Broj rada: R2-03
DOI:10.46793/CIRED2026.R2-03_145

KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE KAO USLOV ZA PUŠTANJE U TRAJAN RAD SOLARNE ELEKTRANE PEŠTAN

POWER QUALITY AS A CONDITION FOR ENTERING IN PERMANENT OPERATION PEŠTAN SOLAR POWER PLANT

Nenad ZLATKOVIĆ, Elektrodistribucija Srbije doo Beograd, Ogranak ED Aranđelovac, Srbija*
Bojan ĐEKIĆ, Elektrodistribucija Srbije doo Beograd, Ogranak ED Aranđelovac, Srbija
Goran ŽIVKOVIĆ, Elektrodistribucija Srbije doo Beograd, Ogranak ED Aranđelovac, Srbija
Dušan DOBRIČIĆ, Manes doo Topola, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Prema zahtevima Operatora distributivnog sistema, Elektrodistribucija Srbije doo Beograd, vršena su merenja i analiza kvaliteta električne energije, kako bi se sagledao uticaj solarne elektrane Peštan na kvalitet električne energije u tački priključenja elektrane na distributivni sistem električne energije (DSEE). To je jedan od potrebnih uslova za prelazak elektrane u režim trajnog rada. Za merenje parametara kvaliteta električne energije korišćeni su on-line mrežni analizatori klase A u skladu sa normom IEC 61000-4-30 ed. 3.

Ključne reči: kvalitet električne energije, norma IEC 61000-4-30, mrežni analizator, solarna elektrana

ABSTRACT

At the request of Distribution System Operator, Elektrodistribucija Srbije Ltd. Belgrade, measurements and analyses of power quality were performed to assess the impact of the solar power plant Peštan on power quality at the point of connection of solar power plant to the power distribution system. This assessment is one of the prerequisites for placing the plan tinto countinous operation. On-line power quality analyzers class A, compliant with IEC 61000-4-30 ed.3 were used to measure power quality parameters.

Key words: power quality, norm IEC 61000-4-30, power quality analyzer, solar power plant

1. UVOD

Poslednjih godina svedoci smo ekspanzije priključenja obnovljivih izvora električne energije, pre svega fotonaponskih izvora na distributivni sistem električne energije (DSEE). Ova konstatacija se odnosi kako na obnovljive izvore koji rade isključivo kao proizvođači električne energije tako i na one koji rade u režimu kupac-proizvođač takozvani prozjumer. Operator distributivnog sistema (ODS), kao subjekt odgovoran za upravljanje DSEE kroz svoja Pravila o radu distributivnog sistema i ostale interne akte propisao je tehničke kriterijume koje mora da

* Nenad Zlatković, nenad.zlatkovic@es.rs; Bojan Đekić, bojan.djekic@es.rs,; Goran Živković, goran.zivkovic@es.rs; Dušan Dobričić, dusan134@yahoo.com

ispuni objekat proizvođača električne energije kako bi se mogao priključiti na DSEE. Ispunjenost tehničkih kriterijuma dokazuje se izradom Studije priključenja u kojoj se proveravaju sledeći tehnički kriterijumi:

- Kriterijum maksimalno dozvoljenje snage generatora u elektrani;
- Kriterijum dozvoljenih vrednosti napona u stacionarnom režimu;
- Kriterijum dozvoljenog strujnog opterećenja elemenata distributivne mreže;
- Kriterijum snage kratkog spoja.

Kriterijum flikera i kriterijum dozvoljenih struja viših harmonika i interharmonika u praksi se ne provera prilikom izrade Studije priključenja, već se ispituju tokom probnog rada elektrane radi prelaska u trajni rad.

Cilj ovog referata je da prikaže analizu uticaja solarne elektrane Peštan na DSEE kada su u pitanju tehnički kriterijumi za proveru kvaliteta električne energije u tački priključenja elektrane na DSEE. Ovo je jedan od potrebnih uslova za prelazak elektrane u trajan rad koji je zahtevan zapisnikom Komisije za interni tehnički prijem objekta ODS-a. Izmereni rezultati upoređeni su sa zahtevima Pravila o radu distributivnog sistema i norme SRPS EN 50160.

2. TEHNIČKI PODACI SOLARNE ELEKTRANE PEŠTAN

Solarna elektrana Peštan instalirana je na krovovima proizvodnih hala preduzeća u mestu Bukovik, Opština Aranđelovac. Prikaz solarne elektrane Peštan dat je na slici 1. Tehnički podaci elektrane prikazani su u tabeli I.



Slika 1- Solarna elektrana Peštan, Aranđelovac

Tabela I- Tehnički podaci solarne elektrane Peštan

Odobrena snaga elektrane:	7997 kVA
Broj invertora:	79 (68 snage 110 kVA, 3 snage 55 kVA, 8 snage 44 kVA)
Način rada elektrane:	Kupac- proizvođač (prozjumer)
Naponski nivo na mestu priključenja elektrane:	20 kV
Mesto priključenja elektrane na DSEE:	Postojeće 20 kV ćelije Peštan 1 (I09) i Peštan 2 (I11) u TS 110/35/20/10 kV Aranđelovac

3. MERENJE I ANALIZA IZMERENIH REZULTATA

Za merenje parametara kvaliteta električne energije korišćeni su on-line mrežni analizatori klase A u skladu sa normom IEC 61000-4-30 ed. 3 instalirani u postrojenju u ćelijama priključenja elektrane Peštan 1 (I09) i Peštan 2 (I11).

Za potrebe predmetne analize vršena su merenja u trajanju od sedam dana u dva ciklusa:

I. Ciklus rada elektrane kada elektrana proizvodi električnu energiju sa kapacitetom od bar 60 % nominalnog kapaciteta (slika 2) (merenje vršeno u periodu 12.08.2024- 18.08.2024. godine),

II. Ciklus rada kada elektrana radi sa znatno smanjenim kapacitetom ili uopšte ne radi (slika 3) (merenje vršeno u periodu 11.11.2024- 17.11.2024. godine).

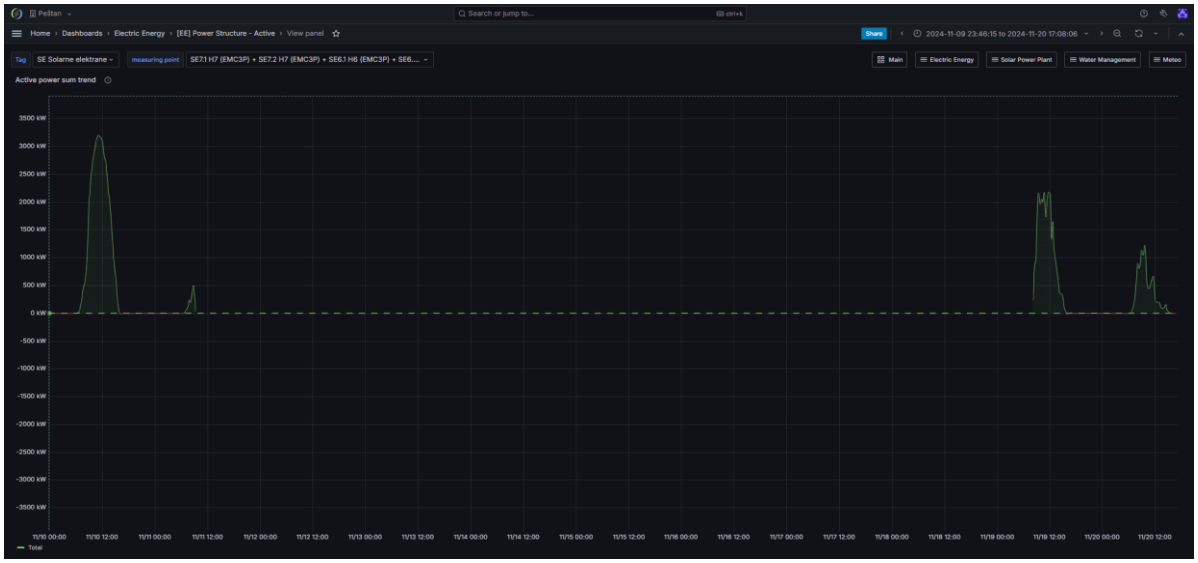
Mereni su sledeći parametri kvaliteta električne energije:

- Efektivne vrednosti linijskih napona;
- Frekvencije;
- Flikeri dugog trajanja;
- Faktor totalnog izobličenja linijskih napona;
- Parni i neparni harmonici napona;
- Parni i neparni harmonici struja;

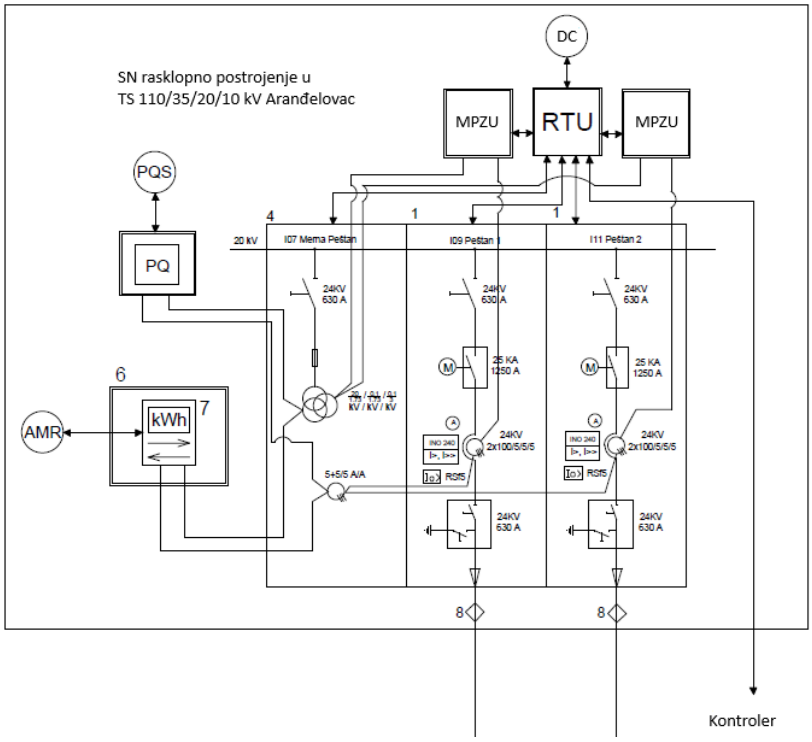
Merenje napona je vršeno mrežnim analizatorom instaliranim u ćeliji Peštan 2 (I11). Za merenjem napona u ćeliji Peštan 1 (I09) nije bilo potrebe obzirom da se radi o naponima na istim sabirnicama 20 kV. Merenje struja vršeno je analizatorima i u ćeliji Peštan 1(I09) (struje sa oznakama I_1) i u ćeliji Peštan 2 (I11) (struje sa oznakama I_2). Opšta shema priključenja elektrane prikazana je na slici 4.



Slika 2- Ciklus rada elektrane kada elektrana proizvodi električnu energiju od bar 60 % nominalnog kapaciteta



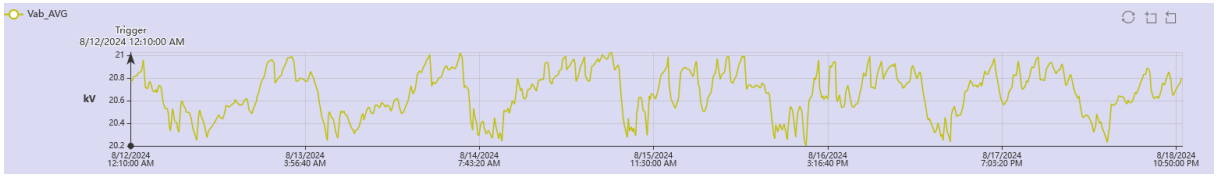
Slika 3- Ciklus rada elektrane kada elektrana ne proizvodi električnu energiju



Slika 4- Opšta shema priključenja solarne elektrane Peštan

3.1 Rezultati merenja efektivnih vrednosti linijskih napona

U tabeli II prikazane su efektivne vrednosti linijskih napona u ciklusu rada elektrane kada proizvodi električnu energiju. Na slici 5 dat je grafički prikaz linijskog napona Vab.

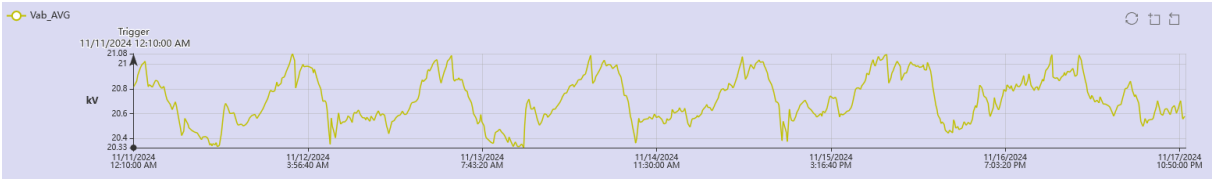


Slika 5- Grafički prikaz linijskog napona Vab kada elektrana proizvodi električnu energiju

Tabela II- Efektivne vrednosti linijskih napona u ciklusu rada kada elektrana proizvodi električnu energiju

	Vab (kV)	Vbc (kV)	Vca (kV)
Srednja vrednost	20.67	20.70	20.72
Minimalna vrednost	20.19	20.22	20.25
Maksimalna vrednost	21.03	21.04	21.08

U tabeli III prikazane su efektivne vrednosti linijskih napona u ciklusu rada elektrane kada elektrana ne radi. Na slici 6 dat je grafički prikaz linijskog napona Vab u režimu rada kada elektrana ne prozvodi električnu energiju.



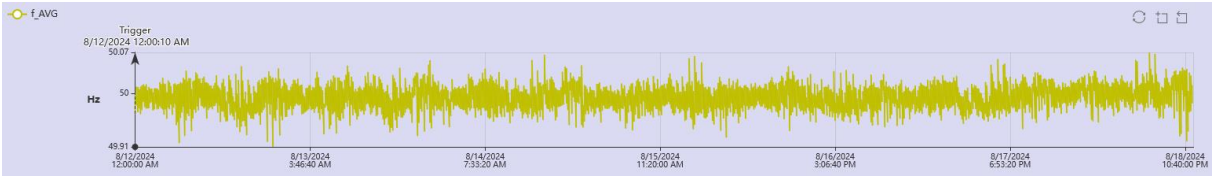
Slika 6- Grafički prikaz linijskog napona Vab kada elektrana ne radi

Tabela III- Efektivne vrednosti linijskih napona u ciklusu rada kada elektrana ne radi

	Vab (kV)	Vbc (kV)	Vca (kV)
Srednja vrednost	20.71	20.73	20.76
Minimalna vrednost	20.33	20.35	20.35
Maksimalna vrednost	21.09	21.14	21.18

3.2 Rezultati merenja frekvencije

Izmerene vrednosti frekvencije u ciklusu rada kada elektrana proizvodi električnu energiju prikazane su u tabeli IV, a grafički prikaz je dat na slici 7.

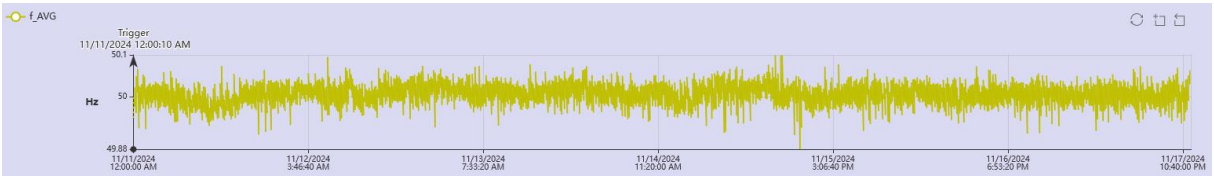


Slika 7- Grafički prikaz izmerenih vrednosti frekvencije kada elektrana proizvodi električnu energiju

Tabela IV- Vrednosti frekvencije u ciklusu rada kada elektrana proizvodi električnu energiju

	Frekvencija (Hz)
Srednja vrednost	50.00
Minimalna vrednost	49.91
Maksimalna vrednost	50.09

Izmerene vrednosti frekvencije u ciklusu rada kada elektrana ne radi prikazane su u tabeli V, a grafički prikaz je dat na slici 8.



Slika 8- Grafički prikaz izmerenih vrednosti frekvencije kada elektrana ne radi

Tabela V- Vrednosti frekvencije u ciklusu rada kada elektrana ne radi

	Frekvencija (Hz)
Srednja vrednost	50.00
Minimalna vrednost	49.87
Maksimalna vrednost	50.10

3.3 Rezultati merenja flikera dugog trajanja

Izmerene vrednosti flikera dugog trajanja u ciklusu rada kada elektrana proizvodi električnu energiju prikazane su u tabeli VI, a u ciklusu rada kada elektrana ne radi u tabeli VII.

Tabela VI- Vrednosti flikera dugog trajanja u ciklusu rada kada elektrana proizvodi električnu energiju

	Plt a-b	Plt b-c	Plt c-a
Srednja vrednost	0.11	0.11	0.12
Minimalna vrednost	0.03	0.03	0.04
Maksimalna vrednost	0.51	0.51	1.67
95% vrednosti ne prelazi vrednost	0.25	0.27	0.53

Tabela VII- Vrednosti flikera dugog trajanja u ciklusu rada kada elektrana ne radi

	Plt a-b	Plt b-c	Plt c-a
Srednja vrednost	0.10	0.10	0.08
Minimalna vrednost	0.04	0.04	0.04
Maksimalna vrednost	0.58	0.50	0.43
95% vrednosti ne prelazi vrednost	0.32	0.26	0.20

3.4 Rezultati merenja faktora totalnog izobličenja linijskih napona

Izmerene vrednosti totalnog harmonijskog izobličenja značajnih harmonika (subgroup total harmonic distortion - THDS) prema [8] u ciklusu rada kada elektrana proizvodi električnu energiju prikazane su u tabeli VIII, a u ciklusu rada kada elektrana ne radi u tabeli IX.

Tabela VIII- Vrednosti faktora totalnog izobličenja linijskih napona u ciklusu rada kada elektrana proizvodi električnu energiju

	THDS Vab (%)	THDS Vbc (%)	THDS Vca (%)
Srednja vrednost	1.15	1.20	1.18
Minimalna vrednost	0.77	0.82	0.79
Maksimalna vrednost	1.58	1.63	1.60

Tabela IX- Vrednosti faktora totalnog izobličenja linijskih napona u ciklusu rada kada elektrana ne radi

	THDS Vab (%)	THDS Vbc (%)	THDS Vca (%)
Srednja vrednost	1.29	1.33	1.31
Minimalna vrednost	0.95	0.98	0.98
Maksimalna vrednost	1.61	1.62	1.61

3.5 Rezultati merenja harmonika linijskih napona

Izmerene maksimalne vrednosti harmonika linijskih napona u ciklusu rada kada elektrana proizvodi električnu energiju prikazane su u tabeli X, a u ciklusu rada kada elektrana ne radi u tabeli XI.

Tabela X- Maksimalne vrednosti harmonika linijskih napona u ciklusu rada kada elektrana proizvodi električnu energiju

Red harmonika	Izmerene maksimalne vrednosti (%)			Dozvoljene vrednosti (%)
	Vab	Vbc	Vca	
2	0.05	0.04	0.06	2
3	0.18	0.11	0.19	5
4	0.03	0.03	0.03	1
5	0.80	0.86	0.84	6
6	0.02	0.03	0.03	0.5
7	1.28	1.31	1.27	5
8	0.02	0.02	0.03	0.5
9	0.07	0.06	0.07	1.5
10	0.01	0.01	0.01	0.5
11	0.59	0.65	0.60	3.5
12	0.01	0	0.01	0.5
13	0.51	0.48	0.53	3
14	0.01	0.01	0.01	0.5
15	0.06	0.03	0.07	0.5
16	0.01	0.01	0.01	0.5
17	0.12	0.11	0.09	2
18	0.01	0	0	0.5
19	0.1	0.1	0.1	1.5
20	0.01	0	0	0.5
21	0.08	0.01	0.08	0.5
22	0.01	0	0	0.5
23	0.08	0.07	0.08	1.5
24	0.01	0	0	0.5
25	0.05	0.05	0.06	1.5

Tabela XI- Maksimalne vrednosti harmonika linijskih napona u ciklusu rada kada elektrana ne radi

Red harmonika	Izmerene maksimalne vrednosti (%)			Dozvoljene vrednosti (%)
	Vab	Vbc	Vca	
2	0.06	0.06	0.05	2
3	0.19	0.14	0.25	5
4	0.05	0.03	0.04	1
5	0.90	0.90	0.93	6
6	0.05	0.03	0.05	0.5
7	1.26	1.34	1.29	5
8	0.04	0.03	0.04	0.5
9	0.07	0.07	0.07	1.5
10	0.02	0.01	0.02	0.5
11	0.40	0.46	0.43	3.5
12	0.02	0.01	0.02	0.5
13	0.42	0.41	0.45	3
14	0.01	0.01	0.01	0.5
15	0.05	0.03	0.05	0.5
16	0.01	0.01	0.01	0.5
17	0.09	0.10	0.08	2
18	0.01	0	0.01	0.5
19	0.09	0.07	0.09	1.5
20	0.01	0.01	0.01	0.5
21	0.13	0.01	0.13	0.5
22	0.01	0	0.01	0.5
23	0.09	0.08	0.09	1.5
24	0.01	0	0.01	0.5
25	0.06	0.05	0.06	1.5

3.6 Rezultati merenja strujnih harmonika u ćelijama Peštan 1 i Peštan 2

U tabeli XII prikazani su rezultati merenja strujnih harmonika u ćeliji Peštan 1, a u tabeli XIII su rezultati merenja strujnih harmonika u ćeliji Peštan 2 u ciklusima rada kada elektrana proizvodi električnu energiju i kada elektrana ne radi.

Tabela XII- Izmerene maksimalne vrednosti strujnih harmonika u ćeliji Peštan 1

	red harmonika	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Ia1 (elektrana radi)	maksimalna vrednost (A)	153.31	0.30	0.96	0.12	11.85	0.08	5.64	0.08	0.15	0.03	2.19	0.03	1.60	0.04	0.16	0.05	0.65	0.04	0.66	0.04	0.13	0.03	0.28	0.04	0.41
Ia1 (elektrana ne radi)	maksimalna vrednost (A)	113.68	0.17	1.00	0.15	11.49	0.05	4.90	0.09	0.22	0.04	1.83	0.02	1.38	0.06	0.14	0.03	0.93	0.02	0.57	0.03	0.13	0.03	0.34	0.01	0.30
Ib1 (elektrana radi)	maksimalna vrednost (A)	151.83	0.35	0.71	0.12	12.27	0.06	5.54	0.08	0.22	0.03	2.27	0.03	1.44	0.05	0.17	0.05	0.81	0.04	0.45	0.05	0.09	0.02	0.25	0.03	0.33
Ib1 (elektrana ne radi)	maksimalna vrednost (A)	110.68	0.18	1.14	0.09	11.85	0.06	4.80	0.07	0.20	0.03	2.06	0.01	1.38	0.06	0.14	0.05	0.98	0.02	0.42	0.04	0.10	0.02	0.38	0.01	0.24
Ic1 (elektrana radi)	maksimalna vrednost (A)	151.89	0.21	0.94	0.13	11.92	0.05	5.59	0.08	0.19	0.03	2.25	0.03	1.66	0.04	0.17	0.07	0.79	0.03	0.64	0.04	0.11	0.03	0.24	0.03	0.34
Ic1 (elektrana ne radi)	maksimalna vrednost (A)	112.27	0.13	0.82	0.11	11.44	0.04	4.87	0.07	0.13	0.04	1.82	0.01	1.51	0.06	0.13	0.04	0.92	0.02	0.53	0.03	0.10	0.03	0.37	0.01	0.26

Tabela XIII- Procentualne vrednosti strujnih harmonika u odnosu na osnovni harmonik u ćeliji Peštan 1

		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Ia1 (elektrana radi)	maksimalna vrednost	0.20%	0.63%	0.08%	7.73%	0.05%	3.68%	0.05%	0.10%	0.02%	1.43%	0.02%	1.04%	0.03%	0.10%	0.03%	0.42%	0.02%	0.43%	0.03%	0.09%	0.02%	0.18%	0.02%	0.26%
Ia1 (elektrana ne radi)	maksimalna vrednost	0.15%	0.88%	0.13%	10.10%	0.04%	4.31%	0.08%	0.19%	0.03%	1.61%	0.01%	1.22%	0.05%	0.12%	0.03%	0.82%	0.01%	0.50%	0.03%	0.12%	0.03%	0.30%	0.01%	0.26%
Ib1 (elektrana radi)	maksimalna vrednost	0.23%	0.47%	0.08%	8.08%	0.04%	3.65%	0.06%	0.14%	0.02%	1.49%	0.02%	0.95%	0.03%	0.11%	0.03%	0.53%	0.02%	0.30%	0.03%	0.06%	0.02%	0.17%	0.02%	0.22%
Ib1 (elektrana ne radi)	maksimalna vrednost	0.16%	1.03%	0.08%	10.71%	0.05%	4.34%	0.06%	0.18%	0.03%	1.86%	0.01%	1.25%	0.06%	0.13%	0.04%	0.89%	0.02%	0.38%	0.04%	0.09%	0.02%	0.34%	0.01%	0.21%
Ic1 (elektrana radi)	maksimalna vrednost	0.14%	0.62%	0.09%	7.85%	0.03%	3.68%	0.05%	0.12%	0.02%	1.48%	0.02%	1.09%	0.02%	0.11%	0.04%	0.52%	0.02%	0.42%	0.02%	0.07%	0.02%	0.16%	0.02%	0.23%
Ic1 (elektrana ne radi)	maksimalna vrednost	0.12%	0.73%	0.10%	10.19%	0.04%	4.34%	0.07%	0.12%	0.03%	1.62%	0.01%	1.34%	0.05%	0.12%	0.04%	0.82%	0.02%	0.47%	0.02%	0.09%	0.03%	0.33%	0.01%	0.23%

Tabela XIV- Izmerene maksimalne vrednosti strujnih harmonika u ćeliji Peštan 2

	red harmonika	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Ia2 (elektrana radi)	maksimalna vrednost (A)	81.91	0.15	0.80	0.10	5.57	0.06	3.25	0.05	0.17	0.06	1.00	0.01	0.83	0.04	0.12	0.08	0.60	0.03	0.26	0.04	0.10	0.04	0.19	0.01	0.18
Ia2 (elektrana ne radi)	maksimalna vrednost (A)	71.45	0.12	0.85	0.09	5.65	0.03	3.06	0.05	0.16	0.04	1.05	0.01	0.69	0.04	0.10	0.05	0.39	0.01	0.28	0.03	0.13	0.03	0.18	0.01	0.15
Ib2 (elektrana radi)	maksimalna vrednost (A)	80.80	0.18	0.58	0.09	5.73	0.04	3.31	0.05	0.16	0.05	1.09	0.01	0.82	0.04	0.11	0.07	0.61	0.02	0.26	0.05	0.07	0.04	0.25	0.01	0.16
Ib2 (elektrana ne radi)	maksimalna vrednost (A)	70.14	0.12	0.83	0.10	5.75	0.04	3.03	0.04	0.17	0.04	1.06	0.01	0.63	0.05	0.12	0.06	0.39	0.01	0.24	0.03	0.08	0.03	0.21	0.01	0.11
Ic2 (elektrana radi)	maksimalna vrednost (A)	79.29	0.17	0.50	0.08	5.55	0.03	3.22	0.06	0.08	0.05	1.02	0.01	0.80	0.04	0.08	0.06	0.61	0.02	0.24	0.05	0.05	0.03	0.22	0.01	0.15
Ic2 (elektrana ne radi)	maksimalna vrednost (A)	69.32	0.14	0.32	0.07	5.66	0.03	2.92	0.05	0.09	0.05	1.09	0.01	0.56	0.04	0.08	0.05	0.42	0.01	0.25	0.03	0.06	0.03	0.20	0.01	0.13

Tabela XV- Procentualne vrednosti strujnih harmonika u odnosu na osnovni harmonik u ćeliji Peštan 2

		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Ia2 (elektrana radi)	maksimalna vrednost	0.18%	0.98%	0.12%	6.80%	0.07%	3.97%	0.06%	0.21%	0.07%	1.22%	0.02%	1.01%	0.05%	0.15%	0.10%	0.73%	0.03%	0.32%	0.05%	0.13%	0.05%	0.23%	0.01%	0.22%
Ia2 (elektrana ne radi)	maksimalna vrednost	0.17%	1.19%	0.13%	7.91%	0.04%	4.28%	0.07%	0.22%	0.06%	1.47%	0.01%	0.97%	0.06%	0.14%	0.07%	0.55%	0.01%	0.39%	0.04%	0.18%	0.04%	0.25%	0.01%	0.21%
Ib2 (elektrana radi)	maksimalna vrednost	0.22%	0.72%	0.11%	7.09%	0.05%	4.09%	0.06%	0.19%	0.06%	1.35%	0.02%	1.01%	0.05%	0.14%	0.09%	0.76%	0.03%	0.32%	0.06%	0.09%	0.04%	0.31%	0.01%	0.20%
Ib2 (elektrana ne radi)	maksimalna vrednost	0.17%	1.18%	0.14%	8.20%	0.06%	4.32%	0.06%	0.24%	0.06%	1.51%	0.01%	0.90%	0.07%	0.17%	0.09%	0.56%	0.01%	0.34%	0.04%	0.11%	0.04%	0.30%	0.01%	0.16%
Ic2 (elektrana radi)	maksimalna vrednost	0.21%	0.63%	0.10%	7.00%	0.04%	4.06%	0.07%	0.10%	0.06%	1.28%	0.02%	1.00%	0.05%	0.10%	0.08%	0.77%	0.03%	0.30%	0.06%	0.06%	0.04%	0.27%	0.01%	0.19%
Ic2 (elektrana ne radi)	maksimalna vrednost	0.20%	0.46%	0.10%	8.17%	0.04%	4.21%	0.07%	0.13%	0.07%	1.57%	0.01%	0.81%	0.06%	0.12%	0.07%	0.61%	0.01%	0.36%	0.04%	0.09%	0.04%	0.29%	0.01%	0.19%

4. ANALIZA IZMERENIH VREDNOSTI PARAMETARA KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Upoređivanjem izmerenih vrednosti parametara kvaliteta električne energije solarne elektrane Peštan u ciklusu rada elektrane kada proizvodi električnu energiju i u ciklusu kada ne proizvodi električnu energiju dolazimo do sledećih zaključaka:

- Efektivne vrednosti linijskih napona u tačkama priključenja elektrana su skoro identične kada elektrana proizvodi električnu energiju i kada je isključena sa mreže;
- Izmerene vrednosti frekvencije su skoro identične kada elektrana proizvodi električnu energiju i kada je isključena sa mreže;
- Izmerene vrednosti flikera dugog trajanja Plt su bliske kada elektrana proizvodi električnu energiju i kada je isključena sa mreže osim za Pltc-a gde je jedan (od ukupno 72 odbirka), ujedno i maksimalan odbirak bio sa vrednošću 1.67;
- Vrednosti faktora totalnog izobličenja napona THDS (%) su skoro identične kada elektrana proizvodi električnu energiju i kada je isključena sa mreže;
- Vrednosti parnih i neparnih harmonika linijskih napona su približno iste kada elektrana proizvodi električnu energiju i kada je isključena sa mreže;
- Vrednosti strujnih harmonika su približno jednake i kada elektrana radi i kada elektrana ne radi, dok gledano procentualno vrednosti pojedinačnih harmonika u odnosu na osnovni harmonik su veći kada elektrana ne radi u odnosu na vrednosti kada elektrana radi. Ova konstatacija važi i za merenja na izvodu Peštan 1 i Peštan 2. Od pojedinačnih vrednosti strujnih harmonika izražen je peti harmonik i u režimu kada elektrana radi i u režimu kada je elektrana isključena, pa se nameće zaključak da ga ne izaziva rad elektrane.

Analizom izmerenih vrednosti i poređenjem sa važećim zahtevima koje je propisao ODS, može se doći do sledećih konstatacija:

- Efektivna vrednost izmerenih linijskih napona u oba ciklusa rada elektrane (kada elektrana proizvodi električnu energiju i kada elektrana ne radi) je u skladu sa zahtevima Pravila o radu DS i norme SRPS EN 50160 (preko 95 % (Pravila o radu DS) i 99% (SRPS EN 50160) vrednosti napona u merenom intervalu je u granicama 18 kV – 22 kV);
- Vrednosti izmerene frekvencije u oba ciklusa rada elektrane su u skladu sa zahtevima Pravila o radu DS i norme SRPS EN 50160 (preko 99.5 % vrednosti frekvencije u merenom intervalu je u granicama 49.5Hz – 50.5Hz);
- Izmerene vrednosti flikera dugog trajanja P_{lt} u oba ciklusa rada elektrane su u skladu sa zahtevima Pravila o radu DS i norme SRPS EN 50160 (95% izmerenih vrednosti treba da je manje ili jednako 1. Ovaj kriterijum važi za tačku priključenja krajnjeg korisnika. Kada se radi studija priključenja malih elektrana proverava se ispunjenost uslova:

$$A_{lt} = \left(c_{fE} * \frac{S_E}{S_{ks}}\right)^3 = \left(\frac{C_{fg}}{\sqrt{n}} * \frac{S_E}{S_{ks}}\right)^3 \leq 0{,}1 \quad (1)$$

gde je:
A_{lt} – dugotrajni faktor smetnji elektrane,

c_{fE} – koeficijent flikera elektrane,
c_{fg} – koeficijent flikera generatora,
S_E – ukupna snaga generatora,
S_{ks} – snaga trofaznog kratkog spoja sa priključenom elektranom

Konkretno za solarne elektrane ODS ne zahteva proveru ovog kriterijuma prilikom izrade studije priključenja već zahteva da investitor elektrane tokom probnog rada elektrane obezbedi atest kojim dokazuje da elektrana zadovoljava kriterijum flikera kao jedan od uslova za prelazak elektrane u trajan rad (Atestom treba da se pokaže da je $c_{fg} \leq 20$). Na osnovu svega navedenog smatramo da je u interesu ODS da propiše način provere kriterijuma flikera umesto da se oslanja na dostavljene ateste. Takođe potrebno je razjasniti odnos parametara P_{lt} i A_{lt}, jer merenjem gotovo svim mrežnim analizatorima se određuje parametar P_{lt}.

- Faktor totalnog izobličenja napona THDS (%) u oba ciklusa rada elektrane je u skladu sa zahtevima Pravila o radu DS i SRPS EN 50160 (maksimalno izmereni THDS su 1.63% i 1.62%, a to je značajno manje od nedozvoljenih 8%);
- Izmerene maksimalne vrednosti parnih i neparnih vrednosti harmonika napona su prikazane u tabelama u poglavlju 3.5 i sve su u skladu sa zahtevima Pravila o radu DS i SRPS EN 50160;
- Izmerene vrednosti strujnih harmonika su prikazane u tabelama u poglavlju 3.6 Njihove dozvoljene vrednosti su date u tabeli 4.2 Pravila o radu DS. Kao i kod flikera i kriterijum dozvoljenih strujnih harmonika se ne proverava u toku izrade studije priključenja elektrane, ali je potrebno tokom probnog rada izmeriti ove vrednosti i uporediti ih sa dozvoljenim vrednostima. Za proveru ovog kriterijuma se koristi obrazac:

$$I_{Vhg} \leq I_{Vhdoz} = I_{Vhs,v,\mu} * S_{ks} \quad (2)$$

gde je:
I_{Vhg} – stvarna vrednost struje višeg harmonika/interharmonika koju generator injektira u DSEE, svedena na mesto priključenja, u (A),
I_{Vhdoz} – dozvoljena vrednost struje višeg harmonika/interharmonika na mestu priključenja, u (A),
$I_{Vhs,v,\mu}$ - dozvoljena vrednost struje višeg harmonika/interharmonika svedena na jediničnu snagu kratkog spoja na mestu priključenja na DSEE, u (A/MVA),
S_{ks} – snaga trofaznog kratkog spoja sa priključenom elektranom u (MVA).

Upoređivanjem izmerenih rezultata strujnih harmonika sa dozvoljenim vrednostima iz Pravila o radu DS za vrednost S_{ks} = 172.25 MVA u tački priključenja elektrane uočene su veće vrednosti struja 5. harmonika koje su prikazane u tabeli XIV za ćeliju Peštan 1 (izmerene vrednosti struja Ia1) od dozvoljene. Vrednost struja 5. harmonika je približno jednaka i veća od dozvoljene i u režimu rada kada elektrana ne radi i u režimu kada elektrana proizvodi električnu energiju. Na osnovu toga nameće se zaključak da sam rad elektrane ne utiče u značajnoj meri na vrednosti strujnih harmonika, već je u mreži i pre priključenja ove elektrane postojao značajan nivo 5. harmonika.

Tabela XIV- Upoređivanje izmerenih vrednosti 5. harmonika sa dozvoljenim vrednostima iz Pravila o radu DS

Redni br. višeg harmonika	$I_{Vhs,v,\mu}$ (A/MVA)	S_{ks} (MVA)	I_{Vhdoz} (A)	I_{Vhg} elektrana radi (A)	I_{Vhg} (elektrana ne radi) (A)
5.	0.029	172.25	4.995	11.85	11.49

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu izvršenih merenja i analiza izmerenih rezultata sa važećim propisima, solarna elektrana Peštan je dobila saglasnost da pređe u trajan rad. Za donošenje ovakve odluke su presudna bila upoređivanja izmerenih rezultata kada elektrana proizvodi električnu energiju i kada elektrana ne radi. Mišljenja smo da ODS mora što pre ažurirati svoje zahteve iz Pravila o radu DS i doneti jasan protokol o ispitivanju uticaja elektrane na DSEE kada su parametri kvaliteta električne energije u pitanju jer dosadašnja praksa je pokazala da investitori elektrana dostavljaju izveštaje o ispitivanju koji nisu jedinstveni i vrlo često ne daju realnu sliku o uticaju elektrane na DSEE, kao i da se ne vrše merenja u režimu kada elektrana ne proizvodi električnu energiju.

LITERATURA

[1] ELEKTRODISTRIBUCIJA SRBIJE DOO BEOGRAD, „Pravila o radu distributivnog sistema", www.elektrodistribucija.rs
[2] SRPS EN 50160:2012, „Karakteristike napona isporučene električne energije iz javnih električnih mreža"
[3] SRPS EN 61000-4-30:2015, „Elektromagnetna kompatibilnost (EMC) — Deo 4-30: Tehnike ispitivanja i merenja — Metode merenja kvaliteta napajanja"
[4] SRPS EN 61000-4-15:2013, „ Elektromagnetska kompatibilnost (EMC) — Deo 4-15: Tehnike ispitivanja i merenja — Flikermetar — Funkcijske i projektne specifikacije"
[5] N. LAKETIĆ, „Kvalitet električne energije na mernom mestu priključenja obnovljivih izvora električne energije", "Stručni skup o priključenju obnovljivih izvora na niskonaponsku i srednjenaponsku distributivnu mrežu", Privredna komora Srbije, 2023
[6] N. ZLATKOVIĆ, B. ĐEKIĆ, N. KRUŠKOVIĆ, „Kvalitet električne energije na mestu priključenja solarnih elektrana na distributivni sistem", 14. Savetovanje CIRED Srbija 2024, Kopaonik 2024
[7] R. MILANKOV, „Priključenje male elektrane- iskustva i predlozi", 9. Savetovanje CIRED Srbija 2014
[8] SRPS EN 61000-4-7:2008, „Elektromagnetska kompatibilnost (EMC) — Deo 4-7: Tehnike ispitivanja i merenja- Opšte uputstvo za merenje harmonika i međuharmonika i instrumentacija, za sistema za napajanje i opremu povezanu na njih"