

SEMINAR

Upravljanje naponom na sučelju prijenosne i distribucijske mreže

Uloga agregiranja u potpori upravljanja naponom

Dominik Maričević | CEO | Nano Energies Hrvatska d.o.o.

9. travnja 2026. | CIRED Seminar – Upravljanje naponom

Kontekst i motivacija: zašto naponska regulacija postaje ključan izazov

Distribuirani resursi transformiraju mrežu — klasična pasivna distribucija više nije dostatna

Rast OIE
fotonapon + vjetar

↑ **OIE**

Masovna integracija FN sustava uzrokuje naponske fluktuacije koje klasična mreža nije dimenzionirana apsorbirati

Nova opterećenja
punionice i toplinske pumpe

EV + HP

Lokalne naponske depresije — prostorno koncentrirane i teško predvidljive

Pasivna mreža
dopušteni naponski raspon

±10%

Distribucijska mreža dimenzionirana za jednosmjerni tok snage — bez aktivnog upravljanja fleksibilnošću naponi prelaze granice

Rješenje: agregiranje distribuiranih resursa kao aktivni STATCOM distribucijske mreže

BESS i FN inverteri kao distribuirani regulatori jalove snage • Koordinirano upravljanje naponom u realnom vremenu • Tržišno valorizirani Q-odgovor

Nano Energies: agregator distribuiranih resursa

Virtualna elektrana (VPP) kao model upravljanja distribuiranim resursima

- Osnivanje: 2008., Češka – 17 godina iskustva u agregiranju fleksibilnosti
- U vlasništvu Second Foundation-a, globalni otkupljivač i algo trader u 23 zemlje
- Tržišta: Češka (matično tržište), Hrvatska, Njemačka, Belgija, Rumunjska, Latvija, Japan
- RH: prva licencirana tvrtka za energetske djelatnosti agregiranja (HERA, 2022.)
- RH: prvi certificirani agregator za aFRR (sekundarna regulacija) – HOPS, 2024.
- Model rada: centralizirano upravljanje heterogenim portfeljem – jedan subjekt prema TSO/DSO
- Vlasnik hardware (RTU/REMS) i software (VPP platforma) – end-to-end rješenje

Portfelj: heterogeni resursi pod jednim upravljanjem

■ BESS – Baterijski sustavi

Odziv <100 ms • 4-kvadrantni izmjenjivači
Kapacitet: 1–10 MW • $Q \geq P$ raspon

■ EV punionice (dvosmjerne)

22–150 kW/uređaj • Q neovisna o P
V2G potencijal • $\cos \varphi \rightarrow 0$ moguće

■ Industrijski potrošači

Upravljanje opterećenjem • Korekcija $\cos \varphi$
Data centri, rashladni sustavi, backup generatori

■ FN elektrane

Q kapabilnost do ~30% P_{install} .
Izmjenjivač online i noću • Besplatna Q usluga

■ Kogeneracija / bioplin

Sinkroni generatori s AVR regulacijom
 $P+Q$ fleksibilnost • Stabilna proizvodnja

■ Agregirani portfelj = Virtualni SVC

Koordinirani Q odgovor iz cijele mreže
Kumulativni Q raspon: red veličine $Mvar$

Frekvencijske pomoćne usluge: što danas radimo

Aktivno sudjelujemo u svim razinama frekvencijske regulacije u RH

FCR

Primarna regulacija

< 30 s

odziv na Δf devijaciju

Automatski odgovor, proporcionalna regulacija

Signal: Δf [Hz] direktno od HOPS-a

Tržište: primarna frekvencijska regulacija

aFRR

Sekundarna regulacija

< 5 min

aktivacija

Integralna regulacijska petlja, HOPS
AGC koordinacija

Signal: AGC signal od HOPS-a

Tržište: sekundarna frekvencijska regulacija

mFRR

Tercijarna regulacija

< 12,5 min

mobilizacija resursa

Ručna aktivacija

Signal: aktivacijski nalog od HOPS-a

Tržište: tercijarna frekvencijska regulacija

Operativne kompetencije dokazane u praksi:

✓ SCADA integracija s HOPS-om u realnom vremenu
uspješno provedena

• Heterogeni portfelj (BESS / FN / EV / kogeneracija)

• Pretkvalifikacija HOPS-a

Tehnička infrastruktura: temelj je već uspostavljen

Arhitektura sustava za frekvencijske usluge – direktno primjenjiva za naponsku regulaciju:

- **RTU/REMS na lokaciji resursa:** mjerenje U, I, P, Q u realnom vremenu (perioda <math><1\text{ s}</math>), lokalna regulacija
- **Telekomunikacijska veza:** VPN/4G/5G, end-to-end latencija <math><500\text{ ms}</math> (tipično <math><100\text{ ms}</math>) – dostatno za naponsku regulaciju
- **VPP platforma:** centralni upravljački sustav, optimizacijski algoritmi, dispatcher portfelja
- **SCADA integracija:** verificirana veza s HOPS-om, proširiva prema HEP ODS-u (IEC 60870-5-104 / IEC 61968)
- **Prilagodba za naponsku regulaciju:** proširenje algoritama za Q-set-point dispečiranje – ne gradi se od nule

→ **Trošak prelaska na naponske usluge: pretežno softverski – hardverska infrastruktura je dostupna**

Od frekvencije do napona: prirodni korak

Ista infrastruktura • Isti resursi • Nova usluga → Minimalni dodatni trošak

Frekvencijsko upravljanje (P)

Regulirana veličina: f [Hz] – uniformna u sinkronoj zoni

Prostornost: Globalni fenomen sinkrone zone

Upravljanje: Aktivna snaga P [MW]

Upravljački signal: AGC od HOPS-a

Odziv: <30 s (FCR) / <5 min (aFRR)

✓ **Već uspostavljeno:** RTU, SCADA, VPP, AGC sučelje

Naponska regulacija (Q) → NOVO

Regulirana veličina: U [kV] – varira po sabirnicama i vodu

Prostornost: Lokalni fenomen – lokacija resursa bitna

Upravljanje: Jalova snaga Q [Mvar]

Upravljački signal: QPC od HOPS-a / ODS-a

Odziv: <200 ms (BESS/FN/EV)

➤ **Dodati:** Q dispečiranje u VPP + QPC sučelje

Fleksibilnost u četiri kvadranta: prednost heterogenog portfelja

Pokrivenost kvadranta po tehnologiji

Sinkroni generator



FV elektrana



Industrijski pogon



BESS inverter



Agregator s heterogenim portfeljem pokriva sve kvadrante → veća tržišna vrijednost od klasičnog pružatelja.

I. kvadrant

$$+P \cdot +Q$$

Produkcija + induktivno Q
 FV u overexcited modu

IV. kvadrant

$$+P \cdot -Q$$

Produkcija + kapacitivno Q
 BESS discharge + Q inject

II. kvadrant

$$-P \cdot +Q$$

Punjenje + induktivno Q
 BESS charge + Q absorb

III. kvadrant

$$-P \cdot -Q$$

Punjenje + kapacitivno Q
 EV + naponska potpora



STATCOM mod — ključna prednost BESS-a

Baterija isporučuje punu jalovu snagu dok je $P = 0$ — bez trošenja SoC.

Upravljačka petlja: koordinacija jalove snage u portfelju

1

TSO/DSO → VPP platforma: Q_{ref} [Mvar] regulacijski zahtjev šalje se agregatorovoj VPP platformi

2

VPP optimizacija: rješava raspodjelu Q_i po resursima uz min. gubitaka i poštivanje ograničenja

3

Dispečiranje set-point: Q vrijednosti na RTU/REMS svake lokacije u portfelju

4

Lokalna Q regulacija: izmjenjivač/AVR izvršava Q regulaciju (<100 ms za BESS/FN/EV)

5

Povratna telemetrija: Q_{actual} → VPP → usporedba s Q_{ref} → korekcija dispečiranja (zatvorena petlja)

→ *Prostorna dimenzija: udaljenost regulacijske jedinice od kritičnih sabirnica utječe na raspodjelu Q*

Kompensacija jalove snage — animacija u realnom vremenu

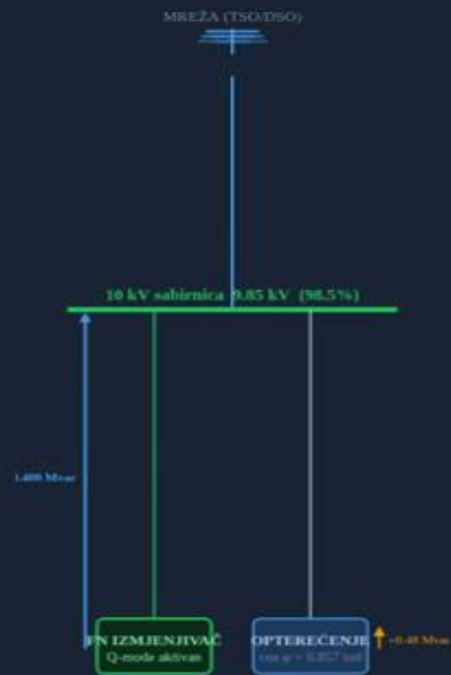
Scenarij: pad napona → detekcija (QPC) → FN izmjenjivač inektira Q kapacitivno → oporavak napona

Kompensacija jalove snage u realnom vremenu

Scenarij: pad napona na distributivnoj sabirnici → FN izmjenjivač inektira Q → oporavak napona

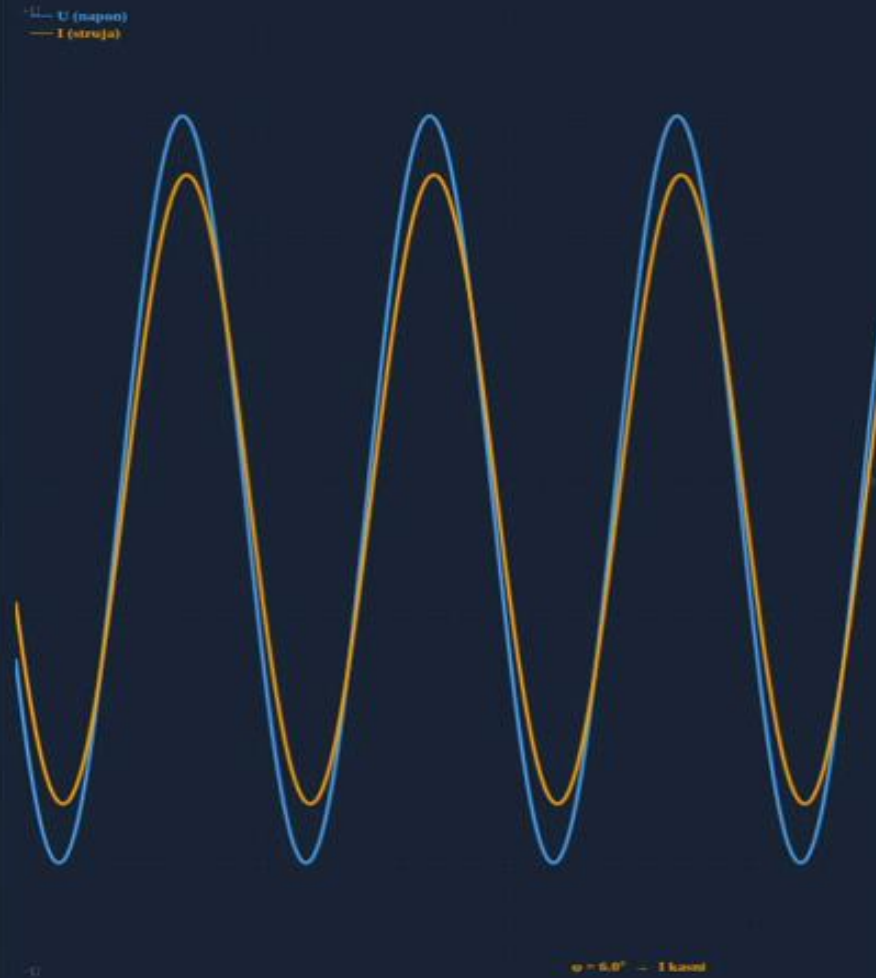
▶ Ponovi

JEDNOPOLNA SHEMA

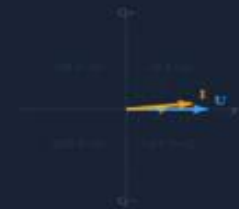


Neto Q = +0.084 Mvar (ind.)

VALNI OBLICI — NAPON U (PLAVA) I STRUJA I (NARANČASTA)



FAZORSKI DIJAGRAM



Q = +0.88 Mvar (ind.)

NAPON SABIRNICE

9.85 kV

AKTIVNA SNAGA P

+0.80 MW

JALOVA SNAGA Q
UKUPNA

+0.084 Mvar

PRIVIDNA SNAGA S

0.804 MVA

FAKTOR SNAGE $\cos \phi$

0.995 ind.

STATUS SUSTAVA

✓ Napon stabiliziran — jalova
kompensacija aktivna

Regulatorni okvir – prijenosna razina (HOPS)

Pravila o nefrekvencijskim pomoćnim uslugama za prijenosni sustav (HOPS, 12/2023):

- **Regulacija napona i jalove snage (VP):** proizvodnja/potrošnja jalove energije kao zaseban tržišni proizvod – tender/nabava
- **Kompenzacijski rad:** zasebni tržišni proizvod za Q/U regulaciju izvan standardnih ugovornih obveza
- **Nabava:** javno nadmetanje, pretkvalifikacijski postupak (dokaz tehničke osposobljenosti)
- **Tržišna situacija:** tržište funkcionira, ali dominiraju konvencionalni sudionici (hidroelektrane, termoelektrane), bilateralno ugovaranje, cijene prema metodologiji HERA-e
- **Ograničenje:** agregatori distribuiranih resursa (DER) nisu eksplicitno adresirana kategorija sudionika
- **Indikativni uvjeti za 2026.:** definirani po tehnologiji i području rada – otvara prostor za DER sudelovanjem

Regulatorni okvir – distribucijska razina (HEP ODS)

Mrežna pravila distribucijskog sustava (NN 74/2018, izmj. 52/2020):

- Kategorija pružatelja pomoćnih usluga prepoznata je na distribucijskoj razini
- Zahtjevi priključenja: $\cos \varphi \geq 0,85$ ind./kap. – postavljeni, ali u praksi su pasivni (kazna, ne tržište)
- Reaktivna energija: obračunska stavka (naknada za prekoračenje), ne tržišni proizvod

Što nedostaje na distribucijskoj razini:

- Nema definiranih tržišnih proizvoda fleksibilnosti (Q usluge) na distribucijskoj razini
- Nema mehanizama nabave (pilot projekata ni standardnih postupaka)
- Nema transparentnih cijena i signala vrijednosti za pružatelje fleksibilnosti
- **Referenca EU:** BE/NL/DE distributeri već nabavljaju lokalnu Q fleksibilnost – HR slijedi

Regulacija jalove snage i napona: verificirani EU primjeri

Dimenzija	Ujedinjeno Kraljevstvo National Grid ESO — TSO	Belgija Elia — TSO	Njemačka 50Hertz / sva 4 TSO-a
Platforma	Enhanced Reactive Power Service (ERPS)	Voltage Service — MVAR Service	Reactive Power Market (50Hertz)
Pokrenuto	2018. (Pathfinder) standardizirano 2022.	2020.–2021. tender ciklusi od tada	1. travnja 2025. test tender sijecanj 2025.
Usluge	Q kapacitivna + induktivna 10-god. ugovori; lok. spec. po regijama 3 cjenovne komponente: dostupnost / sinkronizacija / aktivacija	Q kapacitivna + induktivna Kompenzacija po isporučenim MVARh Asimetrične cijene: injekcija ≠ apsorpcija Godišnji tender ciklus (CREG nadzor)	Q kapacitivna + induktivna 5 regionalnih nabavnih zona Zamjena bilateralnih ugovora Transparentne tržišne cijene
Agregatori DER	✓ Da — BESS, vjetar, FN	✓ Da — VPP agregatori, BESS	✓ Da — FN, vjetar, BESS, elektrolizatori
Rezultati	>700 MVAR ugovoreno (Pennines / N. England tender) ~£0,39/MVAR/h dostupnosti Dogger Bank: 1. offshore Q ugovor	Tender 2025–26: zatvoren Tender 2027–28: u pripremi (III/2025) MVAR Evolutions projekt u tijeku CREG odobrava metodologiju	Puna tržišna zamjena VII/2025 Witznitz FN (600 MW) već sudjeluje Sva 4 njem. TSO-a obvezna OIE eksplicitno uključena u tenderski okvir

Zajednički nazivnik: sve tri zemlje imaju TSO-razinsku nabavu Q usluga eksplicitno otvorenu za agregatore i OIE inverterske resurse

Tržišna realnost: gap analiza – TSO vs. DSO razina

Kratkoročna prilika: TSO razina (sada aktiv.) • Dugoročna strategija: razvoj DSO tržišta fleksibilnosti

Dimenzija	⚡ TSO razina (HOPS)	📍 DSO razina (HEP ODS)
Regulatorni okvir	✓ Definiran (NPU Pravila 12/2023)	⚠ Djelomičan (Mrežna pravila distribucijskog sustava)
Tržišni mehanizmi	✓ Tender i javno nadmetanje	✗ Ne postoje
Agregatori DER	⚠ Nisu eksplicitno adresirana	✗ Nisu adresirana
Tržišna aktivnost	✓ Aktivna (HE i TE dominiraju)	✗ Neaktivna, tržište u razvoju
Signal vrijednosti	✓ Definiran tenderom	✗ Ne postoji (Q = kazna, ne nagrada)

Koraci do komercijalizacije: od demonstracije do tržišta

► Tehnički koraci

1. VPP nadogradnja

Q-set-point dispečiranje, mrežno svjesni algoritam raspodjele

2. Pilot projekt s HEP ODS

Demonstracija Q regulacije na 10/0,4 kV razini

3. Pretkvalifikacija HOPS-a

Verifikacijska mjerenja, pretkvalifikacijski postupak za naponsku uslugu

► Regulatorni koraci

1. Inicijativa HOPS-u

Eksplicitno adresiranje DER agregata u NPU Pravilima kao pružatelja VP usluge

2. Dijalog s HERA-om

Regulatorni okvir za distribucijsku fleksibilnost, Q usluge na DSO razini

3. EU benchmark

Belgijsko/Nizozemski DSO model nabave lokalne fleksibilnosti – referenca za HR

► Komercijalni koraci

1. Ugovorna struktura

SLA za Q uslugu s HEP ODS, kapacitivno plaćanje

2. Poslovni model

Naknada za isporučeni Mvarh, nagradni mehanizam, hibridni prihod

3. Hibridni prihod

TSO tender (HOPS) + DSO lokalna naponska podrška (HEP ODS)

Zaključak: agregator kao most između TSO-a i DSO-a

Tehničke kompetencije za naponsku regulaciju već postoje u frekvencijskim agregatima – potrebne su ciljane nadogradnje

Portfelj s 4-kvadrantnom kapabilnošću – relevantan sudionik za TSO i DSO istovremeno

Regulatorni okvir: TSO razina funkcionira (prostora za DER), DSO razina – u nastajanju

Agregatori DER trebaju biti eksplicitno adresirana kategorija u NPU Pravilima HOPS-a

Iskusni agregatori s dokazanom frekvencijskom referencom – idealni partneri za razvoj tržišta

Poziv na suradnju:

- Suradnja TSO – DSO – agregator u oblikovanju tržišnih pravila koja uključuju DER
- Nano Energies: spremni za pilot projekt na prijenosnoj i distribucijskoj razini u RH

Hvala na pažnji!

dominik.maricevic@nanoenergjes.hr | Nano Energjes Hrvatska d.o.o.