

DOI: [10.46793/CIGRE37.C4.06](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C4.06)**C4.06****ISPITIVANJE SPOSOBNOSTI SOLARNE ELEKTRANE DA PRUŽI PODRŠKU  
ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU U POGLEDU REAKTIVNE ENERGIJE****THE ASSESSMENT OF PV PLANT CAPABILITY TO PROVIDE REACTIVE POWER  
SUPPORT IN POWER SYSTEMS****Ana Vuković, Mila Drajić\***

**Kratak sadržaj:** Napon je veličina koja u elektroenergetskom sistemu pri normalnim radnim uslovima ima uzak opseg dozvoljenih varijacija, kako bi se osigurala naponska stabilnost i pouzdan prenos snage u sistemu. Gornja i donja dozvoljena granica naponskih varijacija iznose najčešće od  $\pm 5\%$  do  $\pm 10\%$ , zavisno od naponskog nivoa koji se posmatra. Veličina neraskidivo povezana sa naponom i zaslužna za njegovu regulaciju je reaktivna energija. Većina mrežnih kodova u svetu definiše zahteve u pogledu minimalne induktivne i kapacitivne reaktivne energije koje elektrane moraju zadovoljiti u tački priključenja. U tradicionalnim elektroenergetskim sistemima, regulacija napona vršena je uglavnom zahvaljujući konvencionalnim (sinhronim) generatorima. Povećanje, a u određenim sistemima, i dominacija proizvodnje iz obnovljivih izvora energije dovela je do potrebe za promenom izvora i načina regulisanja naponskih prilika. Solarne i vetroelektrane razvijaju se i implementiraju sve češće sa sposobnošću da samostalno regulišu reaktivnu energiju i naponske prilike u tački priključenja. Kao pomoć samim invertorski vezanim izvorima da ostvare zadate zahteve u pogledu reaktivne snage, sposobnosti elektrana mogu se poboljšati dodavanjem specijalizovanih uređaja kao što su baterije kondenzatora ili STATCOM-i. Cilj ovog rada biće ispitivanje sposobnosti velike solarne elektrane (750MW) priključene na prenosni 132kV sistem da ispuni zahteve za proizvodnjom ili apsorpcijom reaktivne energije u tački priključenja pri različitim uslovima rada. Osnovni slučaj predstavljaće ispitivanje P-Q karakteristike elektrane pri ambijentalnoj temperaturi karakterističnoj za posmatrani geografski region ( $46^{\circ}\text{C}$ ), uz pretpostavku da naponske prilike samih invertora mogu pratiti maksimalno definisane vrednosti koje garantuje proizvođač opreme (1.1 r.j.). Analiza osetljivosti biće sprovedena u dva slučaja: pri drugim ambijentalnim uslovima (spoljašnja temperatura od  $52^{\circ}\text{C}$ ) i pri maksimalnom naponu invertora nižem od maksimalno dozvoljenih vrednosti (1.05 r.j.). Za svaki od tri pomenuta slučaja razmatraće se i induktivni i kapacitivni režimi rada elektrane, pri nominalnom i ekstremnim vrednostima napona u tački priključenja. Sve analize biće sprovedene u softverskom alatu DIgSILENT PowerFactory, uz detaljno modelovanje pomenute elektrane i svih njenih elemenata. Rezultati rada će omogućiti sagledavanje mogućnosti velikih solarnih elektrana da pruže reaktivnu podršku elektroenergetskom sistemu pri kritičnim režimima rada u smislu minimalnih i maksimalnih dozvoljenih napona u tački priključenja.

---

\* Ana Vuković, Go2power, [ana.vukovic@go2power.eu](mailto:ana.vukovic@go2power.eu)  
Mila Drajić, Go2Power Consulting, [mila.drajić@go2power.eu](mailto:mila.drajić@go2power.eu)

Biće takođe dat osvrt na uticaj ambijentalnih uslova na performanse invertora pri proizvodnji aktivne i reaktivne energije, kao i na uticaj ograničenja parametara samih invertora na vrednosti manje od maksimalno dozvoljenih radi produženja životnog veka razmatrane opreme.

**Ključne reči:** solarna elektrana, reaktivna energija, pogonska karta, *P-Q* karakteristika, DIgSILENT PowerFactory, softverski alati

**Abstract:** In a power system, voltage is a quantity that has a narrow range of permissible variations under normal operating conditions. The upper and lower limits most often vary from  $\pm 5\%$  to  $\pm 10\%$ , depending on the voltage level which is being observed. This ensures voltage stability and reliable power transfer in the power systems. Reactive power is a quantity directly linked to voltage and responsible for its regulation. Most grid codes in the world define reactive power capability requirements at the connection point which power plants must comply with in both inductive and capacitive regimes. In traditional power systems, voltage regulation was carried out mainly by synchronous generators. The increase in penetration, and in certain power systems, the dominance of renewable energy sources has caused a change to the sources and the methods carrying out voltage regulation. Solar and wind power plants are nowadays being developed and implemented with the ability to independently regulate reactive power and voltage conditions at the connection point. To help inverter-based resources meet the reactive power requirements, the capability of power plants can be enhanced by adding specialized devices such as capacitor banks or STATCOMs. The aim of this paper is to assess the capability of a large PV plant (750MW) connected to a 132kV transmission system to meet the reactive power requirements at the connection point under various operating conditions. Base case will represent the assessment of *P-Q* characteristics of the PV plant at ambient temperature characteristic for the observed geographical region ( $46^{\circ}\text{C}$ ), assuming the voltage of the inverters can be at the maximum values guaranteed by the equipment manufacturer (1.1pu). Sensitivity analysis will be carried out in two cases: in other ambient conditions (outdoor temperature of  $52^{\circ}\text{C}$ ) and for the inverter voltage lower than maximum (1.05pu). For each of the three cases mentioned above both inductive and capacitive operating modes will be considered at nominal and extreme voltage values at the connection point. The analysis will be conducted in the DIgSILENT PowerFactory software tool, including the detailed modeling of the observed PV plant and its elements. The results will give an assessment of the reactive power capabilities of a large PV plant to support the power system in critical operating regimes. The influence of ambient conditions on the inverters' power production will also be assessed, as well as the impact of limiting the inverter voltage to values less than the maximum in order to extend the lifetime of the observed equipment.

**Key words:** PV plant, reactive power, capability curve, *P-Q* diagram, DIgSILENT PowerFactory, software tools

## 1 UVOD

U prethodnim decenijama, energetska sektor prošao je kroz značajnu tranziciju na putu ka održivoj i čistoj energiji. Ovaj period obuhvatio je tehnološki razvoj obnovljivih izvora energije, uključujući solarne elektrane. Solarni sektor započeo je svoj razvoj 50-ih godina prošlog veka, a 2022. godine dostigao je globalni kapacitet od 1 TW. Samo dve godine kasnije, 2024. godine, globalni kapacitet je premašio 2 TW, što jasno ukazuje na značaj koji ova tehnologija ima u svetskoj energetska transformaciji. [1]

Ključni faktori koji su omogućili ovako brz napredak solarnih izvora jesu laka dostupnost i prilagodljivost, smanjivanje kapitalnih troškova u relativno kratkom vremenskom intervalu, politički podsticaji, kao i tehnološke inovacije u oblasti proizvodnje sastavnih komponenti solarnih elektrana – fotonaponskih panela i invertorskih sistema. Invertori, koji su odgovorni za pretvaranje jednosmerne struje proizvedene solarnim panelima u naizmeničnu struju, postali su centralni element solarnih elektrana.

Sa rastućim kapacitetom i brojem obnovljivih izvora energije (OIE) širom sveta dolazi do prepoznavanja izazova i problema koje njihova integracija sa sobom nosi. Odgovarajući zakoni i regulative se usklađuju kako bi ispratili aktuelne trendove i potrebe, što dovodi do izmena i dopuna pravila o radu prenosnih sistema i standarda koji definišu integraciju OIE u postojeće elektroenergetske sisteme. Jedan od zahteva pri proveru mogućnosti priključenja novih elektrana u sistem odnosi se na mogućnost generisanja i apsorbovanja reaktivne energije od strane posmatrane elektrane u tački priključenja. Iako solarne elektrane primarno proizvode aktivnu snagu, shodno pomenutim zahtevima moraju imati sposobnost obezbeđivanja i reaktivne snage, što samostalnim radom invertora, što dodavanjem pomoćnih uređaja kao što su baterije kondenzatora ili STATCOM uređaja, u sklopu same solarne elektrane.

Ovaj rad se bavi analizom mogućnosti solarne elektrane snage 750 MW da pruži reaktivnu podršku u tački priključenja. Pomenuta analiza je izvršena u softverskom alatu DigSILENT PowerFactory uz detaljno modelovanje pomenute solarne elektrane sa svim njenim elementima, kao pogonskom kartom izabranih invertora pri različitim naponskim uslovima. Osnovni slučaj prikazan u radu obuhvata ispitivanje P-Q karakteristike elektrane u tački priključenja pri ambijentalnoj temperaturi od 46°C. Analiza osetljivosti je sprovedena kroz dodatna dva slučaja, kako bi se sagledao uticaj pojedinih faktora na rad invertora i njihovu izlaznu snagu. Prvi slučaj predstavlja analizu reaktivne sposobnosti u tački priključenja pri višoj ambijentalnoj temperaturi (52°C), a drugi pri identičnim ambijentalnim uslovima, ali pri nižim naponima invertora.

## **2 REAKTIVNA ENERGIJA: POTREBE I ZAHTEVI**

Reaktivna energija se odnosi na tok energije u naizmeničnom sistemu koja osciluje između elektrane i potrošača i ne vrši koristan rad. Ona je potrebna za magnećenje potrošača za čiji rad je potrebno magnetno polje poput motora i uređaja sa magnetnim jezgrom, kao što su transformatori. [2] Reaktivna energija je takođe neophodna za regulaciju napona i održavanje stabilnih naponskih prilika u elektroenergetskim sistemima.

Problemi koji se javljaju usled nedostatka ili viška reaktivne energije mogu biti:

- Naponska nestabilnost – U slučaju nedostatka reaktivne energije može doći do naponskih propada, fluktuacija ili naponskog sloma. Višak reaktivne energije može izazvati prenapone u mreži, što dovodi do nestabilnosti.
- Problemi sa performansama potrošača – Potrošački uređaji su dimenzionisani za rad u određenom opsegu napona. Pri naponima nižim od propisanih može doći do nepravilnog rada uređaja (npr. treperenje sijalica, pregrevanje i oštećenje motora i sl.).
- Povećani gubici – Reaktivna komponenta struje zaostaje za aktivnom za 90°, a ukupna struja opterećenja se dobija kao geometrijski zbir te dve komponente. Reaktivna komponenta struje dodatno opterećuje elemente mreže od izvora do potrošača, poput

transformatora, kablova i dalekovoda, čime se smanjuju prenosni kapaciteti dostupni za aktivnu snagu i javljaju se dodatni gubici.

- Problemi sa kvalitetom energije – Nedostatak reaktivne energije može dovesti do niskog faktora snage, što negativno utiče na rad industrijskih mašina i povećava troškove proizvodnje. Takođe, višak reaktivne energije može uzrokovati rezonansu – pojavu poklapanja određene frekvencije sa prirodnom frekvencijom mreže, što dovodi do povećanih harmonika u mreži i dodatnog naprezanja opreme.

Iako se elektroenergetski sistemi još uvek često baziraju na konvencionalnim izvorima energije, u kojima se regulacija napona uglavnom obavlja pomoću sinhronih generatora, visok nivo penetracije obnovljivih izvora zahteva njihovo uključivanje u regulaciju napona i reaktivne snage [3]. Nove elektrane koje se priključuju na mrežu moraju ispuniti tehničke zahteve za priključenje na sistem, među kojima je i zahtev za generisanjem i apsorpcijom reaktivne energije koji mora biti ispunjen u tački priključenja svih novih elektrana, kako bi se obezbedila stabilnosti sistema i naponskih uslova u mreži. Zahtevi u vezi sa reaktivnom energijom prisutni su u gotovo svim mrežnim kodovima, a prema njihovim odredbama često se javlja zahtev da solarna elektrana mora biti u mogućnosti da injektira 33% svoje nominalne aktivne snage u tačku vezivanja sa mrežom.

Performanse invertora u ovom procesu su ključne, jer invertori omogućavaju kako generisanje, tako i apsorpciju reaktivne snage, do svog maksimalnog kapaciteta, a tek se preostali nezadovoljen kapacitet iz mrežnih zahteva obezbeđuje dodatnim uređajima u okviru solarne elektrane. Rad i efikasnost solarnih panela i invertora zavise od atmosferskih uslova, poput temperature i vlažnosti vazduha, što direktno utiče na njihovu mogućnost proizvodnje aktivne i reaktivne snage. U slučaju da sami invertori ne mogu da zadovolje zadate zahteve za reaktivnom energijom, potrebno je obezbediti dodatne izvore reaktivne energije u okviru samih solarnih elektrana, u vidu kompenzacionih uređaja kao što su baterije kondenzatora, STATCOM (*Synchronous Static Compensator*) ili SVC (*Static Var Compensator*) uređaji.

### 3 METODOLOGIJA I MODELOVANJE

Modelovanje solarne elektrane, kao i analiza reaktivne podrške date u radu izvršene su u softverskom alatu DIgSILENT PowerFactory u verziji 2022. PowerFactory je napredni softver za analizu elektroenergetskih sistema specijalizovan za proizvodne, prenosne, distributivne i industrijske sisteme.

Bazni scenario analiziran u ovom softveru obuhvata ispitivanje P-Q karakteristike elektrane u tački priključenja pri ambijentalnoj temperaturi od 46°C. Naponi na invertorima u pomenutom slučaju su održavani na vrednosti od 1.1 r.j, kao maksimalno dozvoljenoj od strane proizvođača, jer je tada doprinos reaktivne snage (Q) od strane invertora najveći. Analiza osetljivosti je sprovedena kroz dodatna dva slučaja: prvi, pri ambijentalnoj temperaturi od 52°C i identičnim maksimalnim naponima invertora i drugi, pri ambijentalnoj temperaturi od 46°C, ali pri maksimalnim naponima na invertorskim sabirnicama 1.05 r.j.

Usvojen je tipičan zahtev mrežnih kodeksa kojim se definiše neophodna sposobnost elektrane da injektira/apsorbuje 33% aktivne snage u tački priključenja, što u posmatranom slučaju iznosi 250 MVar.

Analiza je izvršena za aktivne snage u tački priključenja u sledećim koracima:

- 750 MW – nominalna snaga elektrane,
- 375 MW – 50% nominalne snage elektrane i
- 0 MW – noćni režim.

Izlazna aktivna snaga invertora usaglašena je sa karakteristikom izlazne snage prema odgovarajućoj ambijentalnoj temperaturi u svakoj od izvršenih simulacija. Izlaz reaktivne snage zavisi u velikoj meri od napona na invertoru, pri čemu veći napon invertora omogućava veću izlaznu reaktivnu snagu. Zbog toga su naponi održavani blizu maksimalne dozvoljene vrednosti (1.1 r.j.), kako bi se postigla maksimalna podrška.

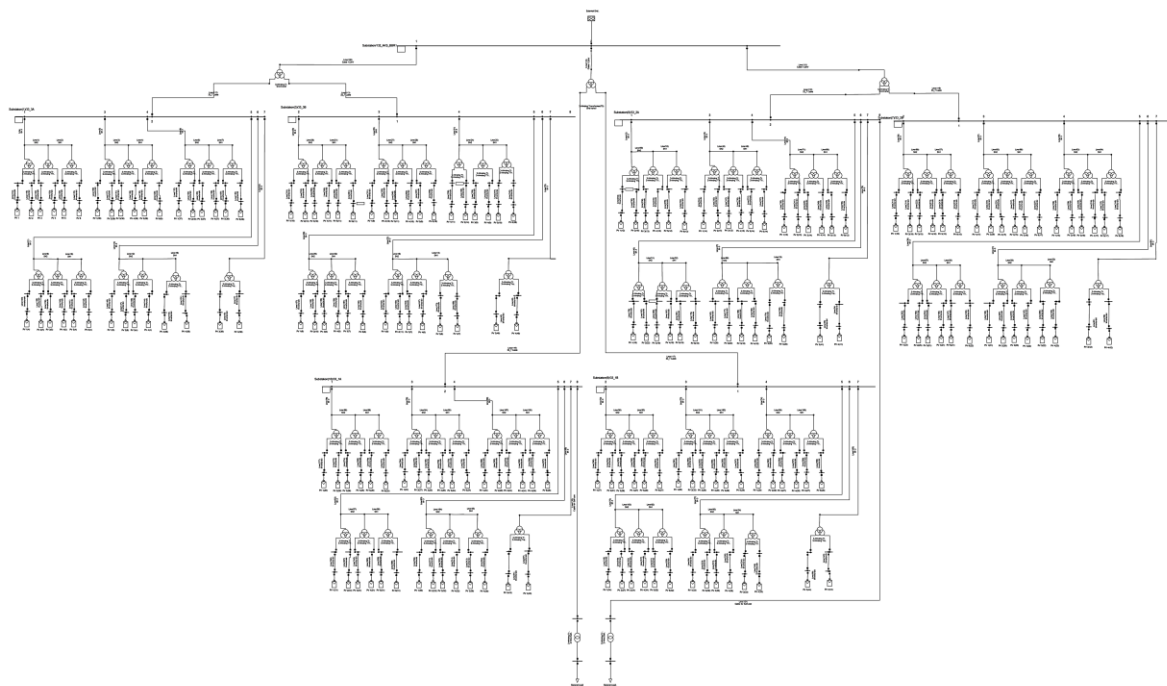
Naponi i opterećenja unutar solarne elektrane u svim simulacijama su održavani u odgovarajućim granicama:

- Napon na 132 kV sabirnicama:  $\pm 5\%$ .
- Naponske varijacije na 33 kV sabirnicama:  $\pm 5\%$  (kontrolisani od strane mrežnih transformatora).
- Naponske varijacije na 0.8 kV:  $\pm 10\%$  (zavise od izlazne reaktivne snage invertora i uslova mrežnog napona). Pri analizi osetljivosti ova granica će biti pomerana na  $\pm 5\%$ .
- Maksimalno opterećenje opreme: 100%

Za svaki od posmatranih scenarija i režima razmatrane su tri vrednosti napona u tački priključenja solarne elektrane: 0.9, 1 i 1.1 r.j, koji su definisani zahtevima u mrežnom kodu pri proveru mogućnosti podrške reaktivne snage. Smatra se da, ukoliko su zahtevi ispunjeni pri ekstremnim vrednostima mrežnog napona u tački priključenja, biće ispunjeni i u svim drugim slučajevima, čime se praktična analiza značajno pojednostavljuje.

### 3.1 MODEL SOLARNE ELEKTRANE

Posmatrana solarna elektrana je snage 750 MW i priključena na sistem na naponskom nivou 132kV. Model elektrane u softveru čine svi elementi koji se i zaista nalaze u elektrani: 132 kV kablovi koji povezuju solarnu elektranu sa tačkom priključenja, 132/33/33 kV mrežni transformatori, invertorski transformatori, PV invertori, interna kablovska mreža SN i NN, kao i sopstvena potrošnja elektrane. Model solarne elektrane je prikazan na slici 1.

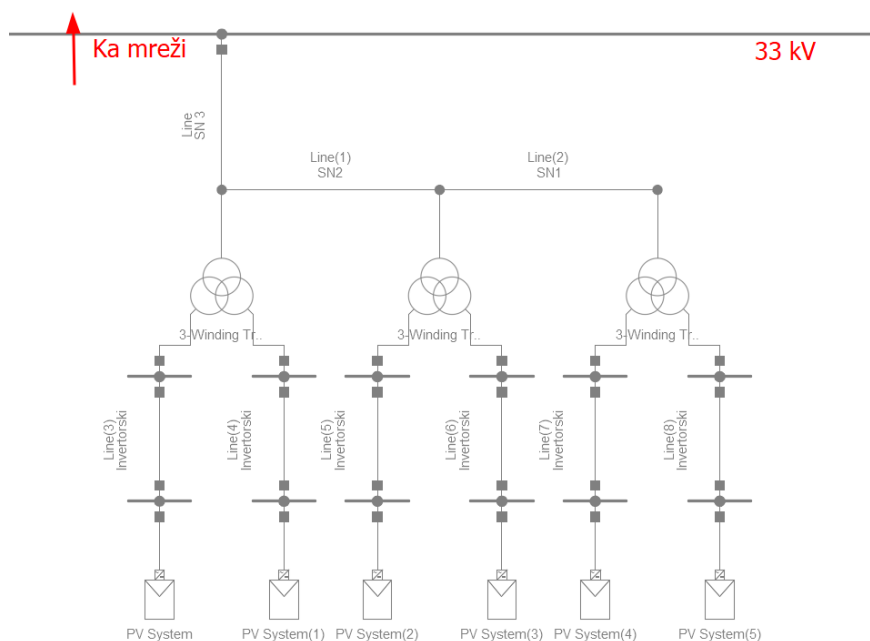


Slika 1: Model solarne elektrane iz DlgSILENT PowerFactory

### 3.1.1 Konfiguracija elektrane

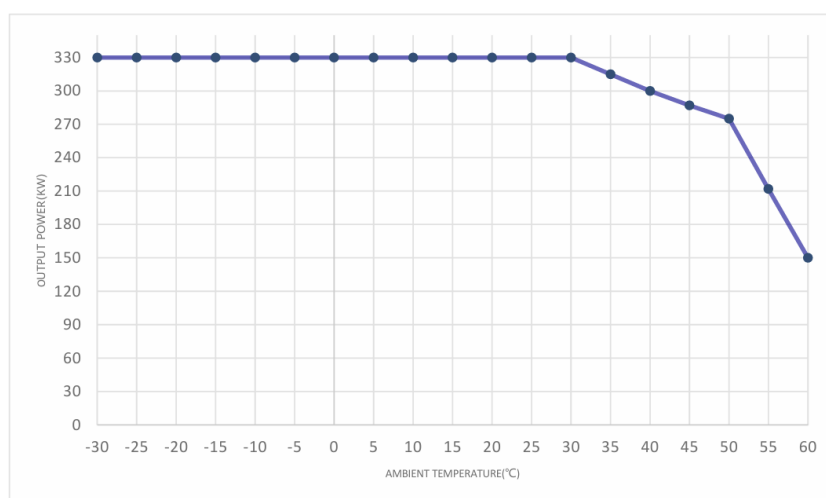
Izabrana konfiguracija invertora u posmatranoj elektrani su *string* invertori. U odnosu na drugu dostupnu konfiguraciju – centralne invertore, string invertori imaju veću efikasnost, u poređenju sa centralnim invertorima za 4-8%. Takođe, višestruko praćenje maksimalne tačke napajanja MPPT omogućava bolju kontrolu proizvodnje pri ovakvoj konfiguraciji, čime se opravdavaju viši početni troškovi i dodatni gubici u AC kablovima, koji povećavaju ukupne gubitke za otprilike 0.5%.

Analiziranu solarnu elektranu čine 3072 invertora i 96 invertorskih transformatora. PV invertori i transformatori su grupisani u PV blokove. Svaki blok se sastoji od invertorskog tronomotajnog transformatora 33/0,8/0,8kV sa dva identična sekundara, i PV invertora povezanih 0,8 kV kablovima na sekundare pomenutih transformatora. 16 invertora je povezano na svaki sekundar invertorskog transformatora, čineći ukupno 32 invertora po jednom transformatoru. U softverskom alatu DlgSILENT PowerFactory, 16 invertora je predstavljeno jednim ekvivalentom, pa su i parametri ekvivalentnog invertora skalirani u skladu sa ovom pretpostavkom. Ekvivalentni reprezent nema negativan uticaj na tačnost rezultata, a uveden je u cilju efikasnijeg i jasnijeg modelovanja elektrane. Na slici 2 prikazan je deo opisanog sistema modelovanog u PowerFactory. Na slici se mogu uočiti i tipovi kablova čiji parametri su prikazani u nastavku. Tip kabla SN3 nosi snagu tri invertorska transformatora i povezuje najbliži od njih sa 33 kV sabirnicama. Tip SN2 povezuje dva bliža invertorska transformatora međusobno, a tip SN1 povezuje najudaljeniji invertorski transformator sa njemu prvim najbližim.



Slika 2: Deo modelovanog sistema

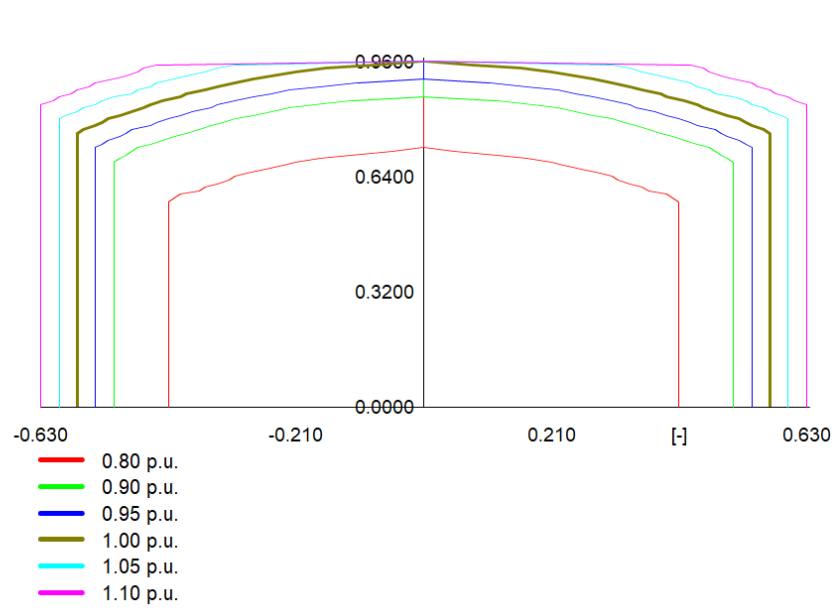
Zavisnost izlazne snage izabranog invertora od temperature je prikazana na slici 3. Pri temperaturi od 46°C izlazna snaga invertora je 285 kW, a 265 kW pri temperaturi 52°C.



Slika 3: Zavisnost izlazne snage od temperature invertora

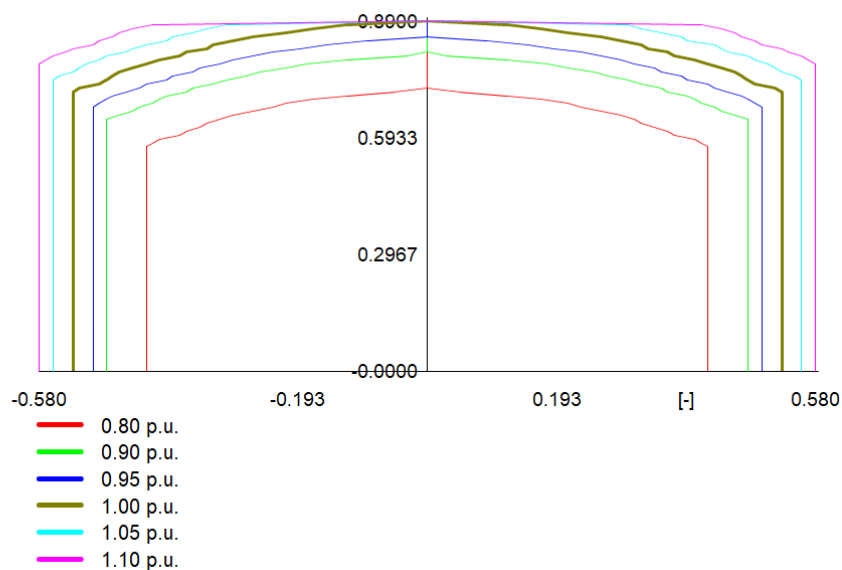
Kako bi se obezbedila aktivna snaga od 750 MW u tački priključenja elektrane, potrebno je da svaki inverter radi sa 252 kW.

P-Q karakteristike invertora za temperature 46°C i 52°C dobijene od proizvođača definisane su na identičan način u softveru i prikazane na slikama 4 i 5. Na slici 4 je data karakteristika invertora za 46°C. Pri naponu od 1.1 r.j. na invertorskim sabirnicama, inverter može dati reaktivnu snagu od 63% nominalne aktivne. Reaktivna podrška je manja pri manjim naponima, pa pri naponu od 0.8 r.j. maksimalna reaktivna snaga koju inverter može da pruži iznosi 42% u odnosu na nominalnu aktivnu snagu.



Slika 4: P-Q karakteristika invertora pri baznom slučaju za 46°C

Na slici 5 je data P-Q karakteristika pri temperaturi 52°C. Uočava se da pri naponu od 1.1 r.j. invertor može dati reaktivnu podršku od 58% nominalne aktivne, što je 5% manja vrednost od baznog slučaja pri ambijentalnoj temperaturi od 46 °C.



Slika 5: P-Q karakteristika invertora za 52°C

### 3.1.2 Modelovanje elementi sistema

U modelu postoje tri mrežna transformatora 132/33/33 kV snage 300 MVA. To su regulacioni transformatori sa regulacionom sklopkom na višenaponskoj strani, dimenzionisani tako da regulišu napon na sredjenaponskim sabirnicama. Transformatori imaju 17 izvoda, a iznos jednog otcepa je  $\pm 1.25\%$ . U simulaciji njihov prenosni odnos je regulisan tako da održavaju



napon na SN sabirnicama u dogovorenim granicama od  $\pm 5\%$ . Najvažniji parametri modela mrežnog transformatora u softveru DIgSILENT PowerFactory prikazani su na slici 6.

Slika 6: Parametri mrežnog transformatora

U modelu postoje, 7 različitih tipova kablova, kojima se prikazuju postojeći VN, SN i NN kablovi. Najvažniji parametri kablova i njihove dužine date su tabeli 1.

Tabela 1: Najvažniji parametri modelovanih kablova

| Kabl                          | Dužina [km] | U [kV] | R [ $\Omega$ /km] | Ro [ $\Omega$ /km] | X [ $\Omega$ /km] | X0 [ $\Omega$ /km] | B [ $\mu$ S/km] |
|-------------------------------|-------------|--------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-----------------|
| <b>Mrežni VN</b>              | 0.07        | 132    | 0.025             | 0.099              | 0.149             | 0.03               | 103.34          |
| <b>Mrežni SN</b>              | 0.15        | 33     | 0.009             | 0.038              | 0.03              | 0.006              | 416.28          |
| <b>SN 3</b>                   | 0.8-4.3     | 33     | 0.05              | 0.199              | 0.051             | 0.01               | 172.79          |
| <b>SN 2</b>                   | 0.23-0.3    | 33     | 0.01              | 0.399              | 0.101             | 0.021              | 86.394          |
| <b>SN 1</b>                   | 0.23-0.25   | 33     | 0.21              | 0.841              | 0.113             | 0.023              | 65.659          |
| <b>Invertorski</b>            | 0.202       | 0.8    | 0.008             | 0.05               | 0.004             | 0.002              | 3094.059        |
| <b>Za sopstvenu potrošnju</b> | 0.1         | 33     | 0.05              | 0.2                | 0.114             | 0.023              | 101.012         |

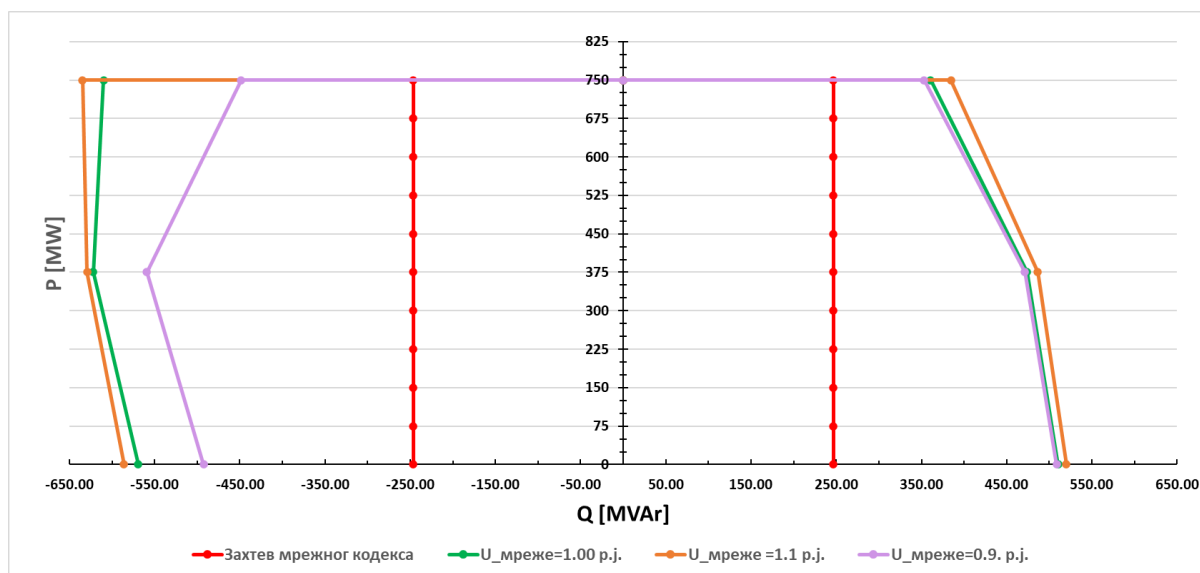
Sopstvena potrošnja elektrane je uvažena i modelovana kao statička potrošnja snage 2x1.25MVA sa faktorom snage 0.85, na naponskom nivou 0.4 kV. Sa 33 kV sabirnicama povezana je sa dvonamotajnim transformatorima sprege DD0 sa parametrima datim u tabeli 2.

Tabela 2: Najvažniji parametri transformatora za sopstvenu potrošnju

| Jedinica                              | Up [kV] | Us [kV] | S [MVA] | X [pu] | R [pu] |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|--------|--------|
| <b>Transf. za sopstvenu potrošnju</b> | 33      | 0.4     | 2.5     | 0.065  | 0.008  |

## 4 REZULTATI

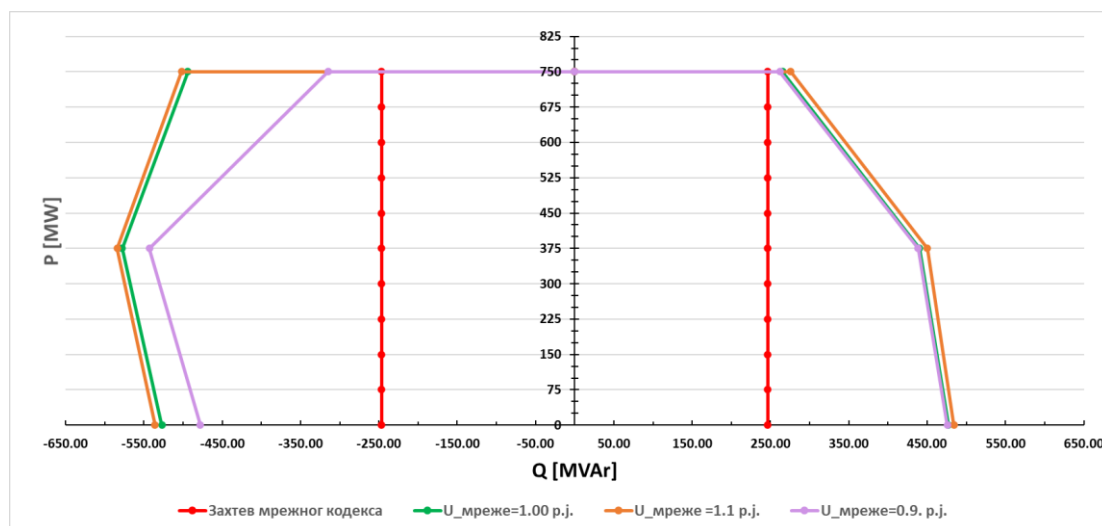
Rezultat analize baznog scenarija PQ karakteristika solarne elektrane pri temperaturi od 46°C i naponu na invertorima od 1.1 r.j. prikazana je na slici 7. Crvenom bojom predstavljen je zahtev mrežnog kodeksa, dok su preostale tri krive rezultati simulacija za različite vrednosti posmatranog mrežnog napona.



Slika 7: P-Q karakteristika solarne elektrane (bazni slučaj - 46°C)

S obzirom da nema presecanja zadatog zahteva i generisanih krivih, može se zaključiti da su proračunate vrednosti reaktivne snage u tački priključenja veće od definisanih, čime je mrežni zahtev ispunjen. Pri nominalnom naponu mreže, u kapacitivnom režimu, pri maksimalnoj aktivnoj snazi u tački konekcije, doprinos elektrane u vidu injektiranja reaktivne snage je 360 MVar. U induktivnom režimu, elektrana apsorbira 610 MVar.

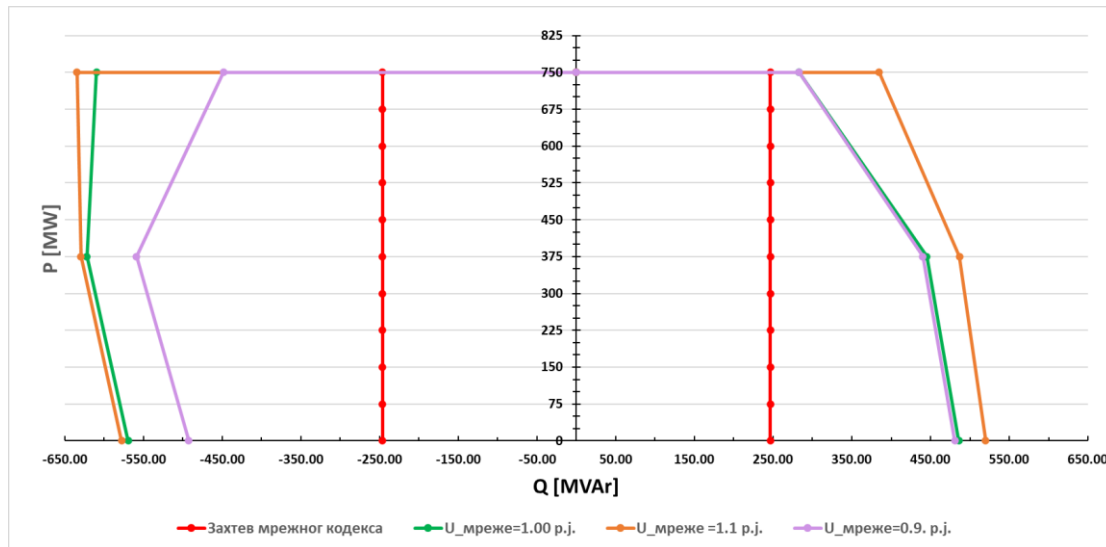
Drugi slučaj daje rezultate pri temperaturi od 52°C. PQ karakteristika solarne elektrane je prikazana na slici 8:



Slika 8: P-Q karakteristika solarne elektrane (52°C)

Može se primetiti da su vrednosti bliže postavljenoj granici u odnosu na bazni scenario, što znači da je reaktivna podrška solarne elektrane u ovom slučaju vidljivo manja, ali je zahtev mrežnog kodeksa i dalje ispunjen, tako da instalacija dodatnih uređaja za kompenzaciju reaktivne energije nije potrebna. Rezultat je u skladu sa prethodno pomenutom zavisnošću izlazne snage invertora od ambijentalne temperature, pri čemu su više temperature nepovoljnije u smislu smanjenja maksimalno mogućeg generisanja invertora, što je i oslikano u rezultatima druge simulacije.

Treći slučaj se odnosi na rezultate pri temperaturi od 46°C i maksimalnim dozvoljenim naponom od 1.05 r.j. na invertorskim sabirnicama. PQ karakteristika solarne elektrane je prikazana na slici 9.



Slika 9: P-Q karakteristika solarne elektrane (46°C, U<sub>inv</sub>=1.05 r.j.)

U ovom slučaju primećuje se da su rezultati u induktivnom režimu slični kao u baznom slučaju, dok je sposobnost elektrane da injektira reaktivnu snagu značajno smanjena, što je i očekivan rezultat. Naime, kako je prema P-Q krivoj definisanoj od strane proizvođača mogućnost svakog pojedinačnog invertora za proizvodnju reaktivne snage manja pri manjim naponima, prikazani rezultat je direktna posledica ovog ograničenja.

Poređenje rezultata pri naponu 1 r.j. na priključnim sabirnicama je dato u tabeli 3.

Tabela 3: Pregled rezultata pri naponu mreže U=1 r.j.

|                            | P= 750MW |       |                                   | P= 375MW |       |                                   | P= 0 MW |       |                                   |
|----------------------------|----------|-------|-----------------------------------|----------|-------|-----------------------------------|---------|-------|-----------------------------------|
|                            | 46 °C    | 52 °C | 46 °C<br>U <sub>max</sub> 1.05 pu | 46 °C    | 52 °C | 46 °C<br>U <sub>max</sub> 1.05 pu | 46 °C   | 52 °C | 46 °C<br>U <sub>max</sub> 1.05 pu |
| Q <sub>kap</sub><br>[MVar] | 360.7    | 265.5 | 283                               | 473.9    | 440   | 445                               | 510.4   | 477.2 | 486                               |
| Q <sub>ind</sub><br>[MVar] | 610      | 494   | 610                               | 622      | 578   | 622                               | 569.4   | 526.9 | 569.4                             |

Ova tabela daje jasniji uvid i kvantifikuje razliku reaktivne podrške od strane invertora pri različitim ambijentalnim uslovima i dozvoljenim naponima na krajevima invertora. U kapacitivnom režimu, uočava se da je pri ambijentalnoj temperaturi od 46°C, za nominalnu snagu u tački priključenja, solarna elektrana sposobna da injektira 95 MVar više nego pri ambijentalnoj temperaturi višoj za 6 °C, a 77 MVar više nego kada je dozvoljeni napon na invertorskim sabirnicama 1.05 r.j. U induktivnom režimu, napon na invertorskim sabirnicama ne predstavlja ograničenje, jer je u pitanju režim apsorpcije reaktivne snage od strane elektrane pri kome se teži što nižim naponima na invertorima čime se apsorpcija od strane elektrane maksimizuje. Pri višoj ambijentalnoj temperaturi, i apsorpciona moć elektrane je manja za više od 100 MVar, jer je i ukupan dozvoljeni izlazni kapacitet smanjen u skladu sa povećanjem spoljašnje temperature, što prikazani rezultati i prate.

Može se zaključiti da su u posmatranoj elektrani zahtevi za reaktivnom snagom ispunjeni zahvaljujući sposobnostima samih invertora, bez potrebe za instalacijom dodatnih uređaja za kompenzaciju, pri svim posmatranim ambijentalnim temperaturama i naponima invertora. Posmatrana elektrana, iako se može se smatrati predimenzionisanom iz ugla proizvodnje aktivne snage, pokazala se adekvatno dimenzionisanom u smislu ukupnih zahteva za izlaznom snagom u tački priključenja.

## **5 ZAKLJUČAK**

Cilj ovog rada bio je da se ispita sposobnost solarne elektrane da pruži reaktivnu podršku sistemu na koji se priključuje. Analiza je sprovedena u softverskom alatu DigSILENT PowerFactory. Tri slučaja su analizirana u radu. Bazni slučaj odnosi se na napon na invertorskim sabirnicama od 1.1 r.j. i ambijentalnu temperaturu od 46°C. Sprovedena je analiza osetljivosti koja obuhvata dva scenarija. Jedan se odnosi na analizu pri ambijentalnoj temperaturi od 52°C, uz iste ostale uslove kao u baznom slučaju, i drugi kad je dozvoljeni napon na invertorskim sabirnicama 1.05 pu, pri čemu su svi ostali uslovi isti kao u baznom slučaju. Sve analize su rađene pri različitim naponima u tački konekcije: 0.9, 1 i 1.1 r.j. Uočeno je da solarna elektrana ima značajan potencijal za injektiranje i apsorpciju reaktivne snage, čime se potvrđuje njena sposobnost da doprinosi naponskoj stabilnosti elektroenergetskog sistema bez potrebe za dodatnim uređajima za reaktivnu kompenzaciju.

U analizama se često ne posvećuje dovoljno pažnje uticaju temperature na performanse invertora, zbog čega je poseban osvrt u radu dat baš za ovaj slučaj, kako bi se istakla potreba za uvažavanjem na izgled manje uticajnih faktora ambijenta. Rezultati ove analize ukazuju na to da relativno mala promena temperature, kao što je povećanje od 6 °C, može značajno smanjiti kapacitet za pružanje reaktivne podrške – u posmatranom za oko 20%, što ukazuje na ključnu važnost temperaturne varijacije na performanse invertora, a samim tim i cele solarne elektrane. Ovakve procene direktno utiču na predloženi kapacitet i dugoročnu efikasnost solarnih sistema.

Takođe, se i pri nižim naponima invertora od maksimalnog uočava smanjenje sposobnosti solarne elektrane da generiše reaktivnu podršku, što je direktna posledica zavisnosti generisanja reaktivne snage od napona invertora, što je još jedan bitan faktor za razmatranje u analizama. Iako na prvi pogled ima negativan uticaj, smanjenje napon invertora ispod maksimalno dozvoljenog u trajnom može dovesti do produžavanja životnog veka invertora, što se sveukupno povoljno odražava na ukupne troškove elektrane.

Osim što ovaj rad daje prikaz faktora koji utiču na performanse solarne elektrane u pogledu reaktivne podrške sistemu, on takođe kroz navedene primere predstavlja mogućnosti modernih

softverskih alata, kakav je DIgSILENT PowerFactory, da se brzo i efikasno izvrše analize zahteva iz mrežnih kodova, uoče potencijalni problemi i predlože i testiraju mere za suzbijanje istih uz minimalne izmene već kreiranih modela i simulacija, ukoliko je se za tim ukaže potreba.

## 6 LITERATURA

- [1] <https://balkangreenenergynews.com/global-solar-power-capacity-doubles-to-2-tw-in-just-two-years/>
- [2] M. Kostić, Kompenzacija reaktivne energije i viši harmonici u električnim mrežama, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, 2014
- [3] <https://www.esig.energy/wiki-main-page/reactive-power-capability-and-interconnection-requirements-for-pv-and-wind-plants/>
- [4] Stefanov, P., Džodić, K, Lazović., Đ.,Regulacija elektroenergetskih sistema sa obnovljivim izvorima energije, Akademska misao, Beograd, 2023
- [5] <https://clouglobal.com/the-hidden-force-reactive-power-and-its-impact-on-the-grid/>