Broj rada: R5-02
DOI:10.46793/CIRED2026.R5-02_165

UPRAVLJANJE REAKTIVNOM SNAGOM AKTIVNIH KUPACA I KUPACA- PROIZVOĐAČA

REACTIVE POWER MANAGEMENT OF ACTIVE CONSUMERS AND PROSUMERS

Nikola CVETANOVIĆ, Elektrodistribucija Srbije, Srbija*
Aleksandar JANJIĆ, GOPA Tech, ogranak Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Aktivni kupci i kupci - proizvođači suočavaju se sa raznim problemima vezanim za reaktivnu snagu, pre svega kroz finansijske kazne za loš faktor snage koji može povećati njihove račune za struju i smanjiti period povrata njihovih ulaganja u sisteme obnovljivih izvora energije. Ova situacija nastaje kada instalacije proizvođača, kao što su solarni PV sistemi, menjaju faktor snage samog kupca, ali i lokalne mreže, ponekad prikazujući smanjenje faktora snage koja dovodi do kazni čak i ako se ukupna potražnja za reaktivnom energijom nije promenila. U ovom radu izvršena je analiza reaktivne snage u distributivnoj mreži na koju su priključeni aktivni kupci. U zavisnosti od načina upravljanja reaktivnom snagom svakog kupca, prikazane su i naponske prilike i tokovi snaga u celoj mreži. U zaključcima rada, date su preporuke za upotrebu pretvarača aktivnih kupaca u cilju kompenzacije reaktivne snage ili pružanja usluga fleksibilnosti u distributivnoj mreži.

Ključne reči: Aktivni kupac, reaktivna snaga, faktor snage, solarni PV sistemi, naponske prilike i tokovi snaga

ABSTRACT

Active consumers and prosumers face various challenges related to reactive power, primarily through financial penalties for poor power factor, which can significantly increase their electricity bills and reduce the payback period of their investments in renewable energy systems. This situation arises when producer installations, such as solar PV systems, alter the power factor of the consumer itself, but also of the local network, sometimes resulting in a reduced power factor that leads to penalties — even when the overall demand for reactive energy has not changed. In this paper, an analysis of reactive power in a distribution network with connected active consumers is performed. Depending on the way each consumer manages reactive power, the resulting voltage profiles and power flows throughout the entire network are presented. In the conclusions of the paper, recommendations are given for the utilization of active consumers' invertors for the purpose of reactive power compensation or for providing flexibility services in the distribution network.

Keywords: active customer, reactive power, power factor, solar PV systems, voltage conditions and power flows

* Nikola Cvetanović n.cvetanovic@gmail.com; Aleksandar Janjić Aleksandar.Janjic@gopa-intec.de

UVOD

Kupci proizvođači suočavaju se sa problemima vezanim za reaktivnu snagu, pre svega kroz finansijske kazne za loš faktor snage koji može da poveća račune za struju i smanji period otplate svojih ulaganja u sisteme obnovljivih izvora energije. Ova situacija nastaje kada instalacije proizvođača, kao što su solarni PV sistemi, menjaju faktor snage lokalne mreže, ponekad pogoršavajući faktor snage prema mreži, što dovodi do kazni čak i ako se ukupna potražnja za reaktivom energijom nije promenila.

Prozjumer (kupac-proizvođač, najčešće korisnik solarnih panela) može imati nekoliko problema vezanih za reaktivnu snagu:

1. Uticaj na mrežu

- Reaktivna snaga je potrebna za rad elektromotornih uređaja, transformatora i drugih induktivnih potrošača. Ako prozjumer proizvodi samo aktivnu snagu (kroz solarne panele), a koristi uređaje koji troše reaktivnu snagu (npr. klima uređaji, pumpe), može doći do neravnoteže u lokalnoj mreži.

- Višak ili manjak reaktivne snage može uzrokovati pad napona ili povećanje gubitaka u mreži.

2. Obaveza regulacije

- Mnoge elektrodistribucije zahtevaju od prozjumera da održavaju određeni faktor snage (najčešće > 0,95). Ako prozjumer ne reguliše reaktivnu snagu, može biti penalizovan ili mu može biti ograničen izvoz električne energije u mrežu.

- Solarni invertori često nemaju mogućnost generisanja ili apsorpcije reaktivne snage, što može biti tehnički izazov.

3. Finansijske posledice

- U većini zemalja, kao i u Srbiji, elektrodistribucije naplaćuju penale za loš faktor snage (npr. ako je faktor snage ispod dozvoljene granice). Prema važećem tarifnom sistemu, ako je faktor snage za obračunski period manji od 0.95, tarifni stav "reaktivna energija" se primenjuje na iznos reaktivne energije koja odgovara faktoru snage 0.95, a tarifni stav "prekomerno preuzeta reaktivna energija" se primenjuje na iznos prekomerno preuzete reaktivne energije. Prekomerno preuzeta reaktivna energija je pozitivna razlika stvarno isporučene reaktivne energije i reaktivne energije koja odgovara vrednosti 0.95 faktoru snage. Relativni odnos cena po tarifnom stavu "reaktivna energija" i tarifnom stavu "prekomerno preuzeta reaktivna energija" je 1:2.

- Prozjumer može biti primoran da instalira kondenzatorske baterije ili naprednije invertore koji mogu upravljati reaktivnom snagom, što povećava troškove.

4. Tehnička ograničenja opreme

- Standardni solarni invertori često nisu projektovani za upravljanje reaktivnom snagom, pa se može desiti da prozjumer ne može ispuniti zahteve mreže bez dodatne opreme.

- Uređaji u domaćinstvu (induktivni potrošači) mogu uzrokovati povećanu potrošnju reaktivne snage, što dovodi do lošijeg faktora snage.

5. Problemi sa priključenjem

- Prilikom priključenja na mrežu, distributer može zahtevati analizu uticaja na reaktivnu snagu, a u slučaju negativnog uticaja može odbiti priključenje ili tražiti dodatne tehničke mere.

Glavni problemi prozjumera sa reaktivnom snagom mogu se dakle sumirati u sledeće kategorije:

- Neadekvatna regulacija reaktivne snage,
- Potencijalni penali zbog lošeg faktora snage,
- Povećani troškovi za dodatnu opremu,
- Tehnički izazovi sa invertorima,
- Negativan uticaj na stabilnost lokalne mreže.

U ovom radu izvršena je analiza reaktivne snage u distributivnoj mreži na koju su priključeni aktivni kupci. U zavisnosti od načina upravljanja reaktivnom snagom svakog kupca, prikazane su i naponske prilike i tokovi snaga u celoj mreži. U zaključcima rada, date su preporuke za upotrebu pretvarača aktivnih kupaca u cilju kompenzacije reaktivne snage ili pružanja usluga.

1 REAKTIVNA SNAGA AKTIVNOG KUPCA

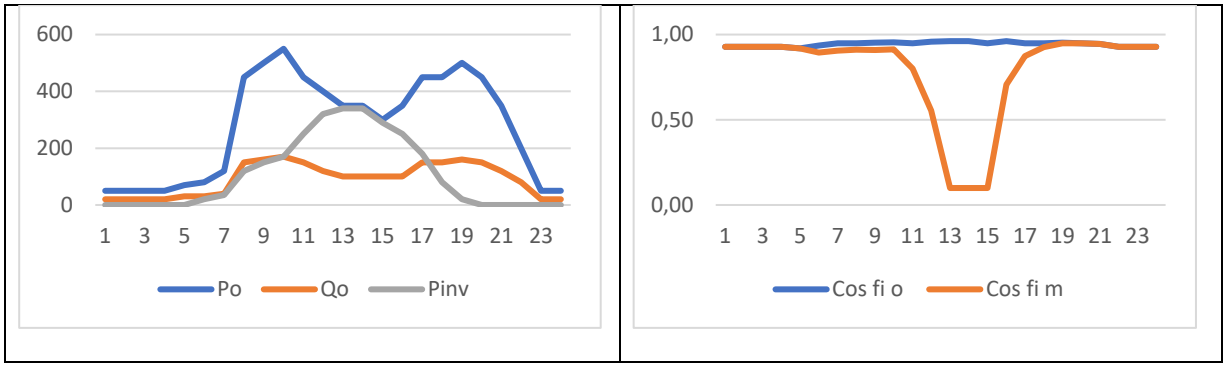
Prema Zakonu o energetici [1], aktivni kupac je krajnji potrošač ili grupa potrošača koji zajednički deluju, koriste ili skladište električnu energiju proizvedenu u okviru svojih objekata, ili je samostalno prodaju i učestvuju u uslugama fleksibilnosti i merama energetske efikasnosti – pri čemu te aktivnosti nisu njihova osnovna delatnost. Osnovna svrha aktivnog kupca, kao i kupca-proizvođača (prozjumer), jeste da se ubrza prelazak na zeleniji energetski miks – kroz investicije kako industrije, tako i domaćinstava.

Aktivni kupac ima pravo da učestvuju na tržištu električne energije direktno ili preko agregatora, da prodaje višak proizvedene električne energije, koristi je za sopstvene potrebe, učestvuje u uslugama fleksibilnosti i šemama energetske efikasnosti i da poverava trećim stranama izgradnju i upravljanje postrojenjima. Evidenciju o aktivnim kupcima vodiće operator sistema na osnovu njihovog zahteva.

Kada se na mestu potrošača (npr. u domaćinstvu ili proizvodnom pogonu) priključi solarna elektrana (fotonaponski sistem), dešavaju se promene u pogledu snage koju objekat povlači iz elektrodistributivne mreže. Sama reaktivna snaga potrošača se ne menja, ali se reaktivna snaga koju objekat povlači iz mreže može promeniti u zavisnosti od tipa i podešavanja solarnog invertora. U nastavku će biti prikazana dva slučaja: rad sa fiksnim i promenljivim faktorom snage elektrane

1.1 Scenario A: Invertor podešen na cos φ = 1

Na sledećoj slici prikazan je primer dnevnog dijagrama prozjumera sa snagom potrošnje P_o, ugrađenim solarnim panelima i invertorom snage P_{inv} i reaktivnom snagom potrošnje Q_o (slika 1 levo). Faktor snage (slika 1 desno) različit je za samog potrošača ($\cos\varphi_0$) od faktora snage koji se registruje na brojilu ($\cos\varphi_m$).



Slika 1 Aktivne snage u sistemu aktivnog kupaca (levo) Faktor snage aktivnog kupca (desno)

U ovom slučaju, važno je razdvojiti reaktivnu snagu samih uređaja u objektu od reaktivne snage na mestu predaje (brojilu).

- **Reaktivna snaga potrošača (Q_o):** Elektromotori (frižideri, klime, pumpe) i transformatori u objektu i dalje zahtevaju istu količinu reaktivne snage za stvaranje magnetnog polja kako bi radili. Priključenjem solarnih panela njihove fizičke osobine se ne menjaju.

- **Aktivna snaga (P_{inv}):** Solarni paneli preko invertora proizvode aktivnu snagu. Ona direktno napaja potrošače, pa objekat povlači znatno manje aktivne snage iz mreže.

Najčešće podešenje invertora je da invertor radi sa jediničnim faktorom snage (cos φ = 1). Ovo je najčešće podešavanje za manje, starije ili jednostavnije sisteme. Invertor proizvodi **isključivo aktivnu snagu**.

- Solarni panel pokriva npr. 80% potreba za aktivnom snagom. Međutim, svu reaktivnu snagu potrošači i dalje moraju da povuku iz mreže.

- Sa strane mreže, aktivna snaga je drastično opala, ali je reaktivna ostala ista. To dovodi do pada faktora snage celog objekta. U industrijskim objektima ovo može izazvati penale za prekomerno preuzimanje reaktivne energije

U sledećoj tabeli prikazan je slučaj ovakvog podešenja invertora snage 100 kW, za dva trenutka u vremenu.

Tabela 1 – Parametri aktivnog kupca u dva vremenska trenutka za Scenario A

	P_o (kW)	Q_o (kVaR)	S_o (kVA)	Cos φ	P_{inv} (kW)	Q_{inv} (kVaR)	S_{inv} (kVA)	P_m (kW)	Q_m (kVAr)	S_m (kVA)	Cos φ
T1	120	20	121,6	0.98	100	0	100	20	20	28,28	0.70
T2	120	40	126,3	0.95	100	0	100	20	40	44,7	0,44

1.2 Scenario B: Invertor je podešen da kompenzuje reaktivnu snagu

Moderni "pametni" invertori imaju mogućnost da, pored aktivne, generišu ili apsorbuju reaktivnu snagu (rade u režimu sa cos φ < 1 bilo induktivno ili kapacitativno). Zbog toga se sve češće prilikom priključivanja prozjumera i zahteva i upravljanje reaktivnom snagom, kako bi se postigla sledeća poboljašanja [2, 3]:

- Invertor "vidi" da potrošači u objektu traže reaktivnu snagu i lokalno je proizvodi zajedno sa aktivnom.
- Reaktivna snaga koju objekat povlači iz mreže se smanjuje ili potpuno nestaje. Faktor snage na brojilu ostaje u traženim granicama, a mreža je rasterećena.

Tabela 2 – Parametri aktivnog kupca u dva vremenska trenutka za Scenario B

	P_o (kW)	Q_o (kVaR)	S_o (kVA)	Cos φ	P_{inv} (kW)	Q_{inv} (kVaR)	S_{inv} (kVA)	P_m (kW)	Q_m (kVAr)	S_m (kVA)	Cos φ
T1	120	20	121,65	0.98	100	-15	101,1	20	5	20,6	0.97
T2	120	40	126,3	0.95	100	-35	105,9	20	5	20,6	0.97

Uporedni prikaz ova dva slučaja dat je u Tabeli 3.

Tabela 3 – Uporedna tabela parametar aktivnog kupca za dva scenarija

Parametar na brojilu (iz mreže)	**Bez solarnog panela**	**Sa solarnim panelom (cosϕ=1)**	**Sa solarnim panelom (Lokalna kompenzacija)**
Aktivna snaga	Visoka	Smanjena (panel pokriva deo)	Smanjena (panel pokriva deo)
Reaktivna snaga	Normalna	Ista (mreža i dalje sve napaja)	Smanjena (invertor pokriva deo)
Faktor snage	Dobar (0.95)	Pogoršan (npr. 0.70)	Odličan (održava se blizu 1)

Iz prethodne tabele jasno je da je potrebno omogućiti da aktivni kupac na drugačiji način upravlja reaktvnom energijom, što će biti analizirano u narednom poglavlju.

2 MOGUĆNOSTI INVERTORA U POGLEDU REAKTIVNE SNAGE

PV invertor se može posebno konfigurisati u režimu za rad sa konstantnim faktorom snage (cosφ). Ovo je uobičajena karakteristika u modernim "pametnim" mrežnim pretvaračima, omogućavajući im da obezbede podršku reaktivne snage mreži ili lokalnoj instalaciji.

U "režimu konstantnog faktora snage", invertor dinamički menja svoju reaktivnu snagu (VAr) proporcionalno stvarnoj snazi (kW) , tako da ukupni faktor snage ostaje na fiksnoj, unapred definisanoj vrednosti. Mrežni operateri često nalažu specifična podešavanja faktora snage za velike PV instalacije kako bi se održala stabilnost mreže i nivo napona. Podešavanjem cosφ, PV invertor može nadoknaditi zahteve reaktivne snage induktivnih opterećenja (kao što su motori ili veliki uređaji), potencijalno izbegavajući penale za loš faktor snage na mestu priključenja.

Važno je napomenuti da kada pretvarač generiše reaktivnu snagu, koristi deo svoje ukupne prividne snage (kVA) . To znači da će njegova maksimalna aktivna izlazna snaga biti neznatno smanjena tokom perioda visoke proizvodnje reaktivne snage.

2.1 Podešavanje cosφ

Podesivi opseg za podešavanje faktora snage je obično od 0.8 u kapacitivnom do 0.8 induktivnom režimu, u zavisnosti od modela invertora i lokalnih propisa.

Ostali načini kontrole dostupni u naprednim invertorima uključuju:

- Režim konstantne reaktivne snage: Invertor održava fiksni VAr izlaz bez obzira na aktivnu izlaznu snagu.
- Volt-VAr režim: Invertor podešava svoju reaktivnu snagu na osnovu nivoa napona lokalne mreže.
- Watt-VAr režim: Reaktivna izlazna snaga se podešava na osnovu nivoa proizvodnje aktivne snage pretvarača.

Sposobnost rada sa konstantnim cosφ je standardna, konfigurabilna karakteristika koja omogućava PV sistemu da funkcioniše kao aktivna mrežna komponenta, a ne samo pasivni izvor energije.

2.1.1 Režim konstantnog cosφ

U ovom režimu, pretvarač održava fiksni odnos između aktivne snage (P) koju generiše i reaktivne snage (Q) koju obezbeđuje ili apsorbuje.

- Proporcionalno podešavanje: Kako se sunčevo zračenje menja tokom dana, pretvarač automatski skalira svoju reaktivnu izlaznu snagu kako bi faktor snage bio konstantan.
- Tipičan opseg: Mnogi invertori podržavaju programabilni opseg od 0.8 u kapacitivnom do 0.8 u induktivnom režimu .
- Mrežni operateri nameću fiksni faktor snage (npr. 0.9 ili 0.95) kako bi pomogli u stabilizaciji napona u distributivnoj mreži.

Obezbeđivanje reaktivne snage troši deo prividnog kapaciteta snage (kVA) pretvarača. Ako invertor radi na maksimalnoj granici kVA, održavanje cos(φ) na drugačijoj vrednosti od jedinice može zahtevati smanjenje proizvodnje aktivne energije. Korišćenje konstantnog cos(φ) može pomoći aktivnom kupcu da izbegne penale za niski faktor snage izazvane smanjenom aktivnom snagom iz mreže tokom sunčanih sati.

Da bi se obezbedila reaktivna snaga bez gubitka solarne energije, često se preporučuje da snaga na DC strani invertora bude dimenzionisana za 20-30 % u odnosu na nominalnu snagu invertora na AC strani, tako da ima dovoljno kVA prostora za rukovanje obe vrste energije.

2.1.2 Ostali uobičajeni načini kontrole

Pored konstantnog cos φ, moderni pretvarači takođe mogu podržati sledeće režime rada invertora:

- cos φ (P): Faktor snage se dinamički menja na osnovu toga koliko aktivne snage se proizvodi (npr. Postaje induktivna na višim nivoima snage).

- Volt-VAr režim: Invertor podešava reaktivnu snagu na osnovu izmerenog napona mreže kako bi se sprečilo prenapona ili podnapona.

- Konstantna reaktivna snaga (P: Invertor obezbeđuje fiksnu količinu reaktivne snage bez obzira na solarnu snagu.

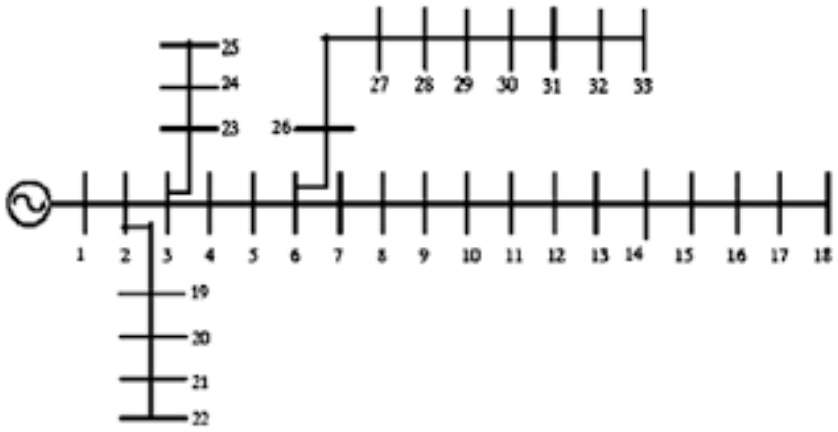
2.1.3 „Q at night“

Tokom noći, PV paneli ne proizvode aktivnu snagu jer nema sunčeve svetlosti. Međutim, invertor može ostati povezan na mrežu i proizvoditi ili apsorbovati reaktivnu snagu. Ova funkcija je važna za podršku elektroenergetskoj mreži, jer pomaže u regulaciji napona i poboljšava kvalitet napajanja. Invertor koristi svoju elektroniku da generiše reaktivnu snagu, bez proizvodnje aktivne snage.

"Q at night" omogućava da invertori doprinesu stabilnosti mreže čak i kada ne proizvode električnu energiju za potrošnju. Ova funkcija je često zahtevana od strane operatora mreže, posebno kod velikih solarnih elektrana.

3 PRIMER MREŽE SA AKTIVNIM KUPCEM

Kao primer analize uticaja različitih režima rada aktivnog kupca, posmatraćemo uobičajenu test mrežu sa 33 čvora [4]



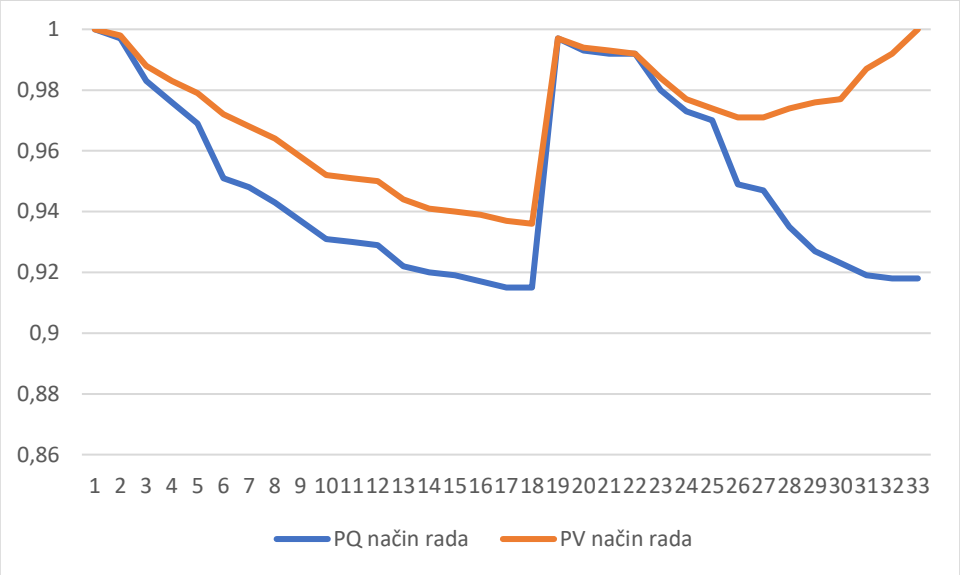
Slika 2 Distributivna mreža sa 33 čvora

Mreža je prilagođena na taj način da je u čvoru 33 predviđen rad aktivnog kupca sa instaliranim solarnim panelima. U originalnom scenariju bez proizvodnje iz solarnih panela, potrošnja u čvoru 33 je 60 kW aktivne i 40 kVAr reaktivne snage. U slučaju aktivnog kupca, ugrađuju se solarni paneli snage 60 kW (iste snage koja pokriva potrošnju u potpunosti u režimu maksimalne proizvodnje) . Proračun je izvršen za dva slučaja:

a) Aktivni kupac u režimu rada konstantnog cos φ

b) Aktivni kupac u režimu rada promenljive reaktivne snage sa konstantnim naponom V = 1 r.j.

Na sledećoj slici prikazani su naponi u čvorovima za oba scenarija. Proračun tokova snaga izvršen je u standardnom paketu MATPOWER [5].



Slika 3 Naponi u čvorovima za scenirao A (PQ čvor, konstantni faktor snage), scenario B: (PV čvor, promenljiva reaktivna snaga)

4 ZAKLJUČAK

Analiza upravljanja reaktivnom snagom aktivnih kupaca i kupaca-proizvođača pokazuje da integracija solarnih PV sistema može značajno uticati na faktor snage i tokove snaga u distributivnoj mreži. Ako se invertori koriste samo za proizvodnju aktivne snage (cos φ = 1), dolazi do pogoršanja faktora snage na mestu priključenja, što može dovesti do finansijskih penala za korisnike i povećanog opterećenja mreže.

Sa druge strane, upotreba modernih "pametnih" invertora koji omogućavaju kompenzaciju reaktivne snage omogućava održavanje povoljnog faktora snage, rasterećenje mreže i izbegavanje dodatnih troškova. Stoga se preporučuje da aktivni kupci koriste invertore sa mogućnošću upravljanja reaktivnom snagom i da se prilikom projektovanja i priključenja novih PV sistema uvek razmatraju režimi rada koji podržavaju fleksibilnost i stabilnost distributivne mreže. Na taj način se postiže optimalna integracija obnovljivih izvora energije i povećava energetska efikasnost sistema.

LITERATURA

[1] Zakon o energetici ('Sl. glasnik RS', br. 145/2014, 95/2018 - dr. zakon, 40/2021, 35/2023 - dr. zakon, 62/2023, 94/2024 i 109/2025 - dr. zakoni)
[2] D.-L. Schultis, A. Ilo, C. Schirmer, Overall performance evaluation of reactive power control strategies in low voltage grids with high prosumer share, Electric Power Systems Research, Volume 168,2019,Pages 336-349,

[3] J. Yang, W. Tushar, T. K. Saha, M. R. Alam and Y. Li, "Prosumer-Driven Voltage Regulation via Coordinated Real and Reactive Power Control," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 13, no. 2, pp. 1441-1452, March 2022,
[4] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing," in *IEEE Power Engineering Review*, vol. 9, no. 4, pp. 101-102, April 1989, doi: 10.1109/MPER.1989.4310642. keywords: {Load management;Switches;Load flow;Tree graphs;Network opology;Transformers;Equations;Convergence;Testing;Telephony},
[5] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. ThomasTitle: “MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education”Journal: IEEE Transactions on Power SystemsDetails: Vol. 26, No. 1, pp. 12-19, February 2011