

Miro Vlaić, struč.spec.ing.el.
HEP-Operator distribucijskog sustava d.o.o.
miro.vlaic@hep.hr

Dalibor Morić, el.teh.
HEP-Operator prijenosnog sustava d.o.o.
dalibor.moric@hep.hr

Dražen Arnaut, dipl.ing.el.
Deuterij d.o.o.
drazen@deuterij.hr

Ive Stilinović, dipl.ing.el.
HEP-Operator distribucijskog sustava d.o.o.
ive.stilinic@hep.hr

MJERENJA KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE U POKUSNOM RADU FNE STANKOVCI

SAŽETAK

Završni korak u postupku priključenja elektrane na distribucijsku elektroenergetsku mrežu su ispitivanja u pokusnom radu. Tijekom pokusnog rada potrebno je mjerenjem dokazati da novi proizvodni objekt zadovoljava (tj. svojim radom ne narušava) dopuštene granice povratnog djelovanja na kvalitetu napona sukladno **Mrežnim pravilima elektroenergetskog sustava (Narodne novine 36/2006 – Mrežna pravila), poglavlje 5.3.4. Povratno djelovanje na mrežu** te da su svi parametri kvalitete napona na obračunskom mjernom mjestu u skladu sa hrvatskom normom HRN EN 50160:2012. Za potrebe priključenja FNE Stankovci odobrene priključne snage 950 kW, obavljena su brojna ispitivanja tijekom lipnja 2015. godine. Cilj ovih mjerenja je bio utvrditi odziv elektrane za vrijeme predviđenih pokusa kao i potvrditi ispravno podešenje sustava relejne zaštite elektrane i 10 kV mreže na koju je priključena FNE Stankovci.

Ključne riječi: kvaliteta električne energije, fotonaponska elektrana, mjerenje, HRN 50160:2012, mrežna pravila

POWER QUALITY MEASUREMENTS DURING TRIAL OPERATION OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANT STANKOVCI

SUMMARY

The final step in the process of connecting power plant to the electricity distribution network are testings in trial operation. During the trial testing, it is necessary to prove that a new photovoltaic power plant meets (does not distort) the permitted limits in accordance with the **Grid code (Official Gazette 36/2006), chapter 5.3.4. Retroactive influence on the network** and that all quality parameters of voltage at the metering point are in accordance with the Croatian standard EN 50160: 2012th. Rated power of power plant is 950 kW, the voltage level is 10kV. For the purpose of connecting PV power plant Stankovci numerous measurements was made in June 2015 to determine the behavior of the power plant during the planned testing's and to verify the correct relay protection settings of PV power plant and 10 kV grid to which PV power plant Stankovci is connected.

Key words: power quality, photovoltaic power plant, measurement, EN 50160: 2012 norm, Grid code

1. UVOD

Fotonaponska elektrana Stankovci nalazi se na području poslovne zone Stankovci priključne snage 950 kW. Spojena je na 10 kV mrežu koja se napaja iz TS 30/10 kV Crljenik. Sukladno **Mrežnim pravilima, poglavlje 5.3.4. Povratno djelovanje na mrežu**, tijekom probnog pogona korisnika mreže, potrebno je mjerenjem utvrditi da korisnik mreže ne narušava dopuštene granice povratnog djelovanja na kvalitetu napona.

Cilj mjerenja je ustanoviti kvalitetu napona na SN sabirnicama u susretnom postrojenju TS 10(20)/0,4 kV FNE Stankovci (na sučelju elektrane i distribucijske mreže), kada je elektrana van pogona i kada je elektrana u pogonu. Osim kvalitete napona važno je odrediti i ukupnu proizvodnju elektrane. Iz navedenih rezultata mjerenja se može utvrditi povratno djelovanje elektrane na mrežu. Kvaliteta električne energije na 10 kV sabirnicama u TS 10(20)/0,4 kV FNE Stankovci je analizirana u skladu sa HRN EN 50160:2012, dok je povratno djelovanje na kvalitetu napona analizirano u skladu sa Mrežnim pravilima EES-a.

U svrhu ispitivanja djelovanja i selektivnosti relejne zaštite izvršen je pokus zemnog spoja u 10 kV mreži na koju je priključena FNE Stankovci.

Građevina	Fotonaponska elektrana Stankovci (950 kW) Stankovci k.č.br. 244/1 k.o. Velim
PEES	401500-120675-0011
Ispitivač	Dražen Arnaut mag. ing. el.
Vrijeme ispitivanja	Mjerenje bez elektrane: 12.06.2015. 00:00 h – 19.06.2015. 00:00 h Mjerenje sa elektranom: 19.06.2015. 16:30 h – 26.06.2015. 16:30 h
Mjerna oprema	Dranetz PowerVisa ser. br. PVUSIA227
Opis postrojenja	Fotonaponska elektrana priključne snage 950 kW se sastoji od dva izmjenjivača. Izmjenjivači imaju nazivni napon 0,3 kV te su preko blok transformatora 0,3/0,3/10(20) kV i SN postrojenja elektrane spojeni na 10 kV distribucijsku mrežu. Priključak elektrane je izveden u susretnom postrojenju elektrane TS 10(20)/0,4 kV FNE Stankovci, koje se nalazi u neposrednoj blizini građevine.
Mjesto mjerenja i opis mjerenja	Na OMM u susretnom postrojenju elektrane TS 10(20)/0,4 kV FNE Stankovci. Vrijednosti napona i struje su dobivene posrednim mjerenjem preko strujnih i naponskih mjernih transformatora.

2. ZAKONSKA REGULATIVA I NORME

U Republici Hrvatskoj je kvaliteta električne energije regulirana Mrežnim pravilima. Mrežna pravila predstavljaju glavni i zakonski jedini važeći dokument u RH vezan za kvalitetu električne energije. Mrežnim pravilima određene su granične vrijednosti parametara kvalitete napona i granice negativnog povratnog djelovanja na mrežu, a što je za slučaj postrojenja srednjeg napona (10, 20, 30 i 35 kV) prikazano u tablici I.

Tablica I. Granične vrijednosti parametara kvalitete napona po Mrežnim pravilima, za postrojenja srednjeg napona

Parametar	Granične vrijednosti	Napomena
Odstupanje frekvencije	49,95 do 50,05 Hz	Normalni pogonski uvjeti
Odstupanje napona	$Un \pm 10\%$	95% prosjeka tijekom tjedan dana
	$Un +10\% / -15\%$	100% prosjeka tijekom tjedan dana
Ukupno harmonijsko izobličenje – THD	$\leq 2,0\%^*$	(*) vrijednosti se odnose na doprinos priključenjem korisnika
Indeks jačine flikera	$Pst \leq 0,7^*$	
	$Plt \leq 0,5^*$	
Nesimetrija napona	$\leq 1,3 \% Un^*$	

Norma HRN EN 50160:2012 definira granične vrijednosti karakteristika napona u javnim elektrodistribucijskim mrežama naponskih razina do 35 kV. Period mjerenja određen normom HRN EN 50160:2012 je sedam dana bez prestanka, pri čemu su propisane granice pojedinih parametara koje moraju biti zadovoljene unutar 95 % perioda mjerenja, dok su u ostalih 5 % slučajeva granice parametara šire, ili čak nisu propisane. U tablici II. prikazane su granične vrijednosti parametara kvalitete napona prema HRN EN 50160:2012.

Tablica II. Granične vrijednosti parametara kvalitete napona prema normi **HRN EN 50160:2012**

Parametar	Granične vrijednosti		Mjerni i vrijednosni parametri			
	NN	SN	Osnovna veličina	Interval usrednjavanja	Promatrano razdoblje	Granice (%)
Frekvencija	49,5 do 50,5 Hz		Prosječna vrijednost	10 s	1 godina	99,5
	47 – 52 Hz					100
Spore promjene napona	Un±10%		Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	99
	Un +10%/-15%					100
Flikeri	Pst		Algoritam flikera	10 min 2 h	1 tjedan	
	Plt< 1					95
Nesimetrija napona	<2 %		Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	95
Viši harmonici napona	THD ≤ 8% (tablica do 40. harm.)		Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	95

Signalni napon	Do 500 Hz: <9% 1-10 kHz: <5%	Efektivna vrijednost	3 s	1 dan	99
-------------------	---------------------------------	-------------------------	-----	-------	----

3. ANALIZA REZULTATA MJERENJA

3.1 Rezultati mjerenja parametara kvalitete električne energije u TS 10(20)/0,4 kV FNE Stankovci na 10 kV sabirnicama u skladu sa HRN EN 50160:2012

Mjerenja parametara kvalitete električne energije su obavljena na 10 kV sabirnicama u TS 10(20)/0,4 kV FNE Stankovci u razdoblju 12.06.2015. 00:00 h – 19.06.2015. 00:00 h kada je elektrana bila van pogona i u razdoblju od 19.06.2015. 16:30 h – 26.06.2015. 16:30 h kada je elektrana bila u pogonu. Mjerenja parametara kvalitete električne energije su analizirana u skladu sa HRN EN 50160:2012. Grafički prikaz rezultata mjerenja je dan u prilogu, dok su brojčane vrijednosti rezultata mjerenja dane u tablici III. U navedenoj tablici se nalaze prikazani parametri parametara kvalitete električne energije, granične vrijednosti prema normi HRN EN 50160:2012 te vrijednosti koje su izmjerene za navedena razdoblja od po tjedan dana. Mjerni intervali unutar kojih se promatraju pojedini parametri su trajanja deset minuta (tijekom tjedna ukupno 1008 10-minutnih intervala), osim za frekvenciju koja se promatra u vremenskim isječcima od deset sekundi. S obzirom da norma postavlja fiksno one vrijednosti kao granične, koje ne smiju biti prekoračene 95% vremena monitoringa (za vrijednosti napona je to 99% te za vrijednosti frekvencije 99,5% vremena), vrijednosti koje su dane u tablici su najveće izmjerene vrijednosti u 95 % vremena monitoringa (odnosno 99% za vrijednosti napona te 99,5% za vrijednosti frekvencije).

Za SN mreže iznos opskrbnog napona je određen deklariranim naponom U_c i on u ovom slučaju iznosi 10 kV.

Tablica III. Sažeti prikaz rezultata mjerenja parametara kvalitete električne energije

PARAMETAR KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE	Postotak vremena promatranja	GRANIČNA VRIJEDNOST PREMA HRN EN 50160:2012	IZMJERENA VRIJEDNOST (mE VAN POGONA)			IZMJERENA VRIJEDNOST (mE U POGONU)		
			L1	L2	L3	L1	L2	L3
Frekvencija napona (Hz)	99,5 %	49,50 – 50,50	49,96 - 50,05			49,96 - 50,04		
	100%	47,00 – 52,00	49,96 - 50,07			49,93 - 50,06		
Vrijednost napona (p.u. U_n)	99%	0,90 – 1,10	0,98 - 1,01	0,98 - 1,01	0,97 - 1,01	0,98 - 1,01	0,98 - 1,01	0,98 - 1,01
	100%	0,85 – 1,15	0,98 - 1,02	0,98 - 1,01	0,97 - 1,01	0,98 - 1,02	0,97 - 1,01	0,97 - 1,01
Dugotrajna jakost flikera P_{lt}	95%	≤ 1	0,82	0,84	0,76	0,35	0,40	0,35
Nesimetričnost napona (%)	95%	$< 2,0\%$	0,25			0,24		
Thd $U_{10'}$ (%)	95%	$< 8,0\%$	2,23	2,19	2,36	2,40	2,37	2,58
U_{h2} (% U_1)	95%	$< 2,0\%$	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03
U_{h3} (% U_1)	95%	$< 5,0\%$	0,25	0,31	0,35	0,28	0,33	0,37
U_{h4} (% U_1)	95%	$< 1,0\%$	0,04	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05
U_{h5} (% U_1)	95%	$< 6,0\%$	1,97	1,98	2,21	2,17	2,27	2,52
U_{h6} (% U_1)	95%	$< 0,5\%$	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03
U_{h7} (% U_1)	95%	$< 5,0\%$	1,33	1,25	1,23	1,12	1,05	1,05
U_{h8} (% U_1)	95%	$< 0,5\%$	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01
U_{h9} (% U_1)	95%	$< 1,5\%$	0,05	0,03	0,04	0,06	0,04	0,06
U_{h10} (% U_1)	95%	$< 0,5\%$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
U_{h11} (% U_1)	95%	$< 3,5\%$	0,17	0,19	0,19	0,19	0,21	0,22
U_{h12} (% U_1)	95%	$< 0,5\%$	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00
U_{h13} (% U_1)	95%	$< 3,0\%$	0,11	0,09	0,09	0,11	0,08	0,09
U_{h14} (% U_1)	95%	$< 0,5\%$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
U_{h15} (% U_1)	95%	$< 0,5\%$	0,04	0,01	0,03	0,03	0,01	0,03
U_{h16} (% U_1)	95%	$< 0,5\%$	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
U_{h17} (% U_1)	95%	$< 2,0\%$	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,07
U_{h18} (% U_1)	95%	$< 0,5\%$	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
U_{h19} (% U_1)	95%	$< 1,5\%$	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06
U_{h20} (% U_1)	95%	$< 0,5\%$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
U_{h21} (% U_1)	95%	$< 0,5\%$	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02
U_{h22} (% U_1)	95%	$< 0,5\%$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
U_{h23} (% U_1)	95%	$< 1,5\%$	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
U_{h24} (% U_1)	95%	$< 0,5\%$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
U_{h25} (% U_1)	95%	$< 1,5\%$	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04

MTU (%U_n)	<i>99%</i>	<i>< 9,0%</i>	0,32	0,33	0,30	0,32	0,35	0,32
-----------------------------	------------	------------------	------	------	------	------	------	------

Iz navedene tablice je vidljivo da su sve vrijednosti izmjerenih parametara kvalitete električne energije unutar graničnih razina danih prema HRN EN 50160:2012. Vrijednosti ukupnog harmoničkog izobličenja i viših harmonika napona i nesimetričnosti napona nisu značajnije povećane u razdoblju kada je elektrana u pogonu u odnosu na razdoblje kada je ona bila van pogona.

3.2 Analiza rezultata mjerenja parametara kvalitete električne energije prema Mrežnim pravilima – Povratno djelovanje elektrane na mrežu

Prema *Mrežnim pravilima*, poglavlje 5.3.4. *Povratno djelovanje na mrežu*, stavak (6) analiza povratnog djelovanja je obveza korisnika mreže, koji operatoru distribucijskog sustava mora u probnom pogonu mjerenjem dokazati da ne narušava dopuštene granice povratnog djelovanja (flikeri, nesimetrija, viši harmonici i drugo).

Prema zahtjevima navedenim u Mrežnim pravilima u nastavku je dana tablica IV. sa parametrima kvalitete električne energije (dana je najveća vrijednost izmjerena u jednoj od 3 faze) za razdoblje mjerenja kada elektrana nije bila u pogonu - razdoblje 12.06.2015. 00:00 h – 19.06.2015. 00:00 h i kada je ona bila u pogonu – razdoblje 19.06.2015. 16:30 h – 26.06.2015. 16:30 h, te ocjena povratnog djelovanja predmetne elektrane na mrežu.

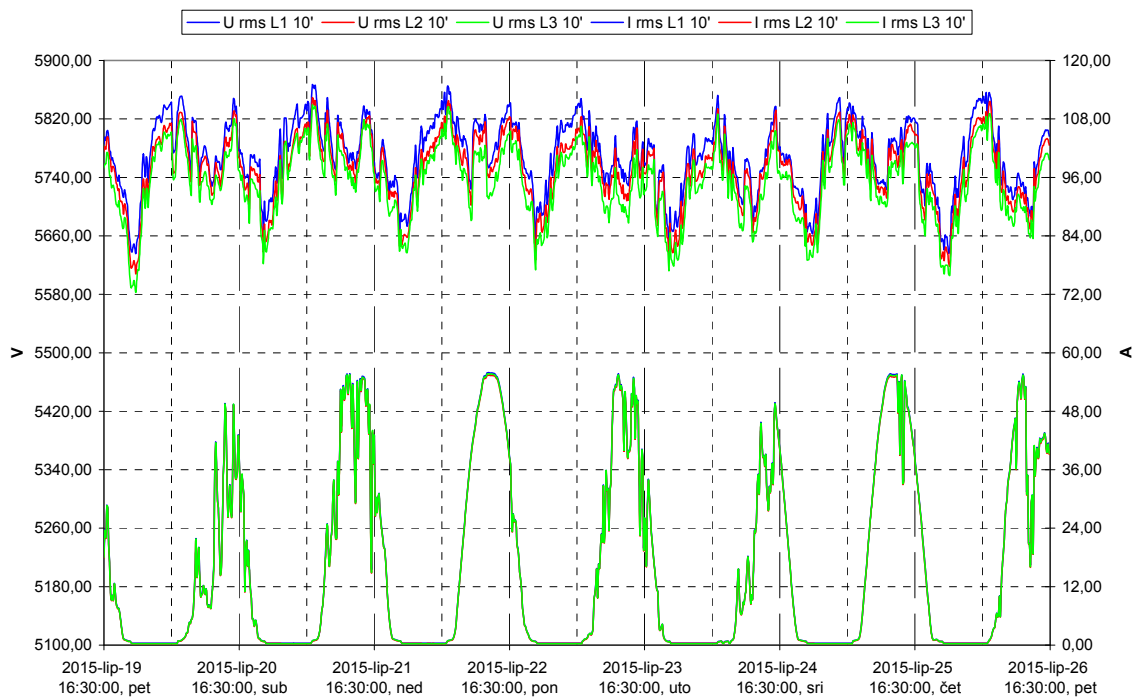
Tablica IV. Udovoljavanje uvjetima ograničenoga povratnog djelovanja na mrežu i kvalitete električne energije na sučelju elektrane s mrežom (10 kV sabirnice u TS 10(20)/0,4 kV FNE Stankovci)

Parametar vezan za kvalitetu električne energije i povratno djelovanje na mrežu	Zahtjevi prema Mrežnim pravilima	mE van pogona Izmjerena vrijednost	mE u pogonu Izmjerena vrijednost	Ocjena Povratnog djelovanja na mrežu
Frekvencija	49,95 – 50,50 Hz, u 100% vremena	49,96 - 50,07	49,93 - 50,06*	ZADOVOLJAVA*
Promjene napona	0,90 U_n – 1,10 U_n u 95% vremena	0,98 - 1,01	0,98 - 1,01	ZADOVOLJAVA
	0,85 U_n – 1,10 U_n u 100% vremena	0,97 - 1,02	0,97 - 1,02	
Faktor kratkotrajnog flikera	Doprinos < 0,7 u 100% vremena	4,07 **	3,26 **	ZADOVOLJAVA
Faktor dugotrajnog flikera	Doprinos < 0,5 u 100% vremena	1,78 **	1,70 **	ZADOVOLJAVA
Nesimetričnost napona	Doprinos < 1,3% U_n u 95% vremena	0,25	0,24	ZADOVOLJAVA
Prigušenje signala MTU	Ne smije biti prigušenja	0,33	0,35	ZADOVOLJAVA
Faktor ukupnog harmonijskog izobličenja napona	Doprinos < 2,0% u 95% vremena	2,36 %	2,58 %	ZADOVOLJAVA

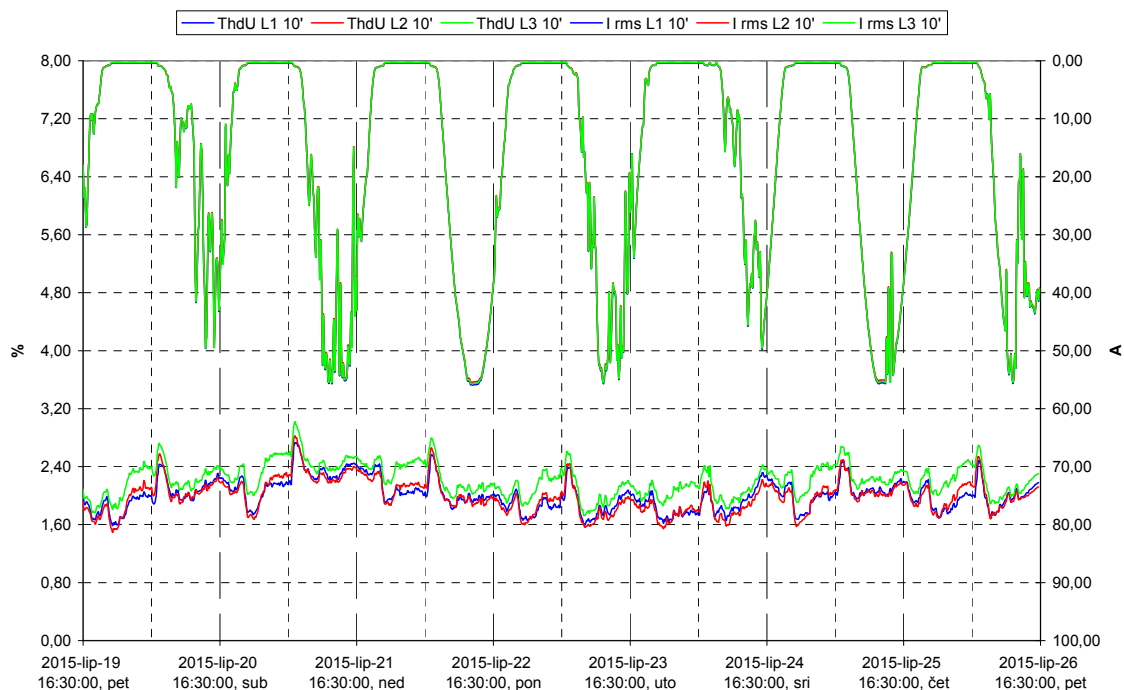
* pogon elektrane nema utjecaja na vrijednost frekvencije

** izmjerene visoke vrijednosti su odbačene zbog događaja (propada napona i prenapona) u mreži koji su ih izazvali

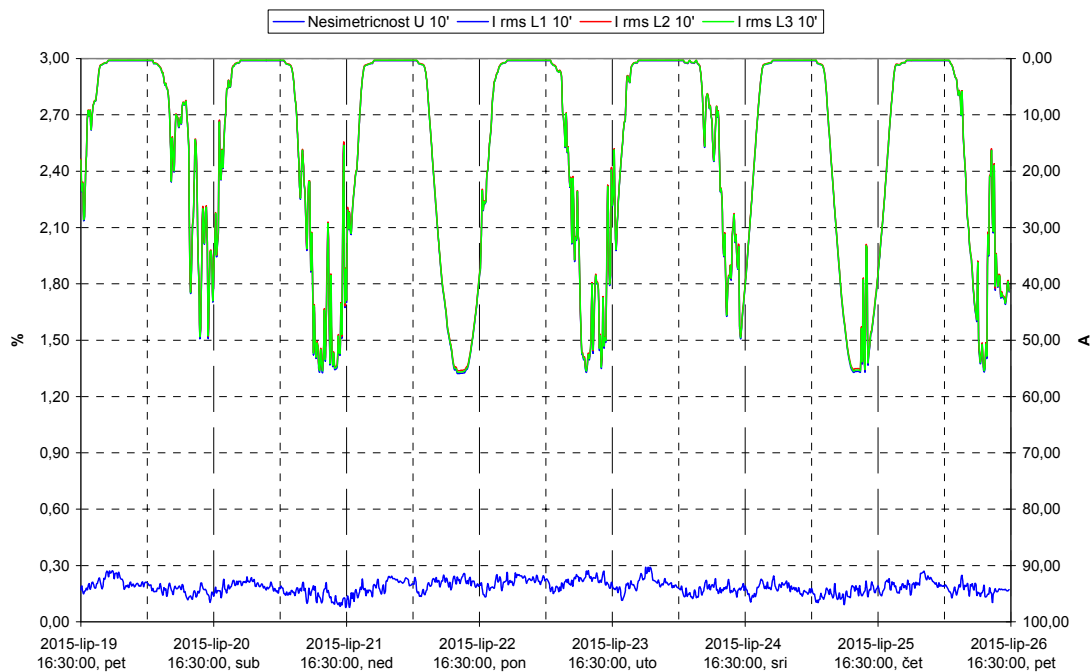
4. GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA MJERENJA KEE



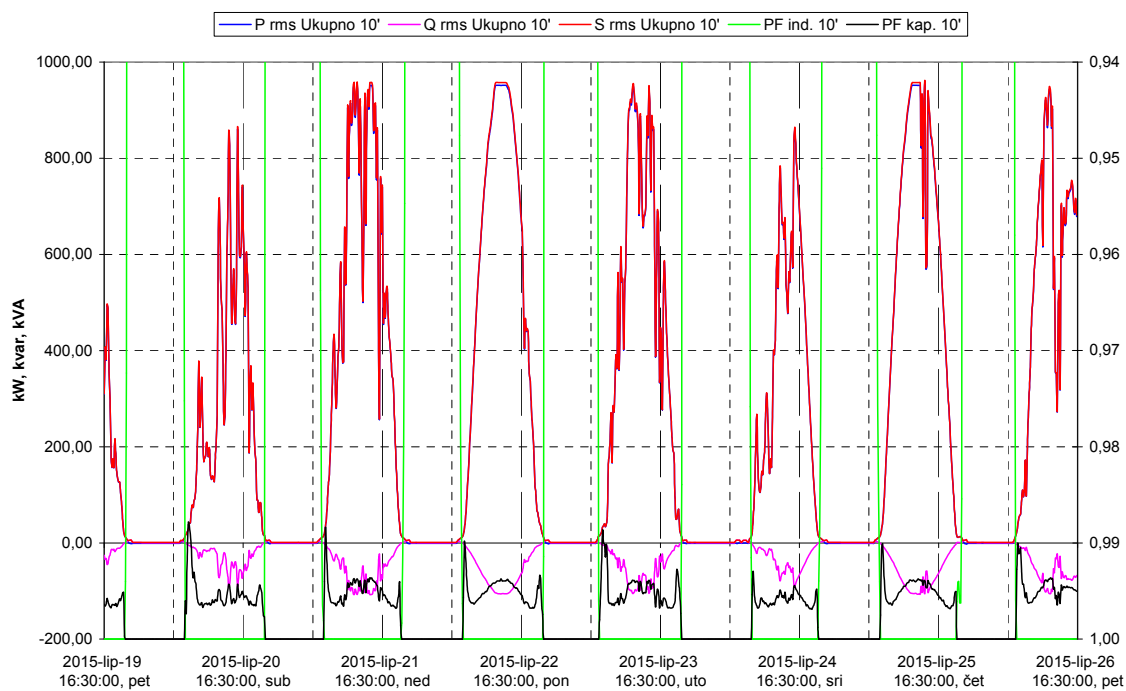
Slika 1. Prikaz usporedbe efektivnih vrijednosti napona i struja (10 minutne srednje vrijednosti) u TS 10(20)/0,4 kV FNE Stankovci na 10 kV sabirnicama kada je elektrana bila u pogonu



Slika 2. Prikaz usporedbe vrijednosti faktora ukupnog harmoničkog izobličenja napona i vrijednosti struja (10 minutne srednje vrijednosti) u TS 10(20)/0,4 kV FNE Stankovci na 10 kV sabirnicama na odvodu za elektranu kada je elektrana bila u pogonu



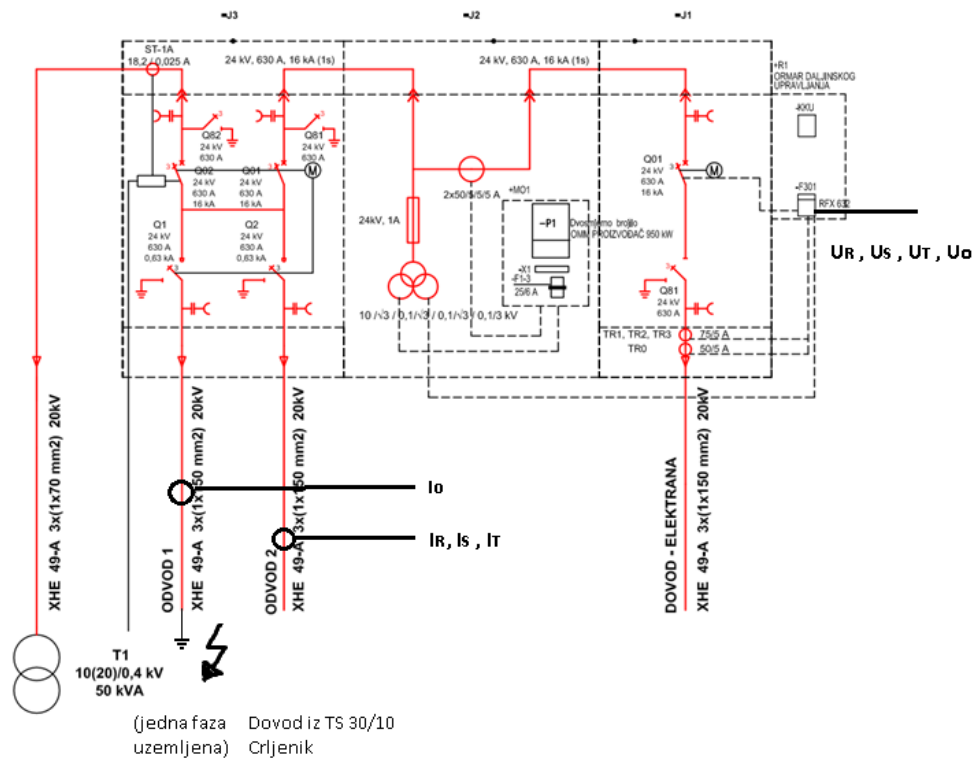
Slika 3. Prikaz usporedbe vrijednosti nesimetričnosti napona i vrijednosti struja (10 minutna srednja vrijednost) u TS 10(20)/0,4 kV FNE Stankovci na 10 kV sabirnicama na odvodu za elektranu kada je elektrana bila u pogonu



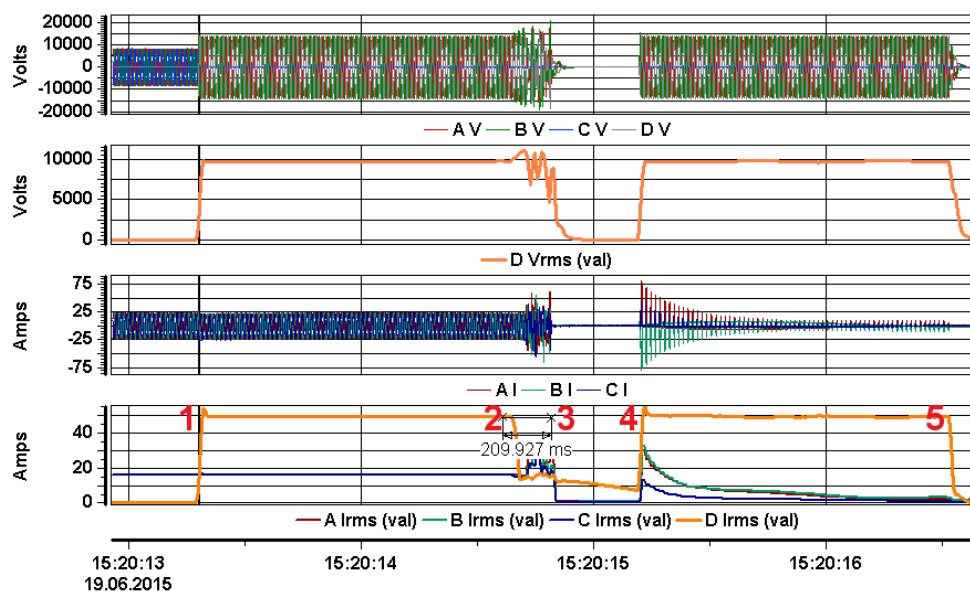
Slika 4. Prikaz usporedbe vrijednosti ukupne radne, ukupne jalove, ukupne prividne snage i faktora snage (10 minutne srednje vrijednosti) u TS 10(20)/0,4 kV FNE Stankovci na 10 kV sabirnicama na odvodu za elektranu kada je elektrana bila u pogonu

5. POKUS TRAJNOG ZEMNOG SPOJA U 10 kV MREŽI

Prilikom ispitivanja povratnog djelovanja na mrežu uslijed prolaska elektrane kroz sekundarno simulirani ciklus APU-a (ponašanje elektrane FNE Stankovci tijekom kvara u mreži i ciklus brzog APU-a) simuliran je zemni spoj u 10 kV mreži na način da se u TS 10/0,4 kV Stankovci 8 (koja se nalazi u neposrednoj blizini susretnog postrojenja i koja je na elektrodistribucijsku mrežu spojena preko susretnog postrojenja) preko tropoložajne rastavne sklopke izvršilo uklapanje jedne faze koja je prethodno povezana na uzemljivač od TS Stankovci 8.



Slika 5. Prikaz mjesta mjerenja na jednopolnoj shemi susretnog postrojenja prilikom pokusa zemnog spoja.



Slika 6. Valni oblik i efektivne vrijednosti napona i struja prilikom zemnog spoja u mreži 10 kV.

Na slici 6 prikazani su valni oblici struja i napona za vrijeme trajanja zemnog spoja i na njima označene brojevima karakteristične točke:

1. Nastanak zemnog spoja, porast nulte struje i napona u zdravim fazama
2. Prorada zemljospojne zaštite u VP 10 kV Zona Stankovci u TS 30/10 kV Crljenik
3. Prorada zaštite (prepoznavanje otočnog rada za cca 210 ms) u FNE Stankovci i ispad elektrane i nestanak mrežnog napona
4. Automatski ponovni uklop u TS 30/10 kV Crljenik (brzi APU nakon vremenske pauze od 400 ms)
5. Definitivni isklop nakon ponovnog djelovanja zaštite

Ovim simuliranjem zemnog spoja u mreži potvrđeno je ispravno prepoznavanje otočnog rada elektrane za vrijeme trajanja ciklusa APU-a na osnovnom napojnom vodu i isključenje izmjenjivača I1 i I2 s mreže bez pojave asinkronog uklopa.

6. ZAKLJUČAK

Tijekom oba razdoblja mjerenja, prije i nakon priključenja elektrane na mrežu sve izmjerene vrijednosti su unutar graničnih razina danih prema HRN EN 50160:2012.

Kada je elektrana bila u pogonu, strujno opterećenje odvoda za elektranu se kretalo između 0 i 54,5 A po fazi. Vrijednost ukupne radne snage se kretala između 0 i 950 kW (100% vrijednosti odobrene priključne snage), a ukupne jalove snage između -0 kVAr i -110 kVAr. Proizvodnja električne energije iz elektrane izgleda kao simetrična zvonolika krivulja, sa proizvodnjom između 5:30 i 21:00 sati, s tim da je maksimum proizvodnje zabilježen između 12:00 i 14:00 sati. Faktor snage $\cos \varphi$ se kretao uglavnom oko 1,00. Vrijednost napona se kretala između 5590 V (0,97 p.u) i 5870 V (1,02 p.u) po fazama tijekom cijelog razdoblja mjerenja.

Rad elektrane se odvija bez smetnji, pridonosi poboljšanju kvalitete opskrbnog napona, a ne utječe značajnije na povećanje vrijednosti nesimetričnosti napona, harmoničkog izobličenja napona te kratkotrajne (a samim time i dugotrajne) jakosti flikera.

7. LITERATURA

- [1] Deuterij d.o.o. : "Izveštaj o ispitivanju kvalitete električne energije u pokusnom radu FNE Stankovci", 2015.
- [2] HRN EN 50160:2008, „Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava“, 2008.
- [3] Mrežna pravila elektroenergetskog sustava; Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva, ožujak 2006. godina.