

SEMINAR

Upravljanje naponom na sučelju prijenosne i distribucijske mreže

Mogućnosti aktivnih kupaca u regulaciji napona distribucijske mreže

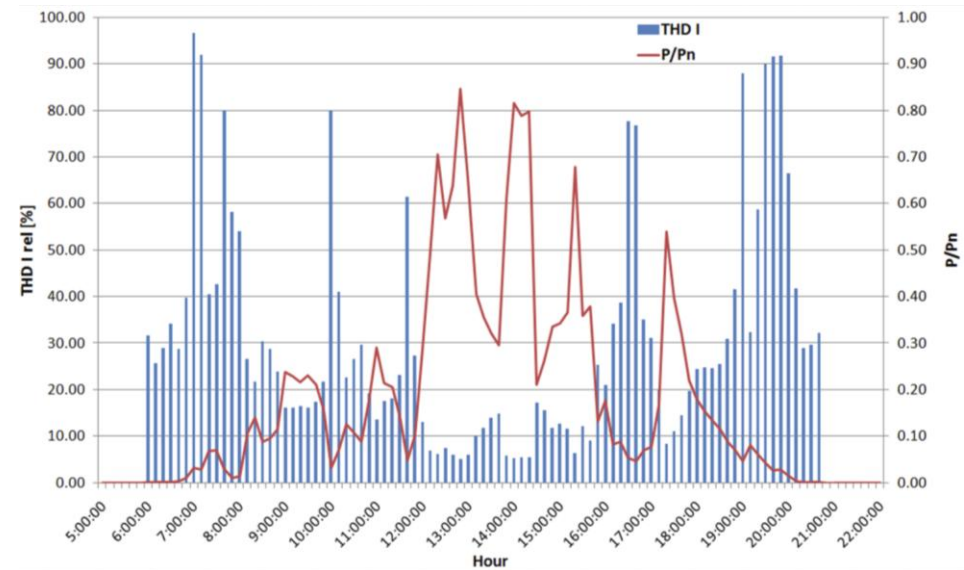
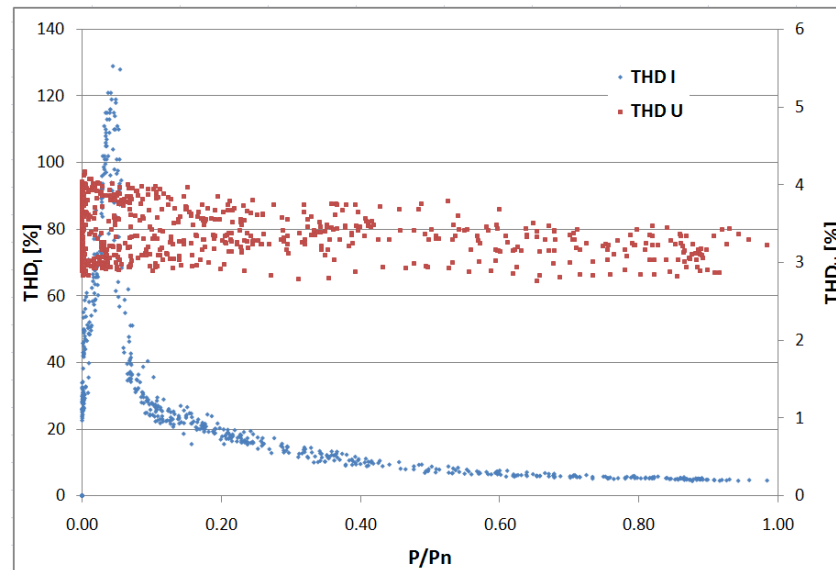
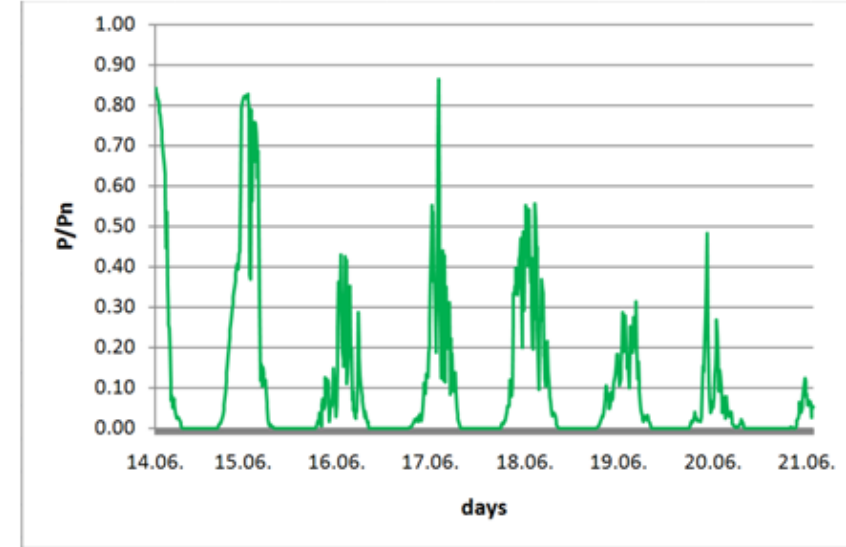
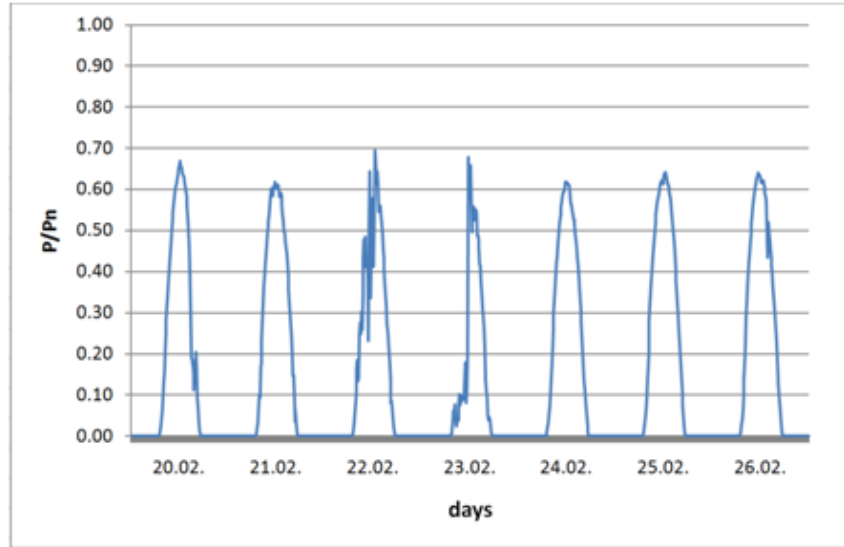
Prof.dr.sc. Krešimir Fekete

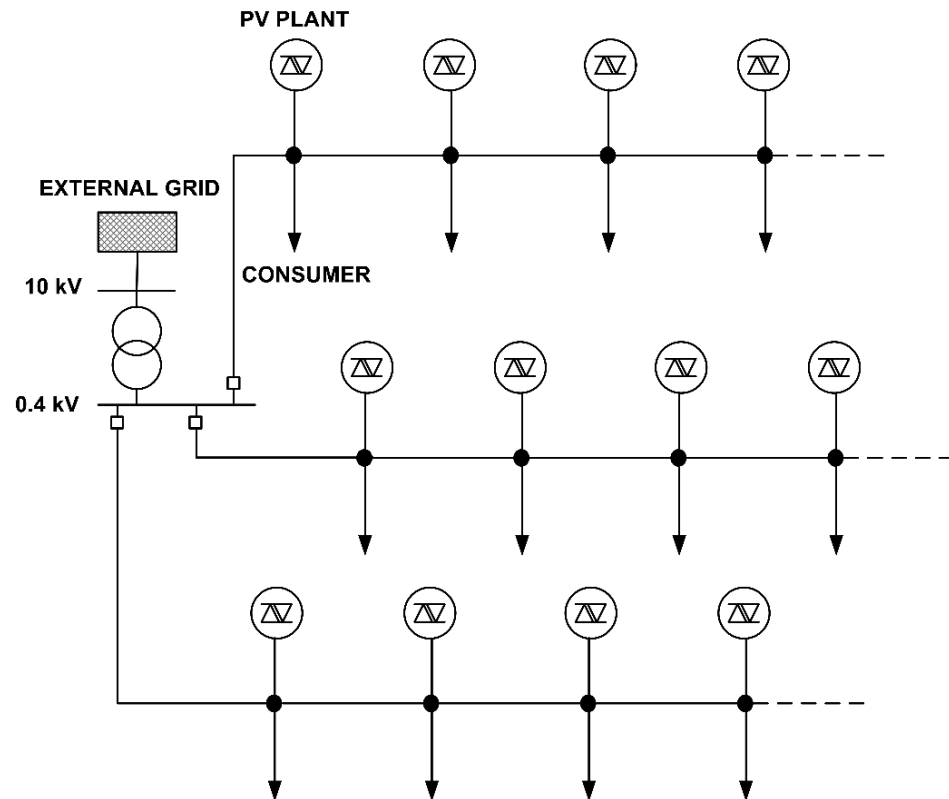
Upravljanje naponom na sučelju prijenosne i distribucijske mreže



- Doktorirao 2013 sa temom: Modeliranje rada hidroelektrana uz utjecaj vjetroelektrana i upravljanje zagušenjima (mentor prof.dr.sc. Srete Nikolovski)
- Nastava: Analiza elektroenergetskog sustava, Prijenos i distribucija električne energije, Tržište električne energije i Osnove elektroenergetskog sustava
- Znanstveno istraživački rad: Analiza elektroenergetskog sustava (tokovi snaga i kratki spojevi), optimizacija elektroenergetske mreže, tržište električne energije

Fotonaponska elektrana



**Table 4**

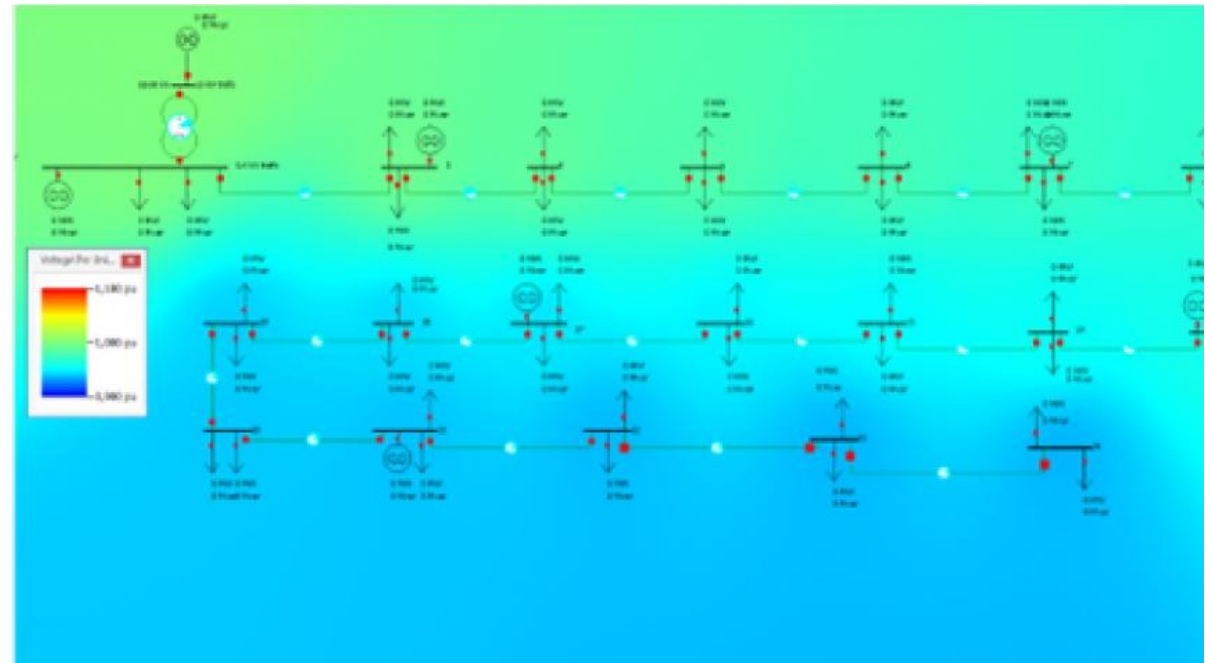
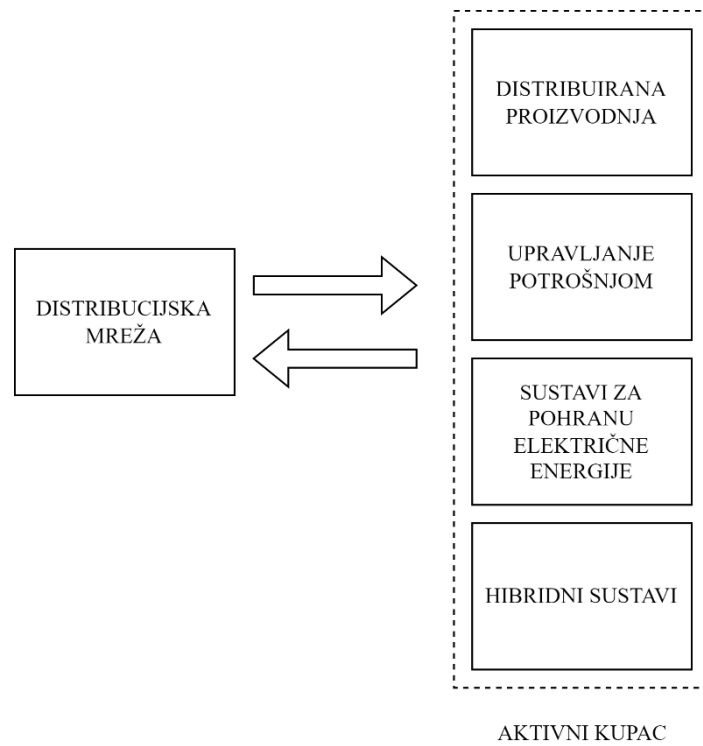
THD_U at the PCC obtained from the simulation of all scenarios and variants.

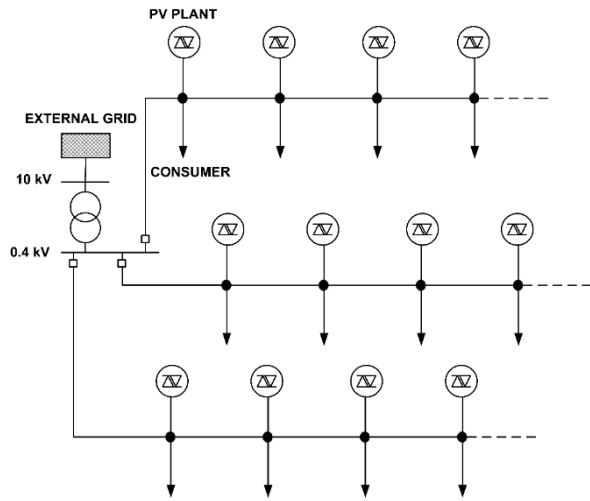
	Scenario/variant			
	Sc. 1	Sc. 2	Sc. 3/var. 1	Sc. 3/var. 2
THD _U at PCC (%)	1.00	2.71	2.46	3.66
V _{PCC(1)} (V _{rms})	230.9	230.7	227.2	227
V _{PCC(3)} (V _{rms})	0.08	0.22	0.80	0.78
V _{PCC(5)} (V _{rms})	1.09	3.10	1.70	3.50
V _{PCC(7)} (V _{rms})	0.67	1.90	1.00	1.90
V _{PCC(9)} (V _{rms})	0.11	0.30	0.60	0.70
V _{PCC(11)} (V _{rms})	0.23	0.69	0.90	1.10

Distribucijska elektroenergetska mreža s velikim udjelom aktivnih kupaca

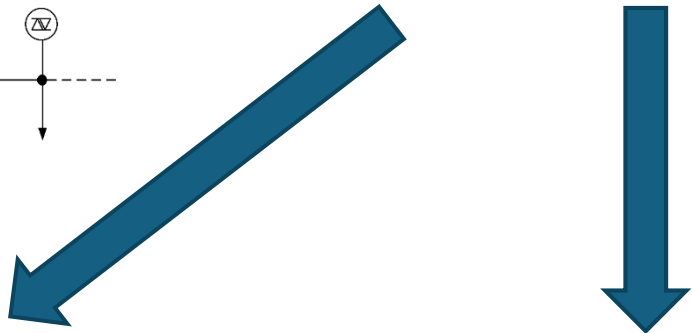
- Uspostavni istraživački projekt HRZZ, voditelj prof.dr.sc. Goran Knežević
- Svrha projekta je uspostavljanje istraživačke grupe koja će proučavati upravljanje pogonom sustava aktivnog kupca te međudjelovanje aktivnog kupca i distribucijske mreže s četiri aspekata promatranja:
 - maksimizacija zarade aktivnog kupca,
 - **optimizacija pogona distribucijske mreže,**
 - smanjenje utjecaja na kvalitetu električne energije,
 - utjecaj na naponsku i frekvencijsku stabilnost mreže.

- Aktivni kupac (*eng. Prosumer*)

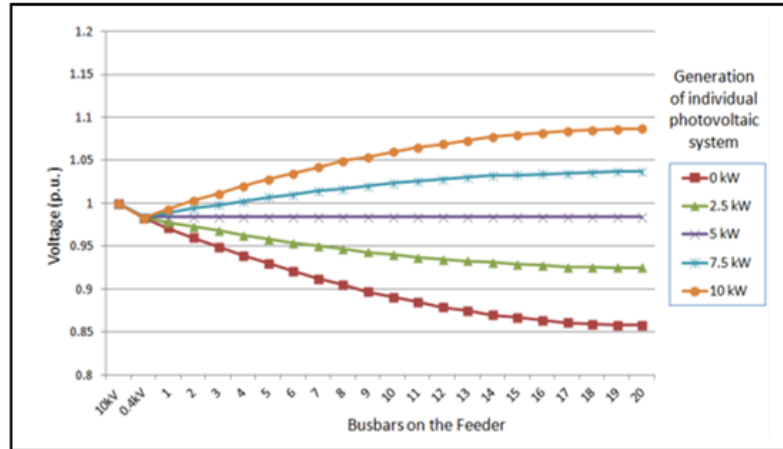
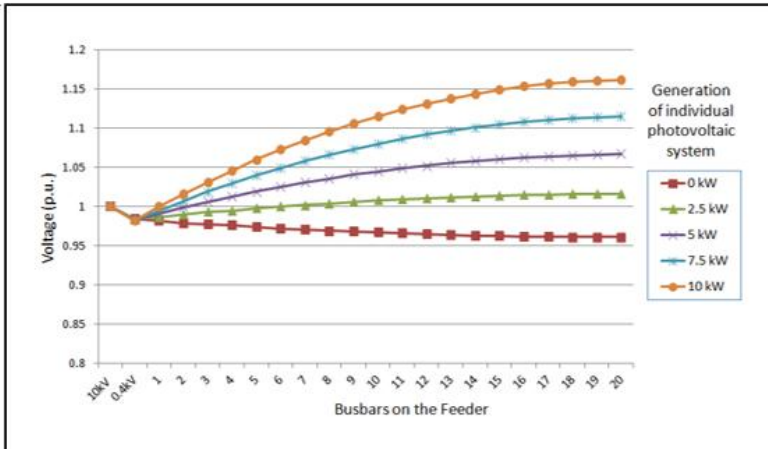




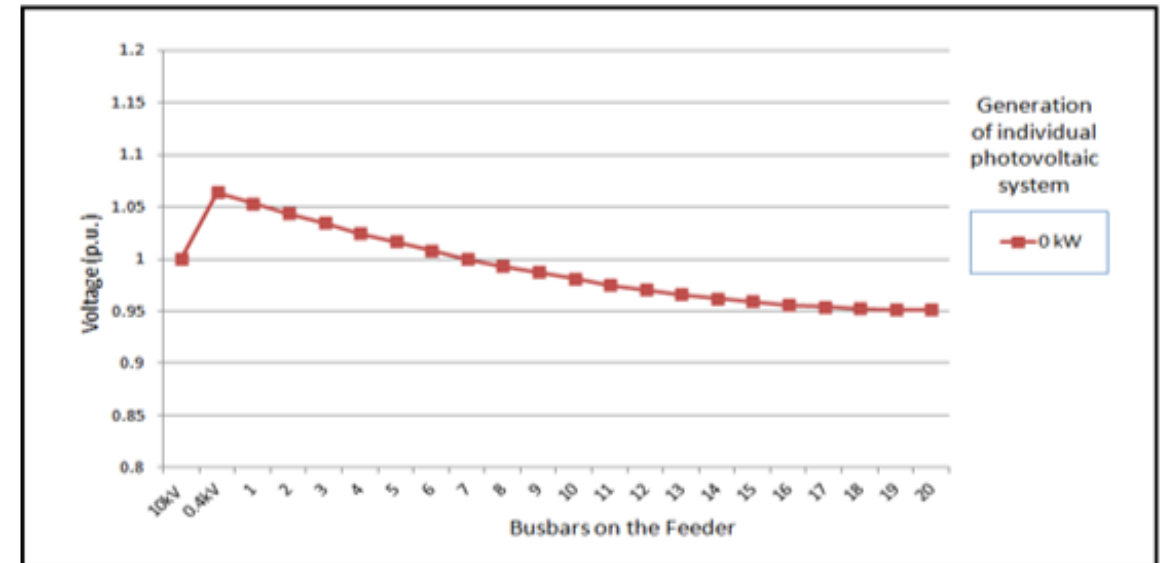
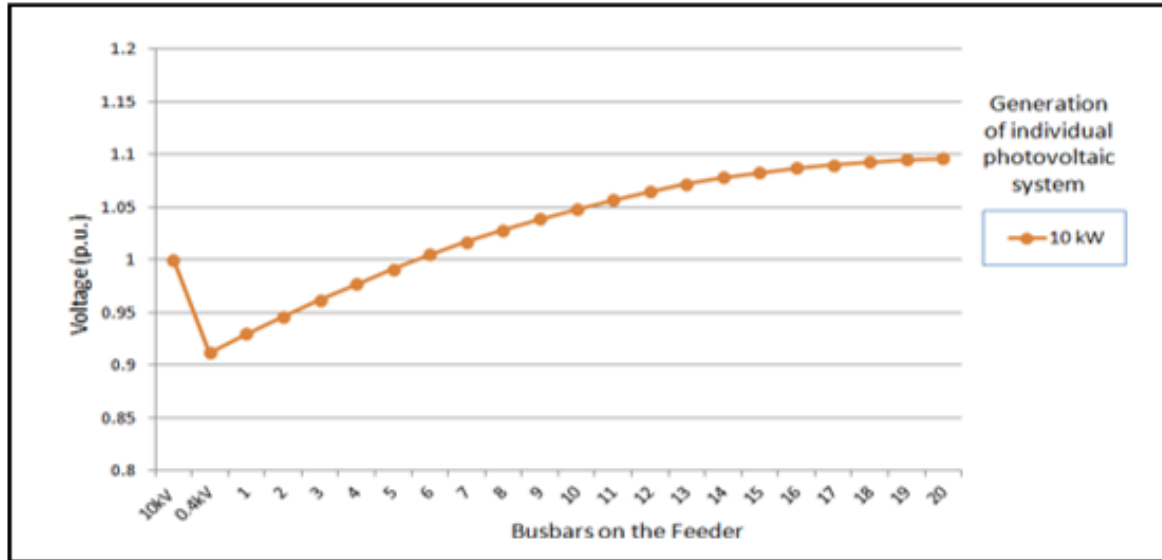
- Proizvodnja FN elektrane se mijenja u rasponu od 0 kW do 10 kW
- Potrošnja kućanstava se mijenja u rasponu od 1 kW do 5 kW



Residential consumption (kW)	Generation of individual photovoltaic system (kW)				
	0	2.5	5	7.5	10
1	✓	✓	✓	✗	✗
2	✓	✓	✓	✓	✗
3	✓	✓	✓	✓	✗
4	✗	✓	✓	✓	✗
5	✗	✓	✓	✓	✓

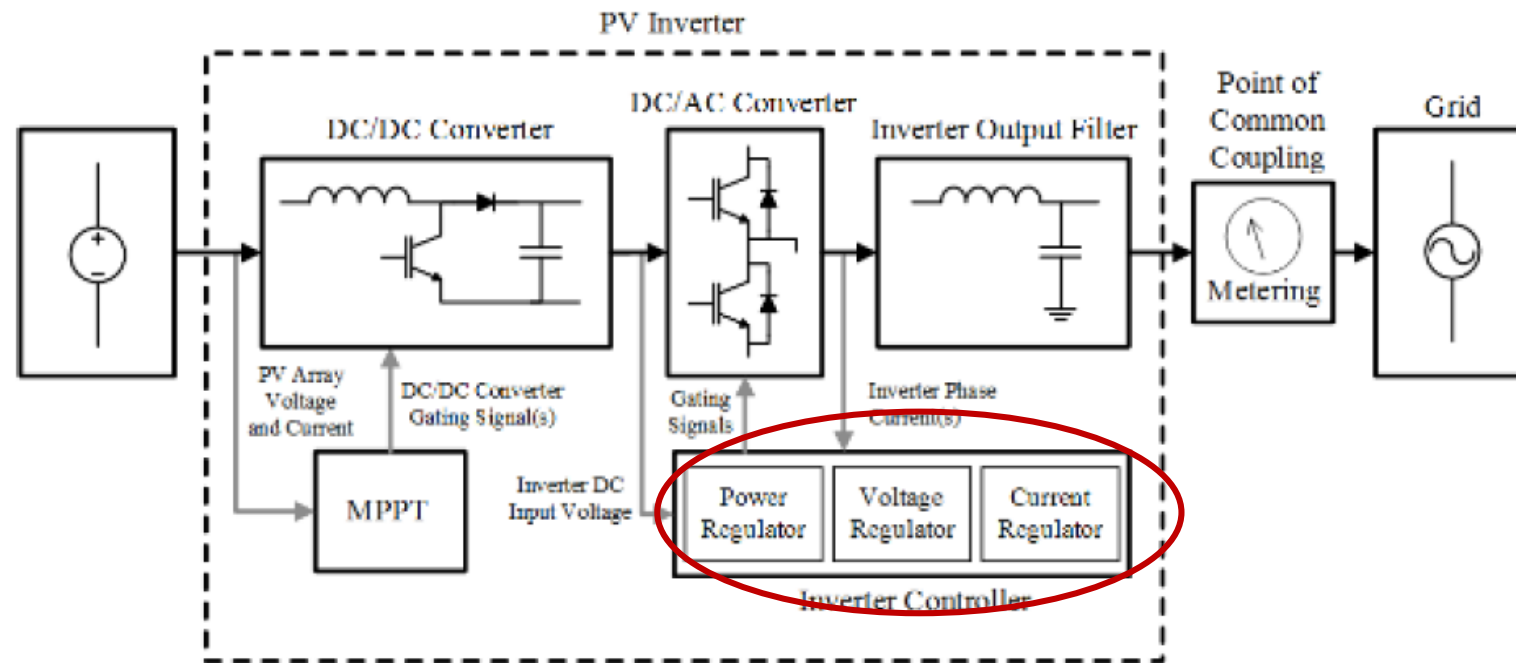


- Predloženo rješenje – transformator s mogućnošću regulacije pod opterećenjem (OLTC)



Pretvarač fotonaponske elektrane – moguće riješenje?

- Ključan element FN elektrane
- Dvije osnovne opcije: *pretvarač koji prati mrežu* (eng. Grid-following inverter) i *pretvarač koji "formira" mrežu* (eng. Grid-forming inverter)



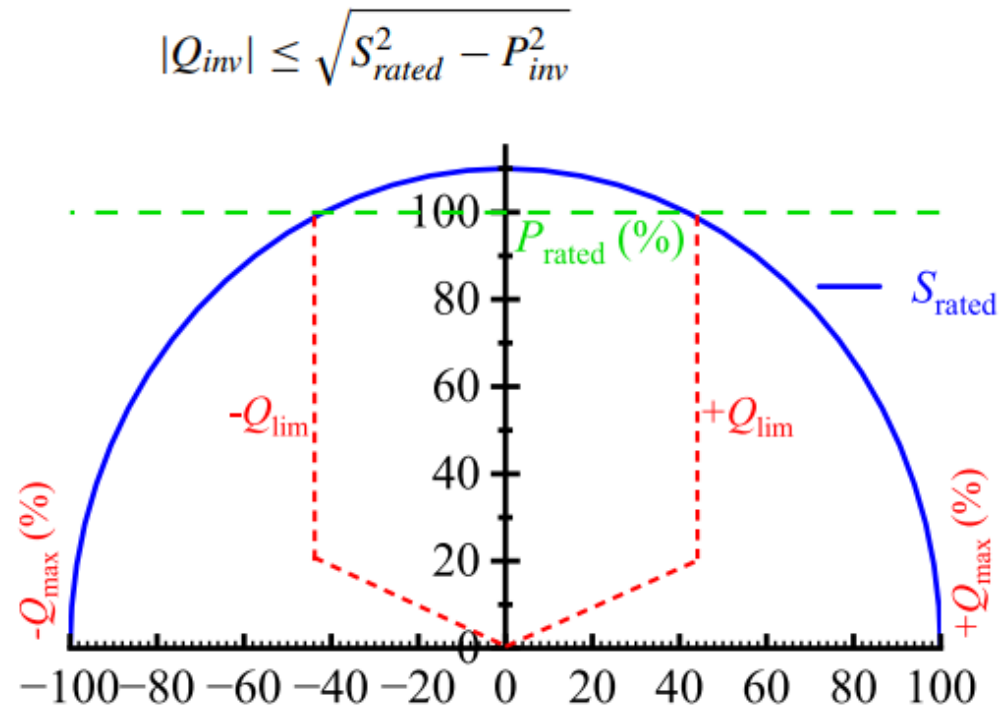
Simplified PV inverter block diagram showing key system components and control

Image courtesy of Dr. Barry Mather, NREL

Uloga FN pretvarača ilustrirana evolucijom industrijskog standarda IEEE 1547 (*IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*)

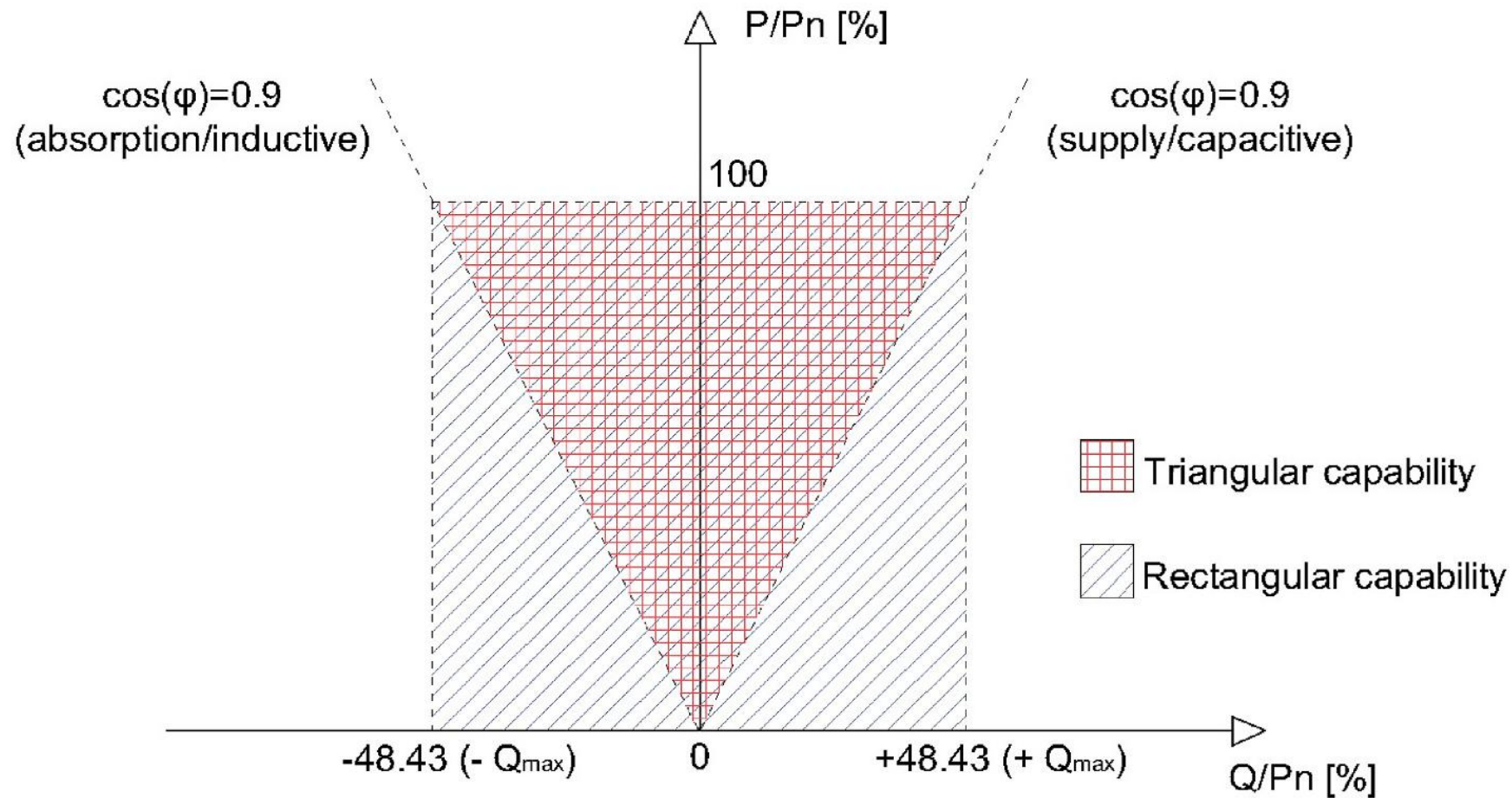
- ❑ **IEEE 1547-2003** – PV pretvarači ne smiju aktivno sudjelovati u regulaciji napona i moraju se isključiti u slučaju poremećaja napona/frekvencije
- ❑ **IEEE 1547-2014** – PV pretvarači mogu aktivno sudjelovati u regulaciji napona, mogu "proći kroz kvar" (eng. *fault-ride through*)
- ❑ **IEEE 1547-2018** – PV pretvarači moraju biti u mogućnosti aktivno sudjelovati u regulaciji napona, trebaju proći kroz kvar

- Mogućnosti suvremenih FN pretvarača glede izlazne jalove snage ovise u prvom redu o instaliranoj prividnoj snazi pretvarača S_{rated}

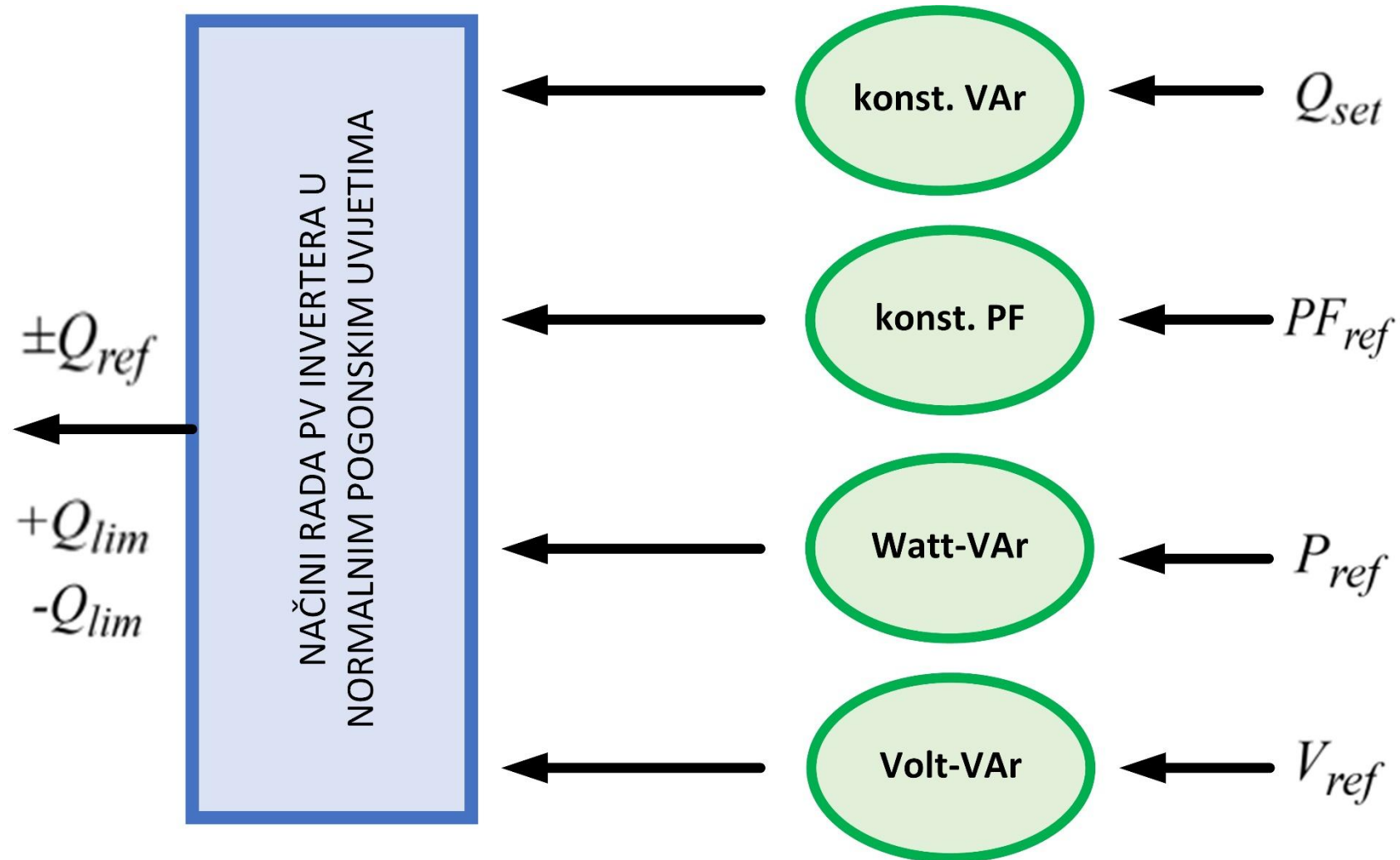


- U praktičnim primjenama, ograničenja izlazne jalove snage FN pretvarača su često zbog sigurnosti stroža (crtkana crvena linija) nego idealna "teorijska" krivulja (puna plava linija)
- "predimenzioniranje" FN pretvarača

- Pogonska karta FN pretvarača prema standardu CEI 0-21, Reference technical rules for the connection of active and passive users to the LV electrical Utilities. CEI - Comitato Elettrotecnico Italiano; 2019.



- Mogući načini rada suvremenih FN pretvarača vezano uz upravljanje jalovom snagom u normalnim pogonskim uvjetima



Konstantna jalova snaga (konst. Var)

- Pretvarač održava izlaznu jalovu snagu (Q_{ref}) na podešenoj vrijednosti (Q_{set}) dok se faktor snage mijenja ovisno o izlaznoj djelatnoj snazi

$$\pm Q_{ref} = \begin{cases} +Q_{lim} & \text{if } Q_{set} < +Q_{lim} \\ Q_{set} & \text{if } -Q_{lim} \leq Q_{set} \leq +Q_{lim} \\ -Q_{lim} & \text{if } Q_{set} > +Q_{lim} \end{cases}$$

Konstantan faktor snage (konst. PF)

- Pretvarač održava konstantni faktor snage prilagođavajući izlaznu jalovu snagu (Q_{ref}) ovisno o aktualnoj djelatnoj snazi
- Izlazna jalova snaga Q_{ref} se računa na temelju aktualne djelatne snage P_{act} % i zadanog faktora snage $\cos\Phi_{ref}$ uz poštivanje limita jalove snage pretvarača

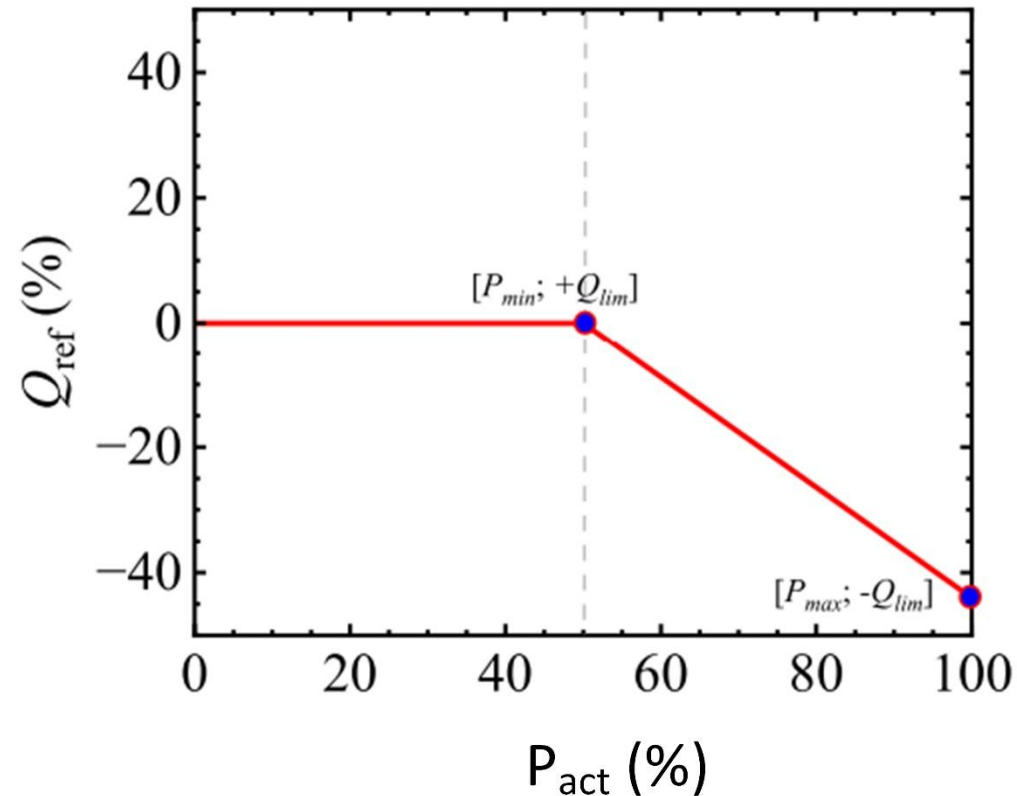
$$Q_{ref} = \sqrt{P_{act}^2 \cdot \left(\frac{1 - \cos^2 \varphi_{ref}}{\max(10^{-5}, \cos^2 \varphi_{ref})} \right)} \times \text{sign}(\cos \varphi_{ref})$$

$$\text{sign}(\cos \varphi_{ref}) = \begin{cases} -1 & \text{if } \cos \varphi_{ref} < 0 \\ 1 & \text{if } \cos \varphi_{ref} \geq 0 \end{cases}$$

$$\pm Q_{ref} = \begin{cases} -Q_{lim} & \text{if } Q_{ref} < -Q_{lim} \\ Q_{ref} & \text{if } -Q_{lim} \leq Q_{ref} \leq +Q_{lim} \\ +Q_{lim} & \text{if } Q_{ref} > +Q_{lim} \end{cases}$$

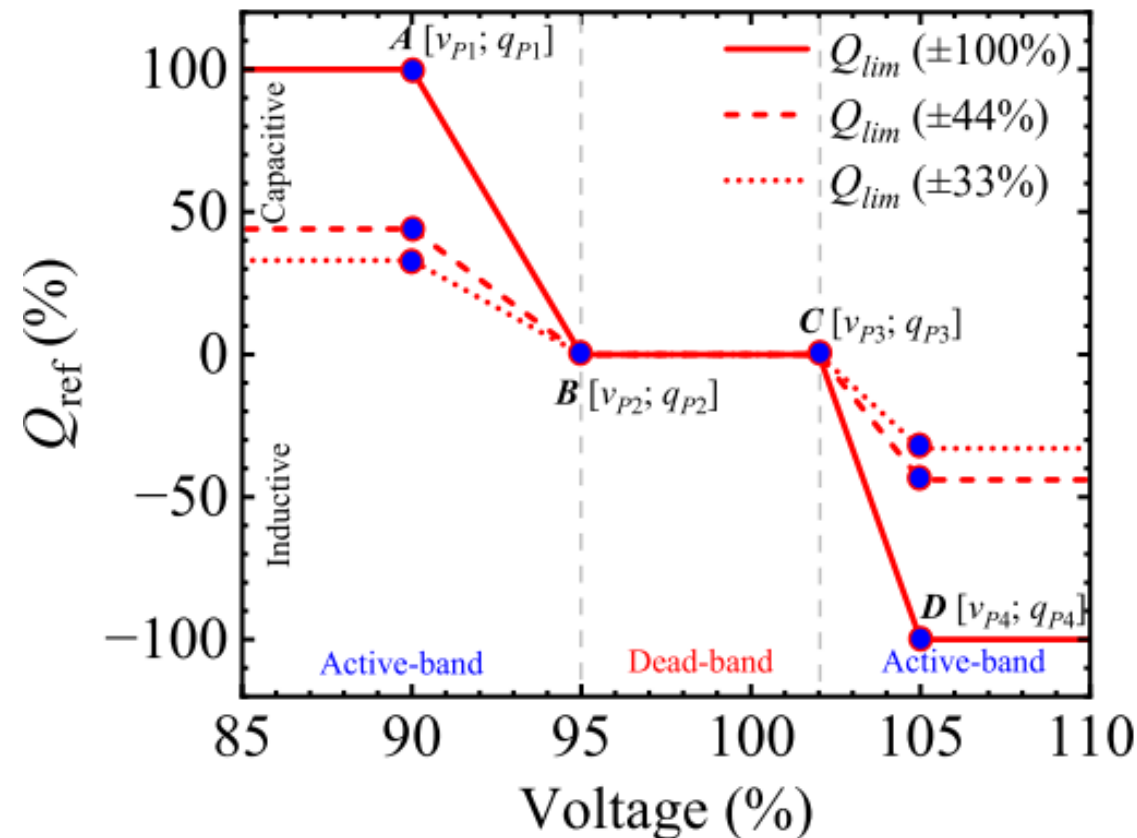
Watt-Var upravljanje

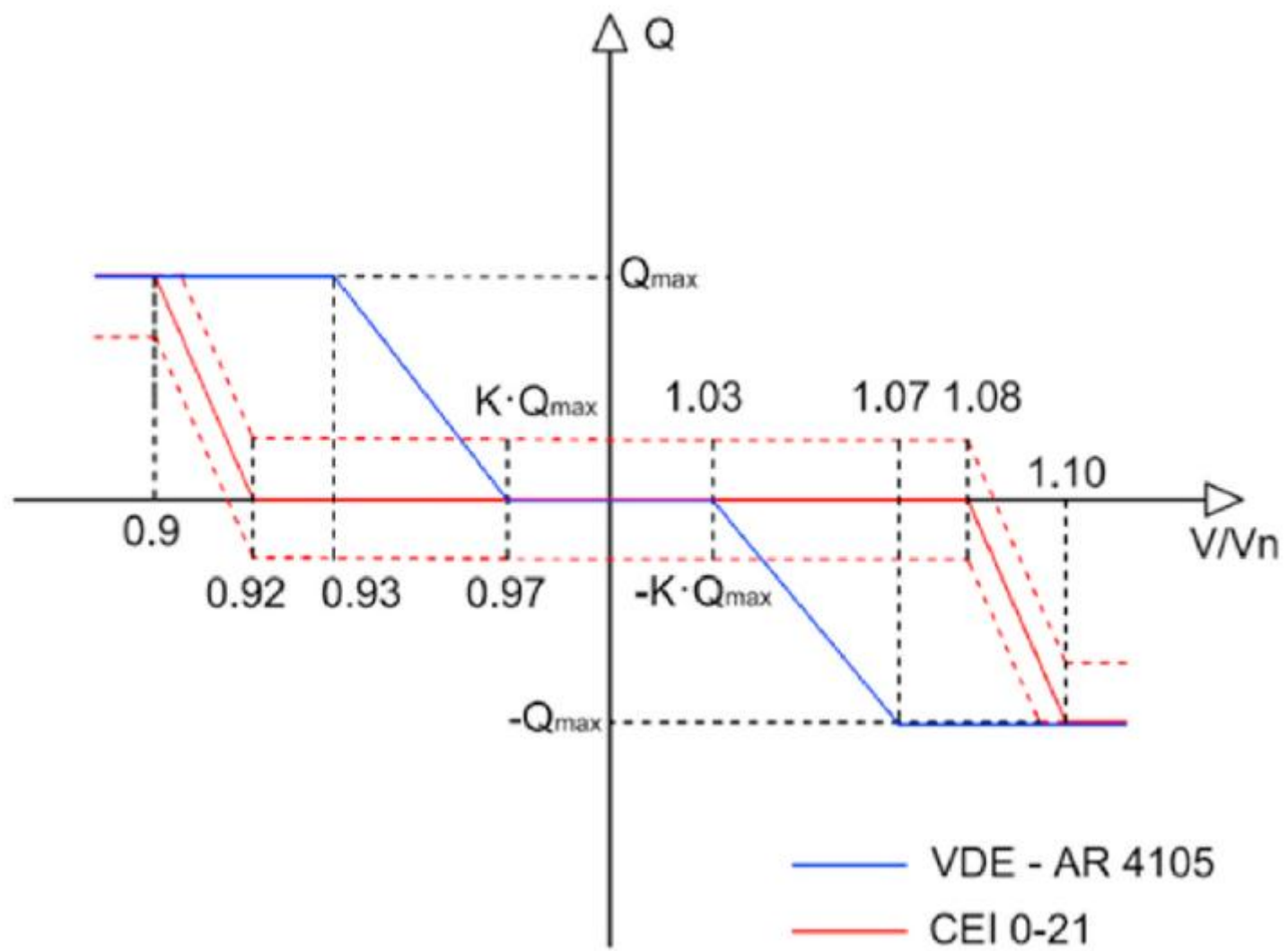
- U ovom načinu rada, jalovom snagom pretvarača se upravlja na temelju aktualne izlazne djelatne snage
- Pretvarač upotrebljava unaprijed zadanu statičnu $Q(P)$ krivulju kako bi aktualnoj izlaznoj djelatnoj snazi P_{act} odredio odgovarajuću jalovu izlaznu snagu pretvarača Q_{ref}



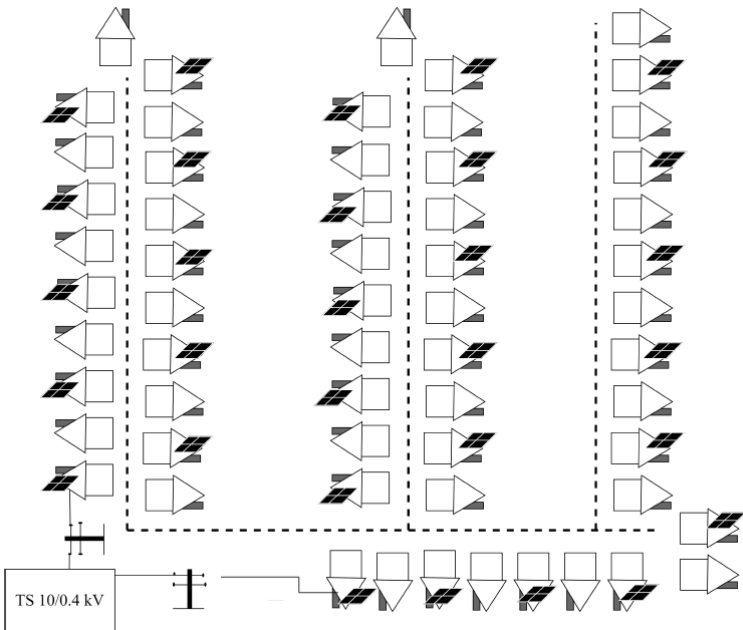
Volt-Var upravljanje

- U ovom načinu rada, jalovom snagom pretvarača se upravlja na temelju izmjenog napona na spoju pretvarača i mreže (PCC)
- Pretvarač upotrebljava unaprijed zadanu Volt-VAr krivulju kako bi na temelju izmjenog napona mreže V_g odredio odgovarajuću jalovu izlaznu snagu pretvarača Q_{ref}

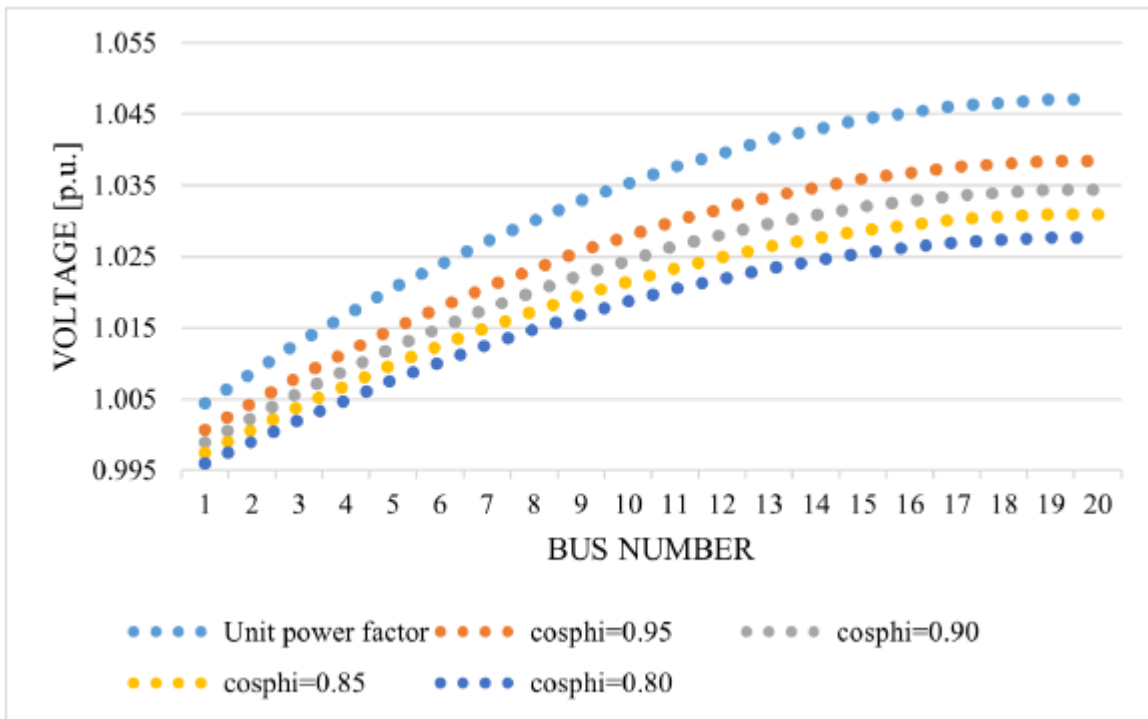




Utjecaj različitih načina rada FN pretvarača na naponski profil niskonaponskog izvoda

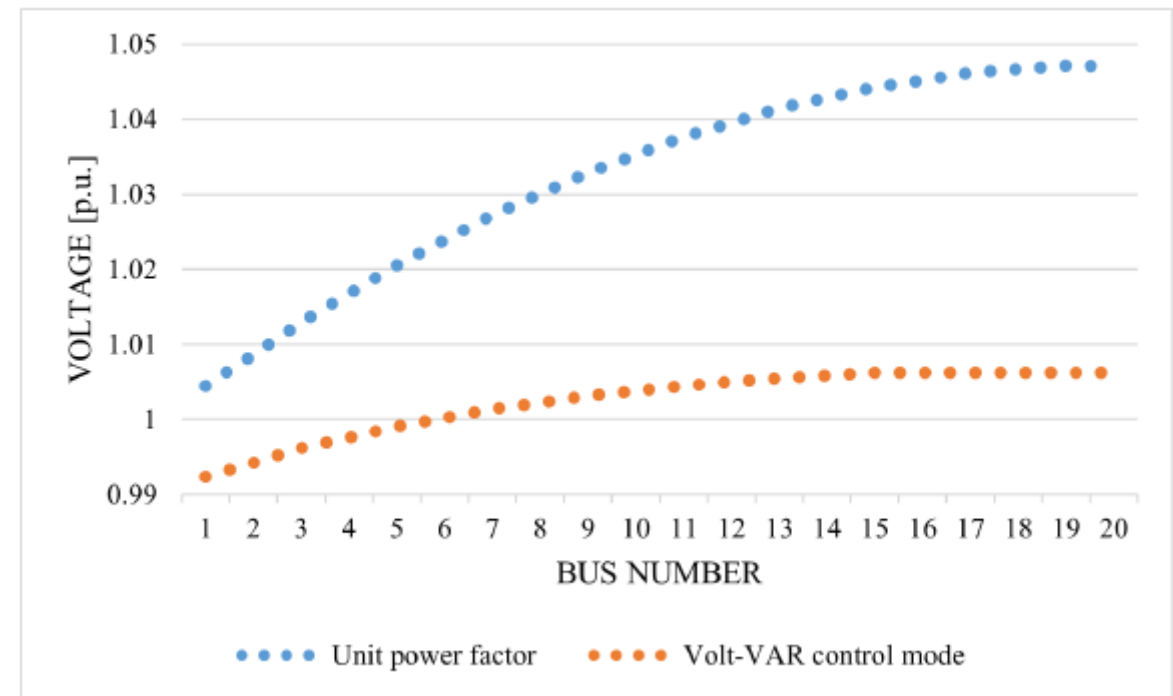


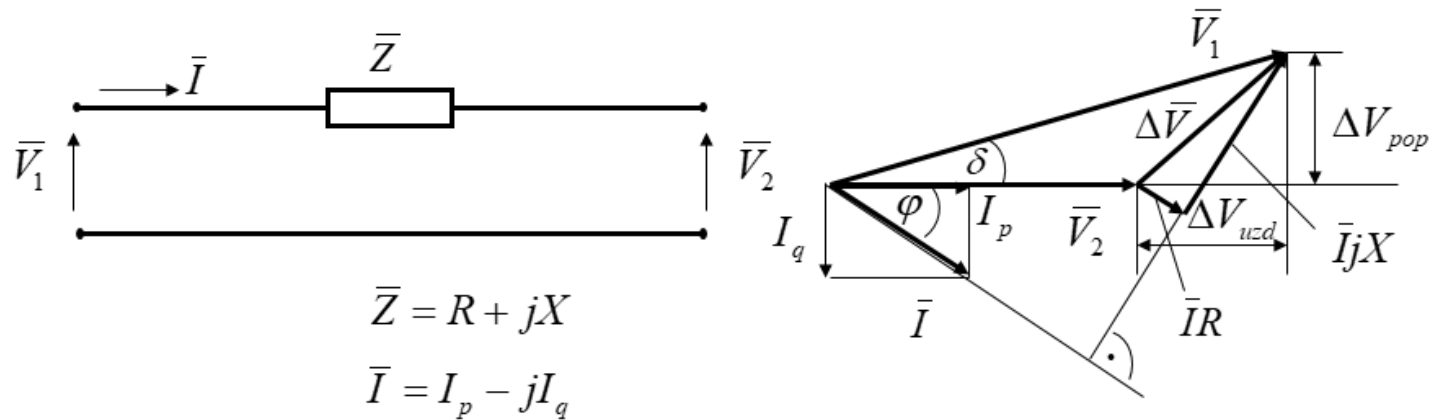
- 20 kućanstava na izvodu
- Fotonaponske elektrane su smještene na polovicu kućanstava, snage 5 kWp
- Simulairan scenarij sa najvećom proizvodnjom fotonaponskih elektrana i najmanjom potrošnjom kućanstava - "worst case" scenarij
- Za simulacije koriste DigSILENT PowerFactory



- Odabran način rada FN pretvarača – konstantni faktor snage
- Upravljanje lokalno i nekoordinirano
- Vidljiv ograničeni pozitivni utjecaj na naponski profil

- Odabran način rada FN pretvarača – Volt-Var sa unaprijed zadanom krivuljom
- Upravljanje lokalno i nekoordinirano
- Vidljiv značajan pozitivni utjecaj na naponski profil

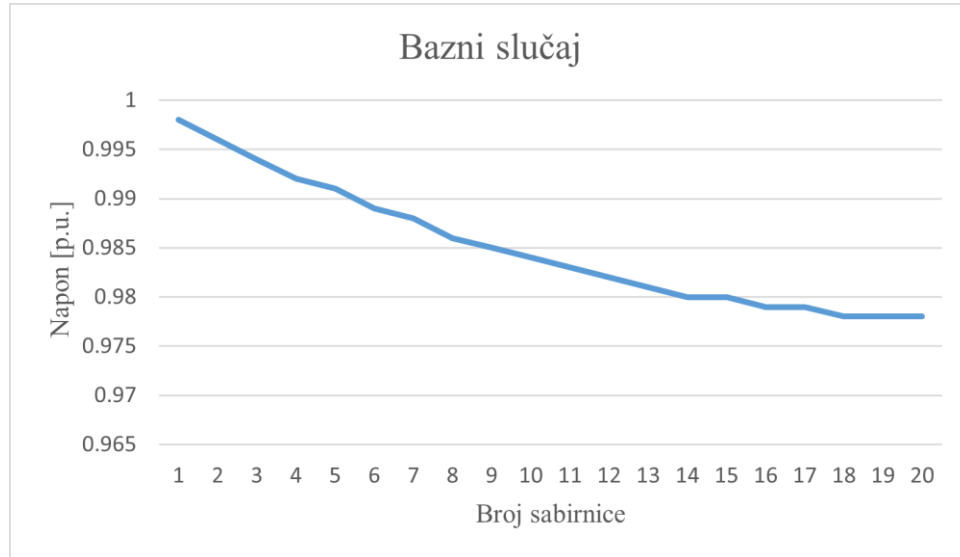




$$\begin{aligned} \Delta \bar{V} &= \bar{I} \bar{Z} = (I_p - jI_q) \cdot (R + jX) = \\ &= \underbrace{(I_p R + I_q X)}_{\Delta V_{uzd}} + j(I_p X - I_q R) = \Delta V_{uzd} + j\Delta V_{pop} \end{aligned}$$

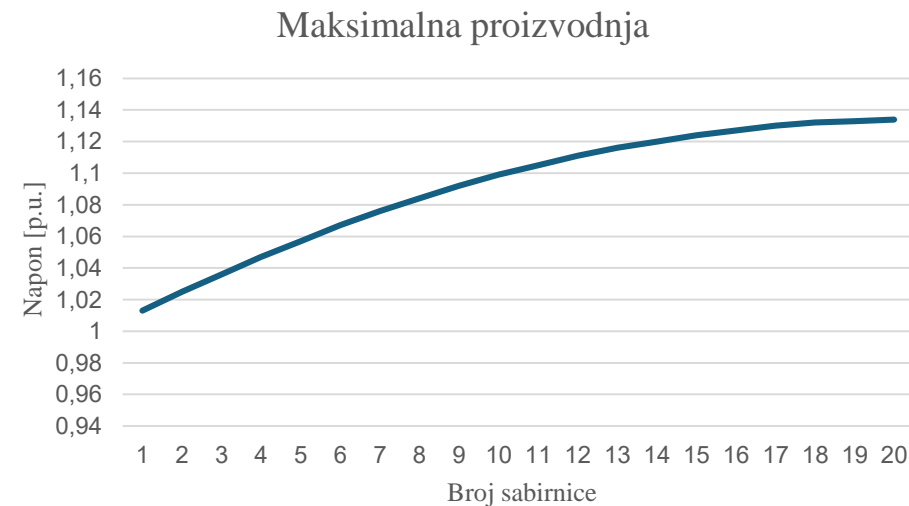
- Učinkovitost upravljanja naponom pomoću jalove snage jako ovisi o omjeru R/X mreže
- Za distribucijske mreže je uobičajeno $R \sim X$ ili $R > X$
- Praktično za svaku jedinicu P, potrebna je jedinica Q da bi se kompenzirao pad napona

- Analiziran je prethodni primjer, ali sa povećanom proizvodnjom FN elektrana (sa 5 kW na 7.5 kW) i povećanom potrošnjom kućanstva (na 1 kW)

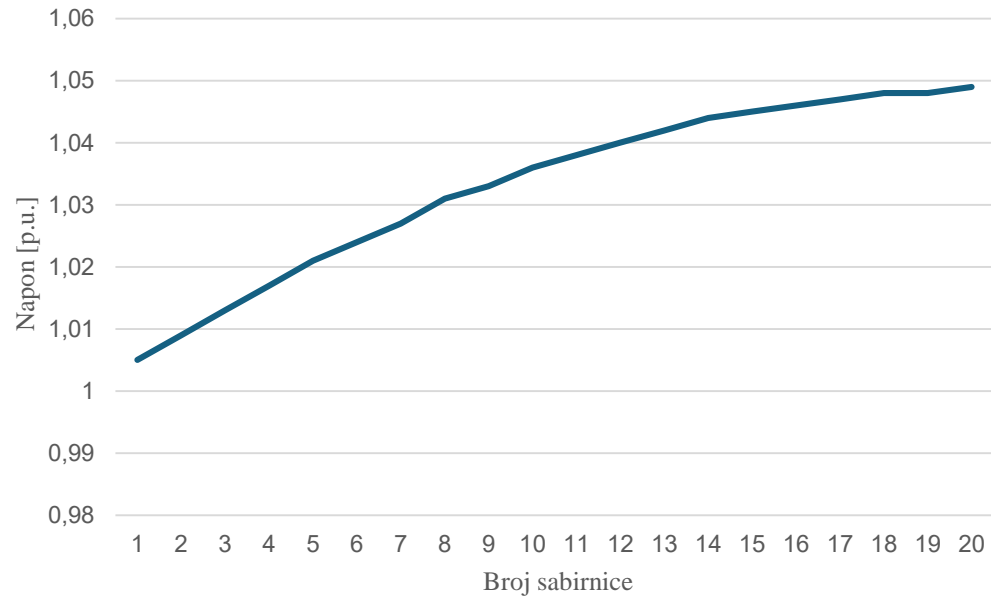


- Bazni slučaj – proizvodnja FN elektrane je 0 kW

- Maksimalna proizvodnja FN elektrana uz faktor snage 1



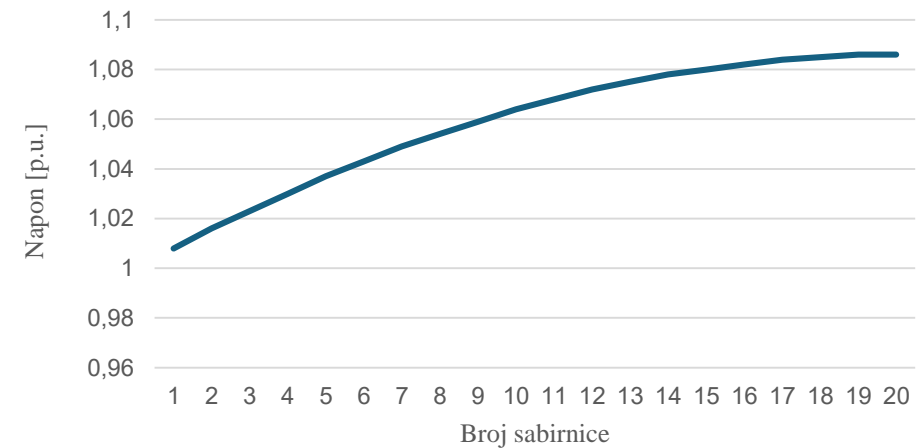
Upravljanje potrošnjom

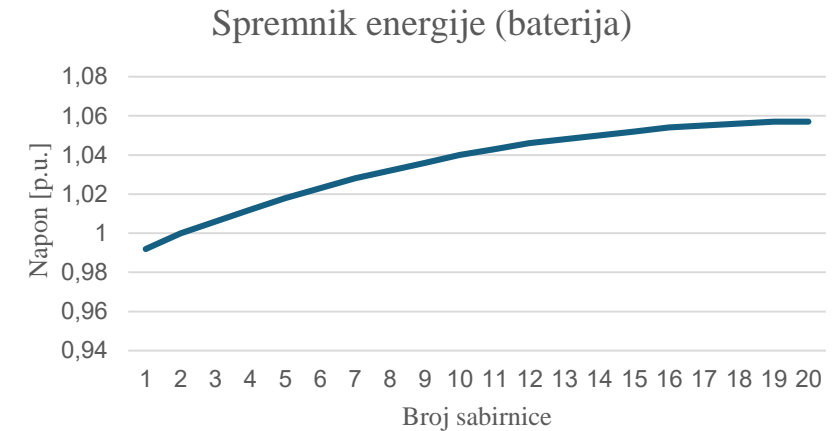
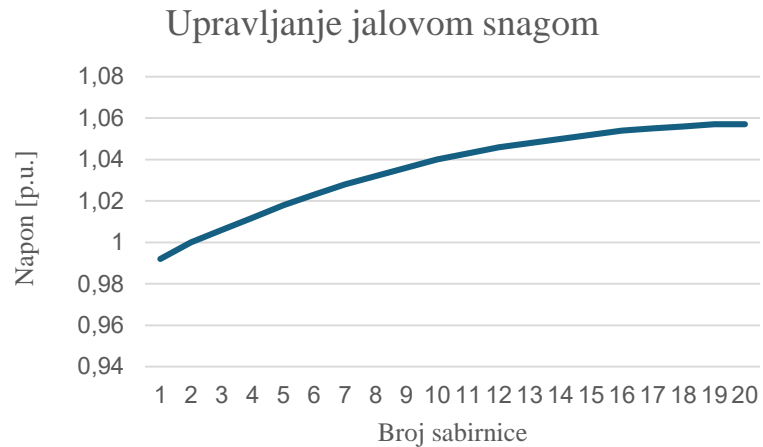


- Povećana djelatna potrošnja kućanstva (punjač EV, punjenje kućnog baterijskog spremnika i sl.)

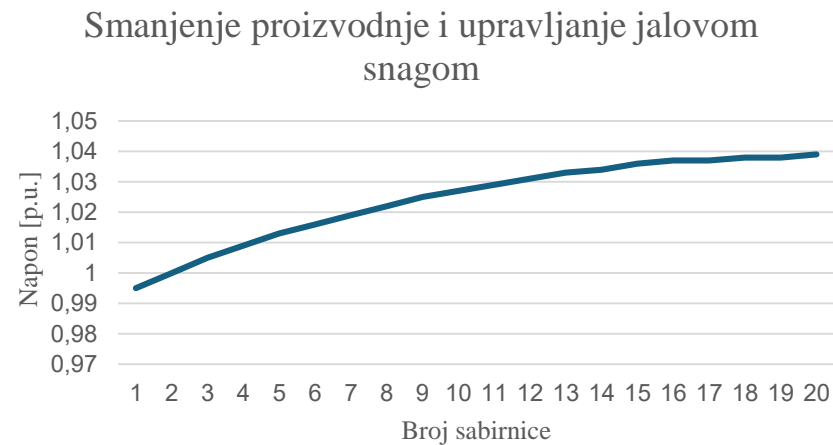
- Ograničena proizvodnja svake FN elektrane (neselektivno) 30%

Smanjenje proizvodnje





- Faktor snage svih FN pretvarača podešen na 0.9



- Povećanje potrošnje izvoda punjenjem centralnog baterijskog spremnika (snaga punjenja 80 kW)

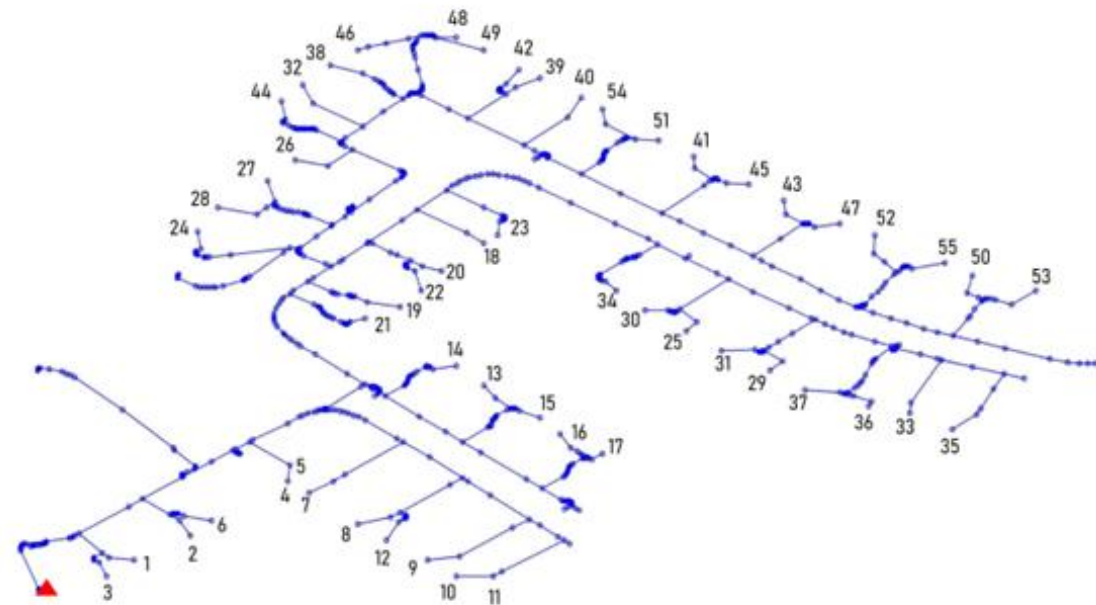
- Kombinacija – faktor snage FN pretvarača 0.9 i smanjenje proizvodnje 30%

Koordinirano upravljanje naponom – centralizirana optimizacija

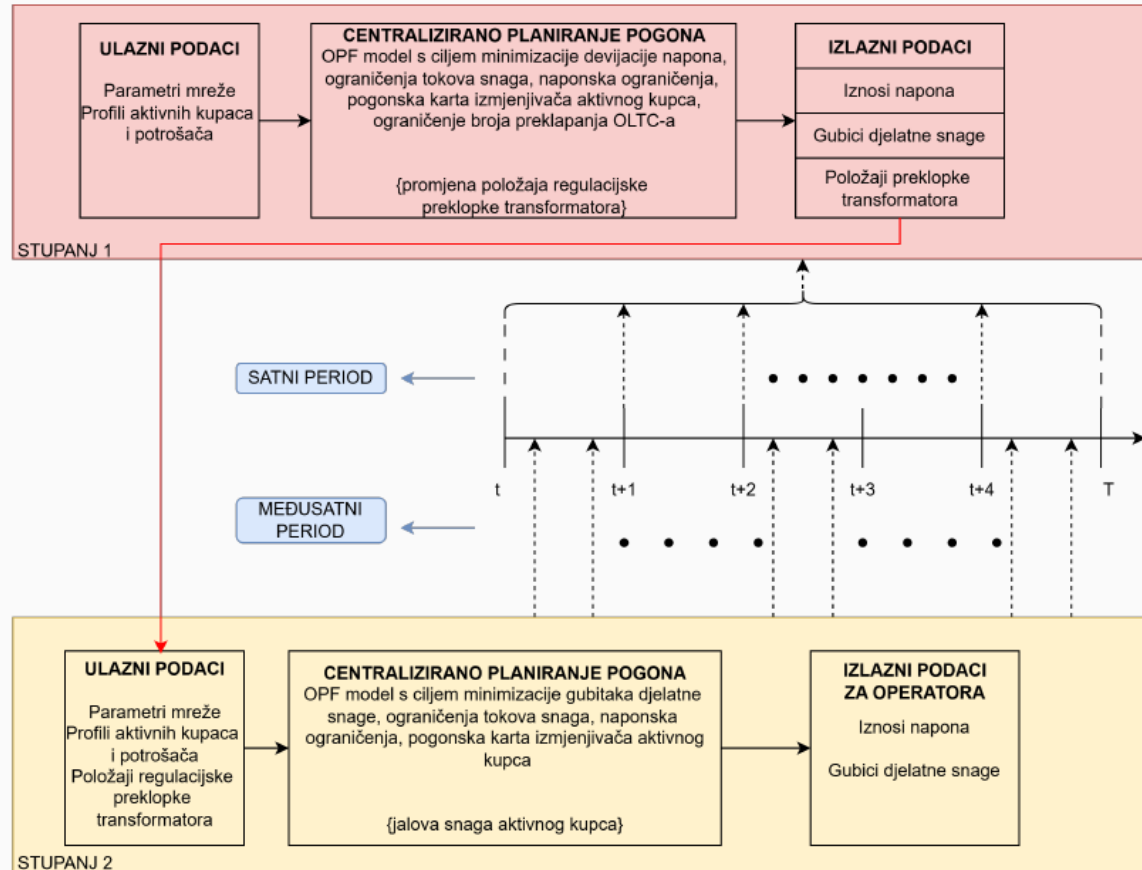
- Centralizirani optimalni tokovi snaga
- Korišten IEEE European Low Voltage Test Feeder (11/0.4 kV)
- Testna niskonaponska mreža modelirana na temelju stvarnih mjerenih podataka
- Nesimetrija uzeta u obzir
- Doktorat:

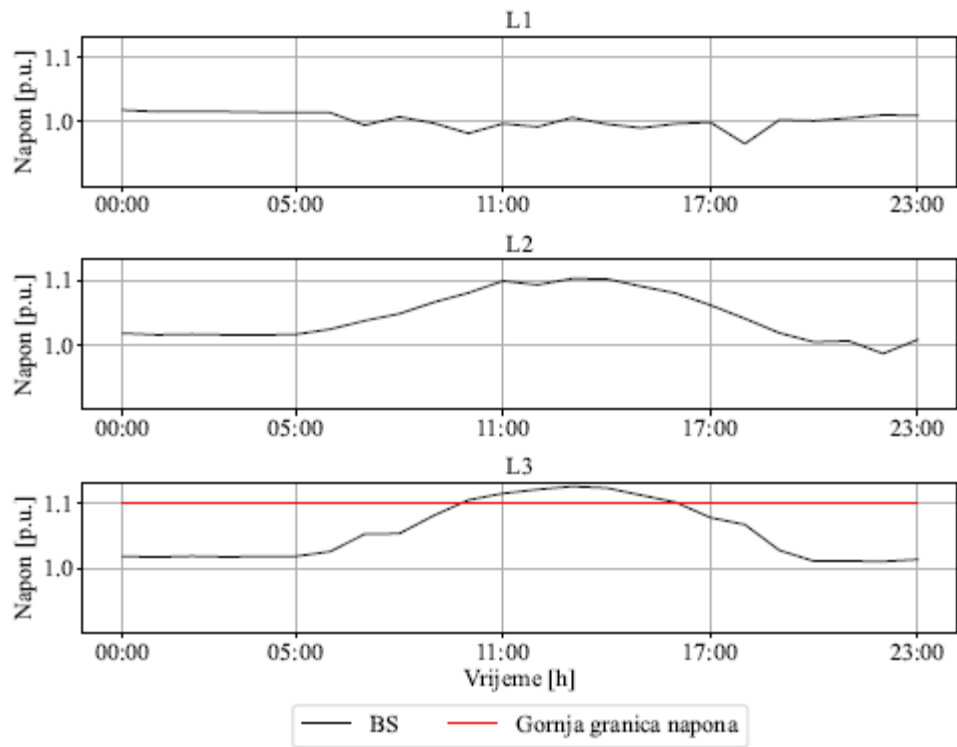
Dr.sc. Marina Dubravac:

“Optimizacijski model i metoda vrednovanja različitih mehanizama upravljanja za planiranje pogona niskonaponske aktivne distribucijske mreže”



Dvostupanjski model za planiranje pogona niskonaponske aktivne distribucijske mreže





- Naponski profil najkritičnijeg čvora

- Rezultati optimizacije niskonaponskih izvoda

MU	F [kVAh]	Maks/Min napon [p.u.]	VUF [%]	Komentar
PT	$2.43 \cdot 10^{15}$	1.22/0.92	2.11	Neizvedivo
FN APC	$1.94 \cdot 10^{15}$	1.06/0.85	2.41	Neizvedivo
FN RPC	$7.23 \cdot 10^{15}$	1.13/0.85	3.12	Neizvedivo
EV APC	$8.44 \cdot 10^{15}$	1.19/0.93	2.31	Neizvedivo
PT + FN APC	$1.39 \cdot 10^{15}$	1.11/0.91	2.11	Neizvedivo
PT + FN RPC	$6.78 \cdot 10^{15}$	1.17/0.91	3.25	Neizvedivo
PT + EV APC	$7.72 \cdot 10^{15}$	1.23/0.94	2.14	Neizvedivo
FN APC + FN RPC	$1.57 \cdot 10^{15}$	1.06/0.85	2.41	Neizvedivo
FN APC + EV APC	142.53	1.01/0.97	0.53	Izvedivo
FN RPC + EV APC	$8.44 \cdot 10^{15}$	1.13/0.97	3.32	Neizvedivo
PT + FN APC + FN RPC	$1.42 \cdot 10^{15}$	1.11/0.91	2.11	Neizvedivo
PT + FN APC + EV APC	339.99	1.09/0.93	0.79	Izvedivo
PT + FN RPC + EV APC	$5.71 \cdot 10^{11}$	1.21/0.93	1.99	Neizvedivo
FN RPC + FN APC + EV APC	113.07	1.01/0.97	0.46	Izvedivo
PT + FN APC + FN RPC + EV APC	143.24	1.06/0.93	0.61	Izvedivo

Zaključak

Prednosti:

- Iskorištenje postojećeg potencijala
- Mogućnost noćnog režima rada
- Pozitivni utjecaji na naponski profil

Izazovi:

- Omjer R/X distribucijske mreže
- Nesimetrija niskonaponske mreže
- Troškovi rada PV invertera – povećani gubici, utjecaj na pouzdanost