

Primjena algoritama (optimalnih) tokova snaga u naprednim analizama distribucijskih mreža

Tomislav Antić

Zavod za visoki napon i energetiku

Fakultet elektrotehnike i računarstva

Sveučilište u Zagrebu

Ovaj rad su sufinancirali Hrvatska zaklada za znanost i HEP
Operator distribucijskog sustava d.o.o. projektom IMAGINE –
Inovativni modeli i laboratorijski testirana rješenja za sljedeću
generaciju distribucijskih mreža (PAR-2018)

Sadržaj

- Uvod
- OPF modeli u OPS/ODS koordinaciji
- Trofazni OPF modeli
- (O)PF modeli u analizi kvalitete električne energije
- OPF modeli – usklađenost sa standardima
- Zaključak

Uvod

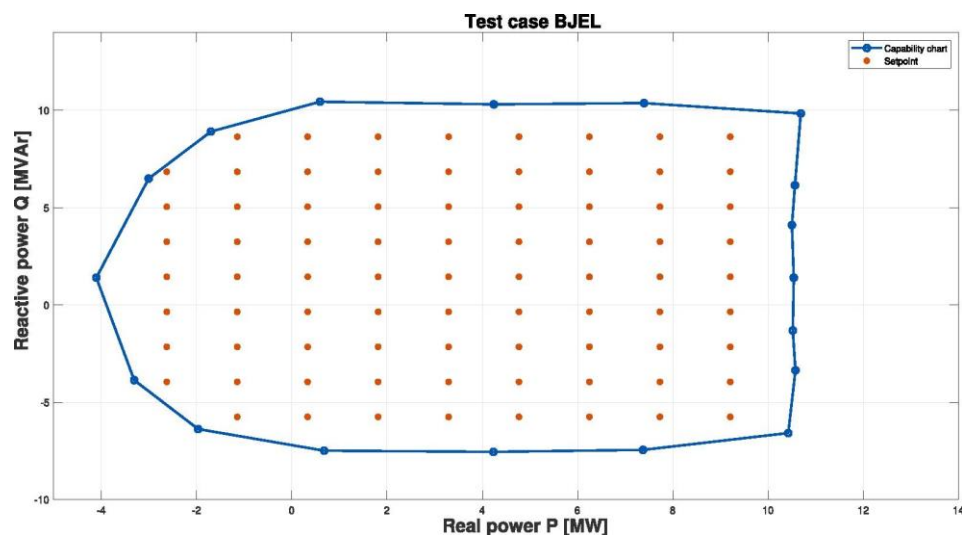
- Proračun tokova snaga jedan je od osnovnih proračuna u elektroenergetskom sustavu
- U brojnim planskim i operativnim problemima koristi se formulacija optimalnih tokova snaga
- Novi entiteti u elektroenergetskom sustavu, a posebice u distribucijskim mrežama stvaraju zahtjeve za proširenjem postojećih modela
- Promjene dovode do potrebe za razvojem novih alata i modela koji će omogućiti napredne tehničke analize u distribucijskim mrežama

OPF modeli u OPS/ODS koordinaciji (1)

- Promjene u elektroenergetskom sustavu utječu na operatore prijenosnog i operacijskog sustava
- Promjena radnih točaka uređaja u vlasništvu operatora distribucijskog sustava stvara fleksibilnost na sučelju prijenosnog i operacijskog sustava
- Uređaji koji mogu pružiti QU regulaciju:
 - OLTC transformatori
 - Kondenzatori
 - Distribuirani izvori energije
- Predloženi algoritam određuje krivulju radnih točaka (područje rada) koju ODS može postići na sučelju s OPS-om
- Osiguravanje potrebne fleksibilnosti

OPF modeli u OPS/ODS koordinaciji (2)

- ODS osigurava promjenu radne i jalove snaga uređaja u odnosu na prethodnu radnu točku
- Prelazak u novu radnu točku predstavlja fleksibilnost koju ODS može pružiti OPS-u



Slika 1. Krivulja sa svim mogućim radnim točkama

M. Bolfek and T. Capuder, "An analysis of optimal power flow based formulations regarding DSO-TSO flexibility provision," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*

(O)PF - kvaliteta električne energije (1)

- Niskouguljične tehnologije instalirane u distribucijskim mrežama kreiraju nove tehničke izazove
- Prenaponi i podnaponi uzrokovani nekoordiniranom integracijom fotonaponskih panela, punionica električnih vozila itd.
- Često su na mrežu spojeni uređajima energetske elektronike → harmoničko izobličenje
- Jednofazno spojeni na mrežu, kao i većina uređaja krajnjih korisnika → naponska nesimetrija
- Potreba za razvojem novih alata koji će u obzir uzeti promjene u modelima uzrokovane priključenjem niskouguljičnih tehnologija

OPF – trofazni model

- Određeni fizikalni zakoni vrijede za osnovni i za sve više harmonike:
 - Pad napona (1)-(2)
 - Tokovi snaga (3)-(4)
 - Kirchoffov zakon struja (5)-(6)

$$U_{j,p,h,t}^{Re} = U_{j,p,h,t}^{Re} - \sum_{q \in \{a,b,c\}} R_{ij,pq,h} \cdot I_{ij,q,h,t}^{Re} + \sum_{q \in \{a,b,c\}} X_{ij,pq,h} \cdot I_{ij,q,h,t}^{Im} \quad (1)$$

$$U_{j,p,h,t}^{Im} = U_{j,p,h,t}^{Im} - \sum_{q \in \{a,b,c\}} R_{ij,pq,h} \cdot I_{ij,q,h,t}^{Im} - \sum_{q \in \{a,b,c\}} X_{ij,pq,h} \cdot I_{ij,q,h,t}^{Re} \quad (2)$$

$$P_{ij,p,h,t} = U_{i,p,h,t}^{Re} \cdot I_{ij,p,h,t}^{Re} + U_{i,p,h,t}^{Im} \cdot I_{ij,p,h,t}^{Im} \quad (3)$$

$$Q_{ij,p,h,t} = U_{i,p,h,t}^{Im} \cdot I_{ij,p,h,t}^{Re} - U_{i,p,h,t}^{Re} \cdot I_{ij,p,h,t}^{Im} \quad (4)$$

$$I_{i,p,h,t}^{Re} gen + I_{h \rightarrow i,p,h,t}^{Re} = I_{i,p,h,t}^{Re} load + I_{i \rightarrow j,p,h,t}^{Re} \quad (5)$$

$$I_{i,p,h,t}^{Im} gen + I_{h \rightarrow i,p,h,t}^{Im} = I_{i,p,h,t}^{Im} load + I_{i \rightarrow j,p,h,t}^{Im} \quad (6)$$

OPF – viši harmonici

- Izvori viših harmonika definirani su kao strujni izvori
 - $i_{n,p,s,h,t}$ – udio struje višeg harmonika h u struji osnovnog harmonika
 - $\theta_{n,a,s,h,t}$ – kut struje višeg harmonika h

$$I_{n,p,s,h,t} = I_{n,p,s,1,t} \cdot i_{n,p,s,h,t} \angle \phi_{n,p,s,h,t} \quad (7)$$

$$\phi_{n,a,s,h,t} = h \cdot \theta_{n,a,s,h,t}, \forall h \quad (8)$$

$$\phi_{n,b,s,h,t} = \begin{cases} h \cdot \theta_{n,b,s,h,t}, h = 3 \cdot m \\ h \cdot \theta_{n,b,s,h,t} + 240^\circ, h = 3 \cdot m + 1 \\ h \cdot \theta_{n,b,s,h,t} + 120^\circ, h = 3 \cdot m + 2 \end{cases} \quad (9)$$

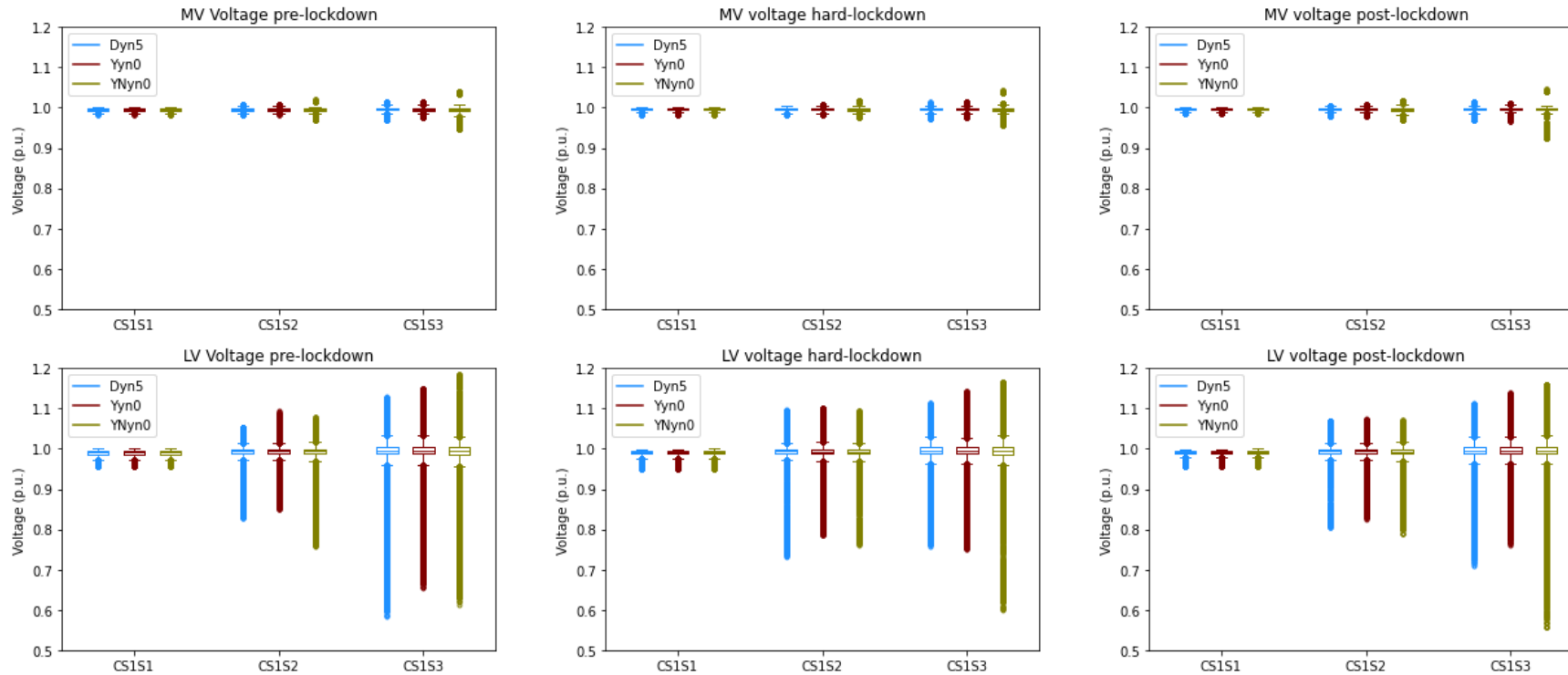
$$\phi_{n,c,s,h,t} = \begin{cases} h \cdot \theta_{n,c,s,h,t}, h = 3 \cdot m \\ h \cdot \theta_{n,c,s,h,t} + 120^\circ, h = 3 \cdot m + 1 \\ h \cdot \theta_{n,c,s,h,t} + 240^\circ, h = 3 \cdot m + 2 \end{cases} \quad (10)$$

$$I_{n,p,h,t} = \sum_{s \in S} I_{n,p,s,h,t} \quad (11)$$

Studija slučaja – kvaliteta električne energije

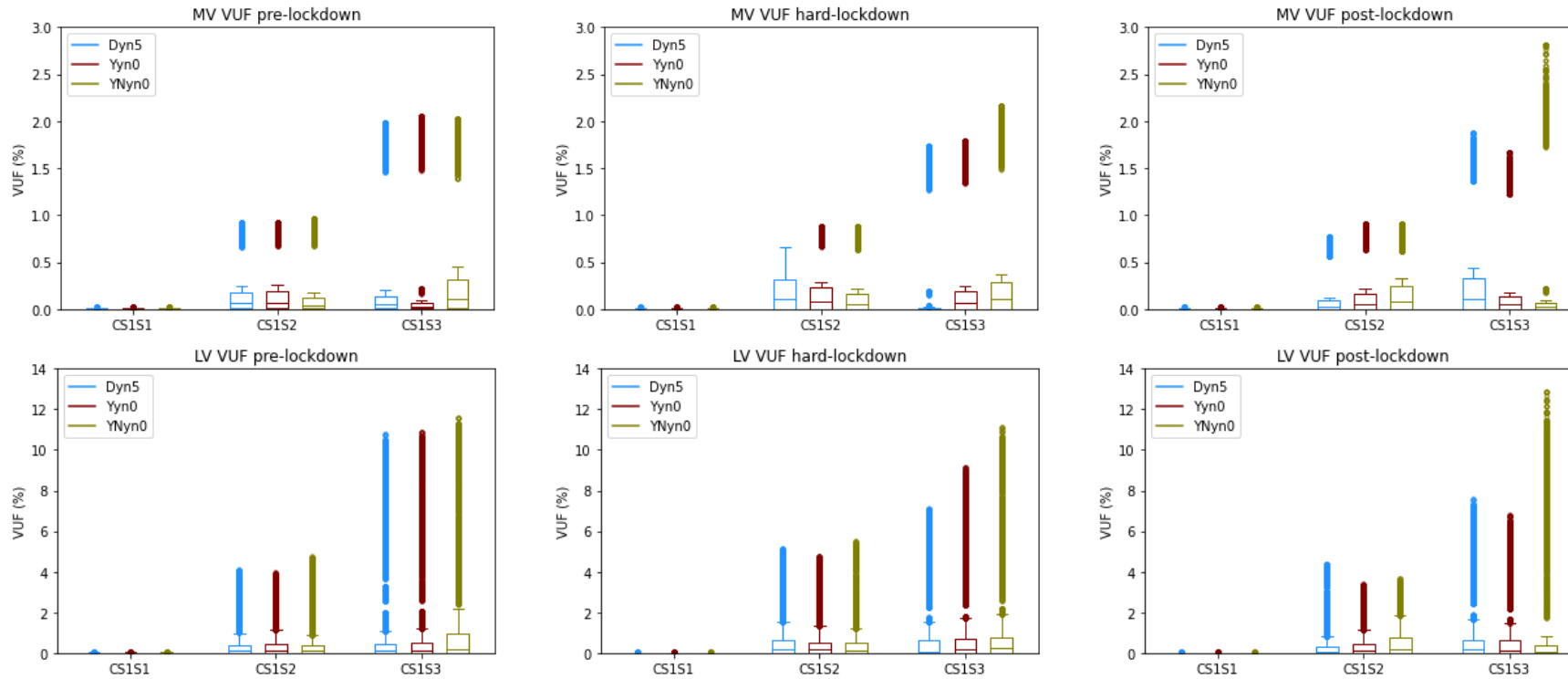
- Razvijeni model korišten je u analizi utjecaja niskougličnih tehnologija i pandemije koronavirusa na pokazatelje kvalitete električne energije
- Analiza širenja smetnji iz NN u SN mrežu ovisno o grupi spoja
- Tri scenarija:
 - Pre-lockdown (S1)
 - Lockdown (S2)
 - Post-lockdown (S3)
- 5 slučajeva:
 - CS1 – bez niskougličnih tehnologija
 - CS2 – PV i EV u 20% čvorišta
 - CS3 – PV i EV u 40% čvorišta
 - CS4 – PV i EV u 60% čvorišta
 - CS5 – PV i EV u 80% čvorišta

Rezultati – napon osnovnog harmonika



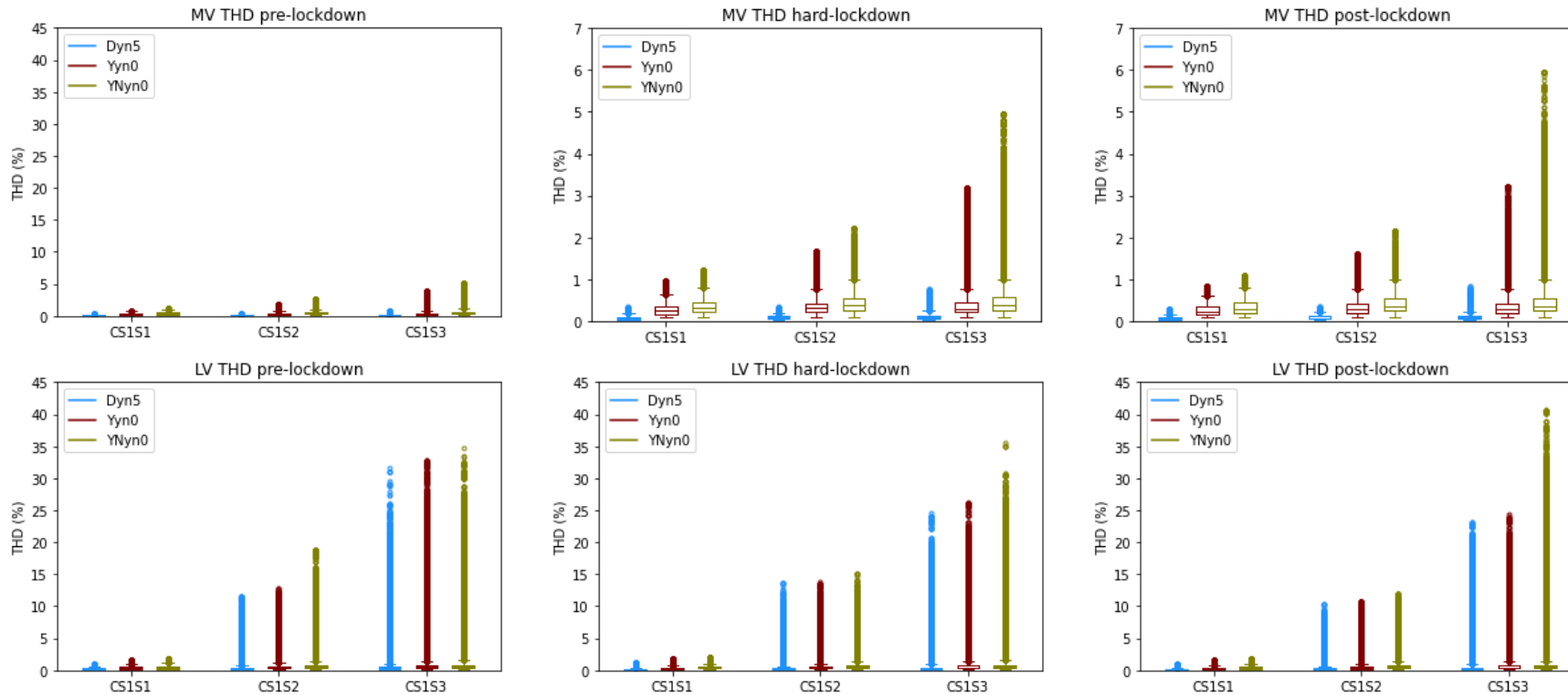
Slika 2. Iznos napona (p.u.)

Rezultati – naponska nesimetrija



Slika 3. Iznos naponske nesimetrije (%)

Rezultati – THD



Slika 4. Iznos THD-a (%)



Studija slučaja – mrežni gubici (1)

- Nekoordinirana integracija niskougličnih tehnologija može uzrokovati povećanje mrežnih gubitaka
- Pandemija koronavirusa i promjena ponašanja krajnjih korisnika (rad od kuće) povećava potrošnju, a posljedično i gubitke u NN mrežama
- Rast cijena električne energije na tržištima predstavlja problem zbog rasta cijena mrežnih gubitaka
- Analiza mogućnosti smanjenja mrežnih gubitaka:
 - Povećanje presjeka vodova – Metoda 1
 - Simetriranje tereta – Metoda 2
 - Promjena faze priključka terete – Metoda 3
 - QU regulacija – Metoda 4

Studija slučaja – mrežni gubici (2)

- 5 slučajeva:
 - CS1 – bez niskougličnih tehnologija
 - CS2 – PV, EV i toplinska pumpa u 20% čvorišta
 - CS3 – PV, EV i toplinska pumpa u 40% čvorišta
 - CS4 – PV, EV i toplinska pumpa u 60% čvorišta
 - CS5 – PV, EV i toplinska pumpa u 80% čvorišta

		Početno	Metoda 1	Metoda 2	Metoda 3	Metoda 4
CS1	Pre-lockdown	621.698	-	-	-	-
	Lockdown	622.900	-	-	-	-
	Post-lockdown	558.430	-	-	-	-
CS2	Lockdown	610.700	450.878	602.368	605.779	731.899
CS3		609.238	450.815	601.963	605.468	731.913
CS4		608.820	450.689	602.016	605.229	731.906
CS5		609.548	450.722	602.431	605.656	731.95

Tablica 1. Mrežni gubici (kWh) – tjedan dana

Studija slučaja – mrežni gubici (2)

Tablica 2. Trošak mrežnih gubitaka (€) – CROPEX DA cijene u pandemijskom razdoblju

	Početno	Metoda 1	Metoda 2	Metoda 3	Metoda 4
CS1	14,494	-	-	-	-
CS2	13,569	9,823	13,336	13,458	16,061
CS3	13,541	9,849	13,338	13,418	16,064
CS4	13,533	9,838	13,320	13,390	16,079
CS5	13,542	9,837	13,315	13,381	16,071

Tablica 3. Trošak mrežnih gubitaka (€) – CROPEX DA cijene u 6. mj. 2022.

	Početno	Metoda 1	Metoda 2	Metoda 3	Metoda 4
CS1	194,276	-	-	-	-
CS2	185,484	135,688	183,612	184,663	221,477
CS3	185,095	135,771	183,632	184,532	221,632
CS4	184,988	135,794	183,607	184,524	221,650
CS5	185,167	135,788	183,479	184,680	221,505

OPF – kvaliteta električne energije (2)

- Problemi s naponskom nesimetrijom i harmoničkim izobličenjem
- Povećani mrežni gubici
- Ograničenja kvalitete električne energije je potrebno dodati u OPF formulaciju
- Norme i mrežna pravila: pokazatelji kvalitete električne energije moraju biti u dozvoljenom intervalu u 95% 10-minutnih intervala tijekom jednog tjedna
- OPF je formuliran kao *non-linear programming* (NLP) model
- Usklađenost s normama postiže se korištenjem binarnih varijabli
- Istraživanje pristupa koji bi eliminirao binarne varijable i ubrzao vrijeme izvođenja

OPF – usklađenost sa standardima (1)

- Napon osnovnog harmonika

$$U_{n,p,1,t}^{Re} \cdot U_{n,p,1,t}^{Re} + U_{n,p,1,t}^{Im} \cdot U_{n,p,1,t}^{Im} \geq x_{vol\ 1,n,p,1,t} \cdot \underline{U}^2 \quad (12)$$

$$x_{vol\ 1,n,p,1,t} \cdot (U_{n,p,1,t}^{Re} \cdot U_{n,p,1,t}^{Re} + U_{n,p,1,t}^{Im} \cdot U_{n,p,1,t}^{Im}) \leq \bar{U}^2 \quad (13)$$

$$U_{n,p,1,t}^{Re} \cdot U_{n,p,1,t}^{Re} + U_{n,p,1,t}^{Im} \cdot U_{n,p,1,t}^{Im} \geq x_{vol\ 2,n,p,1,t} \cdot \bar{U}^2 \quad (14)$$

$$x_{vol\ 3,n,p,1,t} \cdot (U_{n,p,1,t}^{Re} \cdot U_{n,p,1,t}^{Re} + U_{n,p,1,t}^{Im} \cdot U_{n,p,1,t}^{Im}) \leq \underline{U}^2 \quad (15)$$

$$x_{vol\ 1,n,p,1,t} + x_{vol\ 2,n,p,1,t} + x_{vol\ 3,n,p,1,t} \leq 1 \quad (16)$$

$$\sum_{t \in T} x_{vol\ 1,n,p,1,t} \geq 0.95 \cdot |T| \quad (17)$$

OPF – usklađenost sa standardima (2)

- Naponska nesimetrija

$$\begin{aligned} x_{VUF\ 1,n,t} \cdot (U_{n,a,t} + a^2 \cdot U_{n,b,t} + a \cdot U_{n,c,t}) \\ \leq \overline{VUF}^2 \cdot (U_{n,a,t} + a \cdot U_{n,b,t} + a^2 \cdot U_{n,c,t}) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} (U_{n,a,t} + a^2 \cdot U_{n,b,t} + a \cdot U_{n,c,t}) \\ \geq x_{VUF\ 2,n,t} \cdot \overline{VUF}^2 \cdot (U_{n,a,t} + a \cdot U_{n,b,t} + a^2 \cdot U_{n,c,t}) \end{aligned} \quad (19)$$

$$x_{VUF\ 1,n,t} + x_{VUF\ 2,n,t} \leq 1 \quad (20)$$

$$\sum_{t \in T} x_{VUF\ 1,n,t} \geq 0.95 \cdot |T| \quad (21)$$

OPF – usklađenost sa standardima (3)

- Harmoničko izobličenje

$$x_{THD\ 1,n,p,t} \cdot \sum_{h \in H \setminus \{1\}} |U_{n,p,h,t}|^2 \leq \overline{THD}^2 \cdot |U_{n,p,1,t}|^2 \quad (22)$$

$$\sum_{h \in H \setminus \{1\}} |U_{n,p,h,t}|^2 \geq x_{THD\ 2,n,p,t} \cdot \overline{THD}^2 \cdot |U_{n,p,1,t}|^2 \quad (23)$$

$$x_{THD\ 1,n,p,t} + x_{THD\ 2,n,p,t} \leq 1 \quad (24)$$

$$\sum_{t \in T} x_{THD\ 1,n,p,1,t} \geq 0.95 \cdot |T| \quad (25)$$

OPF – bez binarnih varijabli (1)

- Napon osnovnog harmonika

$$\underline{U}^2 \leq |U_{n,p,1,t}| + \delta_{vol\ n,p,1,t}^- - \delta_{vol\ n,p,1,t}^+ \leq \overline{U}^2 \quad (26)$$

$$\underline{U}^2 \leq |U_{n,p,1,t}| + \delta_{vol\ n,p,1,t}^- \quad (27)$$

$$|U_{n,p,1,t}| + \delta_{vol\ n,p,1,t}^+ \leq \overline{U}^2 \quad (28)$$

$$\delta_{vol\ n,p,1,t}^-, \delta_{vol\ n,p,1,t}^+ \geq 0 \quad (29)$$

- Naponska nesimetrija

$$VUF_{n,t} - \overline{VUF} \leq \delta_{VUF\ n,t} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} & (U_{n,a,t} + a^2 \cdot U_{n,b,t} + a \cdot U_{n,c,t}) \\ & \leq (\delta_{VUF\ n,t} + \overline{VUF}) \cdot (U_{n,a,t} + a^2 \cdot U_{n,b,t} + a \cdot U_{n,c,t}) \end{aligned} \quad (31)$$

$$\delta_{VUF\ n,t} \geq 0 \quad (32)$$

OPF – bez binarnih varijabli (2)

- Napon osnovnog harmonika

$$THD_{n,t} - \overline{THD} \leq \delta_{THD\ n,t} \quad (33)$$

$$\sum_{h \in H \setminus \{1\}} |U_{n,p,h,t}|^2 \leq (\delta_{THD\ n,p,t} + \overline{THD}) \cdot |U_{n,p,1,t}|^2 \quad (34)$$

$$\delta_{THD\ n,p,t} \geq 0 \quad (35)$$

- Određivanje μ

- Obj^{max} – maksimalna teorijska vrijednost funkcije cilja
- δ_{accept} – dozvoljeno odstupanje

$$\mu_{vol} = \frac{Obj^{max}}{\delta_{vol\ accept}} \quad (36)$$

$$\mu_{vol} = \frac{Obj^{max}}{\delta_{VUF\ accept}} \quad (37)$$

$$\mu_{vol} = \frac{Obj^{max}}{\delta_{THD\ accept}} \quad (38)$$

OPF – bez binarnih varijabli (3)

- Funkcija cilja

$$\begin{aligned} \min P_{loss} + \mu_{vol} \cdot \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} [\delta_{vol\ n,p,1,t}^- + \delta_{vol\ n,p,1,t}^+] + \mu_{VUF} \\ \cdot \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} \delta_{VUF\ n,t} + \mu_{THD} \cdot \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \delta_{THD\ n,p,t} \end{aligned} \quad (39)$$

Zaključak

- Nekoordinirana integracija niskougličnih tehnologija dovodi do tehničkih problema u mrežama
 - Pokazatelji kvalitete električne energije
 - Mrežni gubici
- Potreba za korištenjem OPF algoritama
- Usklađenost s normama i mrežnim pravilima
- Potencijalna primjena u određivanju :
 - maksimalnog instalacijskog kapaciteta niskougličnih tehnologija
 - optimalne krivulje punjenja EV-a
 - potencijalnih lokacija uređaja za poboljšanje tehničkih prilika
 - potrebna fleksibilnost krajnjih korisnika
 - itd.

Bibliografija

- M. Bolfek and T. Capuder, "An analysis of optimal power flow based formulations regarding DSO-TSO flexibility provision," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 131, p. 106935, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106935>.
- T. Antić, L. Thurner, T. Capuder, and I. Pavić, "Modeling and open source implementation of balanced and unbalanced harmonic analysis in radial distribution networks," *Electric Power Systems Research*, vol. 209, p. 107935, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2022.107935>.
- T. Antić and T. Capuder, "Analysis of power quality concerning COVID-19-related anomalies and integration of distributed energy resources," *2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP)*, 2022, pp. 1-6, doi: [10.1109/ICHQP53011.2022.9808683](https://doi.org/10.1109/ICHQP53011.2022.9808683).
- 24 ▪ T. Antić and T. Capuder, "Utilization of physical devices for the improvement of power quality indicators during the COVID-19 pandemic and uncoordinated integration of low carbon units," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 32, p. 100926, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100926>.
- T. Antić, A. Nouri, A.Keane, T. O'Donnell and T. Capuder, "Mathematical model of three-phase OPF formulation with added harmonic constraints", *radna verzija*



Hvala na pozornosti

Ovaj rad su sufinancirali Hrvatska zaklada za znanost i HEP Operator distribucijskog sustava d.o.o. projektom IMAGINE – Inovativni modeli i laboratorijski testirana rješenja za sljedeću generaciju distribucijskih mreža (PAR-2018)