

Мјерење и анализа параметара квалитета електричне енергије у тачки прикључења ФНЕ Бранковићи 1 и ФНЕ Бранковићи 3 на електродистрибутивну мрежу

Младен Бањанин, Марко Икић

Електротехнички факултет

Универзитет у Источном Сарајеву

Источно Сарајево, Босна и Херцеговина

mladen.banjalin@etf.ues.rs.ba, marko.ikic@etf.ues.rs.ba

Владан Андрић

“VMR Energy” d.o.o. Rogatica

Рогатица, Босна и Херцеговина

vladanandric1982@gmail.com

Сажетак—У овом раду су анализирани резултати мјерења параметара квалитета електричне енергије у тачки прикључења фотонапонских електрана Бранковићи 1 и Бранковићи 3 на електродистрибутивну мрежу. Електране су, заједно са електраном Бранковићи 2, прикључење на дугачки радијални 10 kV далековод. У анализираним периоду и регистрованим режимима рада електрана сви параметри квалитета електричне енергије су били у границама које су прописане стандардом EN 50160.

Кључне ријечи—фотонапонска електрана; квалитет електричне енергије; фликери; хармоници; несиметрија; THD.

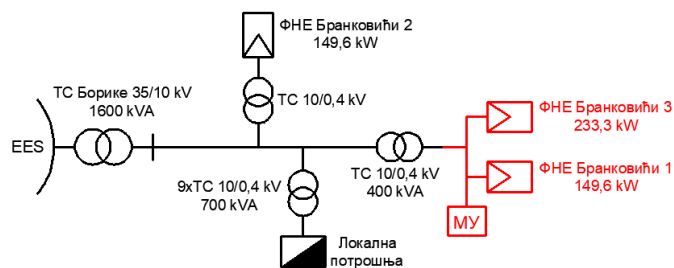
I. УВОД

У посљедње вријеме на нашим просторима је изражен тренд изградње и прикључења на мрежу фотонапонских електрана релативно мањих снага. Те електране се на мрежу често прикључују у руралним областима и преко дугачких радијалних 10 kV далековада. Стога се поставља питање колики утицај те електране имају на квалитет електричне енергије у мрежи, те колики су капацитети постојећих далековада и мреже по питању интеграције обновљивих извора електричне енергије. Електрана може да има и позитиван и негативан утицај на електродистрибутивну мрежу, а у зависности од њене снаге, од локалне потрошње итд. [1]-[3]. У овом раду је анализиран квалитет електричне енергије у тачки прикључења фотонапонских електрана (ФНЕ) Бранковићи 1 и Бранковићи 3 на локалну електродистрибутивну мрежу.

II. ОПИС МЈЕРНЕ ОПРЕМЕ И МЈЕРНОГ МЈЕСТА

ФНЕ Бранковићи 1 и ФНЕ Бранковићи 3 су изграђене на локацији Бранковићи бб, у општини Рогатица. Мјерење параметара квалитета електричне енергије је извршено на 0,4 kV напонском нивоу стубне трафостанице 10/0,4 kV, у

тачки прикључења електрана на електродистрибутивну мрежу, МУ на слици 1.



Слика 1 – Шема прикључења ФНЕ Бранковићи 1 и ФНЕ Бранковићи 3 на локалну електродистрибутивну мрежу

ФНЕ Бранковићи 1 има инсталисану снагу од 149,6 kW, док ФНЕ Бранковићи 3 има инсталисану снагу од 233,3 kW. Обје електране су спојене на исту 10/0,4 kV стубну трафостаницу, слика 2, док је око 250 m даље преко друге стубне трафостанице 10/0,4 kV на исти далековод прикључена ФНЕ Бранковићи 2, инсталисане снаге 149,6 kW. Све три електране су преко радијалног 10 kV вода Пешурићи оквирне дужине 3,8 km спојене у 35/10 kV трафостаницу Борике. На исти далековод је спојено још 9 трафостаница 10/0,4 kV, укупне привидне снаге око 700 kVA (5·100 kVA + 4·50 kVA). Укупна производња фотонапонских електрана у мјесецу октобру је била око 2,5 пута већа од локалне потрошње, што значи да се произведена енергија доминантно враћала у електродистрибутивну мрежу преко ТС Борике.

Вршена су седмодневна мјерења параметара квалитета електричне енергије у два временска периода, и то:

- у периоду од 21.10.2022. године у 14.10h до 28.10.2022. године у 14.10h (период 1),
- у периоду од 28.10.2022. године у 15.10h до 04.11.2022. године у 15.10h (период 2).

Мјерење параметара квалитета електричне енергије је урађено примјеном трофазног анализатора квалитета електричне енергије класе А, модел *Metrel MI 2892* [4], а у складу са стандардом EN 50160 [5]. Стандард EN 50160 дефинише параметре квалитета напона, али не и параметре квалитета струје. Приликом мјерења снага у присуству виших хармоника и/или несиметрије напона и струје уређај *Metrel MI 2892* користи стандард IEEE Std 1459-2010 [6]. Фотографија мјерног мјеста је приказана на слици 2.



Слика 2 – Фотографија мјерног мјеста

III. СНАГЕ ЕЛЕКТРАНА У ВРЕМЕНСКОМ ПЕРИОДУ КАДА СУ ВРШЕНА МЈЕРЕЊА

Снаге појединих електрана мјерене на 5-минутном нивоу у временском периоду 1 су приказане на слици 3, а снаге појединих електрана мјерене на 5-минутном нивоу у временском периоду 2 су приказане на слици 4. У временском периоду 1 ове три електране су произвеле 16 MWh електричне енергије, а у временском периоду 2 електране су произвеле 15,6 MWh електричне енергије. Наведени подаци су добијени од оператора електране, а очитани су са припадајућих инвертора.

IV. ПАРАМЕТРИ КВАЛИТЕТА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ У НИСКОНАПОНСКОЈ МРЕЖИ ПРЕМА СТАНДАРДУ EN 50160

Према стандарду EN 50160 параметри који дефинишу квалитет електричне енергије у нисконапонској мрежи су:

- Вриједност називног напона и дозвољена одступања: 95% десетоминутних средњих ефективних вриједности напона током сваког седмодневног интервала мора бити у опсегу $U_n \pm 10\%$ (у нормалном погону), при чему све десетоминутне ефективне вриједности напона

морају бити у опсегу $U_n + 10\% / -15\%$ (у поремећеном погону).

- Несиметрија напона: У 95% десетоминутних средњих ефективних вриједности напона током сваког седмодневног интервала инверзна компонентна напона не смије да прелази 2% од директне компоненте напона.
- Треперење напона (фликери): Критеријум фликера се оцјењује помоћу индекса јачине фликера кратког трајања (P_{st} – десетоминутна мјерења) и индекса јачине фликера дугог трајања (P_{lt} – рачуна се из израза (1), на основу низа од 12 вриједности P_{st} током временског интервала од 2 часа). У сваком седмодневном интервалу индекс јачине фликера дугог трајања, изазван напонском флукутацијом, мора бити $P_{lt} < 1$ за 95% посматраног временског периода.

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} P_{stj}^3} \quad (1)$$

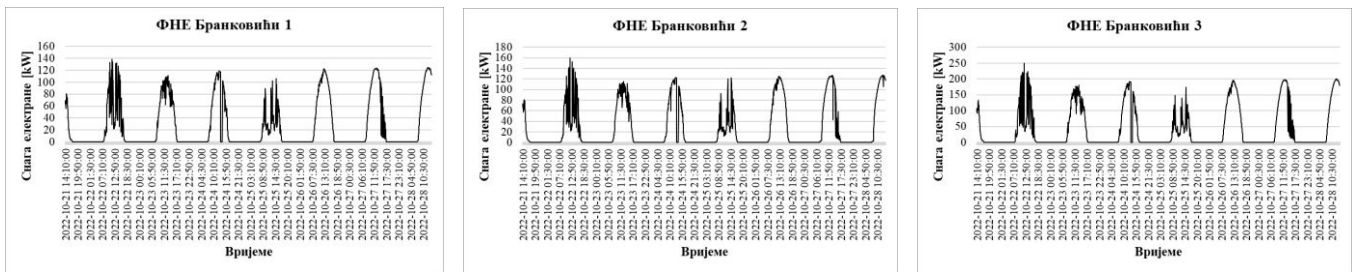
- Вриједност називне фреквенције напона и дозвољена одступања: 99,5% десетсекундних средњих вриједности фреквенције напона током сваког седмодневног интервала мора бити у границама $50 \text{ Hz} \pm 1\%$, а 100% вриједности мора бити унутар интервала $50 \text{ Hz} + 4\% - 6\%$.
- Хармонијско изобличење напона, односно тотална хармонијска дисторзија напона (THD_U): При нормалним погонским условима 95% десетоминутних средњих ефективних вриједности напона сваког седмодневног интервала вриједност појединачних виших хармоника не смије прелазити вриједности из табеле I. При томе се THD_U рачуна примјеном израза (2), у коме U_i представља i -ти хармоник напона:

$$\text{THD}_U = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} U_i^2}}{U_1} \quad (2)$$

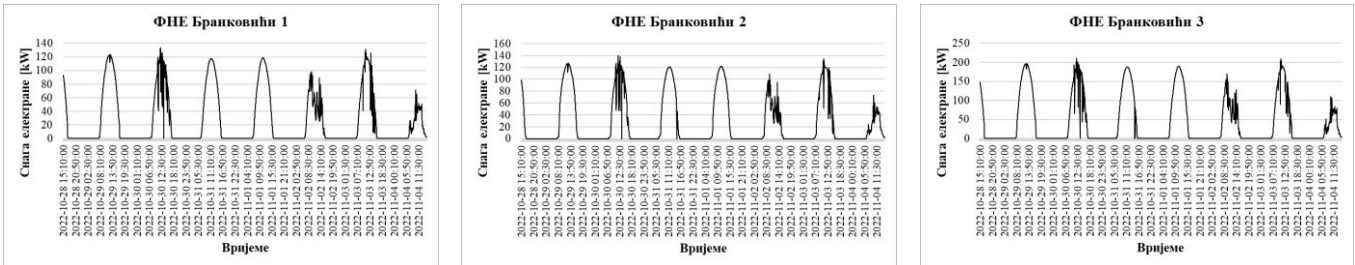
Укупни садржај виших хармоника напона (THD_U) се рачуна узимањем у обзир свих виших хармоника до 40. хармоника, а вриједност THD_U -а мора бити $\leq 8\%$.

ТАБЕЛА I Дозвољени садржај појединих виших хармоника напона према EN 50160

Ред хармоника	Релативна амплитуда U_i	Ред хармоника	Релативна амплитуда U_i
2	2%	13	3%
3	5%	15	1%
4	1%	17	2%
5	6%	19	1,5%
6÷24 (парни)	0,5%	21	0,75%
7	5%	23	1,5%
9	1,5%	25	1,5%
11	3,5%		



Слика 3 – Снаге појединих електрана и укупна снага све три електране мјерене на 5-минутном нивоу у временском периоду 1



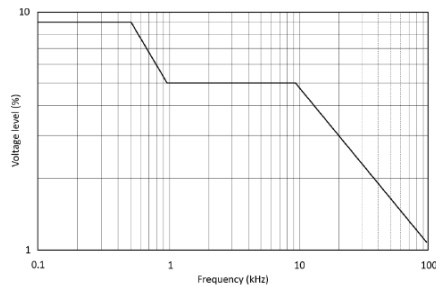
Слика 4 – Снаге појединих електрана и укупна снага све три електране мјерене на 5-минутном нивоу у временском периоду 2

- Сигнални напони: у 99% времена у току дана, трисекундне средње вриједности сигналних напона требају бити мање или једнаке од вриједности са слике 5 [5].

V. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА СЕДМОДНЕВНОГ МЈЕРЕЊА ПАРАМЕТАРА КВАЛИТЕТА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ У ДВА ВРЕМЕНСКА ПЕРИОДА

A. Вриједност називног напона и дозвољена одступања

Измјерене ефективне вриједности фазних напона су наведене у табели II и на слици 6 а). Вриједност напона је константно већа од 230 V. Укупна снага све три електране је приказана на слици 6 б). Напон има више вриједности када електране раде, због промјене смијера тока снаге кроз далековод, док у периодима када електрана не ради напон има нижу вриједност. Измјерене вриједности су у границама дефинисаним стандардом EN 50160.



Слика 5 – Граничне вриједности сигналних напона у процентима у односу на називни напон [5]

- Пренапон – представља појаву када напона порасте изнад $110\% \cdot U_n$.
- Пропад напона – представља појаву када напон падне испод $90\% \cdot U_n$, у трајању од 10 ms до укључујући 1 min.
- Краткотрајни прекид напајања – представља појаву када напон падне испод $5\% \cdot U_n$, у трајању ≤ 3 min.
- Дуготрајни прекид напајања – представља појаву када напон падне испод $5\% \cdot U_n$, у трајању > 3 min.

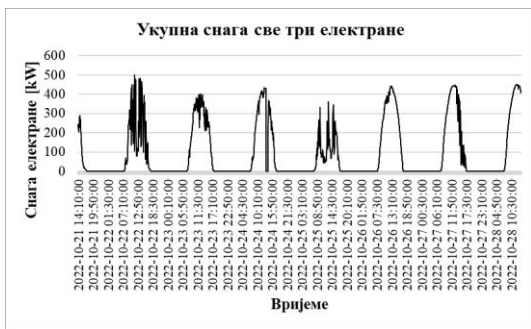
Стандард EN 50160 не дефинише тачан број дозвољених пренапона, пропада напона, краткотрајних и дуготрајних прекида напона.

ТАБЕЛА II Измјерене ефективне вриједности фазних напона

Декларисана вриједност	Измјерене вриједности	
	Период 1	Период 2
207 V \div 253 V 95% резултата	231 V \div 242,7 V	232,8 V \div 242,3 V
195,5 V \div 253 V 100% резултата	230,7 V \div 245,1 V	232,2 V \div 245,1 V
Коментар	Задовољава	Задовољава



а)



б)

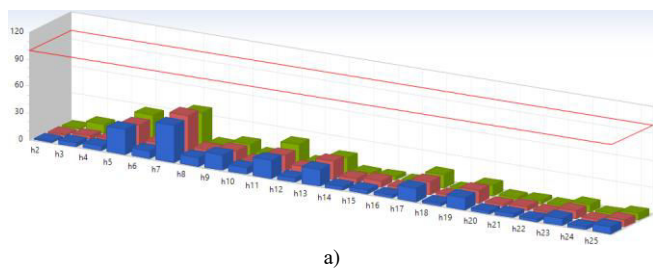
Слика 6 – Измјерене вриједности а) фазног напона и б) укупне снаге све три електране, у периоду 1

В. Хармонијско изобличење напона

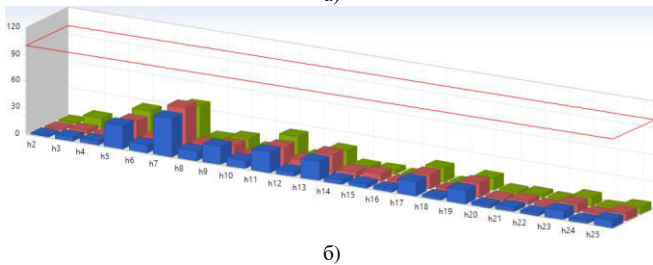
Измјерене вриједности THD фактора фазног напона су наведене у табели III. Измјерене вриједности појединих хармоника напона су приказане на слици 7. Вриједности су у декларисаним границама дефинисаним у стандарду EN 50160. Очигледно је да фотонапонске електране у овом случају немају изражен утицај на појаву виших хармоника напона у мрежи.

ТАБЕЛА III Измјерене вриједности THD фактора фазног напона

Декларисана вриједност	Измјерена вриједност		
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
0%÷8% 100% резултата	Период 1		
	2,45%	2,50%	2,44%
Коментар	Период 2		
	2,51%	2,63%	2,51%
Коментар	Задовољава	Задовољава	Задовољава



а)



б)

Слика 7 – Измјерене вриједности појединих хармоника напона: а) период 1, б) период 2

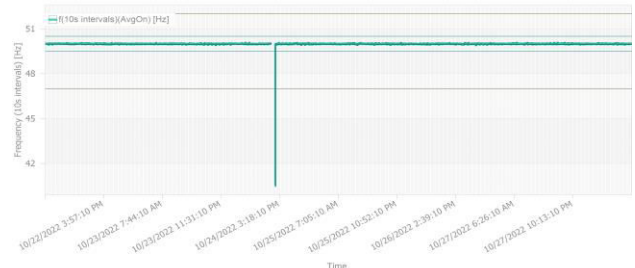
С. Фреквенција напона

Измјерене вриједности фреквенције напона су наведене у табели IV и на слици 8. Уочава се недозвољено одступање фреквенције у периоду 1, које мора бити

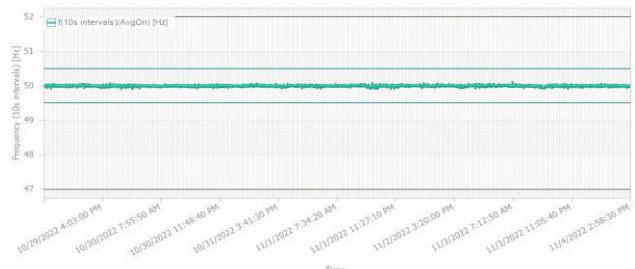
детално испитано како би се могло дати мишљење по питању задовољавања или нарушавања стандарда EN 50160.

ТАБЕЛА IV Измјерене вриједности фреквенције напона

Декларисана вриједност	Измјерене вриједности	
	Период 1	Период 2
49,5 Hz÷50,5 Hz 99,5% резултата	49,94 Hz÷50,06 Hz	49,94 Hz÷50,06 Hz
47 Hz÷52 Hz 100% резултата	40,49 Hz÷50,09 Hz	49,91 Hz÷50,11 Hz
Коментар	Задовољава	Задовољава



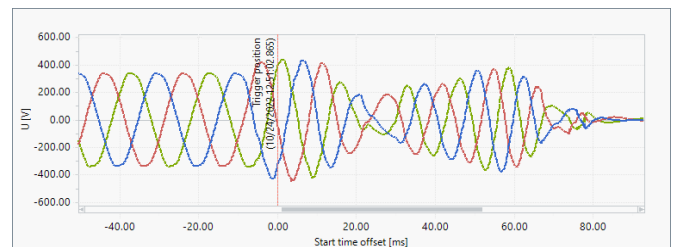
а)



б)

Слика 8 – Измјерене вриједности фреквенције напона: а) период 1, б) период 2

Дана 24.10.2022. године у 12.51h дошло је до испада 10 kV далековода Пешурић из погона, па је због тога дошло до испада фотонапонских електрана. Гласни облик напона приликом испада далековода и искључења електрана је приказан на слици 9.



Слика 9 – Измјерени таласни облик напона приликом испада прикључног 10 kV далековода Пешурић

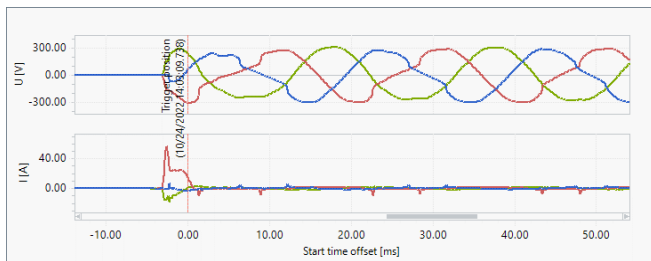
Непосредно прије испада далековода ФНЕ Бранковићи 1 и ФНЕ Бранковићи 3 су радиле са снагама од око 117 kW и 190 kW, респективно. Након дјелимичног растеређења електрана дошло је до пораста напона, услед појаве вишка снаге и енергије у овом дијелу система. Привремени фазни пренапон је достигао вршну

вриједност од око 437 V, док је називна вршна вриједност фазног напона у мрежи једнака 325 V, те је коефицијент пренапона приближно износио 1,345. Након тога снага са којом инвертори/електране раде почиње да осцилује, што узрокује осцилације напона, слика 9. Прелазни процес је укупно трајао око 85 ms, рачунајући од тренутка када је дошло до повишења напона до тренутка када је електрана искључена са мреже. То значи да је заштита инвертора од изолованог рада електране реаговала у прописаном временском периоду, који се према стандарду IEC 62116:2014 [7] може усвојити да износи до 2 s.

Далековод је укључен под напон послје 1h и 12min, у 14.03h. Вриједности напона, струје и учестаности приликом укључења система су приказане на слици 10 и слици 11.



Слика 10 – Измјерене вриједности напона, струје и фреквенције ФНЕ Бранковићи 3 приликом укључења 10 kV далековода Пешурић



Слика 11 – Измјерене вриједности напон и струје ФНЕ Бранковићи 3 приликом укључења 10 kV далековода Пешурић

Ниска вриједност фреквенције од 40,49 Hz, која не задовољава стандард EN 50160, је измјерена у прелазном процесу у току укључења далековода, слика 10. Деформација таласног облика напона, која се види на слици 11, је последица прелазног процеса узрокованог укључењем далековода и усљед довођења под напон енергетског трансформатора 10/0,4 kV, који је оптерећен кондензаторима који се налазе унутар инвертора фотонапонских електрана. Такође, приликом искључења система са напона висока вриједност фазних напона, слика 9, је заситила магнетно коло трансформатора, усљед чега је приликом укључења система дошло до генерисања виших хармоника напона. Усљед описаног прелазног процеса дошло је деформације таласног облика напона, слика 11, те је тренутак проласка напона кроз нулу помјерен у односу на простопериодични сигнал. Ово одступање је мјерни уређај регистровао као одступање фреквенције напона од назначене вриједности (период 1 у

табели IV). Стандард EN 50160 дефинише гранична одступања фреквенције за нормалан радни режим, поглавље IV и табела IV, у шта не спада прелазни процес укључења система под напон. Стога се може рећи да су вриједности унутар прописаних граница и да задовољавају стандард EN 50160 и у периоду 1, а наравно и у периоду 2 када нису регистрована описана одступања.

D. Фликери дугог трајања

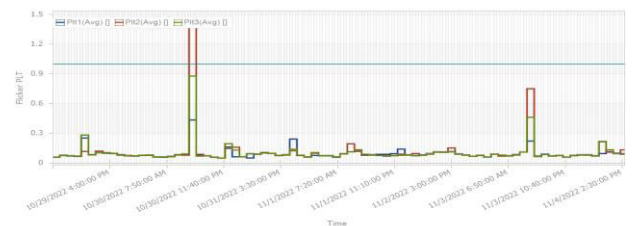
Измјерене вриједности фликера дугог трајања су наведене у табели V и на слици 12. Вриједности су унутар прописаних граница и задовољавају стандард EN 50160. Високе вриједности фликера се углавном појављују приликом поремећаја у раду система (привремени пренапони, пропади напона и прекиди напајања), или приликом наглих промјена у снази производње фотонапонске електране (нпр. усљед нагле промјене инсолације панела).

ТАБЕЛА V Измјерене вриједности фликера дугог трајања

Декларисана вриједност	Измјерене вриједности	
	Период 1	Период 2
95% резултата (0÷1)	0,04÷0,25	0,05÷0,20
Коментар	Задовољава	Задовољава



а)



б)

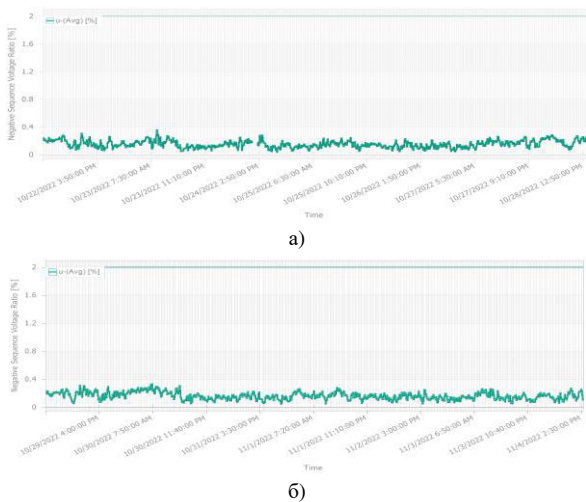
Слика 12 – Измјерене вриједности фликера дугог трајања: а) период 1, б) период 2

E. Несиметрија напона

Измјерене вриједности несиметрије напона су наведене у табели VI и на слици 13. Вриједности су унутар прописаних граница и задовољавају стандард EN 50160.

ТАБЕЛА VI Измјерене вриједности несиметрије напона

Декларисана вриједност	Измјерене вриједности	
	Период 1	Период 2
95% резултата (u-<2%)	0,04%÷0,25%	0,05%÷0,26%
Коментар	Задовољава	Задовољава



Слика 13 – Измјерене вриједности несиметрије напона: а) период 1, б) период 2

F. Сигнални напони

Максимална вриједност сигналних напона учестаности 316 Hz у периоду 1 је износила 4,4 V, а у периоду 2 је износила 1,58 V, што је мање од горње граничне вриједности од 20,79 V. Максимална вриједност сигналних напона учестаности 1060 Hz у периоду 1 је износила 1,06 V, а у периоду 2 је износила 0,73 V, што је мање од горње граничне вриједности од 11,55 V. Вриједности су унутар прописаних граница и задовољавају стандард EN 50160.

G. Додатни измјерени параметри

У временском периоду 1 регистрован је:

- ✓ Један привремени пренапон приликом ког је напон порастао изнад 120% од називног напона, а трајање пренапона је било између 10 ms и 500 ms. Тачније, пренапон у фази 1 је износио 282 V и трајао је 30 ms, пренапон у фази 2 је износио 281,9 V и трајао је 29 ms, а пренапон у фази 3 је износио 273,5 V и трајао је 20 ms.
- ✓ Један пропад напона дубине између 40% и 70% од називног напона, трајања између 10 ms и 200 ms.
- ✓ Један дуготрајни прекид напајања, дана 24.10.2022. године, у трајању од 1h и 12min, у периоду од 12.51h до 14.03h.

У временском периоду 2 регистрован је:

- ✓ Један пропад напона дубине између 80% и 90% од називног напона, трајања између 10 ms и 200 ms.

VI. ЗАКЉУЧАК

На основу презентованих резултата се може закључити да су у посматраном временском периоду од 21.10.2022. године у 14.10h до 28.11.2022. године у 14.10h (период 1) и у временском периоду од 28.10.2022. године у 15.10h до

04.11.2022. године у 15.10h (период 2), сви параметри квалитета електричне енергије у тачки прикључења ФНЕ Бранковићи 1 и ФНЕ Бранковићи 3 на мрежу били унутар граница које су дефинисане стандардом EN 50160, уз постојање осјетне сигурносне резерве између мјерених и граничних вриједности. Тиме је показано да се фотонапонске електране инсталисане снаге од око 530 kW могу прикључити на анализирану 10 kV руралну електродистрибутивну мрежу без да дође до нарушавања прописаног квалитета електричне енергије. Такође је показан значај правилне анализе резултата мјерења квалитета електричне енергије, како би се детектовани догађаји правилно класификовали и како би се извели адекватни закључци по питању испуњавања или нарушавања стандарда EN 50160.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] М. Бањанин, М. Икић. „Утицај малих хидроелектрана на напонске прилике и губитке у локалној електродистрибутивној мрежи“, 1. савјетовање БиХ К/О CIRED, Реф. SK/SO4-02, Мостар, 14-16. октобар 2018. године.
- [2] М. Бањанин, Ј. Тушевљак. „Утицај дистрибуираних извора електричне енергије на мрежу“, Међународни научно-стручни симпозијум INFOTEN-JAHORINA 2014, Vol. 13, Реф. ENS-1-3, стр. 70-75, 19-21. март 2014.
- [3] М. Икић, М. Бањанин, В. Милојевић, С. Чалија. „Експериментална анализа утицаја фотонапонске електране на квалитет електричне енергије дистрибутивне мреже“, 2. савјетовање БиХ К/О CIRED, Реф. SK/SO2-04, Мостар, 25-27. октобар 2020. године.
- [4] Power Master MI 2892 Instruction manual Version 8.4.6, METREL, 2019.
- [5] EN 50160:2010, Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, July 2010.
- [6] IEEE Std 1459-2010, Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, pp. 1-50, March 2010.
- [7] IEC 62116:2014, Utility-interconnected photovoltaic inverters - Test procedure of islanding prevention measures, Edition 2.0, pp. 1-51, February 2014.

ABSTRACT

In this paper, the results of measuring the parameters of the electric power quality at the point of connection of the photovoltaic power plants Brankovići 1 and Brankovići 3 to the electrical distribution network were analyzed. The power plants, together with the photovoltaic power plant Brankovići 2, are connected to a long radial 10 kV distribution line. In the analyzed period and the registered modes of operation of the photovoltaic power plants, all parameters of the electric power quality were within the limits prescribed by the standard EN 50160.

MEASUREMENT AND ANALYSIS OF THE ELECTRIC POWER QUALITY PARAMETERS AT THE POINT OF CONNECTION OF PV PLANT BRANKOVIĆI 1 AND PV PLANT BRANKOVIĆI 3 TO THE ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORK

Mladen Banjanin, Marko Ikić, Vladan Andrić