

Анализа квалитета електричне енергије у тачки прикључења ФНЕ Бранковићи 2 на електродистрибутивну мрежу

Младен Бањанин, Марко Икић, Владан Андрић, Срђан Лале

Апстракт— У раду се анализира квалитет електричне енергије у тачки прикључења фотонапонске електране (ФНЕ) Бранковићи 2 на електродистрибутивну мрежу. Систем електрана Бранковићи се састоји од три фотонапонске електране, које имају укупну инсталисану снагу од око 533 kW. Електране су преко дугачког 10 kV далековода спојене на 35/10/0,4 kV трафостаницу Борице. У анализираном временском периоду и за регистроване режиме рада фотонапонске електране сви параметри квалитета напона су били у границама које су прописане у стандарду EN 50160. Такође, сви параметри квалитета струје су били у границама које су прописане у стандарду IEEE 519.

Кључне ријечи—фотонапонска електрана; квалитет електричне енергије; EN 50160; IEEE 519.

I. УВОД

Фотонапонске електране се на електродистрибутивну мрежу прикључују помоћу инвертора. Као и други уређаји енергетске електронике, и ови уређаји генеришу више хармонице струје, а као последица се појављују виши хармоници напона. Услед тога може доћи до нарушања параметара квалитета електричне енергије у мрежи. Проблем је израженији у случајевима када се фотонапонске електране прикључују на слабу мрежу у руралним областима, што је чест случај, јер је у тим областима нижа цијена земљишта, више је сунчаних дана у току године итд. Утицај који електране имају на електродистрибутивну мрежу је анализиран у [1]-[3]. Овај утицај може бити и позитиван и негативан, у зависности од снаге електране и снаге локалне потрошње, карактеристика мреже на коју се електрана прикључује итд. У овом раду је анализиран квалитет електричне енергије у тачки прикључења фотонапонске електране (ФНЕ) Бранковићи 2 на електродистрибутивну мрежу.

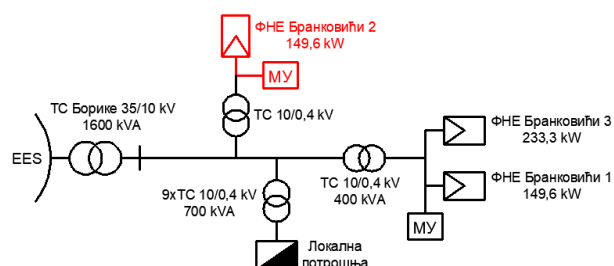
II. ОПИС МЈЕРНЕ ОПРЕМЕ И МЈЕРНОГ МЈЕСТА

ФНЕ Бранковићи 2 је изграђена на локацији

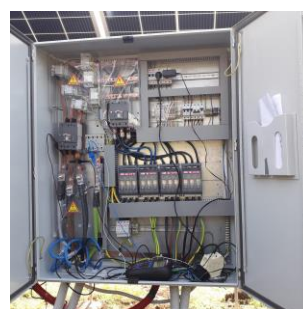
Младен Бањанин, Марко Икић, Срђан Лале – Електротехнички факултет, Универзитет у Источно Сарајеву, Вука Караџића 30, 71123 Источно Сарајево, Република Српска, Босна и Херцеговина (e-mail: mladen.banjanin@etf.ues.rs.ba, marko.ikic@etf.ues.rs.ba, srdjan.lale@etf.ues.rs.ba).

Владан Андрић – “VMR Energy” d.o.o. Rogatica, Борица 15, 73220 Рогатица, Република Српска, Босна и Херцеговина (e-mail: vladanandric1982@gmail.com).

Бранковићи бб, у општини Рогатица. Мјерење параметара квалитета електричне енергије је извршено на 0,4 kV напонском нивоу стубне трафостанице 10/0,4 kV, преко које је електрана прикључена на електродистрибутивну мрежу (МУ на слици 1). Фотографија мјерног мјеста је приказана на слици 2.



Сл. 1. Шема анализираног дијела електродистрибутивне мреже



Сл. 2. Фотографија мјерног мјеста

Инсталисана снага ФНЕ Бранковићи 2 је 149,6 kW, а укупна инсталисана снага све три електране Бранковићи износи око 533 kW. Електране су преко радијалног 10 kV надземног вода дужине око 3,8 km спојене у 35/10/0,4 kV трафостаницу Борице. 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 електрана у периоду када су вршена мјерења је била већа од локалне потрошње, тако да се произведена електрична енергија углавном враћала у мрежу.

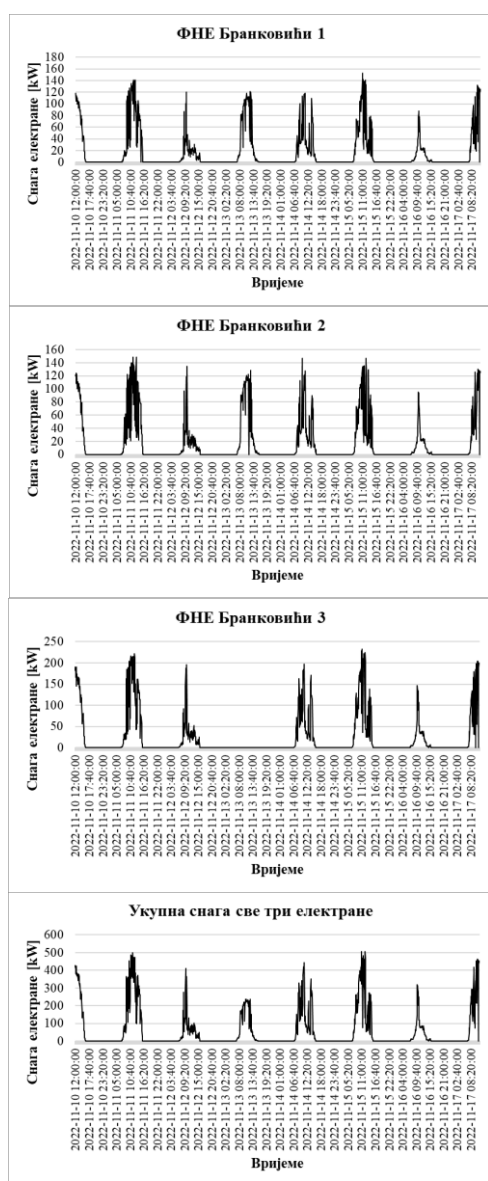
Седмодневна мјерења параметара квалитета електричне енергије су урађена примјеном трофазног анализатора квалитета електричне енергије класе А, модел Metrel MI 2892 [4]. Мјерења су вршена у временском периоду од 10.11.2022. године у 12h до 17.11.2022. године у 12h. Квалитет напона у мрежи је анализиран у складу са

стандардом EN 50160 [5], а квалитет струје коју електрана генерише у мрежу је анализиран у складу са стандардом IEEE 519 [6].

Снаге појединих електрана и укупна снага све три електране, мјерене на 5-минутном нивоу, су приказане на слици 3. Максималне снаге електрана, у посматраном периоду, су износиле:

- 153,1 kW у случају ФНЕ Бранковићи 1,
- 148,5 kW у случају ФНЕ Бранковићи 2,
- 233,1 kW у случају ФНЕ Бранковићи 3,
- максимална једновремена снага све три електране је износила 507,2 kW.

Наведени подаци су добијени од оператора електране, а очитани су са припадајућих инвертора. У анализираном временском периоду ове три електране су произвеле 9,4 MWh електричне енергије. Све три електране раде са фактором снаге који је једнак 1.



Сл. 3. Снаге појединих електрана и укупна снага све три електране мјерене на 5-минутном нивоу

III. ПАРАМЕТРИ КВАЛИТЕТА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ

A. Параметри квалитета напона у мрежи према стандарду EN 50160

Према стандарду EN 50160 параметри квалитета напона 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 осталих 0,5% 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:

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

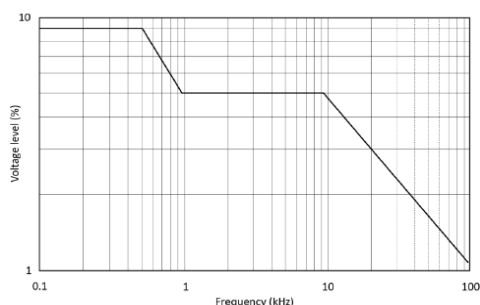
Укупни садржај виших хармоника напона (THD_U) се рачуна узимањем у обзир виших хармоника напона до 40. хармоника, а вриједност THD_U -а мора бити $\leq 8\%$.

ТАБЕЛА I

Дозвољени садржај виших хармоника напона према EN 50160

Ред хармоника	Гранична вриједност	Ред хармоника	Гранична вриједност
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%		

- ✓ Сигнални напони: 99% времена у току дана, трисекундне средње вриједности сигналних напона морају бити мање или једнаке од вриједности дефинисаних на слици 4 [5].



Сл. 4. 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, те краткотрајних и дуготрајних прекида напајања.

В. Параметри квалитета струје електране према стандарду IEEE 519

Дозвољени садржај виших хармоника струје које ФНЕ Бранковићи 2 смије да генерише у мрежу је дефинисан у табели II, према стандарду IEEE 519. 95% десетоминутних средњих ефективних вриједности струје мора бити унутар граница дефинисаних у табели II. 99% десетоминутних средњих ефективних вриједности струје мора бити унутар граница 1,5 пута вриједности дефинисане у табели II. Парни хармоници струје реда $h \leq 6$ су ограничени на вриједности од 50% у односу на вриједности из табеле II. Није дозвољено изобличење таласног облика струје које резултује појавом једносмјерне компоненте струје.

ТАБЕЛА II

Дозвољени садржај виших хармоника струје према стандарду IEEE 519 за системе који раде под напонем између 120 V и 69 kV

I_{sc}/I_L	Ред хармоника (h) струје и његова гранична вриједност				
	2÷10	11÷16	17÷22	23÷34	35÷50
<20	4,0%	2,0%	1,5%	0,6%	0,3%

THD_I фактор струје се рачуна примјеном израза (3), али он не може адекватно да опише стварни утицај изобличене струје на мрежу. У случајевима када електрана/инвертор ради са малом снагом THD_I фактор има веома високу вриједност, јер је основни хармоник струје мали, а постоји много виших хармоника. Ипак, утицај на мрежу изобличене струје мале вриједности је занемарив. Стога се за описивање утицаја изобличене струје на мрежу користи TDD фактор (Total Demand Distortion), израз (4), а који се рачуна у односу на максималну ефективну измјерену вриједност струје у посматраном временском периоду I_L :

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{50} I_i^2}}{I_1} \quad (3)$$

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{50} I_i^2}}{I_L} \quad (4)$$

гдје су: I_i – i -ти хармоник струје, I_1 – први хармоник струје, I_L – максимална ефективна вриједност струје у посматраном временском периоду. За 95% резултата мјерења вриједност TDD фактора мора бити $\leq 5\%$, а за 99% резултата мјерења вриједност TDD фактора мора бити $\leq 7,5\%$.

IV. РЕЗУЛТАТИ МЈЕРЕЊА И АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА СЕДМОДНЕВНОГ МЈЕРЕЊА ПАРАМЕТАРА КВАЛИТЕТА НАПОНА ПРЕМА СТАНДАРДУ EN 50160

Резултати мјерења параметара квалитета напона су наведени у даљем тексту.

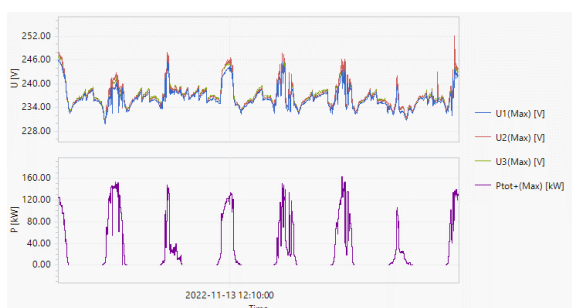
А. Вриједности мрежног напона

Измјерене вриједности фазног напона су наведене у табели III. Напон у мрежи је практично увијек изнад вриједности од 230 V, али су вриједности унутар граница прописаних стандардом EN 50160. Зависност вриједности мрежног напона од снаге са којом електрана ради је приказана на слици 5. Уочава се да ФНЕ Бранковићи 1-3, приликом производње електричне енергије, подижу вриједност напона у мрежи. Разлог томе јесте што електране подмирује локалну потрошњу, а вишкове произведене електричне енергије шаљу у мрежу. Тиме се смањује струја која се по 10 kV далеководу преноси из

мреже до потрошача, или се чак мијења смијер струје кроз далековод, што узрокује пораст напона у тачки прикључења електране на мрежу. Вриједности мрежног напона су унутар прописаних граница, али би прикључење додатних фотонапонских електрана могло да наруши овај параметар квалитета електричне енергије.

ТАБЕЛА III
ИЗМЈЕРЕНЕ ЕФЕКТИВНЕ ВРИЈЕДНОСТИ ФАЗНИХ НАПОНА

Декларисана вриједност	Измјерене вриједности
207 V ÷ 253 V, 95% резултата	229,6 V ÷ 241,3 V
195,5 V ÷ 253 V, 100% резултата	229,6 V ÷ 245,9 V
Коментар	Задовољава



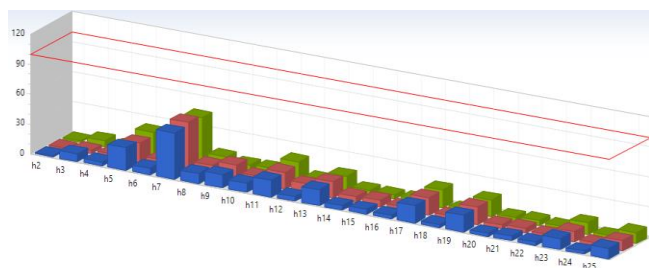
Сл. 5. Зависност вриједности мрежног напона од снаге електрана

В. Хармонијско изобличење напона

Измјерене вриједности THD_U фактора фазног напона су наведене у табели IV, док су на слици 6 приказане вриједности појединих хармоника напона, у односу на горњу граничну вриједност. Све вриједности су унутар прописаних граница и задовољавају стандард EN 50160, а примјетна је и осјетна сигурносна маргина. Виши хармоници напона у анализираној мрежи су углавном посљедица виших хармоника струје, који су детаљно анализирани у поглављу V.

ТАБЕЛА IV
ИЗМЈЕРЕНЕ ВРИЈЕДНОСТИ THD ФАКТОРА ФАЗНОГ НАПОНА

Декларисана вриједност	Измјерена вриједност		
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
100% резултата (0% ÷ 8%)	2,51%	2,66%	2,58%
Коментар	Задовољава		



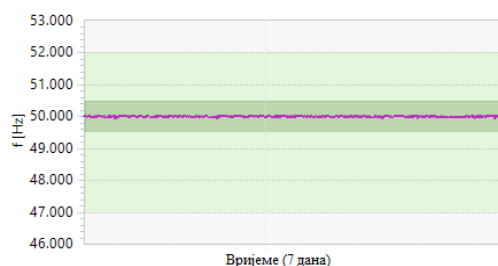
Сл. 6. Измјерене вриједности појединих хармоника напона

С. Фреквенција напона

Измјерене вриједности фреквенције напона су наведене у табели V и на слици 7. Одступања фреквенције од називне вриједности су минимална и све вриједности су унутар граница прописаних стандардом EN 50160. Утицај фотонапонских електрана релативно малих снага на овај параметар квалитета напона је занемарив.

ТАБЕЛА V
ИЗМЈЕРЕНЕ ВРИЈЕДНОСТИ ФРЕКВЕНЦИЈЕ

Декларисана вриједност	Измјерена вриједност	Коментар
99,5% резултата (49,5 Hz ÷ 50,5 Hz)	49,94 Hz ÷ 50,06 Hz	Задовољава
100% резултата (47 Hz ÷ 52 Hz)	49,90 Hz ÷ 50,11 Hz	Задовољава



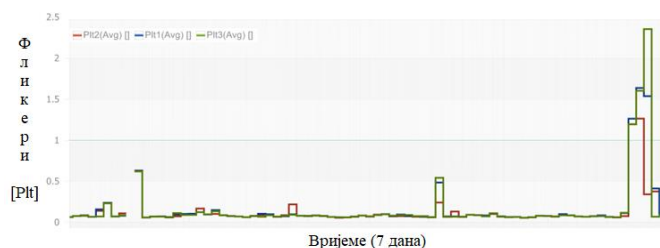
Сл. 7. Измјерене вриједности фреквенције напона

Д. Фликери дугог трајања

Измјерене вриједности фликера дугог трајања су наведене у табели VI и на слици 8. Све вриједности су унутар прописаних граница и задовољавају стандард EN 50160. Фотонапонске електране генеришу фликере углавном када се нагло мијења снага њихове производње, а то се дешава због наглог засјенчења панела, због наглог обасјавања панела, због испада електране из погона итд.

ТАБЕЛА VI
ИЗМЈЕРЕНЕ ВРИЈЕДНОСТИ ФЛИКЕРА ДУГОГ ТРАЈАЊА

Декларисана вриједност	Измјерена вриједност
95% резултата (0 ÷ 1)	0,06 ÷ 0,63
Коментар	Задовољава



Сл. 8. Измјерене вриједности фликера дугог трајања

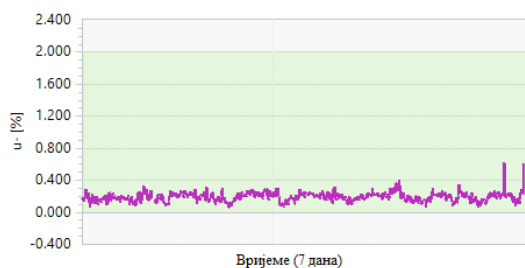
Е. Несиметрија напона

Измјерене вриједности несиметрије напона су наведене у табели VII и на слици 9. Све вриједности су унутар

прописаних граница и задовољавају стандард EN 50160. Утицај фотонапонских електрана на несиметрију напона је мали, зато што се електране снаге преко 8 kVA на мрежу спајају трофазно, а инвертори се конструишу тако да им је снага по фазама симетрично распоређена.

ТАБЕЛА VII
ИЗМЈЕРЕНЕ ВРИЈЕДНОСТИ НЕСИМЕТРИЈЕ НАПОНА

Декларисана вриједност	Измјерена вриједност
95% резултата ($u < 2\%$)	0,04% $\pm$ 0,27%
Коментар	Задовољава



Сл. 9. Измјерене вриједности несиметрије напона

F. Сигнални напони

Максимална вриједност сигналних напона учестаности 316 Hz је износила 2,98 V, што је мање од горње граничне вриједности која је једнака 20,79 V. Максимална вриједност сигналних напона учестаности 1060 Hz је износила 1,11 V, што је мање од горње граничне вриједности која је једнака 11,55 V. У локалној електродистрибутивној мрежи се не користе МТК и слични системи комуникације са бројилима електричне енергије, тако да овај критеријум нема посебан значај.

G. Додатни измјерени параметри

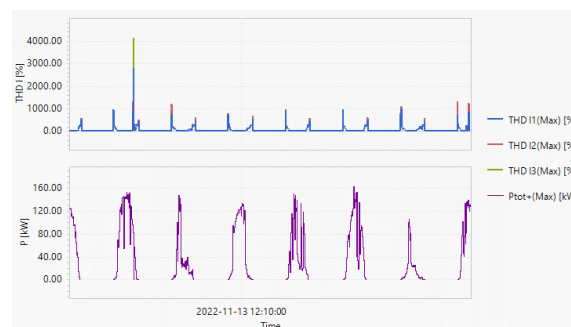
Регистрована су четири пропада напона, од тога три дубине $(0,8 \div 0,9) \cdot U_n$ (U_n – називни напон), а један пропад дубине $(0,7 \div 0,8) \cdot U_n$, сви трајања краћег од 1 s.

Регистрована су три привремена пренапона, од тога један чија је вриједност износила $(1,1 \div 1,2) \cdot U_n$ и два привремена пренапона чија је вриједност била виша од $1,2 \cdot U_n$. Максималне вриједности и трајање пренапона су по фазама износила: фаза 1 (294,8 V трајања 49 ms), фаза 2 (290,2 V трајања 509 ms) и фаза 3 (289 V трајања 40 ms). Регистрована су два прекида напајања, један краткотрајни и један дуготрајни прекид.

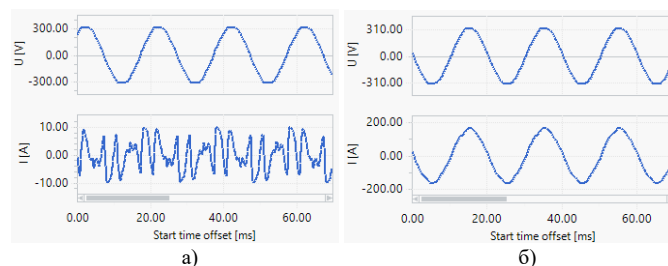
V. РЕЗУЛТАТИ МЈЕРЕЊА И АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА СЕДМОДНЕВНОГ МЈЕРЕЊА ПАРАМЕТАРА КВАЛИТЕТА СТРУЈЕ ПРЕМА СТАНДАРДУ IEEE 519

Зависност THD_I фактора струје од снаге са којом ФНЕ Бранковићи 2 ради је приказана на слици 10. Уочава се да THD_I фактор струје има високу вриједност у случају када електрана ради са малом снагом/струјом, а то се углавном дешава ујутру када Сунце излази и навече када

Сунце залази, те у периодима дана када је ниска инсолација. Разлог томе јесте што инвертор генерише много струјних хармоника када је слабо оптерећен, слика 11 а), а када је значајније оптерећен онда генерише мало струјних хармоника, слика 11 б). Пошто је утицај слабе струје на мрежу занемарив, THD_I фактор струје не може адекватно да опише утицај струјних хармоника напона на квалитет електричне енергије у мрежи. ФНЕ Бранковићи 2 је на мрежу спојена примјеном индустријских инвертора иностраних произвођача, тако да није познато какви су филтри кориштени приликом његове реализације, а такође нису познати нити се могу модификовати алгоритми који се користе за управљање инвертором, односно његовом излазном снагом и струјом. Стога је само могуће анализирати постојеће радне карактеристике инвертора, али их није могуће мијењати.



Сл. 10. Зависност THD_I фактора струје од снаге са којом електрана ради



Сл. 11. Зависност таласног облика напона мреже и струје инвертора од вриједности струје (снаге) са којом електрана ради: а) мала снага, б) велика снага

Измјерене вриједности TDD фактора фазне струје су наведене у табели VIII. Вриједности су унутар прописаних граница и задовољавају стандард IEEE 519. Зависност TDD фактора струје од снаге са којом ФНЕ Бранковићи 2 ради је приказана на слици 12. Струја I_L , која се у изразу (4) користи за прорачун TDD фактора, је измјерена да износи 216,8 A. TDD фактор струје има више вриједности у случајевима када електрана ради са већом снагом, јер је тада струја виших хармоника упоредива са струјом I_L , док је TDD фактор занемариво мали у случају када електрана ради са малом снагом, јер су тада струје виших хармоника занемариве у односу на струју I_L . Стога је TDD фактор погоднији за оцјену утицаја хармоника струје на квалитет електричне енергије у електродистрибутивној мрежи у односу на THD_I фактор.

ТАБЕЛА VIII
ИЗМЈЕРЕНЕ ВРИЈЕДНОСТИ TDD ФАКТОРА ФАЗНЕ СТРУЈЕ

Декларисана вриједност	Измјерена вриједност		
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
95% резултата ($0\% \div 5\%$)	3,24%	3,18%	3,24%
99% резултата ($0\% \div 7,5\%$)	3,59%	3,58%	3,61%
Коментар	Задовољава		



Сл. 12. Зависност TDD фактора струје од снаге са којом електрана ради

Вриједности појединих струјних хармоника у односу на струју I_L , нормиране у односу на граничне вриједности из табеле II, су приказане на сликама 13 и 14. Вриједности су унутар прописаних граница и задовољавају стандард IEEE 519.



а)



б)

Сл. 14. Вриједности појединих струјних хармоника у односу на струју I_L за: а) 95%, б) 99%, измјерених ефективних вриједности струје

VI. ЗАКЉУЧАК

У посматраном временском периоду, од 10.11.2022. године у 12h до 17.11.2022. године у 12h, сви параметри квалитета напона и квалитета струје у тачки прикључења ФНЕ Бранковићи 2 на мрежу су били унутар граница које су дефинисане стандардима EN 50160 и IEEE 519, респективно. Сигурносна маргина за све параметре је осјетна. Тиме је показано да постојећа електродистрибутивна мрежа, чак и у руралним областима, може да апсорбује електричну енергију произведену из фотонапонских електрана већих снага, а да не дође до нарушавања параметара квалитета електричне енергије у мрежи.

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. Бањанин, М. Икић, В. Андрић, „Мјерење и анализа параметара квалитетелектричне енергије у тачки прикључења ФНЕ Бранковићи 1 и ФНЕ Бранковићи 3 на електродистрибутивну мрежу“, 22nd International Symposium INFOTEN-JAHORINA, 15-17 March 2023, стр. 197-202.
- [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 519-2022, IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems, June 2022.

ABSTRACT

The paper presents analyze of the electric power quality at the point of connection of the PV power plant Brankovići 2 to the electric power distribution network. PV plant Brankovići consists of three PV plants, which have a total installed power of about 535 kW. PV plants are connected to the 35/10/0.4 kV substation Borike, via long radial 10 kV transmission line. In the analyzed period and for the registered modes of operation of PV power plants, all parameters of the voltage quality were within the limits prescribed by the EN 50160. All parameters of the electric current quality were within the limits prescribed by the standard IEEE 519.

Analysis of the electric power quality in the point of connection of PV plant Brankovići 2 to the electric power distribution network

Mladen Banjanin, Marko Ikić, Vladan Andrić, Srđan Lale