

**TEHNIČKI ASPEKTI PRIKLJUČENJA FOTONAPONSKIH ELEKTRANA NA  
DISTRIBUTIVNI SISTEM REPUBLIKE SRBIJE****TECHNICAL ASPECTS OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS CONNECTED TO THE  
DISTRIBUTION SYSTEM OF REPUBLIC OF SERBIA**

Aleksandar Pavić, Boris Dumnić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

**Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratka sadržaj** – U radu su definisani tehnički uslovi za priključenje fotonaponskih elektrana na distributivni sistem Republike Srbije. Upotrebom softverskog alata ETAP, modelovana je fotonaponska elektrana snage 990 kW i priključena na 20 kV distributivnu mrežu. Na osnovu dobijenih rezultata, sprovedena je analiza tehničkih aspekata priključenja fotonaponske elektrane na distributivni sistem.

**Ključne reči:** *Obnovljivi izvori, Fotonaponska elektrana, Tehnički uslovi, Distributivni sistem*

**Abstract** – *This paper describes the conditions for connecting photovoltaic power plants to the distribution system of Republic of Serbia. A 990 kW photovoltaic power plant has been modeled using the ETAP software tool and integrated into a 20 kV distribution grid. Based on the obtained results, an analysis of the technical aspects of integrating the photovoltaic power plant into the distribution system was conducted.*

**Keywords:** *Renewable energy, Photovoltaic power plant, Technical aspects, Distribution system*

**1. UVOD**

Emisije ugljen-dioksida (CO<sub>2</sub>) koje nastaju sagorevanjem fosilnih goriva značajno su podigle koncentraciju CO<sub>2</sub> u zemljinoj atmosferi. Zahvaljujući tome, dolazi do pojačavanja efekta staklene bašte koji izaziva značajne klimatske promene sa negativnim uticajima na proizvodnju hrane, vodosnabdevanje i društvo. Upotreba nuklearne energije je ograničena finansijama kao i pitanjima bezbednosti. Sva ova ograničenja izazvala su veliku potražnju za obnovljivim izvorima energije [1].

Prema IEA (eng. International energy agency) kapaciteti obnovljivih izvora energije u 2023. godine su se povećali za oko 510 GW, što predstavlja najbržu stopu rasta u prethodne dve decenije. Povećanje ovih kapaciteta dostiglo je rekordne vrednosti u Evropi, SAD i Brazilu, međutim Kina je imala najznačajniji rast, puštajući u rad onoliko solarnih fotonaponskih sistema koliko celi svet godinu dana ranije. Na globalnom nivou, solarni fotonaponski sistemi su činili tri četvrtine od ukupnog povećanja kapaciteta obnovljivih izvora energije [2].

**NAPOMENA:**

**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Boris Dumnić, red. prof.**

U periodu od 2023. do 2028. godine prema predviđanjima IEA, očekuje se da će se kapaciteti obnovljivih izvora energije povećati za oko 3700 GW, što će biti više nego što je instalirano otkako je prva elektrana na obnovljivu energiju puštena u rad, pri čemu će solarni fotonaponski sistemi i vetar činiti oko 95% globalne ekspanzije obnovljivih izvora energije [2].

Takođe, u ovom periodu očekuje se sledeće [2]:

- U 2024. godini solarni fotonaponski sistemi i vetar generišu više električne energije od hidroenergije.
- U 2025. godini obnovljivi izvori energije premašuju proizvodnju električne energije dobijenu iz uglja.
- U 2025. i 2026. godini, solarni fotonaponski sistemi i vetar premašuju proizvodnju električne energije dobijenu iz nuklearnih elektrana.
- U 2028. godini obnovljivi izvori energije čine preko 42% globalne proizvodnje električne energije.

**2. USLOVI ZA PRIKLJUČENJE ELEKTRANA NA  
DISTRIBUTIVNI SISTEM**

Tehnički uslovi za priključenje elektrane na distributivni sistem Republike Srbije, definisani su i preuzeti iz dokumenta pod nazivom "Pravila o radu distributivnog sistema" [3].

Tehnički uslovi za priključenje elektrana treba da omoguću normalan pogon DS uz nenarušavanje pouzdanosti isporuke i kvaliteta električne energije drugim korisnicima DS [3].

Za priključenje i bezbedan paralelan rad elektrane sa DS, elektrana mora da zadovolji sledeće kriterijume [3]:

- Kriterijum maksimalno dozvoljene snage generatora u elektrani,
- Kriterijum dozvoljenih vrednosti napona u stacionarnom režimu,
- Kriterijum dozvoljenog strujnog opterećenja elemenata distributivne mreže,
- Kriterijum snage kratkog spoja,
- Kriterijum flikera,
- Kriterijum dozvoljenih struja viših harmonika i interharmonika.

**3. SOFTVERSKI ALATI ZA SIMULACIJU  
AKTIVNIH ENERGETSKIH MREŽA**

Neki od najčešće korišćenih softvera za simulaciju aktivnih energetskih mreža kao i za proveru ispunjenosti

uslova priključenja distribuiranih energetske resursa na DS jesu:

- DigSILENT,
- PSCAD,
- PSS@SINCAL,
- ETAP,
- NEPLAN,
- CYME i dr.

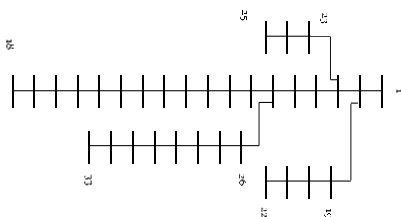
U ovom radu za sve simulacije korišten je softverski paket ETAP. Ovaj softverski paket nudi mogućnost analize, planiranja i optimizacije distributivne mreže, na progresivnoj geoprostornoj platformi za simulaciju, analizu, i optimizaciju performansi distributivnih pametnih mreža [4].

#### 4. ANALIZA TEHNIČKIH ZAHTEVA ZA PRIKLJUČENJE FOTONAPONSKE ELEKTRANE NA DISTRIBUTIVNI SISTEM

U ovom radu predstavljen je konkretan model fotonaponske elektrane koja se priključuje na distributivnu mrežu naponskog nivoa 20 kV.

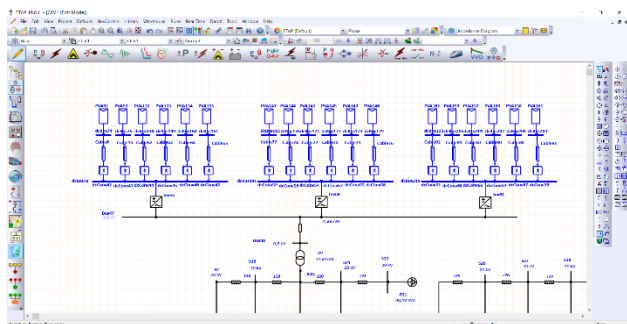
##### 4.1. Opis modela distributivne mreže i fotonaponske elektrane

Distributivna mreža je kreirana po uzoru na IEEE 33 distributivnu mrežu. Naponski nivo modifikovane IEEE 33 distributivne mreže iznosi 20 kV.



Slika 4.1.1. IEEE 33 distributivna mreža [5].

Na slici 4.1.2 prikazan je model fotonaponske elektrane priključene na distributivnu mrežu naponskog nivoa 20 kV u ETAP-u.



Slika 4.1.2. Model fotonaponske elektrane u ETAP-u.

Fotonaponski panel kreiran je po uzoru na fotonaponski panel iz serije Eco Line HJT GG M132 kompanije "LUXOR" [6]. Fotonaponska elektrana je realizovana tako da se fotonaponski nizovi priključuju u šest nezavisnih MPPT (eng. *Maximum power point tracking*) ulaza na svakom invertoru. U okviru elektrane nalaze se tri invertora istih karakteristika. Fotonaponski nizovi su projektovani tako da sadrže 25 redno vezanih panela radi

dobijanja željenog napona od 1075 V. Na prvih pet MPPT ulaza svakog invertora paralelno se vezuju po 4 stringa (koji sadrže 25 redno vezanih panela) što ukupno čini 100 panela po jednom MPPT ulazu. Maksimalna snaga ovih MPPT ulaza iznosi 70 kWp, dok struja na DC strani u ovih pet MPPT ulaza iznosi 65 A. Na šesti MPPT ulaz paralelno se vezuju 2 stringa, koji sadrže 25 redno vezanih panela, što ukupno čini 50 panela. Snaga i struja na ovom MPPT ulazu iznosi 35 kWp i 32,56 A, respektivno. Takođe, potrebno je napomenuti da maksimalna snaga svih panela (snaga fotonaponskog polja cele elektrane) iznosi 1,155 MW. Izlazna snaga elektrane odnosno snaga prema distributivnoj elektroenergetskoj mreži u ovom primeru je 990 kW.

Invertor je kreiran po uzoru na invertor SUN2000-330KTL-H1 kompanije „Huawei“ [7]. U okviru elektrane nalaze se tri invertora istih karakteristika. U ovom modelu, izlazna snaga invertora definisana je na 330 kW, izlazni napon na 0,8 kV, a izlazna struja ima vrednost 238,2 A.

##### 4.2. Provera kriterijuma maksimalno dozvoljene snage

Prema ovom kriterijumu, promena napona na mestu priključenja elektrane na distributivni sistem, ne sme preći vrednost od 2% na SN [3].

Na osnovu proračuna tokova snaga u distributivnoj mreži (elektrana još uvek nije priključena), primećuje se da na mestu gde je planirano priključenje fotonaponske elektrane (sabirnica S20) napon ima vrednost 98,12% nominalnog napona.

Priključenje fotonaponske elektrane na distributivni sistem je realizovano u sabirnici S20. Na osnovu proračuna tokova snaga, nakon priključenja fotonaponske elektrane primećuje se da se napon povećao za 0,41% i iznosi 98,53% nominalnog napona.

Na osnovu prethodnih proračuna, može se zaključiti da promena napona od 2% na mestu priključenja, nije prekoračena.

Maksimalno dozvoljena prividna snaga generatora u elektrani  $S_{ngm}$  u [MVA], za priključenje elektrane na SN, izračunava se prema sledećem izrazu [3]:

$$S_{ngm} = \frac{S_{ks}}{50 * k} \quad (4.2.1)$$

Snaga trofaznog kratkog spoja u tački priključenja na distributivni sistem, za naponski nivo 20 kV je tipizirana i iznosi 500 MVA. Za fotonaponske elektrane količnik struje uključenja i naznačene struje generatora  $k$  ima vrednost 1 ( $k=1$ ) [4]. Nakon uvrštavanja ovih vrednosti u izraz (4.2.1) dobija se:

$$S_{ngm} = \frac{S_{ks}}{50 * k} = \frac{500}{50 * 1} = 10 \text{ MVA}$$

Prividna snaga generatora razmatrane elektrane je manja od 10 MVA, pa se može zaključiti da je kriterijum maksimalno dozvoljene snage zadovoljen.

##### 4.3. Provera kriterijuma dozvoljenih vrednosti napona u stacionarnom režimu

Kriterijum dozvoljenih vrednosti napona u stacionarnom režimu je zadovoljen ukoliko je, u okviru normalnog

pogona distributivnog sistema, promena napona  $\Delta u_m$  manja od 5% u bilo kojoj tački distributivnog sistema. Za proveru ovog kriterijuma je potrebno izvršiti proračune tokova snaga za minimalno i maksimalno opterećenje distributivnog sistema. Kod elektrana koje za proizvodnju električne energije koriste energiju sunca (solarne elektrane) za minimalno i maksimalno opterećenje distributivnog sistema usvaja se minimalno i maksimalno opterećenje u periodu u kojem je moguća proizvodnja ove vrste elektrana (pri prisustvu sunčeve svetlosti) [3].

Na slikama 4.3.1, 4.3.2 i 4.3.3 prikazane su naponske prilike distributivnog sistema, pre priključenja FN elektrane.

Bus ID	Nominal kV	Voltage	MW Loading	Mvar Loading	Amp Loading	% Lo
1	20	100	0.68	0	0	476.3
2	20	100	0	0	0	0
3	50	110	2.952	1.750	18.07	
4	51	20	66.38	1.656	99.99	
5	52	20	90.29	2.352	1.050	99.29
6	53	20	97.88	2.431	1.420	94.43
7	54	20	67.87	1.753	1.078	60.83
8	55	20	67.45	1.500	1.021	57.59
9	56	20	66.54	1.559	0.964	50.01
10	57	20	66.74	0.935	0.379	27.34
11	58	20	65.1	0.742	0.302	24.36
12	59	20	66.21	0.541	0.210	17.67
13	510	20	66.04	0.481	0.211	15.78

Slika 4.3.1. Naponske prilike u DS pre priključenja.

Bus ID	Nominal kV	Voltage	MW Loading	Mvar Loading	Amp Loading	% Lo
14	511	20	66.56	0.421	0.191	13.89
15	512	20	65.97	0.375	0.181	12.29
16	513	20	65.91	0.352	0.176	10.79
17	514	20	65.74	0.288	0.11	9.305
18	515	20	65.20	0.210	0.076	7.130
19	516	20	65.85	0.175	0.084	5.635
20	517	20	66.4	0.116	0.011	3.718
21	518	20	65.56	0.0548	0.044	1.612
22	519	20	66.27	0.39	0.16	11.59
23	520	20	66.19	0.27	0.19	8.605
24	521	20	66.09	0.19	0.09	5.798
25	522	20	66.03	0.09	0.04	2.850
26	523	20	65.79	0.033	0.009	20.79

Slika 4.3.2. Naponske prilike u DS pre priključenja.

Bus ID	Nominal kV	Voltage	MW Loading	Mvar Loading	Amp Loading	% Lo
24	521	20	66.09	0.19	0.09	5.798
25	522	20	66.07	0.09	0.04	2.850
26	523	20	65.79	0.033	0.009	20.79
27	524	20	67.65	0.549	0.258	17.70
28	525	20	67.53	0.271	0.128	8.88
29	526	20	66.89	0.403	0.203	27.22
30	527	20	66.69	0.449	0.228	25.37
31	528	20	66.53	0.381	0.21	23.54
32	529	20	66.41	0.32	0.17	21.62
33	530	20	66.35	0.309	0.14	17.83
34	531	20	66.43	0.294	0.155	16.25
35	532	20	66.1	0.189	0.104	6.647
36	533	20	66.03	0.08	0.04	2.168

Slika 4.3.3. Naponske prilike u DS pre priključenja.

Analizom rezultata dobijenih na osnovu proračuna tokova snaga, nakon priključenja fotonaponske elektrane, za uslove rada koji podrazumevaju rad elektrane sa nominalnom snagom, može se zaključiti da se napon povećao u svakoj tački distributivnog sistema, pri čemu u bilo kojoj tački distributivnog sistema promena napona nije prekoračila limit od 5%.

Uzimajući u obzir vrednost minimalnog napona, a usled nedostatka tačnih podataka, na osnovu krive efikasnosti pretpostavljeno je da minimalna snaga koju inverter generiše iznosi približno 6% nominalne snage. Analizom rezultata dobijenih na osnovu proračuna tokova snaga, nakon priključenja fotonaponske elektrane, za uslove rada

koji podrazumevaju rad elektrane sa minimalnom snagom, može se zaključiti da se napon povećao u svakoj tački distributivnog sistema, pri čemu u bilo kojoj tački distributivnog sistema promena napona nije prekoračila limit od 5%.

#### 4.4. Provera kriterijuma snage kratkog spoja

Ovim kriterijumom definisano je da vrednost struje (snage) ne sme preći maksimalno dozvoljene vrednosti struja (snaga) kratkog spoja na koje je dimenzionisana oprema u DS [3]. Za razmatrani slučaj, maksimalna dozvoljena komponenta struje kratkog spoja, na mestu priključenja elektrane na distributivni sistem ne sme biti veća od 1 kA.

Analizom rezultata dobijenih na osnovu proračuna trofaznog kratkog spoja (slika 4.4.1) primećuje se da vrednost struje kratkog spoja, na mestu priključenja elektrane na distributivni sistem (sabirnica S20) iznosi 0,806 kA, pri čemu definisana vrednost od 1 kA nije prekoračena.

ID	Nominal kV	Symm. kA	Asymm. kA	Peak kA	MF	
1	S20	20	0.8061185	0.9937356	1.721129	1.232741

Slika 4.4.1. Vrednost struje 3FKS na mestu priključenja.

#### 4.5. Provera kriterijuma dozvoljenih struja viših harmonika i interharmonika

Ovaj kriterijum se proverava pomoću izraza [3]:

$$I_{vhg} \leq I_{vhdoz} = I_{vhs,v,\mu} * S_{ks} \quad (4.5.1)$$

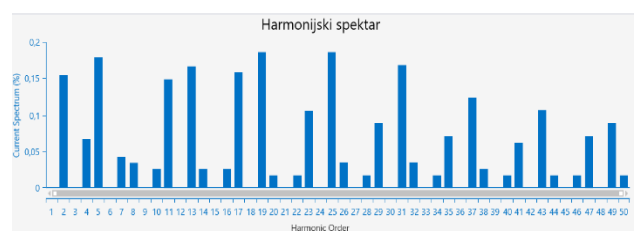
Stvarna vrednost struje viših harmonika koju generator injektira u DS  $I_{vhg}$  [A], svedena na mesto priključenja, se dobija na osnovu analize harmonika u softverskom alatu ETAP. Vrednosti ovih struja date su u tabeli 4.5.1.

Dozvoljena vrednost struje viših harmonika  $I_{vhdoz}$  [A], na mestu priključenja, proračunata je u tabeli 4.5.1.

Dozvoljena vrednost struje viših harmonika  $I_{vhs,v,\mu}$  [A/MVA] svedena na jediničnu snagu kratkog spoja na mestu priključenja na DS definisana je u tabeli 4.2 u dokumentu "Pravila o radu distributivnog sistema" [3].

Snaga trofaznog kratkog spoja u tački priključenja na distributivni sistem  $S_{ks}$  [MVA], za naponski nivo 20 kV je tipizirana i iznosi 500 MVA.

Spektar viših harmonika struje za korišćeni model invertora prikazan je na slici 4.5.1.



Slika 4.5.1. Harmonijski spektar struje korišćenog invertora.

Tabela 4.5.1. Stvarna i dozvoljena vrednost struje viših harmonika/interharmonika na mestu priključenja.

Br. višeg harmonika	$I_{vhg}$ [A]	$I_{vhdoz}=I_{vhs,v,\mu}*S_{ks}$ [A]	$I_{vhg} \leq I_{vhdoz}$
2	0,044	$0,029*500=14,5$	Ispunjeno
3	0	/	/
4	0,019	$0,009*500=4,5$	Ispunjeno
5	0,05	$0,029*500=14,5$	Ispunjeno
6	0	$0,012*500=6$	Ispunjeno
7	0,012	$0,041*500=20,5$	Ispunjeno
8	0,01	$0,004*500=2$	Ispunjeno
9	0	/	/
10	0,007	$0,007*500=3,5$	Ispunjeno
11	0,042	$0,026*500=13$	Ispunjeno
12	0	$0,005*500=2,5$	Ispunjeno
13	0,047	$0,019*500=9,5$	Ispunjeno
14	0,007	$0,003*500=1,5$	Ispunjeno
16	0,007	$0,003*500=1,5$	Ispunjeno
17	0,045	$0,011*500=5,5$	Ispunjeno
18	0	$0,002*500=1$	Ispunjeno
19	0,052	$0,009*500=4,5$	Ispunjeno
20	0,005	$0,0015*500=0,75$	Ispunjeno
22	0,005	$0,0013*500=0,65$	Ispunjeno
23	0,03	$0,006*500=3$	Ispunjeno
25	0,052	$0,005*500=2,5$	Ispunjeno
26	0,01	$0,0011*500=0,55$	Ispunjeno
27	0	$(0,05-0,92)*500=(25-460)$	Ispunjeno
28	0,005	$0,00107*500=0,53$	Ispunjeno
29	0,025	$(0,05-0,86)*500=(25-430)$	Ispunjeno
30	0	$0,001*500=0,5$	Ispunjeno
32	0,01	$0,0009*500=0,45$	Ispunjeno
33	0	$(0,05-0,75)*500=(25-375)$	
35	0,02	$(0,05-0,71)*500=(25-355)$	Ispunjeno
37	0,035	$(0,05-0,67)*500=(25-335)$	Ispunjeno
38	0,008	$0,00078*500=0,39$	Ispunjeno
40	0,005	$0,00075*500=0,37$	Ispunjeno
42	0	$0,00071*500=0,35$	Ispunjeno
44	0,005	$0,00068*500=0,34$	Ispunjeno
48	0	$0,00062*500=0,31$	Ispunjeno
50	0,005	$0,0006*500=0,3$	Ispunjeno

Stvarna vrednost struje viših harmonika, ni u jednom slučaju, ne prelazi dozvoljenu vrednost, pa se može zaključiti da je kriterijum dozvoljenih struja viših harmonika i interharmonika u potpunosti ispunjen.

## 5. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata, možemo zaključiti da razmatrana fotonaponska elektrana ispunjava sve zadate kriterijume za priključenje i bezbedan paralelan rad sa distributivnim sistemom, što podrazumeva normalan pogon distributivnog sistema, uz nenarušavanje pouzdanosti isporuke i kvaliteta električne energije drugim korisnicima.

Ukoliko rezultati pokažu da su uslovi rada distributivnog sistema nakon priključenja fotonaponske elektrane neprihvatljivi sa stanovišta ispunjenosti tehničkih uslova, neophodno je definisati odgovarajuće korake koje je potrebno preduzeti u cilju ostvarivanja normalnog pogona distributivnog sistema.

## 6. LITERATURA

- [1] John Twidell, Renewable energy resources, 4 edition, Routledge, 2022.
- [2] IEA, "Renewables 2023", IEA, Paris, 2024. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/executive-summary>
- [3] Pravila o radu distributivnog sistema, 00.000.-08.01.-180303/1-17, Beograd, 13.07.2017.
- [4] <https://etap.com/sectors/distribution>
- [5] Mohammad Kakueinejad, Azim Heydari, Mostafa Askari, Farshid Keynia, "Optimal Planning for the Development of Power System in Respect to Distributed Generations Based on the Binary Dragonfly Algorithm", Applied Sciences, Vol 10. 4795, 2020.
- [6] <https://www.luxor.solar/en/solar-modules/eco-line-gg/hjt-glass-glass-m132-680-700wp.html>
- [7] <https://solar.huawei.com/download?p=%2F-%2Fmedia%2FSolarV4%2Fsolar-version%2Fcommon%2Fprofessionals%2Fall-products%2Futility-smart-pv%2Fsmart-pv-controller%2FSUN2000-330KTL-H1%2Fsun2000-330ctl-h1-datasheet-20230515.pdf>

### Kratka biografija:



**Aleksandar Pavić** rođen je u Trebinju 1998. god. Osnovne studije na Fakultetu tehničkih nauka na odseku elektroenergetski sistemi završio je 2022. god. Kontakt: [aleksandaracopavic@gmail.com](mailto:aleksandaracopavic@gmail.com)



**Dr Boris Dumnić** rođen je 1976. god. Zaposlen je na Fakultetu tehničkih nauka, Departmanu za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, Katedri za energetska elektroniku i pretvarače. Oblasni interesovanja su mu električne mašine, pogoni, energetska elektronika i obnovljivi izvori električne energije.