

МЈЕРЕ ЗА ЕЛИМИНАЦИЈЕ УТИЦАЈА КОМПЕНЗАЦИЈЕ РЕАКТИВНЕ СНАГЕ НА КВАЛИТЕТ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ У ИНДУСТРИЈСКИМ ПОСТРОЈЕЊИМА СА ПРИСУТНИМ ВИШИМ ХАРМОНИЦИМА

Бојана Новаковић, Срђан Јокић, Горан Вуковић, Петар Матић, *Електротехнички факултет, Источно Сарајево, Република Српска, БиХ*

Садржај – У раду је анализиран утицај компензације реактивне снаге на квалитет електричне енергије у индустријским постројењима са присутним вишим хармоницима. Постављањем кондензатора у мрежу у којој већ постоје виши хармоници може доћи до резонанције и појаве напона и струја веома високих вриједности. Анализиране су потребе за уградњом филтера, те описани основни принципи конструкције филтера. Дате су препоруке за доношење одлуке о уградњи филтера, као и преглед показатеља утицаја компензације на квалитет електричне енергије.

Кључне ријечи: Кондензаторске батерије, Нелинеарни потрошачи, Квалитет електричне енергије

Abstract – *Impact of compensation on power quality in industrial facilities with harmonics is object of consideration in this paper. Harmonic distortions are caused by nonlinear industrial loads. Industrial facilities utilize capacitor banks to improve the power factor. The application of capacitors can cause resonance, in which conditions current and voltages are magnified. Requirements for filter installation are analyzed, and list of general principles for filter construction are described. Recommendations for making decisions of filter installation are given, so do review of indices of compensation impact on power quality.*

Key words: *Capacitor banks, nonlinear loads, Power quality*

1. УВОД

Један од најчешћих узрока незадовољавајућег квалитета електричне енергије је присуство хармонијских изобличења таласних облика напона и струја. Хармонијска изобличења настају због нелинеарних уређаја у електроенергетском систему (ЕЕС), у које свакако спадају индустријски потрошачи. Струјни хармоници проузроковани нелинеарним оптерећењем могу негативно утицати на широк опсег опреме у ЕЕС-у, а најпримјетније на кондензаторе, трансформаторе и моторе, изазивајући додатне губитке, прегријавања и преоптерећења. Хармонијске струје могу проузроковати интерференцију са телекомуникационим водовима, као и грешке при мјерењу снаге у систему. Хармонијске струје стварају проблеме у напојној мрежи, као и у инсталацијама потрошача који их узрокују.

Индустријски потрошачи обично користе кондензаторске батерије, ради поправке фактора снаге и смањења рачуна за прекомјерно преузету реактивну електричну снагу. Услед присуства кондензатора, у мрежи може доћи до резонанције у којој постоје напони и струје веома великих вриједности. Појава великих вриједности напона виших хармоника у мрежи највише штети самим батеријама јер може изазвати њихово прегријавање и пробој. Оштећења услед резонанције трпе и остали елементи система.

Проблему елиминације хармоника и спречавању појаве резонанције треба приступити студиозно. Високи трошкови отказа опреме могу се смањити употребом активних филтера. Анализа утицаја виших хармоника на компензацију реактивне снаге је изузетно сложена пошто се ради о нелинеарном проблему зависном од параметара мреже, уклопног стања и радног режима.

2. УТИЦАЈ КОМПЕНЗАЦИЈЕ РЕАКТИВНЕ СНАГЕ НА ВИШЕ ХАРМОНИКЕ

До паралелне резонанције долази када, на одређеној фреквенцији, капацитивност кондензаторске батерије и еквивалентна реактанса система формирају паралелно осцилаторно коло. На резонантној фреквенцији, импеданса паралелне везе еквивалентне индуктивности система и капацитивности кондензатора постаје јако велика (теоријски бесконачна). Због тога и мале хармонијске струје могу изазвати велике падове напона на тој импеданси. Напон у близини кондензатора биће увећан и јако изобличен, а и струја кроз батерију ће бити такође увећана. Ова појава узрокује кварове кондензатора, топљење осигурача и прегријавање трансформатора. Чак и мали садржај виших хармоника у струји потрошача при паралелној резонанцији може узроковати велики интензитет виших хармоника у остатку мреже. Степен повећања напона и струје одређен је величином кондензаторске батерије.

До серијске резонанције долази када кондензаторска батерија за корекцију фактора снаге формира серијску везу са еквивалентном импедансом трансформатора и извора хармоника. Импеданса серијске везе индуктивности трансформатора и кондензаторске батерије је веома мала (теоријски једнака нули). Због тога се хармонијске струје које одговарају резонантној фреквенцији затварају у овом колу. Напон на кондензатору се повећава и изобличава.

Најпроблематичнији резонантни услови настају када су кондензатори инсталирани на сабирнице постројења, код централне компензације. Тада у системској импеданси доминира утицај трансформатора и постоји висок однос X/R – нема резистансе да ограничи импедансу резонантног кола и пригуши резонанцију.

3. МЕТОДЕ КОНТРОЛЕ ВИШИХ ХАРМОНИКА

Квалитет електричне енергије је, са аспекта потрошача, углавном везан за параметре квалитета напона (континуитет напајања, одступање ефективне вриједности основног хармоника од номиналне вриједности, хармонијско изобличење таласног облика, присуство фликера, напонски пропади, асиметрија фаза) и фреквенције као глобалне величине. Напон је локална величина, па су и параметри квалитета напона локални.

Квалитет потрошача са аспекта електродистрибутивног предузећа је углавном везан за квалитет струје у прикључном воду потрошача. Ниво хармоника који неки потрошач на одређеном напонском нивоу смије инјектирати у дистрибутивну мрежу зависи од крутости мреже у тачки прикључења потрошача. Због варијације снаге и карактера потрошње, за правилно сагледавање параметара квалитета струје неког потрошача потребно је вршити континуирана мјерења показатеља квалитета струје и напона на прикључном мјесту у дужем временском интервалу.

Утицај хармонијских изобличења осјети се у цијелом систему. Потреба за контролом виших хармоника јавља се само када они постану проблем. Основне методе за контролу виших хармоника су:

- редуковање хармонијске струје потрошача,
- модификовање фреквенцијског одзива система помоћу филтера, завојница или кондензатора,
- уградња филтера са циљем елиминисања хармонијских струја из система, блокирања уласка струје у систем или обезбјеђивање да ток хармонијских струја буде локалан. [4]

Са постојећом опремом потрошача се често може мало тога урадити да би се значајније редуковала количина генерисаних хармонијских струја. Уређаји који користе електрични лук и већина електроенергетских претварача су ограничени дизајнираним карактеристикама. Постоји низ метода за модификовање неповољног системског одзива на фреквенцијама виших хармоника: употреба шант филтера, додавање реактанси између генератора и кондензатора, промјена величине кондензатора, премјештање кондензатора на другу локацију или уклањање кондензатора.

Карактеристике извора виших хармоника у систему се најбоље одређују мјерењем на постојећим постројењима. Мјерења би требало изводити на свим дијеловима постројења за која се сумња да имају прекомјерна нелинеарна оптерећења. Трајање мјерења је најмање једну седмицу, тако да све периодичне варијације оптерећења буду забиљежене. За ново или планирано постројење могу послужити хармонијске карактеристике које даје произвођач опреме.

За оцјену утицаја нелинеарних оптерећења на прилике у мрежи потребно је одредити коефицијент THD (тотална хармонијска дисторзија) При тоталној хармонијској дисторзији мањој од 5 % препоручује се примјена уређаја за компензацију који би се састојали само од кондензаторске батерије и заштитне пригушнице (или филтера). При THD од 5 % и више, препоручује се примјена филтера виших хармоника. [3]

4. УРЕЂАЈИ ЗА КОНТРОЛУ ХАРМОНИЈСКИХ ИЗОБЛИЧЕЊА

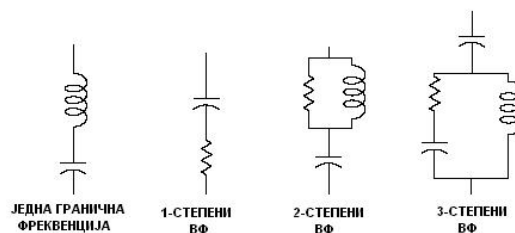
Постоји велики број уређаја помоћу којих је могуће контролисати хармонијска изобличења. Они могу бити једноставни, као што су кондензаторске батерије или редне пригушнице, али и комплексни као што је активни филтер. Једноставне акције као што су додавање, промјена или премјештање кондензаторских батерија, могу ефикасно модификовати неповољан фреквенцијски одзив у систему и тиме довести хармонијска изобличења на прихватљив ниво. Ове акције имају ограничено дејство, јер често није могуће измјештати кондензаторске батерије. Пригушнице могу остваривати исту функцију електрично удаљавајући систем од штетног резонантног стања. Постоје двије класе филтера виших хармоника: пасивни и активни филтери. [1]

Редне пригушнице

Једноставан, а успјешан начин да се контролишу хармонијска изобличења, генерисана од стране погона промјенљиве брзине остварује се употребом малих пригушница, које се убацују на напојној страни претварача у погонима. Ово је посебно ефикасно у случају погона PWM типа. Индуктивност смањује ниво до кога се кондензатори у једносмјерним међукоlima претварача могу пунити и тјера погон да пропушта струју дужи временски период. Ефекат који се постиже у мрежи је нижа вриједност струје, са много мањим садржајем хармоника, при истој преузетој количини енергије.

Пасивни филтери

Пасивне филтере чине индуктивни, капацитивни и резистивни елементи постављени и подешени тако да би контролисали више хармонике. Често се користе и релативно су јефтинији у односу на друге начине елиминисања хармонијских изобличења. Међутим, приликом пројектовања, важно је да се провјере све могуће интеракције пасивних филтера и остатка система. Пасивни филтери се користе или за скретање хармонијских струја ван система или блокирање њиховог тока између дијелова система. Слика 1 приказује неколико типова типичних конфигурација филтера.



Слика 1: Пасивни филтери

Шант пасивни филтер је најчешћи и најекономичнији тип пасивног филтера са једном граном. Елементи су пригушница и кондензатор, везани оточно на ЕЕС, подешени тако да на одређеној фреквенцији ступе у серијску резонанцију и представљају ниску импедансу за одређену хармонијску струју. Због тога хармонијске струје умјесто ка мрежи теку кроз филтер.

Ови филтери поред сузбијања виших хармоника могу обезбједити и поправку фактора снаге. У ствари, од кондензатора за поправку фактора снаге могу се

уједно добити и оточни филтери, додавањем редне индуктивности у сваку фазу.

Битан споредни ефекат оваквог типа филтера је тај да они изазивају паралелну резонанцију са еквивалентном импедансом система на фреквенцији испод граничне фреквенције филтера. Ова резонантна фреквенција мора бити одвојена од било ког утицајног хармоника или других фреквенцијских компоненти, произведених од стране потрошача. Да би се избјегао проблем са резонанцијом, филтери се додају у систем почев од најнижег израженог хармоника који постоји у систему. На примјер, постављање филтера седмог хармоника често захтјева да се поставе и филтери петог хармоника.

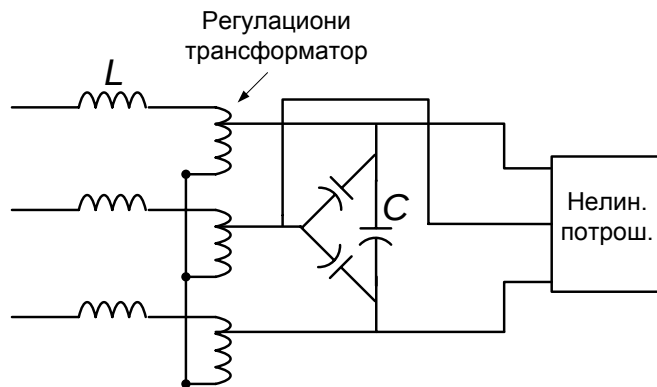
Серијски пасивни филтер је повезан у серију са потрошачем. Пригушница и кондензатор су повезани паралелно и подешени тако да обезбиједи високу импедансу на жељеној фреквенцији хармоника. Та висока импеданса блокира ток хармонијских струја само на подешеној фреквенцији. На основној фреквенцији, филтер треба да обезбјеђује ниску импедансу, па ће пропустити струју.

Серијски филтери се користе да блокирају струје са једним вишим хармоником (нпр. пети хармоник). Употреба серијских филтера код блокирања струја са вишеструким хармоникима је ограничена, јер свака хармонијска струја захтијева посебан серијски филтер подешен на одговарајућу фреквенцију. Овакво рјешење може резултовати значајним губицима и на основној фреквенцији. Као и друге серијске компоненте у ЕЕС-у, серијски филтери морају бити дизајнирани да подносе пуну називну струју потрошача и морају имати прекострујну заштиту. Зато се рјеђе примјењују него шант филтери.

Нискофреквентни широкопојасни филтер је идеалан за примјену ради блокирања вишеструких или широкопојасних хармонијских фреквенција. Редна пригушница постављена је у серију са главним водом и искориштена да обезбиједи електрично раздвајање мреже и нелинеарног потрошача. Кондензатор је постављен оточно, да формира нискофреквентни широкопојасни филтер. Струје са фреквенцијским компонентама које су испод граничне фреквенције филтера могу проћи, а струје са фреквенцијском карактеристиком изнад граничне фреквенције филтера се одводе из система.

На слици 2 приказан је систем намјењен за примјену у индустријским постројењима. Због присутности кондензаторске батерије напон на улазу потрошача расте па је потребан регулациони трансформатор да сведе напон на прихватљив ниво. Гранична фреквенција је обично ниска. Са ниско подешеном фреквенцијом, мала је вјероватноћа да ће филтер доћи у нежељену резонанцију са остатком система и пропустити више хармонијске струје.

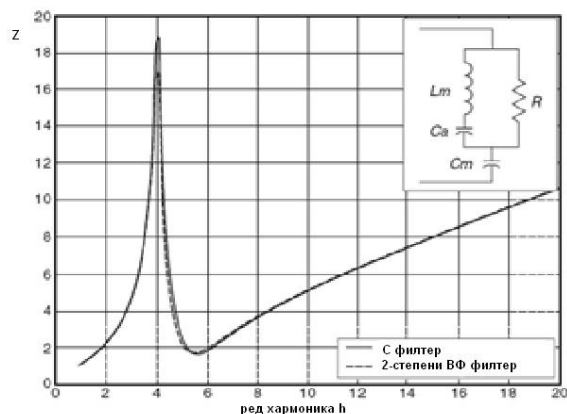
За примјене код мрежа са претварачима енергетске електронике филтер може редуковати укупно струјно хармонијско изобличење опсега од 90 до 100 % на опсег од 9 до 12 %. Оваква изведба је сигурно много ефикаснија него једноставна редна пригушница, која само редукује укупно струјно хармонијско изобличење на опсег од 30 до 40 %. Ипак, цијена редне пригушнице мања је од цијене нискофреквентног широкопојасног филтера. [1]



Слика 2: Нискофреквентни широкопојасни филтер

С филтери су алтернатива нискофреквентним широкопојасним филтерима у редуковању вишеструких хармонијских фреквенција истовремено и у индустрији и у ЕЕС-у. Они могу пригушити широк опсег стационарних и временски промјенљивих хармонијских и интерхармонијских фреквенција, генерисаних од стране енергетских претварача, индукционих пећи, циклоконвертора, и сл.

Типична конфигурација С филтера је приказана на слици 3. Помоћни кондензатор C_a и пригушница L_m на основној фреквенцији формирају серијску резонанцију, па нема губитака на отпорнику R . У пракси се користе и друге комбинације пасивних филтера.



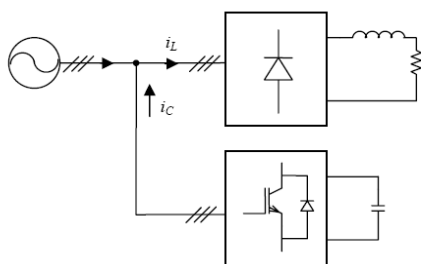
Слика 3: Конфигурација и фреквентни одзив С филтера

Активни филтери

Активни филтери су релативно нова врста уређаја за елиминисање виших хармоника. Базирани су на софистицираној електронској опреми и много су скупљи од пасивних филтера. Међутим, имају упечатљиву предност јер не долазе у резонанцију са системом. Активни филтери могу радити независно од карактеристика импедансе система. Према томе, могу се користити у веома сложеним околностима гдје пасивни филтери не могу да функционишу успјешно због проблема са паралелном резонанцијом. Такође, могу елиминисати истовремено више од једне хармонијске компоненте и суочити се са другим проблемима квалитета електричне енергије као што је фликер. Они су посебно корисни за велике нелинеарне потрошаче, напајане из релативно слабих тачака ЕЕС-а.

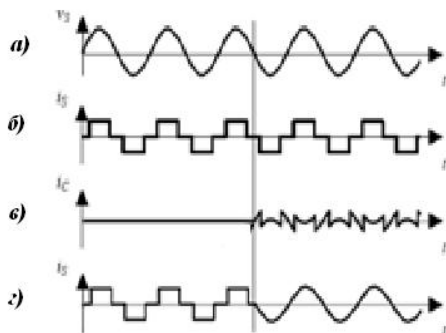
Основни принцип рада активних филтера је додавање дијелова синусног таласа који недостају у струји нелинеарних потрошача помоћу претварача енергетске електронике.

Основне конфигурације активних филтера су серијски и шант активни филтери. Слика 4 приказује концепт шант активног филтера. [2]



Слика 4: Шема шант активног филтера

На слици 5 је упрошћено приказано шта се очекује од шант активног филтера и какво треба да буде његово понашање.



Слика 5: а) Напон у тачки извора; б) Струја извора без додавања шант активног филтера; в) компензациона струја коју узима филтер; г) струја извора прије и након укључења активног филтера

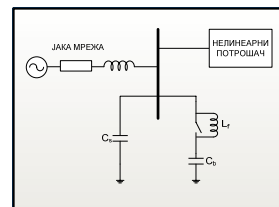
На слици 5 се може уочити како од тренутка прикључења активног филтера струја извора постаје синусоида.

Практична примјена активних филтера је почела средином осамдесетих година прошлог вијека, када је постигнут значајан напредак у технологији електронских прекидача за веће номиналне снаге и повећању њихове комутационе фреквенције. Такође, појавили су се и бржи дигитални сигнални процесори који су могли да обаве сложене прорачуне и обаве струјну регулацију у реалном времену. Функције које активни филтери у одговарајућим топологијама могу да остваре су:

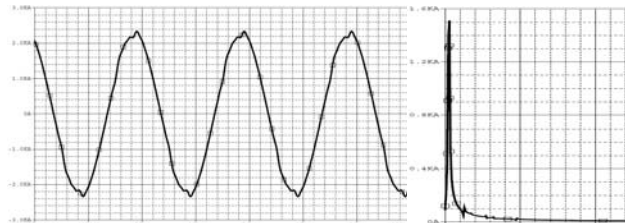
- компензација реактивне снаге,
- хармонијска компензација,
- компензација струје/напона инверзног редослиједа,
- регулација напона.

5. РАЧУНАРСКА СИМУЛАЦИЈА

У циљу илустрације ефеката уградње филтера у индустријским мрежама са нелинеарним потрошачима, начињена је рачунарска симулација дијела електроенергетског система приказаног на слици 6. Посматрани дио система прикључен је на круту мрежу преко трансформатора моделованог реактансом. На средњенапонске сабирнице индустријске мреже прикључен је нелинеарни потрошач, чији је таласни облик струје и интензитет виших хармоника приказан на слици 7. Садржај виших хармоника у струји потрошача је релативно низак (ни један од виших хармоника не прелази 3 %).



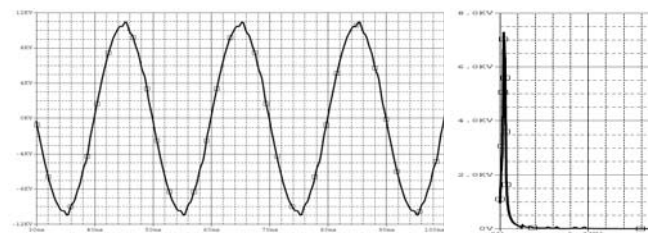
Слика 6: Модел дијела ЕЕС-а



Слика 7: Таласни облик и хармонијски састав струје нелинеарног потрошача

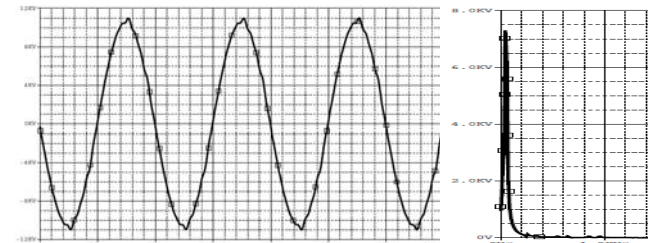
ЕЕС је моделован идеалним напонским извором и еквивалентном реактансом. Вриједности елемената система су изабране приближно стварним величинама. Напонски ниво је 6,3 kV, напон кратког споја напојог трансформатора 6 %, а снага трансформатора 8 MVA.

Симулација је конципирана тако да покаже како се мијења интензитет виших хармоника у мрежи са примјеном филтера и промјеном параметара филтера. Прво је сниман напон на сабирницама у случају када није вршена компензација. Уочава се да виши хармоници садржани у струји нелинеарног потрошача утичу на изобличење напона на сабирницама (слика 8).



Слика 8: Напон на сабирницама без компензације

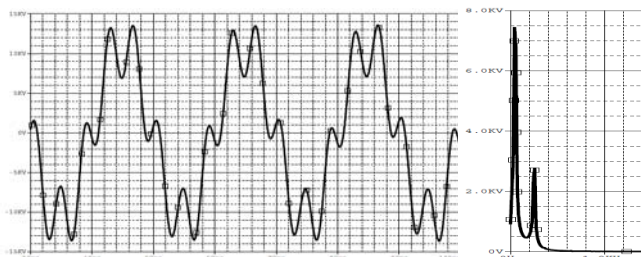
На слици 9 приказан је таласни облик напона на сабирницама када је на њима прикључена кондензаторска батерија реактивне снаге 0,3 MVar. У том случају фреквенција паралелне резонанције се не поклапа ни са једном од фреквенција виших хармоника струје нелинеарног потрошача, због чега је садржај виших хармоника напона низак. Тотална хармонијска дисторзија има вриједност 3 %.



Слика 9: Напон на сабирницама ($Q_k = 0,3 \text{ MVar}$)

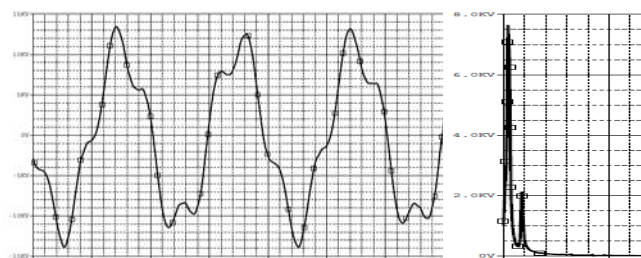
На слици 10 је показано шта се дешава са напонем на сабирницама када је реактивна снага кондензаторске батерије 14 MVar. При тој вриједности јављају се услови за појаву паралелне резонанције на фреквенцији петог хармоника. Пошто је садржај петог хармоника у струји

нелинеарног потрошача 2 %, јавља се паралелна резонанција која узрокује таласно изобличење напона. Садржај петог хармоника напона износи чак 30 %, а тотална хармонијска дисторзија је 80 %.



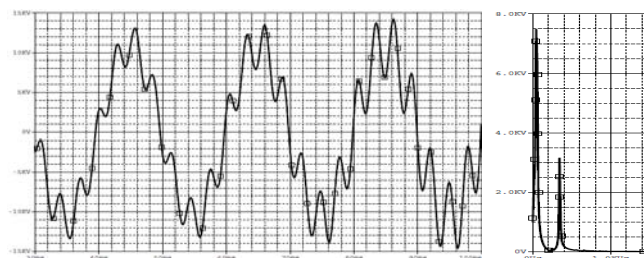
Слика 10: Напон на сабирницама ($Q_k = 14 \text{ MVar}$)

Затим је показано шта се дешава када се кондензаторска батерија искористи за формирање шант филтера. Додата је пригушница индуктивности 1 mH. На слици 11 приказан је напон на сабирницама за овај случај. Тотална хармонијска дисторзија смањена је на 51 %.

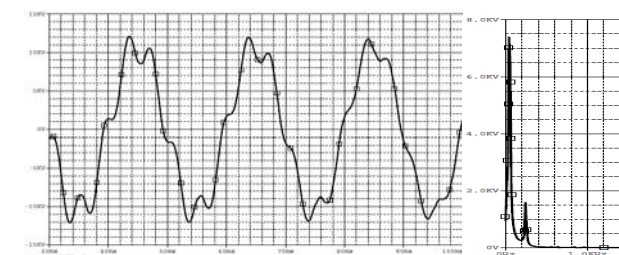


Слика 11: Напон на сабирницама ($Q_k = 14 \text{ MVar}$) са додатим филтером за компензацију петог хармоника

Анализирано је и шта се дешава када је кондензаторска батерија изабрана тако да до паралелне резонанције са системском импедансом долази на седмом хармонику ($Q_k = 7 \text{ MVar}$). Напон на сабирницама без филтрирања приказан је на слици 12 (садржај седмог хармоника напона 40 %, тотална хармонијска дисторзија 71 %), а на слици 13 случај када се користи шант филтер ради елиминације седмог хармоника (садржај седмог хармоника напона 26 %, а тотална хармонијска дисторзија 23 %).



Слика 12: Напон на сабирницама ($Q_k = 7 \text{ MVar}$)



Слика 13: Напон на сабирницама ($Q_k = 7 \text{ MVar}$) са додатим филтером за компензацију петог хармоника

6. ЗАКЉУЧАК

Параметри квалитета напона су локални параметри, а и временски промјенљиви – због флукуација токова снага у дистрибутивном и преносном систему, промјена уклопног стања, промјена отцјепа у регулационим трафостаницама, кварова у мрежи и слично. Временска зависност и локалност параметара напона захтијева континуирана мјерења на дужем временском хоризонту и више мјерних тачака, у складу са стандардима и препорукама произвођача како би се правилно процијенио утицај виших хармоника на компензацију реактивне снаге.

Филтери се најчешће подешавају на нешто ниже учестаности од фреквенције хармоника који се филтрира, да би се обезбиједила сигурност и у случају да постоје одступања у параметрима система које могу довести до промјене граничне фреквенције. Ако би филтери били подешени тачно на фреквенције вишег хармоника, промјене у капацитету или индуктивности са температуром или усљед грешке могу помјерити фреквенцију паралелне резонанције дубоко у област хармоника који се филтрирају. Ово може довести до горе ситуације од случаја да не постоји филтер, с обзиром да се јавља веома оштра резонанција.

Симулацијом је показано да употреба филтера који елиминишу само један хармоник није довољна акција при рјешавању проблема са вишим хармоницима који потичу од нелинеарних потрошача. Нелинеарна оптерећења садрже вишеструке хармонијске компоненте, тако да елиминација једне не поправља укупан квалитет енергије. Битан споредни ефекат употребе филтера је тај да они изазивају паралелну резонанцију са еквивалентном импедансом система на фреквенцији испод граничне фреквенције филтера. Да би се избјегао проблем са резонанцијом, филтери се додају у систем почев од најнижег израженог хармоника који постоји у систему. На примјер, постављање филтера седмог хармоника захтијева постављање и филтера петог хармоника.

Поступак дизајнирања филтера жељених карактеристика је јако сложен, јер се, осим о елиминацији хармонијских компоненти, мора водити рачуна и о потенцијалним резонанцијама дијелова филтера и системске импедансе. Активни филтери се намећу као најбоље, али и најскупље рјешење.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso, H. Beaty – „*Electrical Power System Quality*“, 2004.
- [2] М. Зеџ, Ч. Зељковић, С. Зубић, П. Матић, В. Радусиновић – „*Анализа квалитета електричне енергије објекта са великим бројем нелинеарних потрошача мале снаге*“, 2009.
- [3] Н. Рајаковић, Д. Тасић, Г. Савановић – „*Дистрибутивне и индустријске мреже*“, 2004.
- [4] ЕТФ Београд, група аутора – „*Анализа карактеристичних дијаграма оптерећења у ЕД Београд са циљем типизације дијаграма активног и реактивног оптерећења и утврђивања показатеља квалитета електричне енергије*“, 2008.