

Анализа специфичних резултата регистрованих приликом мјерења параметара квалитета електричне енергије у електродистрибутивној мрежи

Младен Бањанин, Марко Икић

Апстракт — У раду су приказани и анализирани специфични резултати који су детектовани приликом седмодневних мјерења параметара квалитета електричне енергије у тачкама прикључења на мрежу четири фотонапонске електране и једне хидроелектране. Све анализирани електране су спојене на 10 kV електродистрибутивну мрежу, а инсталисана снага им је у опсегу од 150 kW до 2,12 MW. Детектован је осјетан утицај великих нелинеарних потрошача на параметре квалитета електричне енергије у мрежи. Утицај фотонапонских електрана (нелинеарних произвођача) на квалитет електричне енергије у анализираном временском периоду није био значајан.

Кључне ријечи—фотонапонска електрана; мала хидроелектрана; квалитет електричне енергије; виши хармоници.

I. УВОД

Анализа квалитета електричне енергије у електродистрибутивној мрежи је у задњим деценијама веома значајна тема, услед наглог пораста броја потрошача који се на мрежу прикључују примјеном уређаја енергетске електронике. У посљедњих неколико година, поред нелинеарних потрошача, на мрежу се интензивно прикључују и нелинеарни произвођачи електричне енергије. На нашим просторима то су углавном фотонапонске електране, а у мањој мјери вјетроелектране. Нелинеарни елементи, било да су то потрошачи или произвођачи електричне енергије, генеришу више хармонике струје, а посљедице и више хармонике напона. Виши хармоници напона, чак и у случају линеарних потрошача, узрокују појаву виших хармоника струје, док виши хармоници струје на линеарним импедансама елемената мреже узрокују појаву виших хармоника напона. Услед тога долази до нарушавања квалитета електричне енергије у мрежи. Параметри квалитета електричне енергије се у Европи углавном анализирају у складу са нормом EN 50160 [1], која се односи на параметре квалитета напона у мрежи.

Младен Бањанин, Марко Икић – 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).

Норма EN 50160 не анализира параметре квалитета струје, али се може рећи да их индиректно узима у обзир кроз утицај виших хармоника струје на појаву виших хармоника напона.

Утицај малих фотонапонских електрана и малих хидроелектрана на електродистрибутивну мрежу је анализиран у радовима [2]-[5]. На бази тих резултата се може закључити да у општем случају дистрибуирани извори електричне енергије немају изражен негативан утицај на параметре квалитета електричне енергије у мрежи. Основни проблем који је уочен јесте што електране приликом производње електричне енергије повећавају висину напона у тачки прикључења. Разлог томе јесте што се у овом случају електрична енергија генерише ближе потрошачима, те се смањује струја (снага) која се преноси из мреже вишег напонског нивоа према потрошачима, те се посљедице смањују падови напона на елементима дистрибутивне мреже. Уколико је снага производње електране већа од снаге локалне потрошње, што је чест случај, онда се мијења смијер струје (активне снаге) кроз прикључни далековод, што узрокује додатни пораст напона на мјесту прикључења електране. Проблем је поготово изражен у случају прикључења електране велике инсталисане снаге на релативно дуг далековод релативно нижег називног напона, јер се тада кроз прикључни далековод у мрежу вишег напонског нивоа преноси релативно велика струја. Стога није риједак случај да напон на мјесту прикључења електране на електродистрибутивну мрежу превазилази горњу граничну вриједност [3]. У случају хидроелектрана, овај проблем се углавном рјешава преласком електране у капацитивни режим рада, али се тиме повећавају губици активне снаге у мрежи [2]. Изражено негативан утицај малих електрана на остале параметре квалитета електричне енергије није уочен, чак ни у случају фотонапонских електрана које се на мрежу прикључују примјеном инвертора [4].

У овом раду су анализирани специфични резултати који су регистровани приликом мјерења параметара квалитета електричне енергије у електродистрибутивној мрежи. Сва мјерења су вршена за два карактеристична случаја: 1) фотонапонска електрана прикључена на радијални слабо оптерећен 10 kV далековод, 2) мала

хидроелектрана прикључена уз велики индустријски погон, са већим бројем нелинеарних потрошача. Показано је да осјетан утицај на параметре квалитета електричне енергије у мрежи имају велики нелинеарни потрошачи, а у овом случају то су углавном регулисани електромоторни погони. Такође је констатовано да се резултати мјерења морају пажљиво анализирати, с обзиром да је у стандарду IEC 61000-4-30 [6], у складу са којим се мјере параметри квалитета електричне енергије, наглашено да у прелазним режимима резултати мјерења могу бити нереални (најчешће се то дешава приликом мјерења фреквенције).

II. ОПИС МЈЕРНЕ ОПРЕМЕ И МЈЕРНИХ МЈЕСТА

Мјерење параметара квалитета електричне енергије и таласних облика напона и струја је вршено примјеном трофазног анализатора квалитета електричне енергије класе А, модел Metrel MI 2892. Мјерења су вршена на мјесту прикључења електрана на електродистрибутивну мрежу. Анализиране четири фотонапонске електране су на мрежу прикључене преко стубних трафостаница, па су због непостојања мјерних трансформатора мјерења вршена на 0,4 kV напонском нивоу. Њихова инсталисана снага је једнака 149,6 kW за три електране, односно 233,3 kW за четврту електрану. Инсталисана снага хидроелектране је једнака 2,12 MW, а мјерења су вршена на 10 kV напонском нивоу. Близу хидроелектране се налази велики каменолом са већим бројем регулисаних електромоторних погона велике снаге. Детектован је осјетан утицај рада ових погона на параметре квалитета електричне енергије, прије свега на изобличење таласног облика струје електране и посљедишно изобличење таласног облика мрежног напона.

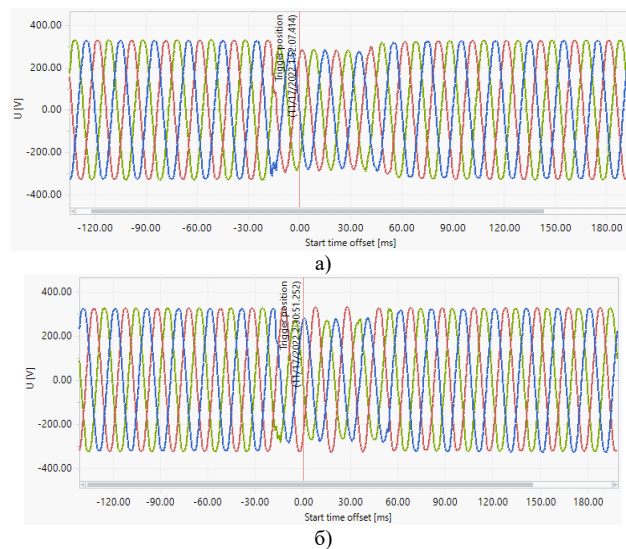
III. АНАЛИЗА СПЕЦИФИЧНИХ РЕЗУЛТАТА МЈЕРЕЊА

За разлику од радова [4],[5] у којима је вршена анализа параметара квалитета електричне енергије у складу са нормом EN 50160, у овом раду су анализирани специфични таласни облици напона и струје, те је анализиран утицај изобличења струје на изобличење напона. Такође су приказани и таласни облици напона и струје приликом пропада напона, прекида напајања и привремених пренапона, као и други интересантни резултати мјерења.

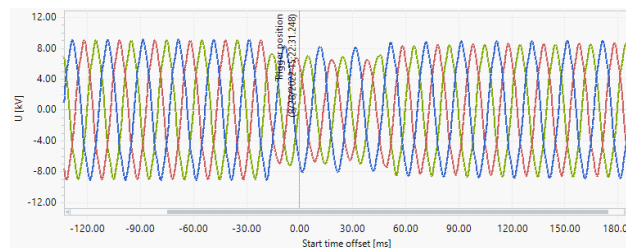
A. Пропади напона

Пропад напона представља појаву када вриједност мрежног напон падне испод $90\% \cdot U_n$, у трајању од 10 ms до укључујући 1 min. На слици 1 је приказан таласни облик пропада напона на мјесту прикључења фотонапонске електране на мрежу, и то на слици 1 а) пропад напона у све три фазе који траје око 60 ms, а на слици 1 б) пропад напона који се дешава у двије фазе и који такође траје око 60 ms. На слици 2 је приказан таласни облик пропада напона на мјесту прикључења хидроелектране на мрежу, који се дешава у двије фазе и

који траје око 60 ms.

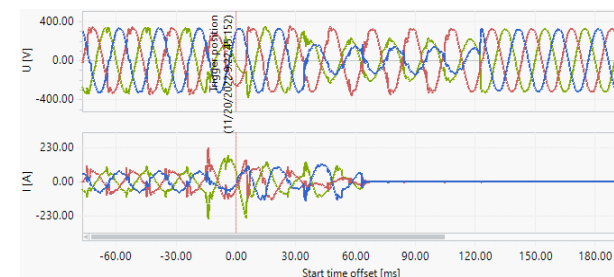


Сл. 1. Пропад напона на мјесту прикључења фотонапонске електране на мрежу: а) пропад напона у све три фазе, б) пропад напона у двије фазе



Сл. 2. Пропад напона у двије фазе на мјесту прикључења хидроелектране на мрежу

На слици 3 је приказан таласни облик пропада напона у двије фазе, који је довео до испада фотонапонске електране из погона услед реаговања поднапонске заштите. Након одређеног времена квар је нестao и напон је добио стандардом прописане вриједности, без да је дошло до испада прикључног далековода.

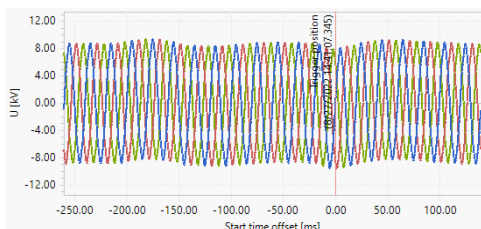


Сл. 3. Пропад напона у двије фазе и посљедишно испад фотонапонске електране из погона

B. Пренапони

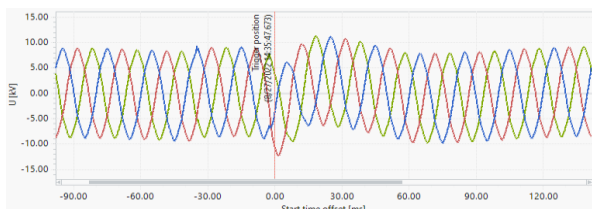
Пренапон представља појаву када напона порасте изнад $110\% \cdot U_n$. На слици 4 је приказан измјерени таласни облик пренапона који се дешава у све три фазе на мјесту прикључења хидроелектране на мрежу. Пренапон је

узрокован субсинхроним осцилацијама фазног напона, које се дешавају на учестаности од приближно 8 Hz. Најчешћи узрок ове врсте осцилација напона јесу високоомски једнофазни земљоспојеви. Ови кварови узрокују појаву нултог напона у систему. Услед интеракције паразитних доземних капацитивности и индуктивности, у мрежи са изолованом неутралном тачком долази до субсинхроних осцилација нултог напона, а посљедишно и до субсинхроних осцилација фазних напона.



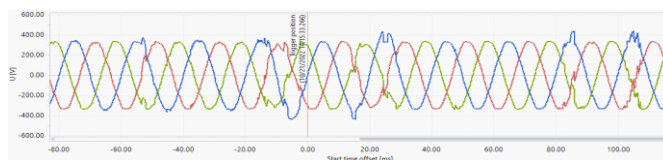
Сл. 4. Привремени пренапон на мјесту прикључења хидроелектране узрокован субсинхроним осцилацијама фазног напона

На слици 5 је приказан измјерени таласни облик пренапона и пропада напона на мјесту прикључења хидроелектране на мрежу. У тренутку окидања (тригерованга) мјерног уређаја највјероватније је дошло до високоомског земљоспоја једне фазе (означена плавом бојом), што је узроковало пропад напона у тој фази и пораст напона у фазама без земљоспоја. Несиметрија фазних напона је довела до појаве нултог напона и посљедишно до пораста напона на фазама без квара. Овакви догађаји су најчешћи узрок субсинхроних осцилација фазног напона приказаних на слици 4.



Сл. 5. Привремени пренапон и пропад напона на мјесту прикључења хидроелектране узрокован високоомским једнофазним земљоспојем

На слици 6 је приказан измјерени таласни облик пренапона на мјесту прикључења фотонапонске електране на мрежу. Мјерење је вршено на 0,4 kV напонском нивоу, гдје је звјездиште енергетског трансформатора директно уземљено. Највјероватнији узрок пренапона јесу земљоспојеви у 10 kV изолованој електродистрибутивној мрежи на коју је електрана прикључена. Пошто је звјездиште трансформатора на 0,4 kV напонском нивоу директно уземљено, нулти напон је једнак нули, тако да напон ограничено расте и пренапон у фазама без квара траје само док траје земљоспој у фази са кваром.

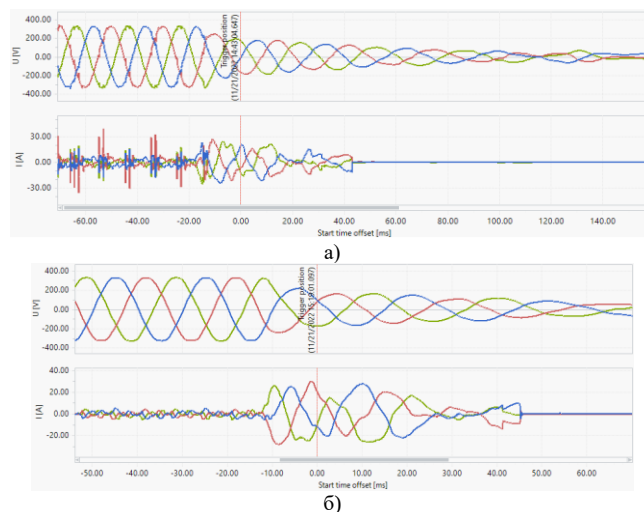


Сл. 6. Привремени пренапон на мјесту прикључења фотонапонске електране на мрежу

С. Прекиди напајања

Прекиди напајања се према норми EN 50160 дијеле на краткотрајне и дуготрајне прекиде напајања. Краткотрајни прекид напајања представља појаву када напон падне испод $5\% \cdot U_n$, у трајању $\leq 3 \text{ min}$. Дуготрајни прекид напајања представља појаву када напон падне испод $5\% \cdot U_n$, у трајању $> 3 \text{ min}$.

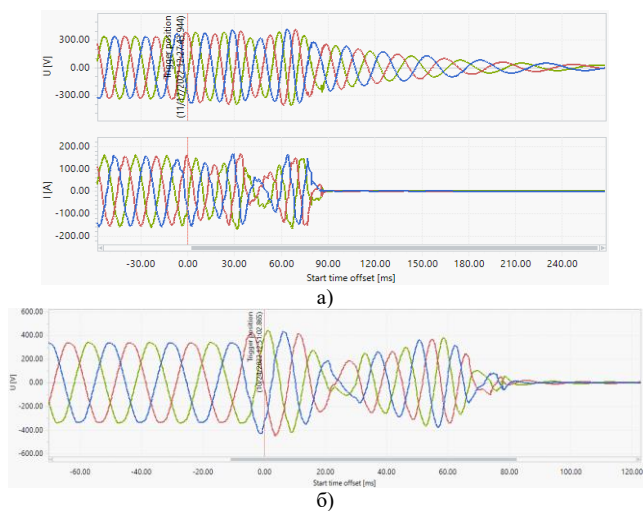
На слици 7 су приказани случајеви прекида напајања на мјесту прикључења фотонапонске електране на електродистрибутивну мрежу. Пошто је електрана спојена на радијални 10 kV далековод, то значи да су и локални потрошачи који су спојени на овај далековод остали без напајања електричном енергијом. У случајевима са слике 7 електране су радиле са малом струјом и малом снагом, тако да искључење прикључног далековода није довело до појаве пренапона услед наглог растерећења електране.



Сл. 7. Прекиди напајања услед испада прикључног 10 kV далековода фотонапонских електрана

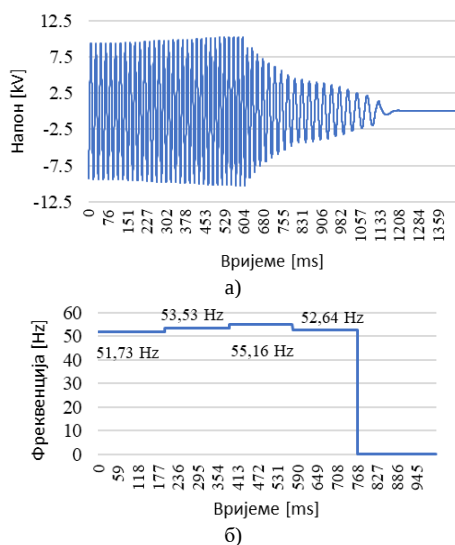
На слици 8 су приказани случајеви када је услед наглог растерећења електране дошло до појаве привремених пренапона, а затим до појаве пропада и прекида напона. Овакав сценарио се има у случају када је електрана прије наглог растерећења произвођила релативно велику снагу, тако да након наглог растерећења настаје вишак снаге и енергије кога електрана настоји да пласира потрошачима у краткотрајном острвском режиму рада. Са слике 8 а) се уочава да осцилација напона на мјесту прикључења електране након њеног наглог растерећења одговара осцилацији струје електране. Заштита од изолованог рада електране је реаговала у кратком временском периоду

(крајем од 100 ms), те након тога долази до наглог опадања вриједности напона и прекида напајања. На слици 8 б) је приказан случај када је напон на мјесту прикључења електране још више порастао услед њеног наглог растеређења, а осцилација напона је након искључења електране веома брзо пригушена.



Сл. 8. Привремени пренапон, а затим пропад напона и прекид напајања услед испад прикључног далековода фотонапонских електрана

На слици 9 је приказана промјена напона и фреквенције на мјесту прикључења мале хидроелектране на мрежу, а која је узрокована испадом прикључног далековода.



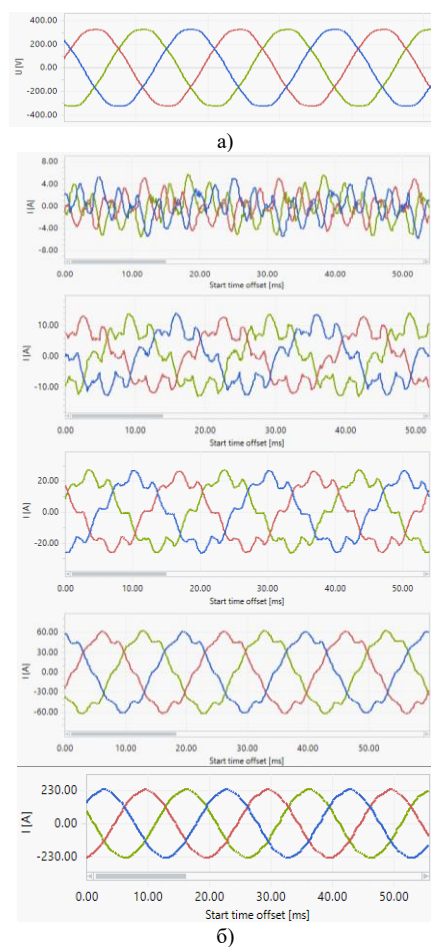
Сл. 9. Привремени пренапон, а затим пропад напона и прекид напајања услед испад прикључног далековода мале хидроелектране

Непосредно прије испад из погона електрана је радила са малом снагом, а услед наглог растеређења напон је порастао на вриједност од 10,35 kV (коэффициент пренапона је једнак 1,15), слика 9 а). Уколико би електрана непосредно прије налог растеређења радила са већом снагом и пораст напона би био виши. Због наглог растеређења хидроелектране долази до убрзавања

турбине и ротора генератора, услед чега фреквенција напона расте до вриједности од 55,156 Hz, слика 9 б), што није био случај код фотонапонске електране која се на мрежу прикључује преко инвертора, слика 8.

D. Утицај фотонапонских електрана на изобличење таласног облика струје и напона

Фотонапонске електране се на мрежу прикључују примјеном инвертора који су нелинеарни елементи, тако да генеришу више хармонике струје и посљедице више хармонике напона. У [4] је показано да прикључење фотонапонских електрана нема изражен негативан утицај на параметре квалитета напона у мрежи, укључујући изобличење таласног облика напона. На слици 10 је приказан таласни облик напона за различите снаге (струје) са којима фотонапонска електрана ради.

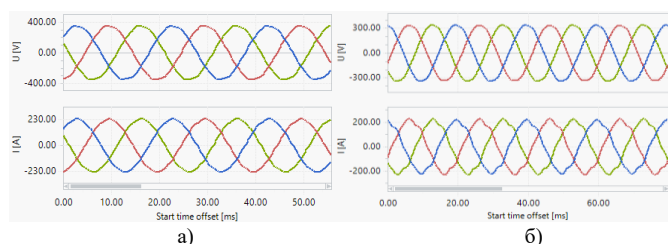


Сл. 10. а) Таласни облик напона за различите б) струје (снаге) фотонапонске електране

Таласни облик напона је био непромијењен у свим радним режимима електране, тако да је приказан само једном, слика 10 а). Са слике 10 б) се уочава да када електрана ради са веома малом снагом има веома изобличен таласни облик струје, али та мала струја прави занемариво мале падове напона на елементима мреже тако да је њен утицај на квалитет напона занемарив. Како

струја (снага) са којом електрана ради расте, тако се побољшава и таласни облик струје, те све више личи на протопериодичан. Због тога је утицај фотонапонске електране на садржај виших хармоника у таласном облику напона мали.

На слици 11 је приказан утицај потрошача на таласни облик струје и напона фотонапонске електране. Фотонапонска електрана може да генерише практично протопериодичне струје уколико је оптерећена линеарним потрошачима, слика 11 а), док у случају напајања нелинеарних потрошача електрана генерише струје које су изобличене вишим хармоницима, али то у овом случају није имало осјетан утицај на таласни облик напона на мјесту прикључења електране, слика 11 б).



Сл. 11. Таласни облици струје и напона фотонапонске електране при називној снази у случају а) линеарних, б) нелинеарних потрошача, које електрана напаја

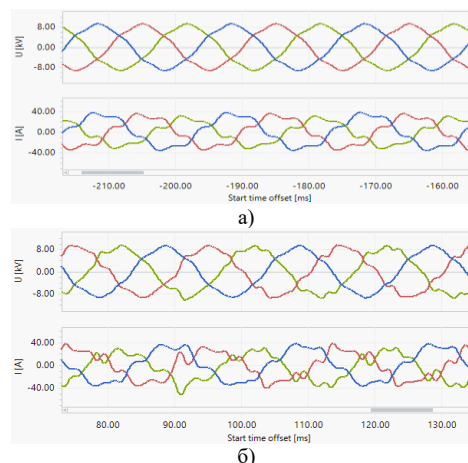
Е. Утицај нелинеарних потрошача на изобличење таласног облика струје и напона

Нелинеарни потрошачи имају изражен утицај на квалитет струје и напона у електродистрибутивној мрежи. Струја нелинеарних потрошача је изражено изобличена вишим хармоницима, те они на импедансама елемената система генеришу више хармонике напона који деформишу таласни облик мрежног напона. Утицај нелинеарних потрошача на мрежу зависи од два фактора:

1. Од интензитета струје нелинеарних потрошача. Уколико је струја мала, њен утицај на квалитет напона је занемарив, слика 10, али уколико је струја велика њен утицај на квалитет напона је значајан, слика 12, слика 13 и слика 14.
2. Од изобличености таласног облика струје. Уколико је струја мање изобличена вишим хармоницима њен утицај на квалитет напона је мањи, слика 12 а), а уколико је струја, при истом интензитету, израженије изобличена вишим хармоницима њен утицај на квалитет напона је велики, слика 12 б).

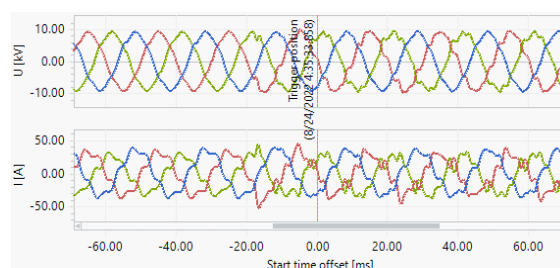
Напон и струја са слике 12 су мјерени на мјесту прикључења хидроелектране на мрежу. Синхрони генератори у хидроелектранама би требало да генеришу приближно протопериодичне напоне и струје, али пошто је у близини електране на мрежу прикључен каменолом са великим бројем регулисаних електромоторних погона великих снага они узрокују да је таласни облик струје електране веома изобличен вишим хармоницима. Посљедишно се исто дешава са таласним обликом напона.

Проблем је израженији због чињенице да је снага линеарних потрошача много мања од снаге нелинеарних потрошача у датој трафостаници.



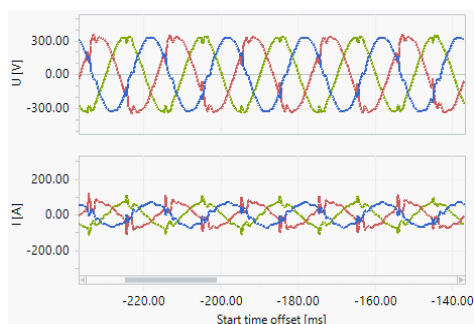
Сл. 12. Утицај изобличености таласног облика струје на изобличеност таласног облика напона на мјесту прикључења хидроелектране на мрежу

На слици 13 је приказано изобличење таласног облика напона на мјесту прикључења хидроелектране на 10 kV електродистрибутивну мрежу, а које је узроковано радом регулисаних електромоторних погона у оближњем каменолому. Јасно се уочава да је практично до тренутка окидања мјерног уређаја таласни облик напона био много мање изобличен вишим хармоницима у поређењу са таласним обликом напона након окидања мјерног уређаја, иако је интензитет струје остао практично исти. Разлог за то јесте што је таласни облик струје непосредно прије окидања мјерног уређаја био знатно мање изобличен вишим хармоницима у поређењу са таласним обликом струје након окидања мјерног уређаја. Појачано изобличење таласног облика струје вишим хармоницима је довело до појачаног изобличења таласног облика напона на мјесту прикључења електране на мрежу.



Сл. 13. Утицај изобличености таласног облика струје на изобличеност таласног облика напона на мјесту прикључења хидроелектране на мрежу при приближно једнаком интензитету струја

На слици 14 је приказан утицај нелинеарних потрошача на изобличење таласног облика струје фотонапонске електране, што за посљедицу има изобличење таласног облика напона на мјесту прикључења електране. Јасно се уочавају промјене напона које су узроковане наглим промјенама струје.



Сл. 14. Утицај изобличености таласног облика струје на изобличеност таласног облика напона на мјесту прикључења фотонапонске електране на мрежу

F. Анализа одступања фреквенције приликом мјерења параметара квалитета електричне енергије

У стандарду IEC 61000-4-30 је наведено да алгоритми који се користе за мјерење и анализу параметара квалитета електричне енергије у мрежи могу да генеришу нереалне резултате у случају појаве пренапона, пропада напона или прекида напајања (поготово у случају мјерења фреквенције). Такви резултати би требали бити означени од стране мјерног уређаја, али искуство показује да се то не деси сваки пут јер то зависи од подешавања мјерног уређаја, од специфичности ситуације која се догодила приликом мјерења итд. На слици 15 је илустрован утицај укључење напона након прекида напајања на пораст фликера и појаву изражених одступања фреквенције. Пораст фликера је логична појава у овом случају, јер велика осцилација напона узрокује осцилацију свјетлосног флуksа расвјетних тијела. Детектована одступања фреквенције не могу бити објашњена на бази анализе измјерених таласних облика напона, те се са великом вјероватноћом може тврдити да су последица недостатака мјерних алгоритама. Стога се ова одступања могу занемарити приликом анализе резултата мјерења.



Сл. 15. Укључење и искључење мрежног напона узрокују нагли пораст фликера, а често узрокују и појаву изражених одступања фреквенције

IV. ЗАКЉУЧАК

У раду су анализирани специфични резултати који су детектовани приликом седмодневних мјерења параметара квалитета електричне енергије (према норми EN 50160) у

тачкама прикључења на мрежу четири фотонапонске електране и једне мале хидроелектране. Показано је да велики нелинеарни потрошачи имају изражен утицај на изобличење таласног облика струје у мрежи, што последично доводи до изобличења таласног облика мрежног напона. Фотонапонске електране, иако представљају нелинеарне изворе електричне енергије, при већим снагама могу да генеришу практично простопериодичне струје у мрежу, док хидроелектране могу да генеришу струје које су изражено изобличене вишим хармоницима уколико напајају велике нелинеарне потрошаче. Приликом укључења или искључења мрежног напона мјерни уређаји могу да прикажу значајна одступања фреквенције. Такве резултате мјерења је потребно пажљиво анализирати како би се утврдило да ли је у питању стварно одступање мјереног параметра, или је одступање узроковано несавршеностима мјерних метода.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] EN 50160:2010, Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, July 2010.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] М. Бањанин, М. Икић, В. Андрић, „Мјерење и анализа параметара квалитета електричне 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.
- [5] М. Бањанин, М. Икић, М. Тимотија, С. Макљеновић, Ј. Глуховић, „Мјерење и анализа параметара квалитета електричне енергије у тачки прикључења МХЕ Миљакца на 10 kV електродистрибутивну мрежу“, 22nd International Symposium INFOTEN-JAHORINA, 15-17 March 2023, стр. 191-196.
- [6] IEC 61000-4-30:2015+AMD1:2021 CSV, Consolidated version, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods, edition 3, 2021.

ABSTRACT

The paper presents and analyzes specific results detected during seven-day measurements of electricity quality parameters at the connection points to electric power distribution network of four photovoltaic power plants and one hydroelectric power plant. All analyzed power plants are connected to the 10 kV electrical distribution network, and their installed power ranges from 150 kW to 2.12 MW. A noticeable influence of non-linear consumers on the electric quality parameters was detected. The impact of photovoltaic power plants on the electric power quality in the analyzed time period was not significant.

Analysis of specific results registered during the measurement of electric power quality parameters in the distribution network

Mladen Banjanin, Marko Ikić