

**UTICAJ SIMULTANOG PRIKLJUČENJA KONDENZATORA I SINHRONOG GENERATORA NA NAPONSKE PRILIKE U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI****THE INFLUENCE OF SIMULTANEOUS CONNECTION OF CAPACITOR AND SYNCHRONOUS GENERATOR ON DISTRIBUTION GRID VOLTAGE CONDITIONS**

Mladen Stančić, Savo Đukić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

**Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – Radom je razmatran uticaj simultanog priključenja kondenzatora i sinhronog generatora na naponske prilike u distributivnoj mreži. Na osnovu nekoliko scenarija priključenja kondenzatora i sinhronog generatora na test distributivnu mrežu izvedeni su odgovarajući zaključci.

**Ključne reči:** Kondenzator, Sihroni generator, Distributivna mreža.

**Abstract** – This paper considers the influence of simultaneous connection of capacitors and synchronous generators on the voltage conditions in the distribution network. Based on several scenarios of connection of the capacitor and the synchronous generator to the test distribution network, appropriate conclusions have been drawn.

**Keywords:** Capacitor, Synchronous generator, Distribution network.

**1. UVOD**

U današnje vreme kompanije za distribuciju električne energije doživljavaju velike promene. Sve veći akcenat je na minimizaciji troškova poslovanja. Zahtevi za smanjenim troškovima distribucije električne energije rezultuju potrebom za optimizacijom sistema u cilju omogućavanja da postojeći kapaciteti budu maksimalno iskorišćeni.

Jedan od načina racionalnijeg iskorišćenja postojećih kapaciteta ogleda se kroz pojam kompenzacije reaktivne snage. Jedan od najrasprostranjениjih elemenata za kompenzaciju reaktivne snage je otočni kondenzator. Pravilnim priključenjem i upravljanjem, kondenzatori mogu značajno poboljšati performanse distributivne mreže, uključujući naponske prilike.

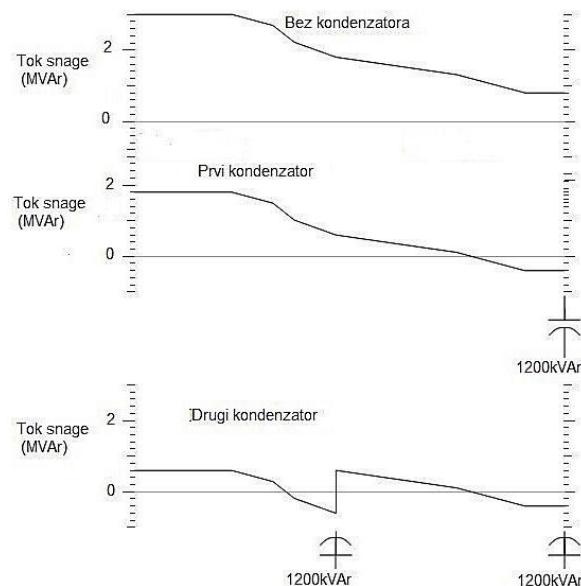
U proteklih nekoliko godina svedoci smo ekspanzije zahteva za priključenje elektrana na distributivnu mrežu, kao rezultat podsticajnih mera i pojave efikasnijih tehnologija za proizvodnju električne energije. Elektrane menjaju tokove snaga i naponske prilike u distributivnoj mreži i utiču na rad postojećih sistema regulacije napona. Uticaj je veći u ruralnim mrežama koje su slabije i sa većim odnosom ekvivalentne otpornosti i reaktanse.

U drugoj glavi je teorijski razmatran uticaj priključenja kondenzatora i sinhronog generatora (SG) na naponske prilike u distributivnoj mreži. U trećoj glavi je uticaj na naponske prilike razmatran kroz nekoliko scenarija priključenja na test nadzemnu distributivnu mrežu. Na kraju rada dati su odgovarajući zaključci i literatura.

**2. UTICAJ NA NAPONSKE PRILIKE****2.1. Uticaj kondenzatora na naponske prilike u mreži**

Naponi u distributivnoj mreži se moraju održavati u određenim granicama, čime se obezbeđuje da oprema korisnika i oprema u distributivnoj mreži funkcionišu na zadovoljavajući način. Nizak naponski nivo prouzrokuje da induktivni motori rade sa strujom koja je veća od propisane. Takođe, sa nižim naponom oporavak sistema nakon nekog poremećaja koji se desi unutar njega je sporiji. Zbog toga je održavanje napona u nominalnim granicama od izuzetnog značaja. Otočno priključeni kondenzatori u distributivnoj mreži smanjuju vrednost induktivne struje u kolu. Smanjenje struje rezultuje smanjenjem pada napona, odnosno poboljšanjem naponskog profila od lokacije kondenzatora do izvora napajanja [1].

Izbor lokacije kondenzatora za poboljšanje naponskih prilika zavisi najviše od toga gde su kritična mesta sa aspektom napona. Na slici 2.1 je prikazan primer kako kondenzator(i) menja(ju) naponske prilike unutar kola [2].

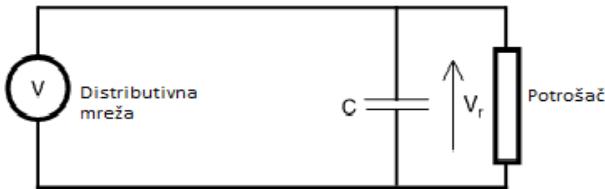


Slika 2.1. Naponske prilike u kolu pre i nakon dodavanja kondenzatora [2]

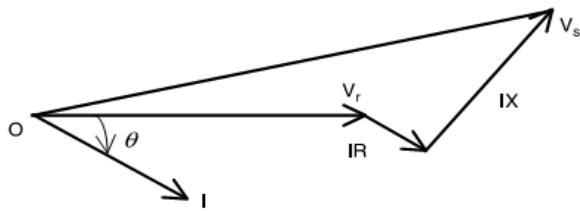
**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Savo Đukić, docent.

Na slici 2.2 prikazana je jednopolna šema sistema koji se koristi za analizu uticaja kondenzatora na naponske prilike. Fazorski dijagram sistema bez kondenzatora je prikazan na slici 2.3, dok je fazorski dijagram sistema sa kondenzatorom prikazan na slici 2.4.



Slika 2.2. Jednopolna šema trofaznog radikalnog sistema [1]



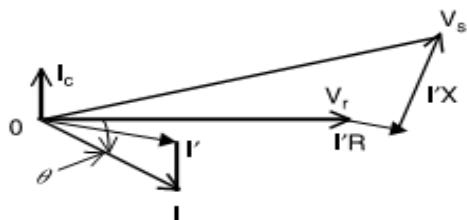
Slika 2.3. Fazorski dijagram sistema bez šant kondenzatora [1]

Za sistem sa slike 2.3 važi sledeća jednačina:

$$V_r = V_s - I(\cos \varphi \pm j \sin \varphi) (R + jX), \quad (2.1)$$

gde su:

- $V_s$  – fazni napon na izvoru napajanja,
- $V_r$  – fazni napon u tački potrošnje (fazni),
- $I$  – struja opterećenja,
- $R$  – otpornost,
- $X$  – reaktansa,
- $\varphi$  – ugao faktora snage.



Slika 2.4. Fazorski dijagram sistema sa šant kondenzatorom [1]

Za dijagram sa slike 2.4 važi sledeća jednačina:

$$I' = I(\cos \varphi \pm j \sin \varphi) - jI_c, \quad (2.2)$$

gde se struja kondenzatora računa kao:

$$I_c = \frac{V}{X_c}. \quad (2.3)$$

Poboljšanje naponskih prilika na potrošaču je postignuto smanjenjem vrednosti struje (izraz (2.2)), odnosno smanjenjem pada napona.

## 2.2. Uticaj sinhronog generatora na naponske prilike u mreži

SG proizvode aktivnu i mogu da proizvode ili troše reaktivnu energiju. Tradicionalno, operator distributivnog sistema nevoljno dopušta SG da vrši regulaciju napona, iz dva razloga. Prvo, strategiju regulacije napona SG potrebno je iskoordinisati sa drugim sistemima regulacije u distribu-

tivnoj mreži. Drugo, generatori koji se priključuju na distributivnu mrežu su malih snaga.

Da bi mogao da poveća vrednost napona, SG mora injektirati veliku reaktivnu snagu, što može dovesti do prorade relejne zaštite i ispada generatora. Stoga, SG obično radi sa konstantnim faktorom snage ili u određenom opsegu faktora snage [3].

Načini rada SG priključenog na distributivnu mrežu su [3]:

- sa regulacijom faktora snage,
- sa regulacijom napona,
- sa kombinacijom regulacije faktora snage i regulacije napona, i
- sa regulacijom reaktivne snage.

Rad SG sa regulacijom faktora snage omogućava operatoru distributivne mreže priključenje na tradicionalan „podesi i zaboravi“ način. Izbegavaju se potencijalne poteškoće koordinacije kontrole napona između više generatorskih jedinica, kao i sa postojećim sistemom regulacije u distributivnoj mreži. SG mogu da rade sa konstantnim faktorom snage ili u određenom opsegu faktora snage.

U mrežama u kojima povećanje vrednosti napona predstavlja prepreku priključenju SG, usvaja se induktivni faktor snage. Strategija koja se takođe koristi je postavljanje različitih referentnih vrednosti faktora snage u različitim vremenskim periodima. U načelu, taj koncept podrazumeva kapacitativni režim rada tokom perioda vršnih opterećenja i induktivni režim rada tokom perioda malih opterećenja [3].

Pri regulaciji napona, promenom pobudne struje SG menja se smer i vrednost reaktivne snage radi održavanja napona u referentnoj tački. Napon referentne tačke se dovodi na ulaz regulatora koji ocenjuje grešku (razliku u odnosu na referentnu vrednost napona) i prepodešava vrednost pobudne struje. Osetljivost regulatora treba da, sa jedne strane, bude dovoljno velika da obezbedi odgovarajuću kontrolu napona, a sa druge strane, dovoljno mala da se izbegne konflikt sa drugim sistemima za automatsku kontrolu napona.

Efikasnost regulacije napona zavisi od odnosa veličine (snage) SG i snage kratkog spoja mreže u referentnoj tački. Za manji odnos, uticaj generatora na napon u referentnoj tački može biti mali, tako da je za male promene napona potrebno proizvoditi/trošiti reaktivnu energiju sa velikom snagom, što ograničava snagu sa kojom se proizvodi aktivna energija.

Mana moda regulacije napona jeste to što je zakon regulacije potrebno iskoordinisati sa zakonima regulacije drugih sistema koji regulišu napon u obližnjim tačkama mreže. Sa druge strane, za priključenje većeg broja elektrana bez implementacije sistema kontrole napona, vrednosti napona u mreži mogu porasti iznad dozvoljenih vrednosti [3]. Oba gore razmatrana pristupa regulaciji imaju svoje prednosti i nedostatke sa aspekta uticaja na mrežu. Nijedan od pristupa ne može biti optimalan za sva stanja distributivne mreže. Iz tog razloga nastale su strategije koje kombinuju dva razmatrana pristupa.

Na primer, jedan pristup predlaže da SG radi sa konstantnim faktorom snage, ukoliko vrednost napona na

krajevima generatora leži u granicama između unapred definisane minimalne i maksimalne vrednosti. Ukoliko to nije slučaj, napon se održava na odgovarajućoj vrednosti. Tako, predloženim pristupom se obezbeđuje da se regulacija napona vrši samo kada je to neophodno, tj. u slučajevima kada napon u referentnoj tački izđe van dozvoljenih granica. Prema drugom pristupu, SG održava napon u referentnoj tački u određenom opsegu. SG normalno radi sa konstantnim faktorom snage. Ukoliko napon u referentnoj tački počne da se približava minimalnoj vrednosti, odnos reaktivne i aktivne snage se povećava i obrnuto, ukoliko napon počne da se približava maksimalnoj vrednosti, odnos reaktivne i aktivne snage se smanjuje [3].

Regulacijom reaktivne snage se obezbeđuje da priključenje i rad generatora ne izaziva značajno povećanje vrednosti napona. Naponski profil mreže za ovu strategiju regulacije vrlo je sličan naponskom profilu bez generatora. Pristup se sastoji u pronaalaženju vrednosti reaktivne snage za koju je povećanje vrednosti napona usled injektiranja aktivne snage minimalno [3].

### 2.3. Uticaj simultanog priključenja kondenzatora i sinhronog generatora na naponske prilike u mreži

Integriranje generatora i kondenzatora u radijalnim distributivnim mrežama jedna je od efikasnih opcija za poboljšanje naponskih prilika i smanjenje gubitaka u mreži. Kako bi se postigli odgovarajući efekti, potrebno je obezbediti optimalno dimenzionisanje i optimalno postavljanje generatora i kondenzatora. Nepravilno lociranje i određivanje veličine ovih elemenata u distributivnoj mreži smanjuje efikasnost sistema i povećava gubitke električne energije i troškove rada [4].

U [4] je primenjena metoda koja se bazira na faktorima osetljivosti gubitaka i nedavno razvijenoj tehnici za optimizaciju distributivne mreže adekvatnim postavljanjem generatara i kondenzatora. U razmatranje se uzimaju različiti nivoi opterećenja i određuju tačne lokacije postavljanja generatora i kondenzatora, pri čemu je cilj minimizacija gubitaka električne energije i poboljšanje naponskog profila mreže [4]. Optimizacijom se postiže smanjenje gubitaka na svim nivoima opterećenja. Takođe, naponski profil se značajno poboljšava. Maksimalno smanjenje gubitka uz poboljšanje naponskog profila se postiže istovremenim postavljanjem više generatora i više kondenzatora u mrežu. Dakle, može se zaključiti da istovremena alokacija generatora i kondenzatora povećava efikasnost distributivnog sistema [4].

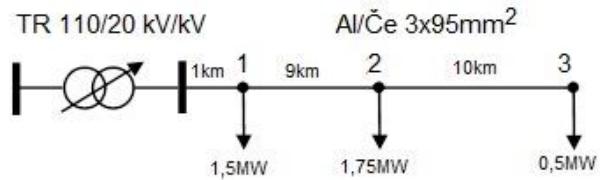
U [5] je predstavljen novi metod za istovremeno postavljanje generatora i fiksnih kondenzatora u cilju smanjenja zahteva za aktivnom snagom iz prenosne mreže, poboljšanja naponskog profila, kao i smanjenja gubitaka električne energije distributivne mreže čije opterećenje varira u toku dana.

### 3. PRIMER UTICAJA PRIKLJUČENJA KONDENZATORA I SINHRONOG GENERATORA NA NAPONSKE PRILIKE U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI

U ovoj glavi analizira se uticaj priključenja kondenzatora i SG na naponske prilike u test distributivnoj mreži sa slike 3.1.

Razmatra se priključenje dva kondenzatora, snage 300kVAr i 900kVAr, koji su priključeni u tačkama 3 i 2 (vidi sliku 3.1), respektivno. Takođe, razmatra se priključenje jednog SG, koji radi u režimu regulacije napona, u različitim tačkama priključenja i sa različitim vrednostima aktivne snage sa kojom predaje energiju u distributivnu mrežu (10MW, 5MW i 1MW), za dva režima opterećenja: maksimalni i minimalni. Pri proračunima su usvojene sledeće vrednosti:

- za faktor snage opterećenja vrednost 0.95,
- za odnos minimalnog i maksimalnog opterećenja vrednost 0.75,
- za vrednost napona na 20 kV sabirnicama: 20.77kV (za maksimalni režim opterećenja) i 20.36kV (za minimalni režim opterećenja).



Slika 3.1. Nadzemna 20kV test distributivna mreža

Rezultati proračuna su dati u tabelama 3.1-3.5.

U tabeli 3.1 prikazani su rezultati (naponi i preuzeta aktivna i reaktivna snaga) na 20kV sabirnicama, pre i nakon priključenja kondenzatora.

U tabeli 3.2 date su vrednosti napona u tri razmatrane tačke mreže, za minimalni i maksimalni režim, pre i nakon priključenja kondenzatora.

U tabelama 3.3-3.5 prikazani su efekti simultanog priključenja kondenzatora i SG (za različite vrednosti injektiranja aktivne snage) na naponske prilike u test distributivnoj mreži.

Tabela 3.1. Rezultati na 20kV sabirnicama pre i nakon priključenja kondenzatora

Pre dodavanja kondenzatora			
Režim	Q (MVAr)	P (MW)	U (kV)
Min	1.05	2.97	20.36
Max	1.40	3.97	20.77
Posle dodavanja kondenzatora			
Min	0.147	3.01	20.36
Max	0.153	4.02	20.77

Tabela 3.2 – Napon (kV) u razmatranim tačkama mreže pre i nakon priključenja kondenzatora

Režim	Tačka 1	Tačka 2	Tačka 3
Pre dodavanja kondenzatora			
Min	20.30	19.98	19.91
Max	20.68	20.25	20.15
Posle dodavanja kondenzatora			
Min	20.32	20.19	20.16
Max	20.70	20.46	20.41

Tabela 3.3. Napon (kV) u razmatranim tačkama mreže nakon priključenja SG snage 1MW

Režim	Tačka 1	Tačka 2	Tačka 3
SG priključen u tački 1			
Min	20.36	20.22	20.20
Max	20.76	20.52	20.47
SG priključen u tački 2			
Min	20.32	20.36	20.33
Max	20.71	20.76	20.71
SG priključen u tački 3			
Min	20.33	20.29	20.36
Max	20.72	20.63	20.76

Tabela 3.4 – Napon (kV) u razmatranim tačkama mreže nakon priključenja SG snage 5MW

Režim	Tačka 1	Tačka 2	Tačka 3
SG priključen u tački 1			
Min	20.36	20.23	20.20
Max	20.77	20.52	20.46
SG priključen u tački 2			
Min	20.32	20.36	20.33
Max	20.71	20.77	20.71
SG priključen u tački 3			
Min	20.33	20.29	20.36
Max	20.72	20.64	20.77

Tabela 3.5 – Napon (kV) u razmatranim tačkama mreže nakon priključenja SG snage 10MW

Režim	Tačka 1	Tačka 2	Tačka 3
SG priključen u tački 1			
Min	20.36	20.23	20.20
Max	20.76	20.52	20.46
SG priključen u tački 2			
Min	20.32	20.36	20.33
Max	20.71	20.76	20.71
SG priključen u tački 3			
Min	20.33	20.29	20.36
Max	20.72	20.64	20.76

#### 4. ZAKLJUČAK

Integracijom distribuiranih izvora u distributivnu mrežu moguće je poboljšati naponske prilike u mreži, minimizovati gubitke i smanjiti troškove proširenja distributivnog sistema, pri čemu uticaj zavisi od mesta priključenja (tj. udaljenosti od izvora napajanja) i snage injektiranja.

Simultano postavljanje kondenzatora i generatora u radijalnim distributivnim mrežama je jedna od efikasnijih metoda koje se mogu koristiti za poboljšanje naponskih prilika. Kondenzatori i generatori moraju biti i optimalno dimenzionisani i optimalno postavljeni. U tom smislu, istraživanja su usmerena razvoju jednostavnih i efikasnih metodologija za optimalno dimenzionisanje i postavljanje kondenzatora i distributivnih generatora.

Poređenjem rezultata prikazanih u tabeli 3.2 (priključeni samo kondenzatori) i rezultata prikazanih u tabelama 3.3, 3.4 i 3.5 (priključeni i kondenzatori i SG), može se zaključiti da SG, kada radi u režimu regulacije napona, podiže naponski profil u svim tačkama mreže, posebno u onim bližim tački priključenja. Naponske prilike su najpovoljnije u tačkama priključenja kondenzatora i generatora, čime se jasno vidi njihov povoljan uticaj na sistem.

#### 5. LITERATURA

- [1] R. Natarajan: “Power system capacitors”, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 2005.
- [2] T.A. Short: “Electric power distribution equipment and systems”, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 2006.
- [3] S. Đukić: “Strategije regulacije napona i faktora snage za sinhronne generatore u distributivnim mrežama”, CIRED, Vrnjačka Banja, Srbija, 2014.
- [4] S.K. Sudabattula, K. Muniswamy, V. Suresh: “Simultaneous Allocation of Distributed Generators and Shunt Capacitors in a Distribution System”, The ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics & Communications, Vol. 17, No. 1, 2019.
- [5] S.M. Sajjadi, M.R. Haghifam, “Simultaneous placement of distributed generation and capacitors in distribution networks considering voltage stability index”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 46, No. 3, 2013.

#### Kratka biografija:

**Mladen Stančić** rođen je u Šapcu 1993. godine. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi odbranio je 2017. godine.

**Savo Đukić** rođen je u Novom Sadu 1983. godine. Doktorsku disertaciju odbranio je 2014. godine na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektroenergetski sistemi.