnom pogonu

- ENTSO-E Mrežna pravila prepoznaju sinetičku tromost kao uslugu
- Velik, dobro povezan sustav i nejednakosti proizvodnje i potrošnje su relativno male
- Problemi eventualno u slučaju razdvajanja sustava na otoke



Svijet

Probleme imaju slabo povezani sustavi, asinkrono povezani sustavi, otočni sustavi...

- UK, Irska estimiraju tromost sustava u stvarnom vremenu
- Usluge i tržišta rezerve za brzu regulaciju frekvencije (UK, Skandinavija)
- Promjena mrežnih pravila (proizvodne jedinice kompatibilne s većim RoCoF-om)
- Danska, ERCOT, Tasmania: visoka penetracija pretvarača u nekom trenutku
- VE pružaju sintetičku tromost u Kanadi

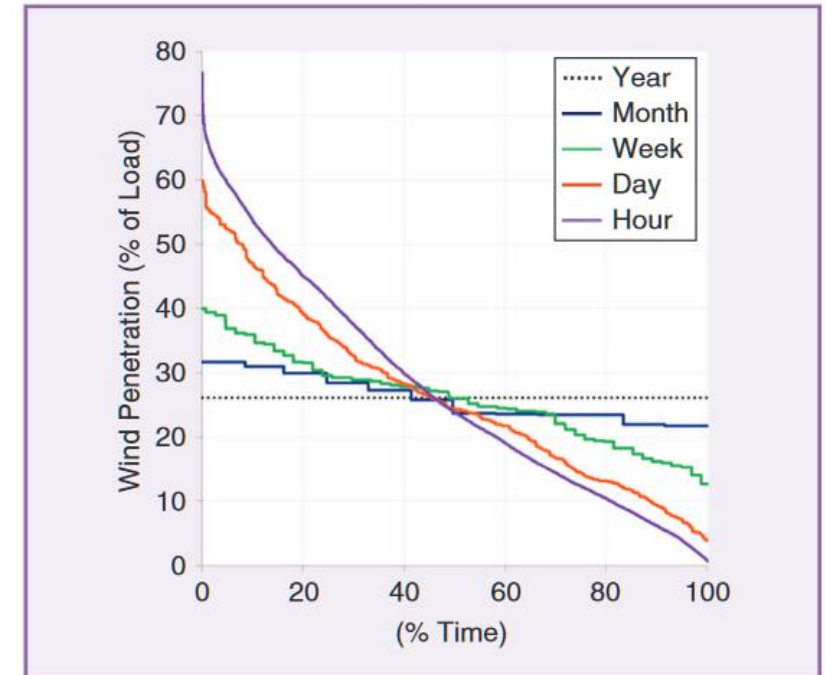


figure 2. Wind penetration duration curves for a nominally 30% annual energy system.

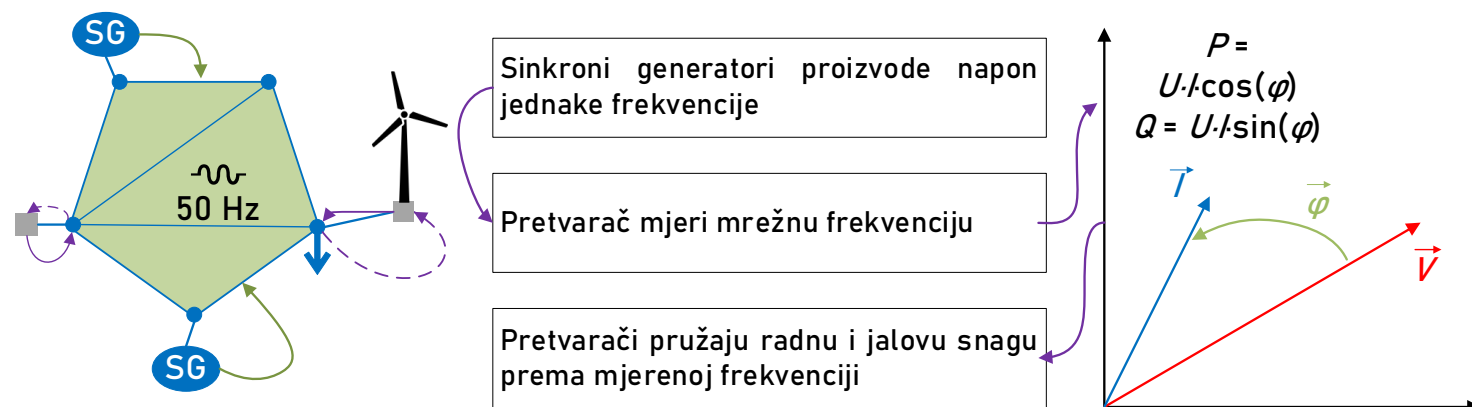
Izazovi u integraciji vjetroelektrana s aspekta dinamičke stabilnosti sustava

Nije sve u tromosti

Grid following vs. Grid forming

Način upravljanja pretvaračima bitan

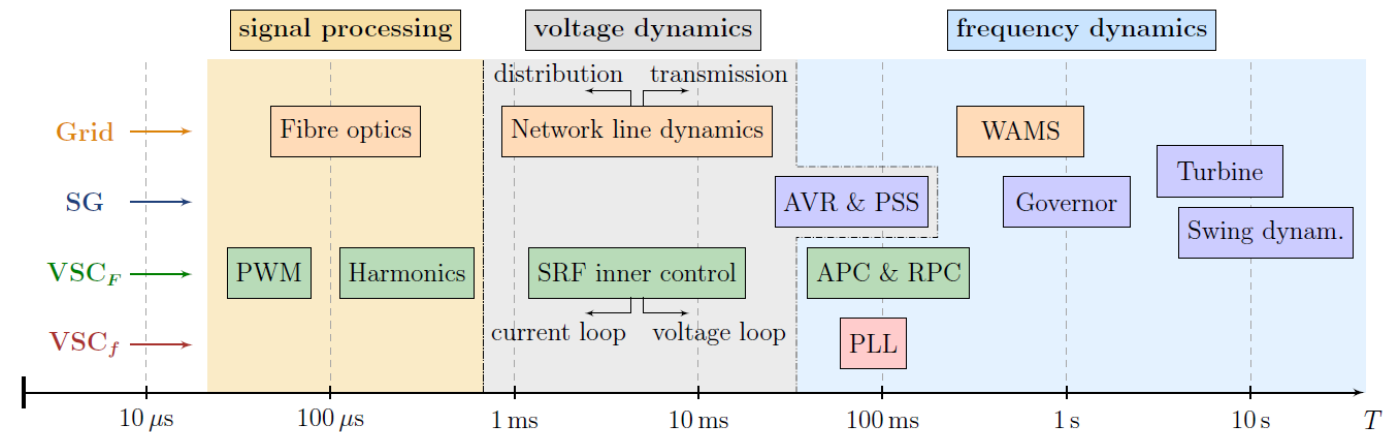
- Većina pretvarača u mreži su *grid-following* tipa – strujni izvori
- Vremenska kašnjenja
- Uređaji za sinkronizaciju
- Mogu pružati sinetičku tromost i usluge za regulaciju frekvencije, no nestabilan pogon pri većim udjelima u mreži
- Prelazak na *grid-forming* pretvarače – naponski izvori



Nove dinamičke interakcije

Istraživanja predviđaju da je pogon sustava sa 100% pretvarača izvediv – problem je tranzicija

- Interakcije između sinkronih generatora i pretvarača
- Interakcije između pretvarača međusobno
- Subsinkrone rezonancije
- Regulacija napona i jalove snage, prolazak kroz kvar



Markovic, Uros, et al. "Understanding Stability of Low-inertia Systems." engrXiv, 18 Feb. 2019. Web.

Publikacije

- [1] M. Beus, M. Krpan, I. Kuzle, H. Pandzic and A. Parisio, "A Model Predictive Control Approach to Operation Optimization of an Ultracapacitor Bank for Frequency Control," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, doi: 10.1109/TEC.2021.3068036.
- [2] M. Krpan, I. Kuzle, A. Radovanovic and J. V. Milanovic, "Modelling of Supercapacitor Banks for Power System Dynamics Studies," in *IEEE Transactions on Power Systems*, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3059954.
- [3] N. Holjevac, T. Baškarad, J. Đaković, M. Krpan, M. Zidar, and I. Kuzle, "Challenges of High Renewable Energy Sources Integration in Power Systems—The Case of Croatia," *Energies*, vol. 14, no. 4, p. 1047, Feb. 2021.
- [4] B. Barać, „Virtualni sinkroni generator“, diplomski projekt, FER, 2021.
- [5] M. Krpan and I. Kuzle, "Impact of Ultracapacitor Modelling on Fast Frequency Control Performance," *2020 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES)*, Perth, Australia, 2020, pp. 326–331, doi: 10.1109/SGES51519.2020.00064.
- [6] M. Beus, H. Pandžić, M. Krpan and I. Kuzle, "Korištenje modelskog prediktivnog upravljanja za optimizaciju pogona superkondenzatora u svrhu pružanja primarne regulacije frekvencije," in *14. simpozij o sustavu vođenja EES-a*, 2020, pp. 1–10.
- [7] J. Đaković, M. Krpan, P. Ilak, T. Baškarad, and I. Kuzle, "Impact of wind capacity share, allocation of inertia and grid configuration on transient RoCoF: The case of the Croatian power system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 121, p. 106075, Oct. 2020.
- [8] B. Barać, „Mikromreže izmjenične struje u otočnom pogonu“, diplomski seminar, FER, 2020.
- [9] M. Krpan and I. Kuzle, "Dynamic characteristics of virtual inertial response provision by DFIG-based wind turbines," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 178, p. 106005, Jan. 2020.
- [10] M. Krpan and I. Kuzle, "Coordinated Control of an Ultracapacitor Bank and a Variable-Speed Wind Turbine Generator for Inertial Response Provision During Low and Above Rated Wind Speeds," in *iSPEC 2019 – 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference: Grid Modernization for Energy Revolution, Proceedings*, 2019, pp. 1693–1698.
- [11] J. Dakovic, P. Ilak, T. Baskarad, M. Krpan, and I. Kuzle, "Effectiveness of Wind Turbine Fast Frequency Response Control on Electrically Distanced Active Power Disturbance Mitigation," in *11th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, 2018, pp. 1–7.
- [12] M. Krpan, I. Kuzle, and Y. Liu, "Analysing Frequency Support from DFIG-based Wind Turbines - Impact of Parameters and Initial Conditions," in *11th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, 2018, pp. 1–7.
- [13] M. Krpan and I. Kuzle, "Towards the New Low-Order System Frequency Response Model of Power Systems with High Penetration of Variable-Speed Wind Turbine Generators," in *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2018, pp. 1–5.
- [14] 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.
- [15] M. Krpan and I. Kuzle, "Sudjelovanje vjetroelektrana s promjenjivom brzinom vrtnje u primarnoj regulaciji frekvencije," in *13. savjetovanje HRO CIGRE*, 2017, pp. 1–10.
- [16] M. Krpan, "Koncept virtualne konstante tromosti i regulacija frekvencije u elektroenergetskim sustavima s visokom penetracijom obnovljivih izvora energije," in *HKIE 10. Dani inženjera elektrotehnike*, 2017, pp. 1–11.
- [17] M. Krpan and I. Kuzle, "Inertial and primary frequency response model of variable-speed wind turbines," *Publ. J. Eng.*, vol. 2017, no. 3, pp. 844–848, 2017.
- [18] M. Krpan and I. Kuzle, "Linearized model of variable speed wind turbines for studying power system frequency changes," in *17th IEEE International Conference on Smart Technologies, EUROCON 2017 – Conference Proceedings*, 2017, pp. 393–398.



Hvala!



WINDLIPS