

UTICAJ VIŠIH HARMONIKA NA KVALITET ISPORUČENE ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ DISTRIBUTIVNOG SISTEMIMA

Goran Sekulić, Elektromreža Srbije
Saša Ilić, Elektromreža Srbije
Zoran Makević, Elektromreža Srbije

KRATAK SADRŽAJ

U radu su opisani viši harmonici, koji u velikoj meri utiču na kvalitet električne energije koju potrošači preuzimaju iz distributivne mreže. Oni narušavaju kvalitet električne energije tj. kvalitet napona, a samim tim i struje koju potrošači prilikom eksploatacije uzimaju iz mreže. Viši harmonici su nepoželjni u distributivnim mrežama jer se sabiraju sa osnovnim harmonikom napona, tako da dolazi do njegovog izobličenja, što prouzrokuje probleme u napajanju osetljivih potrošača (npr. medicinske opreme, koja zahteva za svoj rad prosto periodičan napon). Objašnjena je pojava viših harmoničnih komponenti struje i napona (viših harmonika), kao i uticaj kompenzacije reaktivne energije na više harmonike u distributivnoj mreži. Kroz studiju slučaja predstavljeno je na konkretnom primeru zašto i kako nastaje pogoršanje kvaliteta napona, odnosno kako pogrešan izbor opreme za kompenzaciju reaktivne snage utiče na kvalitet električne energije.

Ključne reči: kvalitet električne energije, kompenzacije reaktivne energije, harmonične komponente struje i napona, studije slučaja.

ABSTRACT

The paper examines higher harmonics which largely influence the quality of electrical energy, which is supplied to appliances through the distribution system. Higher harmonics diminish the quality of electrical energy, i.e. the voltage quality which decreases the quality of electrical energy delivered to the appliances during exploitation of the system. Higher harmonics are not desirable in the distribution systems due to their addition with basic harmonic of voltage which influences its distortion and causes problems in power supply of sensitive users (for example medical equipment which requires sinusoidal voltage). Further on, the paper demonstrates how the total harmonic distortion of the voltage and electricity is calculated, and describes the causes of higher harmonics occurrence. The problems which occur due to higher harmonics and methods for their elimination are described. The phenomenon of higher harmonic current and voltage components (higher harmonics) is explained, as well as the impact of reactive power compensation on higher harmonics in the distribution network. A case study has been included to show by concrete example why and how voltage quality deterioration takes place, i.e. how the wrong choice of reactive power compensation affects the electric power quality.

Key words: quality of electrical energy, the impact of reactive power compensation, harmonic distortion of the voltage and electricity, harmonic distortion of the voltage and electricity.

Goran Sekulić: 064-8029-824; Faks: 014-224-964; goran.sekulic@ems.rs;
Saša Ilić: 064-8029-830; Faks: 014-224-964; sasa.p.ilić@ems.rs;
Zoran Makević: 064-8408-201; Faks: 014-224-964; zoran.makevic@ems.rs

УВОД

Задатак електричне мреже у оквиру електроенергетског система је пренос и дистрибуција електричне енергије од извора до потрошача, уз задовољење критеријума који се тичу прописаног квалитета испоручене електричне енергије, сигурности погона и поузданости напајања потрошача. Присуство нелинеарних потрошача у енергетском систему доприноси појави виших хармоничних компоненти струја и напона, или кратко, виших хармоника. Типични представници нелинеарних

потрошача су: регулисани електромоторни погони, софтвертери, разни конвертори, системи за непрекидно напајање, флуоресцентне светиљке, итд. Услед све веће инсталисане снаге нелинеарних потрошача у систему, све су веће струје виших хармоника, а самим тим и дисторзије напона, што за последицу има и пораст нивоа виших хармоника напона.

Потрошачи електричне енергије, који представљају изворе виших хармоника, прикључене на дистрибутивну мрежу имају доминантан утицај на квалитет напона у непосредној електричној близини. Потребно је напоменути да се присуство хармоника у одређеној мери преноси и на друге напонске нивое. Тако нпр. велики нелинеарни потрошач без постројења за компензацију прикључен на преносну или дистрибутивну мрежу може да знатно утиче на квалитет електричне енергије већег подручја. Такође велики утицај на количину виших хармоника у мрежи имају домаћинства, јер они немају ограничења по питању $\cos\phi$ количине хармоника које смеју да генеришу. Проблем виших хармоника се тренутно активно решава једино код индустријских потрошача јер су услови за њих знатно ригорознији.

Повећање виших хармоника напона ствара озбиљне проблеме у раду осталих, линеарних потрошача. Проблем се још више усложњава ако се због потребе за компензацијом реактивне снаге уграђују кондензатори фиксног и/или променљивог капацитета. Постоје два основна проблема које треба посебно размотрити када се примењују кондензатори.

Један од проблема приликом примене кондензатора проистиче из чињенице да су кондензатори у електричном колу, а по својој природи, грана са малом импедансом за више хармонике струје. Повећање струје кроз кондензатор ствара веће диелектричне губитке и повећава загревање, што негативно утиче на дужину животног века самог кондензатора. Кондензатори редукују импедансу мреже, чиме могу да повећају ниво хармоника струје, иако сам кондензатор не производи више хармонике струја. Последица ових ефеката је појава виших хармоника напона, који стварају додатно диелектрично напрезање кондензатора, што може довести до пробоја диелектрика.

Други, потенцијално опаснији проблем је појава паралелне резонансе. Када се у неком чвору мреже инсталирају паралелни кондензатори, они чине паралелно коло са индуктивностима самог система. Велике вредности струје виших хармоника у резонантном колу праве велике дисторзије напона, изазивају пренапоне и могу проузроковати пробој изолације трансформатора, мотора, проводника и самих кондензатора.

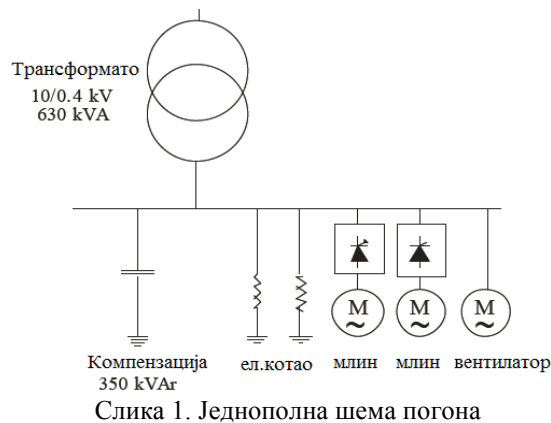
У овом раду биће представљена једна реална ситуација појавезонансе за конкретан објекат након уградње класичног система за компензацију. Посматрани објекат у овом случају је фабричка хала, а за решење проблема су разматрана два могућа решења: применом универзалног система за корекцију квалитета електричне енергије $UPQCS$ применом високопропусних LC филтара.

КОМПЕНЗАЦИЈА РЕАКТИВНЕ СНАГЕ

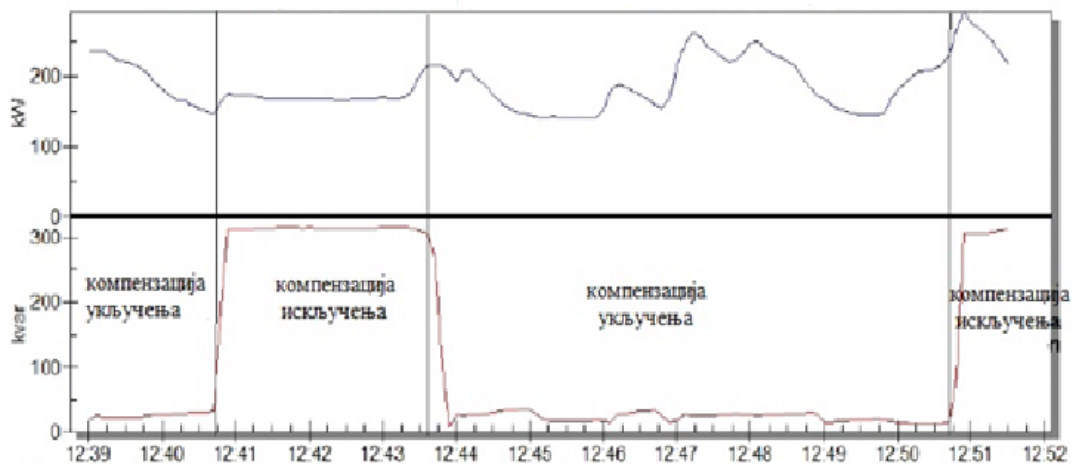
Овим радом указује се на могуће грешке приликом избора типа опреме за компензацију реактивне снаге. У поменутом случају, у погону у коме постоји одређена снага извора виших хармоника уграђена је опрема за компензацију класичног типа: кондензаторске батерије, контактори, регулатор, итд. Оваквим приступом, без озбиљније анализе самог проблема, дошло је до појаве резонансе, а самим тим и до појачања струја виших хармоника и изобличења напона, што је даље водило отказу и непоузданом раду осетљиве опреме. Такође дошло је и до прегревања каблова на орману компензације, реаговања осигурача и убрзаног прегревања кондензаторских батерија.

КЛАСИЧНО ПОСТРОЈЕЊЕ ЗА КОМПЕНЗАЦИЈУ

У циљу смањења трошкова реактивне енергије уграђена је опрема за компензацију реактивне снаге класичног типа са контакторима. Једнополна шема погона дата је на Слици 1. По пуштању у рад изгледало је да компензација врши своју функцију: реактивна снага трансформатора је пала на минимум, а фактор снаге је достигао задату вредност.



После два месеца након уградње класичне опреме за компензацију почеле су да отказују кондензаторске батерије. С обзиром да је орман био у гарантном року испоручилац опреме је уредно мењао батерије. Грејање батерија и каблова било је изузетно високо, а испоручилац опреме није предузео никакву акцију по том питању. После четири месеца рада, батерије су и даље прегоревале у редовним временским интервалима, али су почеле да се деформишу и оксидирају папучице на напојним кабловима, а изолација каблова је видно остарила и постала крта. Проблем је постао очигледан тек у летњем периоду, када је услед високих температура дошло до усијања напојног кабла и убрзаног прегоривања батерија. У циљу анализе проблема, приступило се мерењима у трафо станици. Утврђено је да опрема у орману компензације функционише нормално, тј. укључењем кондензаторских батерија смањује се реактивна снага трансформатора, трансформатор се струјно растеређује и поправља се фактор снаге на 0.98, што је приказано на Слици 2.



Слика 2: Активна и реактивна снага трансформатора

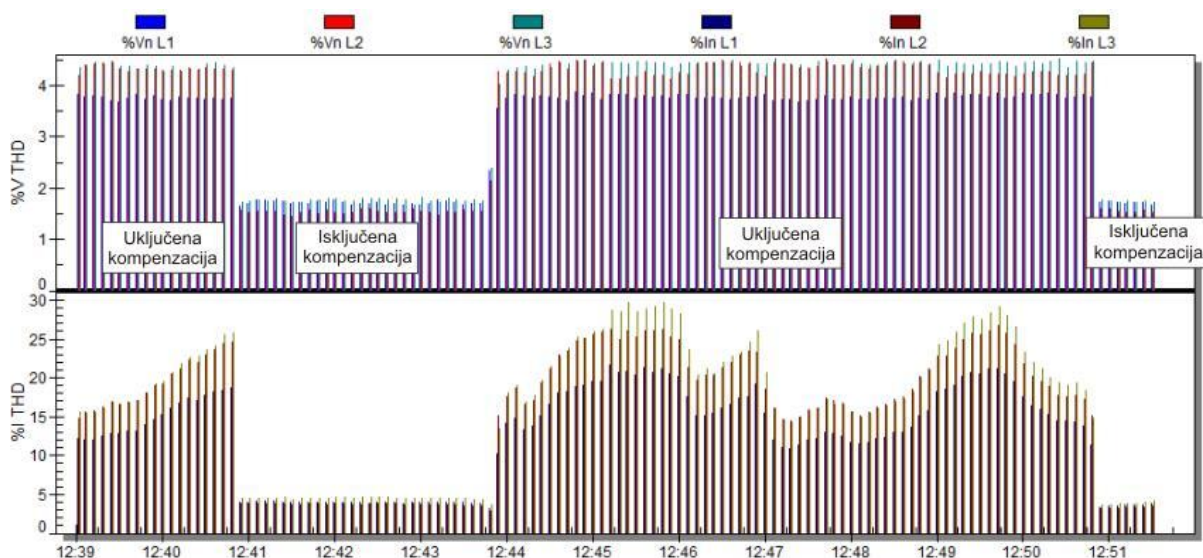
На први поглед опрема за компензацију реактивне снаге функционише нормално и сви позитивни ефекти њеног рада су присутни: струјно растеређење трансформатора и преносних водава, висок фактор снаге, итд...

Детаљна анализа

Пет месеци након уградње класичних батерија за компензацију, приступило се детаљној анализи проблема. Мерењем хармонијских изобличења напона и струја утврђено је да у нормалном радном режиму, односно безукљученог ормара компензације, *THD* фактор напона износи 1.8%, а струје 3.7%. Укључењем ормара компензације, у истом радном режиму, *THD* фактор напона расте до 4.5% а *THD* фактор струје до 30% (Слика 3). Искључењем ормана компензације вредности *THD*-а враћају се на почетне вредности. Очигледан је несразмеран пораст хармонијских изобличења напона и струја са укључењем кондензаторских батерија услед појаве резонанце.

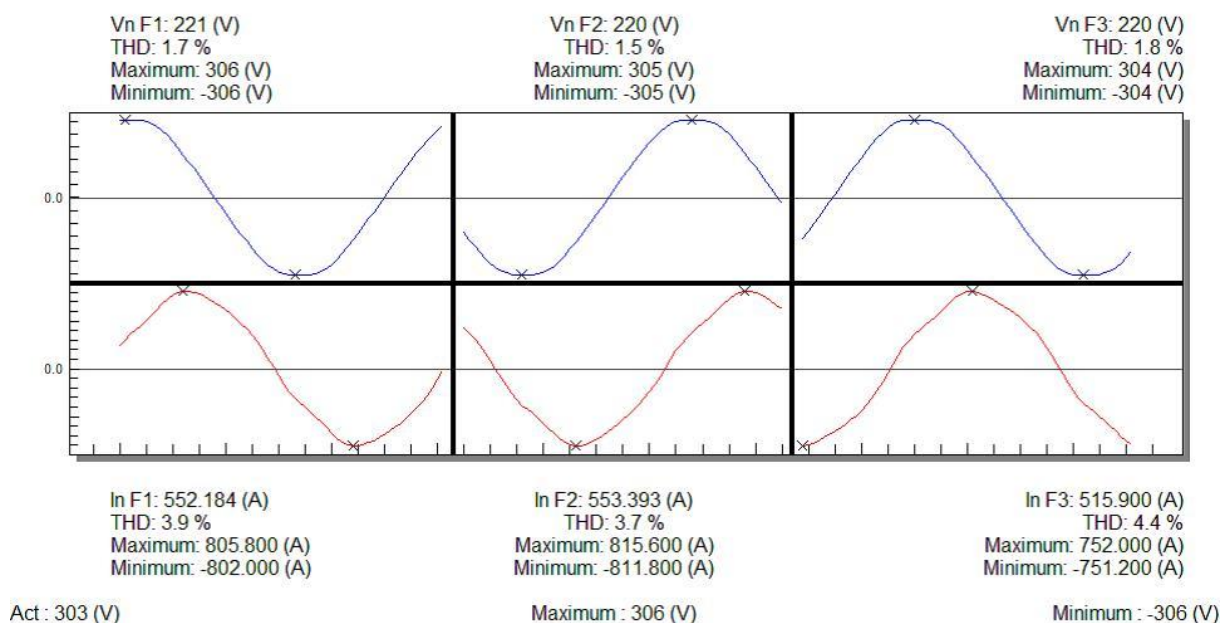
Важно је напоменути да површним мерењима није могуће утврдити потенцијални настанак резонанце, као у овом случају. Услед недостатка обучености и/или искуства извођачи радова, закључујући поједностављено само на основу пар параметара квалитета напона као што је нпр *THD* фактор напона, одлучују се за уградњу класичне опреме за компензацију реактивне снаге. У овом случају то се показало као погрешна одлука.

Неопходно је пре уградње опреме за компензацију извршити стручну анализу утицаја опреме за компензацију на квалитет напона у погону.

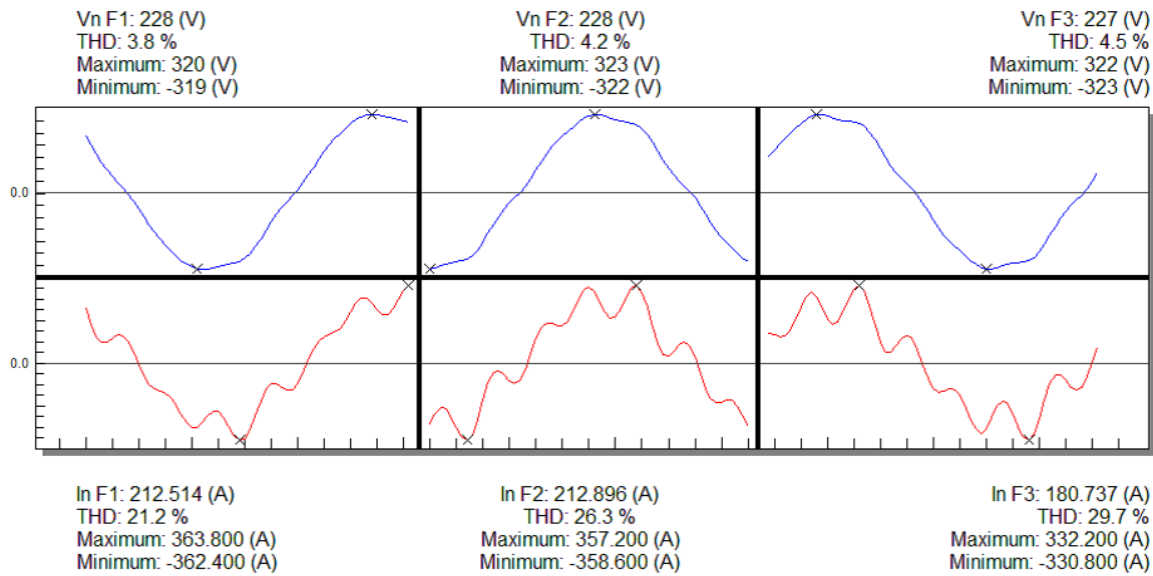


Слика 3: THD фактор напона и струја за посматрани период

Таласни облици напона и струја пре и после компензације приказани су на Слици 3 и Слици 4. Очигледно је повећање изобличења при укљученој опреми за компензацију.



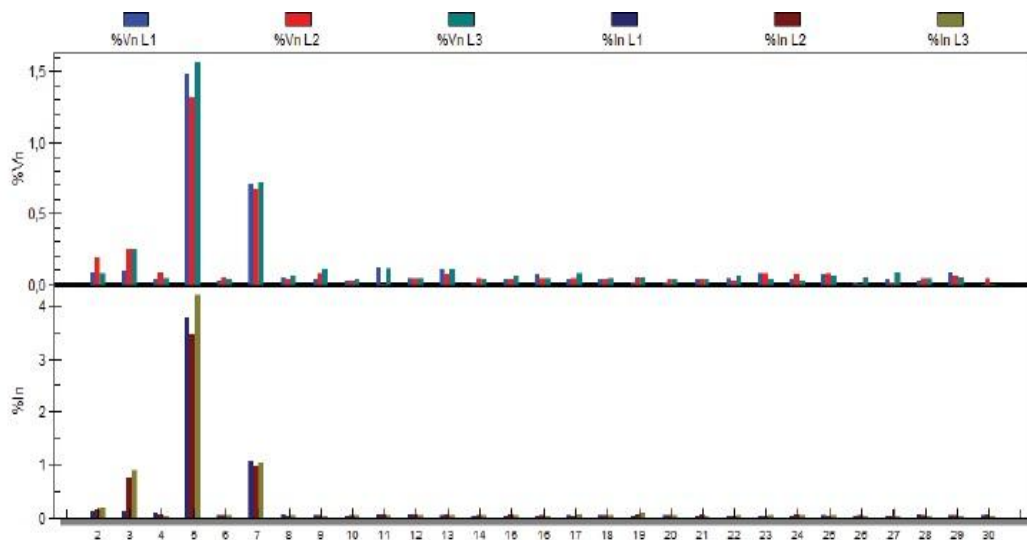
Слика 4: Таласни облици напона и струја пре укључења ормана компензације



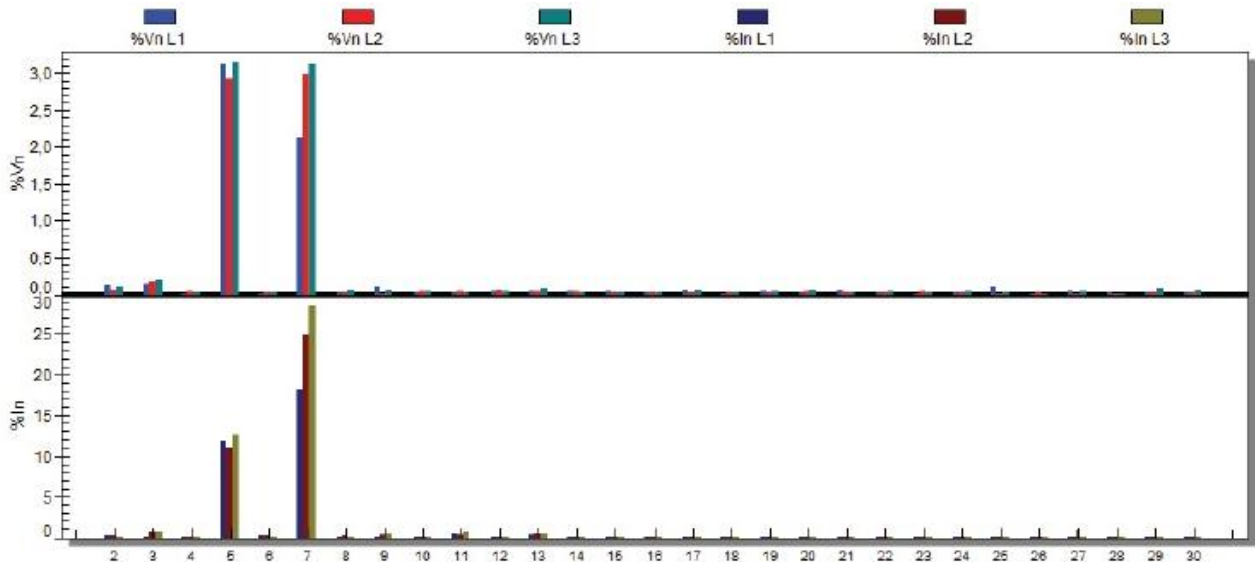
Act : 228 (V) Maximum : 320 (V) Minimum : -319 (V)
Слика 5: Таласни облици напона и струја после укључења ормана компензације

Анализом хармонијског садржаја напона и струја, са укљученом и искљученом компензацијом, утврђено је да је дошло до повећања садржаја свих виших хармоника струје а највише 7-ог хармоника, што приказују Слика 5 и Слика 6.

Гледано у апсолутним износима, односно у амперима, струја 7-ог хармоника порасла је више од 10 пута. Овако висока вредност струје виших хармоника изазвала је додатна изобличења напона и повећање THD фактора напона. Ово изобличење напона даље се одражава на све потрошаче у погону и изазива реаговање заштита и ресетовање осетљивих потрошача.



Слика 6: Хармонијски садржај напона и струја пре укључења компензације



Слика 7: Хармонијски садржај напона и струја после укључења компензације по фазама

Занимљива чињеница је да овако погоршан квалитет напона највише штети самим кондензаторским батеријама. Због високих изобличења напона и затварања виших хармоничних компоненти струја преко кондензаторских батерија, *THD* фактор струје кондензаторских батерија је достигао 29% што је горњи лимит који произвођачи предметних батерија дозвољавају. Очигледно је да батерија ради на грани својих могућности и да то узрокује скраћење животног века и превремени отказ батерије.

После извршене анализе, инвеститору је предложено да постојећу опрему за компензацију реактивне снаге трајно искључи и да изврши реконструкцију и надоградњу у филтерску компензацију реактивне снаге. На тај начин би се спречио настанак резонанце, а задржала би се функција смањења реактивне снаге која се преузима из мреже. Са оваквим развојем догађаја инвеститор је изложен додатним трошковима, и оно што је у почетку изгледало као јефтино решење показало се као неодговарајуће и најскупље могуће решење.

РЕШЕЊЕ ПРОБЛЕМА РЕЗОНАЦИЈЕ

У приказаном случају, након детаљне анализе и детектовања појаве ефекта резонанце, јавила се потреба за реконструкцијом постојећег постројења у филтерски тип компензације реактивне снаге, како би се извршила функција смањења потрошње реактивне снаге а квалитет напона остао непромењен. За овај конкретан пример, размотрена су два могућа решења.

Универзални систем за корекцију квалитета електричне енергије UPQCS

Једино од решења за наведене проблеме је универзални систем за корекцију квалитета електричне енергије под називом *UPQCS (Universal Power Quality Conditioning System)*.

Улога оваквог система је да компензује недостатке у квалитету електричне енергије, било да се ради о недостацима напојне мреже или пријемника, односно за проблеме као што су: пропади напона, пренапони, несиметрија, фликери, виши хармоници. Ове карактеристике чине овакав систем погодним за инсталацију на сабирнице већег броја индустријских пријемника.

Основне компоненте оваквог система су: активни исправљач, паралелни и серијски филтар.

Намена паралелног филтера је да елиминише струјне хармонике пријемника и да компензује фактор снаге пријемника. Принцип рада паралелног активног филтера заснива се на поништавању струје виших хармоника тако што се инјектира струја исте амплитуде и фреквенције али фазно померена за 180° у односу на струју одговарајућег хармоника. У циљу оптимизације величина паралелних филтера, они се комбинују са опремом за динамичку компензацију реактивне снаге. Динамичка компензација поправља фазни став основног хармоника струје, а паралелни филтер компензује хармонијска изобличења инјектирањем струјног сигнала одговарајуће фреквенције и амплитуде. Резултат тога је да је фактор снаге потрошача једнак јединици, а струја потрошача не садржи више хармонике.

Серијског филтар служи да форсира ток хармоника пријемника напонског типа у паралелни филтар, компензује више хармонике мрежног напона, као и фликере, пренапоне, пропаде напона, несиметрију напона и испаде фазе.

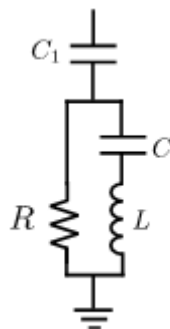
Активни исправљачврши трансфер снаге у или из заједничког једносмерног међукола, апоред тога врши и регулирају напона једносмерног међукола. Регулација напона на заједничком кондензатору растеређује активни филтар потребе за напонском контролом.

Активни филтери немају недостатке које имају пасивни филтери, а предности се огледају у могућности брзе адаптације на промене у режиму рада потрошача и мреже, могућности да компензују све више хармонике одједном, као и да елиминишу друге проблеме везане за квалитет електричне енергије.

4. Високопропусни Ц филтер

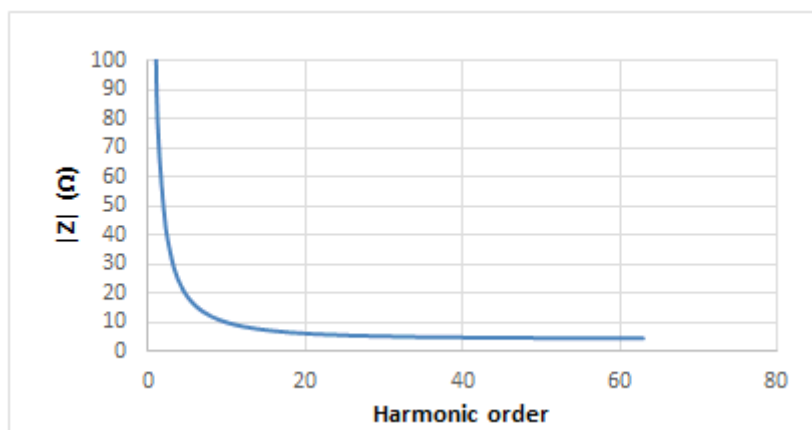
Пасивни филтри се деле на: прост усклађен, двоструко усклађен и високопропусни. У принципу то су једноставна, поуздана и јефтина решења али се нису показали ефикасним код модерних електромоторних погона и неких других нелинеарних потрошача међу којима су и нека електротермичка постројења. Често се дешава да изазивају паралелну резонанцију или да долази до прекомпензације реактивном енергијом на основној фреквенцији, а показало се и да нису довољно флексибилни за динамичку компензацију различитих хармонијских компоненти. Савремена решење за елиминисање проблема виших хармоника нашла су се у примени активних филтера.

Међутим за решавање приказаног проблема у овом раду користила би високопропусни С филтар реда Шкако би елиминисали хармонике реда $k = 5, 7$.



Слика 8:Основна шема високопропусног Ц – филтра[3]

Главна предност овог филтера је у већој редукцији активних губитака на основној фреквенцији, што се види поређењем кривих $|Z_f| = f(k)$.



Слика 9. Дијаграм импедансе Ц – филтера у функцији хармоника реда k

На основу карактеристика високопропусних филтара познато је да је најпростији филтар I реда који се састоји од R и C елемената, али оваква конфигурација ретко користи јер захтева велики кондензатор и има изражене губитке на основној фреквенцији. Најбоље карактеристике има филтер II реда, али су му губици на основној фреквенцији већи него код филтера III реда. Оптимално решење представља Ц филтер који има мале губитке, али је нешто осетљивији на промене параметара компоненти.

На основу изложеног може се закључити да је пожељно примењивати просте усклађене филтере када је потребно елиминисати одређене фреквенције, или када желимо избећи резонантне услове у мрежи. Недостатак је оштрина подешавања простог усклађеног филтера, односно могуће одступање резонантне

фреквенције филтера од подешене вредности. Високопропусни филтери се пројектују тако да у што ширем опсегу пригушују хармонике одређене фреквенције и све више хармонике. За разлику од усклађених филтера, садрже већи број компонената, па повећавају трошкове уградње филтера.

ЗАКЉУЧАК

На овом конкретном примеру можемо да видимо неке проблеме који се могу јавити код решења која су већ дуг период доступна. Примењени тип компензације је неодговарајући за предметни погон, чиме је проузрокована резонанца. Овакав режим рада се мора по сваку цену избећи, јер последица резонанце је велико погоршање квалитета напона, чиме се квари услови за поуздан и дуготрајан рад целокупне електричне опреме у погону. У овом случају, параметри квалитета напона пре уградње опреме нису очигледно указивали на могућност настанка резонанце, али су поједностављеним закључивањем извођачи радова занемарили остале релевантне параметре. Пре уградње кондензаторских батерија обавезна је стручна анализа и мреже и потрошача у циљу предвиђања понашања мреже после уградње батерија, па тек на основу тога одредити тип опреме за компензацију реактивне снаге.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Драган Брајовић, Зоран Лазаревић, Квалитет електричне енергије, Београд 2016.

[2] Интернет страница <http://www.avalonpartners.biz/>

[3]

https://hvdc.ca/webhelp/Master_Library_Models/Passive/Filters/Passive_Filter_Design.htm