

Мјерење и анализа параметара квалитета електричне енергије у тачки прикључења МХЕ Миљацка на 10 kV електродистрибутивну мрежу

Младен Бањанин, Марко Икић

Електротехнички факултет

Универзитет у Источном Сарајеву

Источно Сарајево, Босна и Херцеговина

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

Милан Тимотија, Слађан Макљеновић, Лазар Глуховић

ЗП „Електродистрибуција“ а.д. Пале

Источно Сарајево, Босна и Херцеговина

milan.timotija@edbpale.com,

sladjan.makljenovic@edbpale.com,

lazar.gluhovic@edbpale.com

Сажетак—У овом раду су анализирани резултати мјерења параметара квалитета електричне енергије у тачки прикључења МХЕ Миљацка на 10 kV електродистрибутивну мрежу. У анализираном периоду и регистрованим режимима рада електране сви параметри квалитета електричне енергије су били у границама које су прописане стандардом EN 50160. Детектован је утицај великих електромотора који се налазе у оближњем каменолому на параметре квалитета електричне енергије.

Кључне ријечи-мале хидроелектране; квалитет електричне енергије; фликери; хармоници; несиметрија; THD.

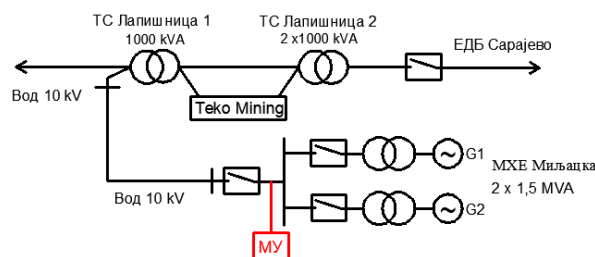
I. Увод

У посљедњој деценији на нашим просторима постоји изражен тренд прикључења малих хидроелектрана и фотонапонских електрана у локалну електродистрибутивну мрежу. Услед тога постојећа електродистрибутивна мрежа мијења свој карактер и прелази из пасивне у активну мрежу. Ове промјене утичу на токове снага, на губитке и на вриједности напона у мрежи, захтијевају другачија подешавања система заштите итд. Утицај малих електрана на мрежу може бити и позитиван и негативан, тако да електрана може да смањује или повећава губитке у мрежи, може да повећава или смањује напоне у мрежи, може да побољшава или квари квалитет електричне енергије у мрежи итд. Какав ће утицај електрана имати на мрежу зависи од тога колика је њена снага, колика је локална потрошња, са којим фактором снаге електрана ради и слично [1]-[3]. У овом раду је анализиран утицај мале хидроелектране Миљацка (МХЕ Миљацка) на квалитет електричне енергије у тачки прикључења на локалну 10 kV електродистрибутивну мрежу.

II. ОПИС МЈЕРНЕ ОПРЕМЕ И МЈЕРНОГ МЈЕСТА

МХЕ Миљацка има инсталисану снагу од 2,124 MW и планирану годишњу производњу електричне енергије од

7500 MWh. Изграђена је на ријечи Миљацки, у општини Источно Стари Град. Мјерење параметара квалитета електричне енергије је извршено на 10 kV напонском нивоу, у тачки прикључења електране на локалну електродистрибутивну мрежу (МУ на слици 1). Електрана је преко кратког радијалног 10 kV вода спојена у ТС Лапишница 1. У исту трафостаницу је спојен и каменолом „Teko Mining Lapišnica“ д.о.о. Источно Сарајево у коме постоји већи број електромотора велике инсталисане снаге чији рад контролишу уређаји енергетске електронике. Истичу се мотори снаге 300 kW, 200 kW, 110 kW, 50 kW, те око 15 мотора снаге између 17 kW и 22 kW.



Слика 1 – Шема прикључења МХЕ Миљацка на локалну електродистрибутивну мрежу

Мјерење параметара квалитета електричне енергије је урађено примјеном трофазног анализатора квалитета електричне енергије класе А, модел Metrel MI 2892 [4]. Анализа квалитета напона је вршена у складу са стандардом EN 50160 [5], а прорачун снага у присуству виших хармоника и/или несиметрије напона и струје је вршен на основу стандарда IEEE Std 1459-2010 [6]. Вршена су седмодневна мјерења, у периоду од 22.08.2022. године у 10:40h до 29.08.2022. године у 10:40h. Мјерења је укупно произведена електрична енергија, тј. и енергија сопствене потрошње електране и енергија која се предаје у електродистрибутивну мрежу. Мјерења су вршена на секундарима напонских и струјних мјерних трансформатора. Преносни однос напонског мјерног

трансформатора износи $10000/\sqrt{3}/100/\sqrt{3}$ V/V, а класа тачности му је 0,5. Преносни однос струјног мјерног трансформатора износи 200/5 A/A, а класа тачности му је 0,5. Фотографија мјерног мјеста је приказана на слици 2.



Слика 2 – Фотографија мјерног мјеста

III. ПАРАМЕТРИ КВАЛИТЕТА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ У СРЕДЊЕНАПОНСКОЈ МРЕЖИ ПРЕМА СТАНДАРДУ EN 50160

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

- Вриједност називног напона и дозвољена одступања: 99% 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 $U_n \pm 15\%$ (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 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:

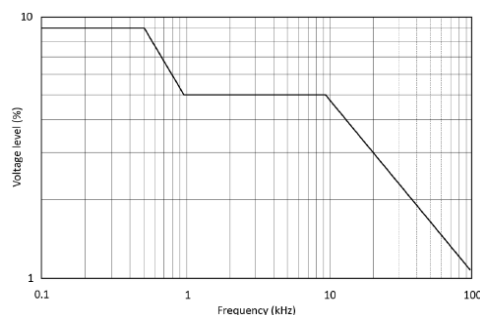
$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} U_i^2}}{U_1} \quad (2)$$

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	3,0%
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: у 99% времена у току дана, трисекундне средње вриједности сигналних напона требају бити мање или једнаке од вриједности са слике 3 [6].



Слика 3 – Граничне вриједност сигналних напона у процентима у односу на називни напон [6]

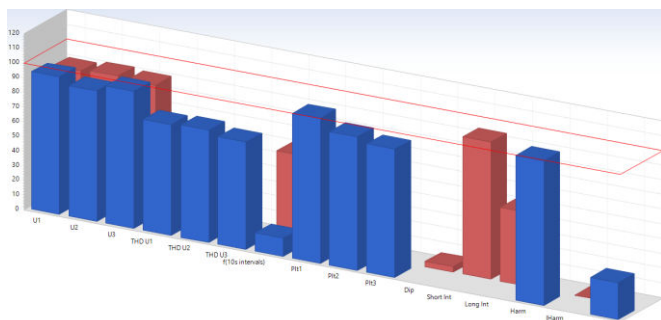
- Пренапон представља појаву када напона порасте изнад $110\% \cdot U_n$. Пропад напона представља појаву када напон падне испод $90\% \cdot U_n$, у трајању од 10 ms до укључујући 1 min. Краткотрајни прекид напајања представља појаву када напон падне испод $5\% \cdot U_n$, у трајању ≤ 3 min. Дуготрајни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

IV. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА СЕДМОДНЕВНОГ МЈЕРЕЊА ПАРАМЕТАРА КВАЛИТЕТА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ

Резултати мјерења свих параметара квалитета електричне енергије су приказани на слици 4. Ознаке имају следећа значења:

- U1, U2, U3 – ефективне вриједности фазних напона фаза 1, 2 и 3, респективно.
- THD U1, THD U2, THD U3 – THD фактори напона у фазама 1, 2 и 3, респективно.
- f(10s intervals) – фреквенција напона.
- Plt1, Plt2, Plt3 – фликери дугог трајања у фазама 1, 2 и 3, респективно.
- Dip – пропади напона.
- Short Int – краткотрајни прекиди напајања.
- Long Int – дуготрајни прекиди напајања.
- Harm – виши хармоници напона.
- Iharm – виши хармоници струје.
- u – несиметрија напона.

Са 100 на ординатној оси на слици 4 је означена 100%-тна вриједност сваке од величина, тј. њихова горња гранична вриједност. Уочава се да сви параметри квалитета електричне енергије задовољавају стандард EN 50160.

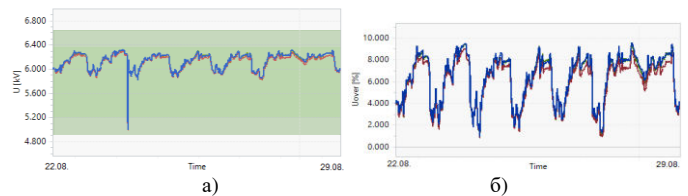


Слика 4 – Измјерене вриједности параметара квалитета електричне енергије

Измјерене ефективне вриједности фазних напона су приказане у табели II и на слици 5. Вриједности напона су константно више од називне вриједности, али се налазе унутар граница прописаних стандардом EN 50160. Напони у мрежи су виши у току ноћи, због смањене потрошње електричне енергије, а нижи у току дана услед повећане потрошње електричне енергије. У анализираном временском периоду електрана је радила са релативно малом снагом, због лоше хидролошке ситуације, тако да би додатно требало испитати вриједности напона за случај када електрана ради са пуном снагом.

ТАБЕЛА II Измјерене ефективне вриједности фазних напона

Параметар	Фазни напон		
	U1	U2	U3
<i>Декларисана вриједност</i>	<i>Измјерена вриједност</i>		
99% резултата (5195,7 V ÷ 6350,3 V)	5823,2 V ÷ 6313,3 V	5819,1 V ÷ 6284,6 V	5818,4 V ÷ 6310,9 V
100% резултата (4907,1 V ÷ 6639,0 V)	4999,6 V ÷ 6321,0 V	4987,4 V ÷ 6290,2 V	5001,9 V ÷ 6315,9 V
Коментар	Задовољава	Задовољава	Задовољава

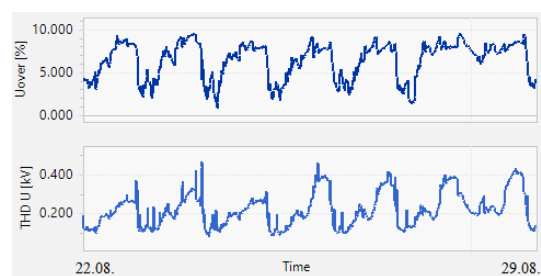


Слика 5 – Измјерене вриједности: а) фазног напона, б) одступања фазног напона изнад називне вриједности

Измјерене вриједности THD_U фактора фазног напона су приказане у табели III. Вриједности THD_U фактора фазног напона су унутар прописаних граница и задовољавају стандард EN 50160. На слици 6 су приказане вриједности фазног напона у процентима изнад називног напона система и вриједности THD_U фактора фазног напона. На основу слике 6 се може констатовати да је промјена THD_U фактора фазног напона приближно периодична, те да THD_U фактор има више вриједности у току ноћи, а ниже вриједности у току дана. Два су основна узрока ове појаве: 1) при раду са повишеним напонем енергетски трансформатори израженије генеришу више хармонике напона, 2) у току љета каменолом ради и у ноћним сатима, тако да регулисани погони генеришу више хармонике и у току ноћи, док су линеарни потрошачи углавном ван погона. Услед наведених фактора у току ноћи расте THD_U фактор фазног напона (доминантан је 5. хармоник напона). Тачни подаци о раду регулисаних електромоторних погона у каменолому нису познати, па није могуће детаљно анализирати њихов утицај на вриједност THD_U фактора фазног напона.

ТАБЕЛА III Измјерене вриједности THD_U фактора фазног напона

Параметар	THD U1	THD U2	THD U3
<i>Декларисана вриједност</i>	<i>Измјерена вриједност</i>		
100% резултата (0% ÷ 8%)	1,22% ÷ 6,06%	1,22% ÷ 6,11%	1,37% ÷ 5,83%
Коментар	Задовољава	Задовољава	Задовољава

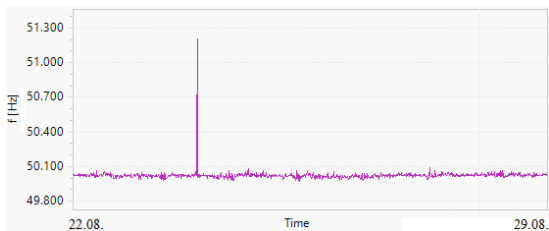


Слика 6 – Измјерене вриједности фазног напона у процентима изнад називног напона и THD_U фактора фазног напона

Измјерене вриједности фреквенције су приказане у табели IV и на слици 7. Вриједности су унутар прописаних граница и задовољавају стандард EN 50160. Повишена вриједност учестаности од 51,21 Hz се појавила приликом укључења далековода под напон, дана 24.08.2022. у 6.43.21.h. Стога је регистровано одступање учестаности узроковано деформацијом таласног облика напона услед прелазног процеса укључења далековода.

ТАБЕЛА IV Измјерене вриједности фреквенције

Параметар	Фреквенција
<i>Декларисана вриједност</i>	<i>Измјерена вриједност</i>
99,5% резултата (49,5 Hz÷50,5 Hz)	49,94 Hz÷50,06 Hz
0,5% резултата (47 Hz÷52 Hz)	49,89 Hz÷51,21 Hz
Коментар	Задовољава



Слика 7 – Измјерене вриједности фреквенције

Измјерене вриједности дуготрајних фликера су приказане у табели V. Вриједности су унутар прописаних граница и задовољавају стандард EN 50160, али су веома близу горње границе.

ТАБЕЛА V Измјерене вриједности дуготрајних фликера

Параметар	Фликери		
	Pf1	Pf2	Pf3
<i>Декларисана вриједност</i>	<i>Измјерена вриједност</i>		
100% резултата (0÷1)	0,10÷0,99	0,10÷0,91	0,10÷0,87
Коментар	Задовољава	Задовољава	Задовољава

Број детектованих привремених пренапона, пропада напона и прекида мрежног напона је приказан у табели VI. Уочава се доста велики број привремених пренапона у мрежи.

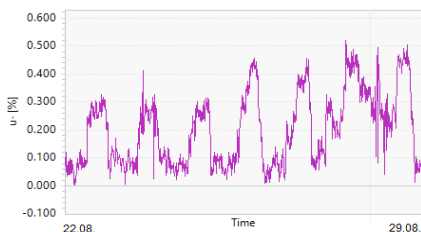
ТАБЕЛА VI Број детектованих привремених пренапона, пропада напона и прекида мрежног напона

Параметар	Пренапони	Пропади напона	Дуготрајни прекид
Детектовано догађаја	19	3	1

Измјерене вриједности несиметрије напона су приказане у табели VII и на слици 8. Вриједности су унутар прописаних граница и задовољавају стандард EN 50160.

ТАБЕЛА VII Несиметрија напона

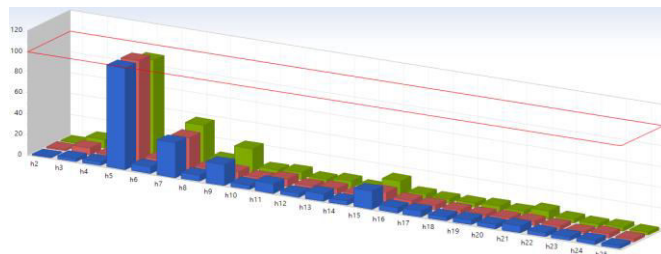
Параметар	Несиметрија напона
<i>Декларисана вриједност</i>	<i>Измјерена вриједност</i>
100% резултата (0%÷2%)	0,04%÷0,50%
Коментар	Задовољава



Слика 8 – Измјерене вриједности несиметрије напона

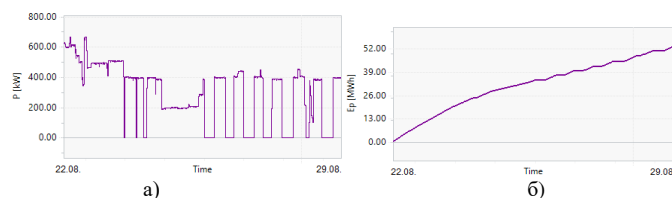
Измјерене вриједности појединих напонских хармоника су приказане на слици 9. Вриједности су унутар прописаних граница и задовољавају стандард EN 50160. Само је вриједност 5-тог хармоника напона близу горње границе која износи 6%, табела I, и по фазама је имала вриједност до 5,85%, 5,90% и 5,52%.

Максимална измјерена вриједност сигналних напона учестаности 316 Hz износи 137 V и мања је од граничне вриједности која износи 519,6 V. Максимална измјерена вриједност сигналних напона учестаности 1060 Hz износи 42 V и мања је од граничне вриједности која износи 288,7 V. Вриједности су унутар прописаних граница и задовољавају стандард EN 50160.



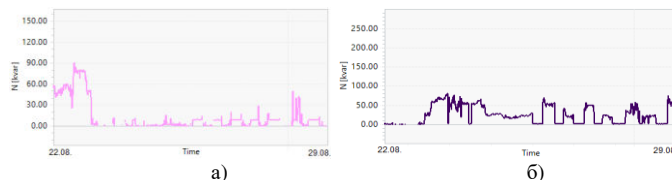
Слика 9 – Измјерене вриједности појединих напонских хармоника

Измјерене вриједности активне снаге са којом је електрана радила и кумулативна вриједност произведене активне енергије су приказане на слици 10. Због слабог дотока воде електрана је радила са једним генератором и са релативно малом снагом, те је у анализираном седмодневном интервалу произвела око 52 MWh електричне енергије.



Слика 10 – Измјерене вриједности а) активне снаге са којом је електрана радила, б) кумулативна вриједност произведене активне енергије

Измјерене вриједности реактивне (неактивне) снаге са којом је електрана радила су приказане на слици 11. У случају када електрана ради са већом снагом (нпр. 22.08. и 23.08) уочава се да ради у капацитивном режиму, тј. преузима реактивну енергију из мреже како би снизила вриједност напона.



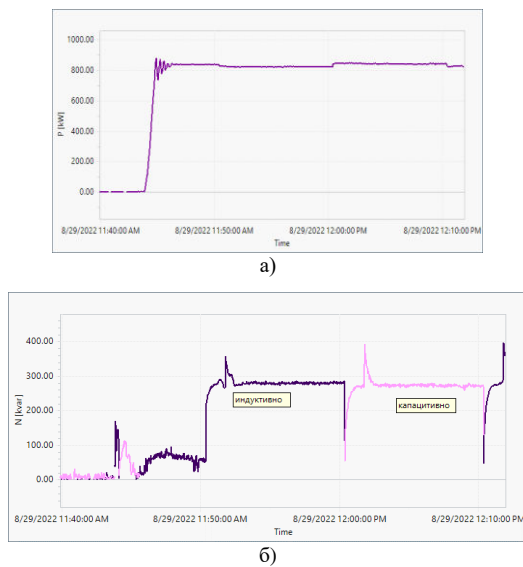
Слика 11 – Измјерене вриједности реактивне (неактивне) снаге електране: а) капацитивна реактивна снага, б) индуктивна реактивна снага

V. ДОДАТНА ИСПИТИВАЊА ПАРАМЕТАРА КВАЛИТЕТА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ

Дана 29.08.2022. године, након што је завршено седмодневно испитивање параметара квалитета електричне енергије, урађено је краткотрајно испитивање утицаја рада МХЕ Миљацка у индуктивном и капацитивном режиму на висину напона у мрежи. Режим испитивања је био сљедећи:

- Од 11.40h до 11.50h електрана је радила са фактором снаге $\cos(\varphi) \approx 1$, мада је исти варирао.
- Од 11.50h до 12.00h електрана је радила са фактором снаге $\cos(\varphi) \approx 0,95$ индуктивно.
- Од 12.00h до 12.10h електрана је радила са фактором снаге $\cos(\varphi) \approx 0,95$ капацитивно.

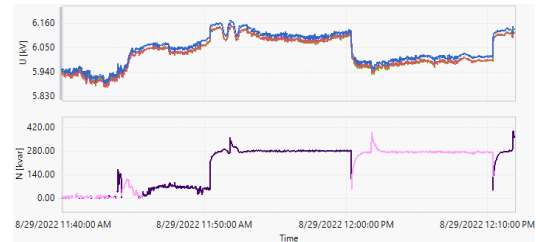
Све вријеме електрана је радила са једним генератором и са приближно константном снагом, која је у стационарном режиму рада варијала између 810 kW и 840 kW, укључујући и сопствену потрошњу. Измјерене вриједности активне и реактивне (неактивне) снаге електране су приказане на слици 12. Електрана је брзо подигла активну снагу производње, из разлога што је кратко (око 40 min) била искључена из погона тако да су дијелови постројења били у загријаном стању, као и због тога што су регулатори имали адекватно подешене коефицијенте регулације.



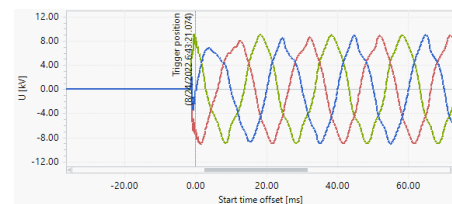
Слика 12 – Измјерене вриједности: а) активне, б) реактивне (неактивне) снаге електране

Измјерене вриједности напона у мрежи и реактивне снаге са којом електрана ради су приказане на слици 13. Уочава се пораст напона у случају када електрана ради у индуктивном режиму, тј. када производи реактивну енергију, односно смањење напона када електрана ради у капацитивном режиму, тј. када троши реактивну енергију. Вриједност напона се током испитивањима налазила унутар прописаних граница.

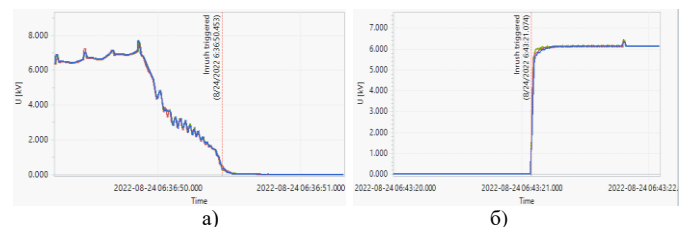
Дана 24.08.2022. у 6.36.50h дошло је до испада електране са мреже, услед испада из погона прикључног далековода. Промјена напона на мјесту прикључења електране током њеног испада из погона је приказана на слици 14. На слици 15 је приказан таласни облик напона приликом поновног далековода под напон, дана 24.08.2022. у 6.43.21h. На слици 16 су приказане ефективне вриједности напона приликом искључења електране и поновног укључења далековода под напон.



Слика 13 – Измјерене вриједности напона у мрежи (горе) и реактивне снаге са којом електрана ради (доле)

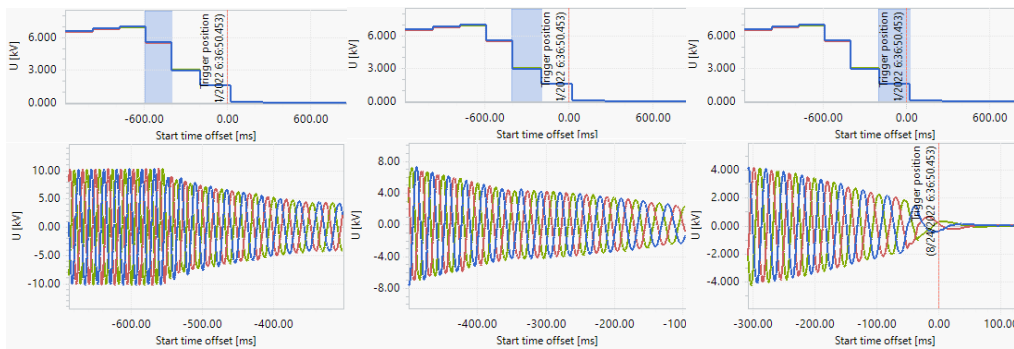


Слика 15 – Таласни облик напона приликом укључења далековода под напон, дана 24.08.2022. у 6.43.21h

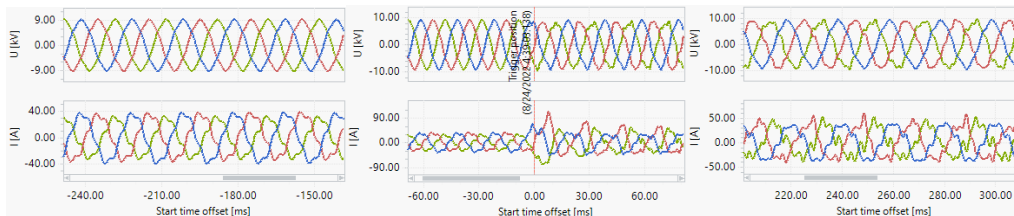


Слика 16 – Ефективна вриједност напона приликом а) искључења електране и б) укључења далековода под напон, дана 24.08.2022. године

На слици 17 су приказани изобличени таласни облици напона и струје електране. Изобличење струје су узроковали велики електромотори којима се управља помоћу уређаја енергетске електронике и који се налазе у оближњем каменолому (слика 1). Изобличене струје изазивају одговарајуће падове напона на импеданси прикључног далековода, што узрокује изобличење напона у мјесту прикључења електране на мрежу. Ова изобличења таласних облика напона су један од узрока релативно високих вриједности фликера, 5. хармоника напона и THD_U напона у тачки прикључења електране. Други разлог јесте тај што енергетски трансформатор, при раду са повишеним напоном, израженије генерише више хармонике напона, поготово 5. хармоник, услед чега расте вриједност THD_U фактора фазног напона.



Слика 14 – Таласни облик напона приликом испада електране са мреже дана 24.08.2022. у 6.36.50h



Слика 17 – Изобличење струје и напона електране услед рада великих електромотора у оближњем каменолому

VI. ЗАКЉУЧАК

На основу презентованих резултата се може закључити да су у посматраном временском периоду од 22.08.2022. године у 10:40h до 29.08.2022. године у 10:40h. Сви параметри квалитета електричне енергије у тачки прикључења МХЕ Миљацка на 10 kV мрежу били унутар граница које су дефинисане стандардом EN 50160. Вриједности напона, вриједности фликера и вриједност 5. хармоника напона су у посматраном временском периоду биле веома близу горње границе. Високе вриједности фликера, 5. хармоника напона и THD_U фактора напона су електромоторни погони који се налазе у оближњем каменолому и који се нападају преко уређаја енергетске електронике. Други разлог за појаву повишених вриједности 5. хармоника напона и THD_U фактора напона јесте рад енергетских трансформатора са повишеним радним напонем, који је често близу горње границе, што узрокује израженије генерисање виших хармоника напона. МХЕ Миљацка је у анализираном временском периоду, услед лоше хидролошке ситуације, радила са релативно малом снагом у односу на инсталисану. При раду са већом снагом напон у тачки прикључења електране расте, а генератори прелазе у капацитивни режим рада и снижавају напон потрошњом реактивне енергије. Стога би се испитивања која су описана у овом раду требала поновити и за случај када електрана ради са снагом која је приближно једнака називној, како би се додатно испитао утицај електране на квалитет 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. 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.

ABSTRACT

In this paper, the results of the measurement and analysis of electrical power quality parameters at the point of connection of MHE Miljacka to the 10 kV electrical distribution network are presented. In the analyzed period and in registered operation modes of the power plant, all parameters of the electric power quality were within the limits prescribed by the standard EN 50160. The influence of large electric motors located in a nearby quarry on the parameters of the electric power quality was detected.

MEASUREMENT AND ANALYSIS OF THE ELECTRIC POWER QUALITY PARAMETERS AT THE POINT OF CONNECTION OF MHE MILJACKA TO THE 10 KV ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORK

Mladen Banjanin, Marko Ikić, Milan Timotija, Slađan Makljenović, Lazar Gluhović