

Primjena aktivnog filtera snage (PQFS) u distribucijskoj mreži

Ćosić, Nives

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:081349>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-15**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni studij

**PRIMJENA AKTIVNOG FILTERA SNAGE (PQFS) U
DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI**

Diplomski rad

Nives Čosić

Osijek, 2022.

Sadržaj

1.	UVOD	1
1.1	Zadatak diplomskog rada.....	2
1.2	Pregled literature.....	2
2.	HARMONICI.....	3
2.1	Osnovno o harmonicima.....	3
2.1.1	Harmonijsko izobličenje	4
2.1.2	Simetrične komponente.....	6
2.2	Izvori harmonika.....	7
2.2.1	Transformatori.....	7
2.2.2	Motori i generatori	8
2.2.3	Trošila s električnim lukom.....	8
2.2.4	Fluorescentna rasvjeta	9
2.2.5	LED žarulje	9
2.2.6	Trošila s energetsom elektronikom	10
2.3	Štetne posljedice harmonika	13
2.4	Pokazatelji harmonijskog izobličenja	15
2.4.1	THD.....	15
2.4.2	TDD.....	16
2.5	Norme i pravila elektroenergetskog sustava.....	17
2.5.1	EN 50160.....	17
2.5.2	IEC 61000	19
2.5.3	IEEE 519	20
3.	METODE SNIŽAVANJA VIŠIH HARMONIKA U MREŽI	22
3.1	Smanjenje intenziteta harmonijskih struja.....	22
3.2	Promjena rezonantne frekvencije sustava.....	22
3.3	Ugradnja filtera.....	23
3.3.1	Pasivni filter	24
3.3.2	Aktivni filteri.....	25

4. RUKOVANJE AKTIVNIM FILETROM SNAGE PQFS.....	32
4.1 Opis opreme.....	32
4.2 O korisničkom sučelju	34
4.3 Upute za podešavanje harmonika	38
4.4 Pregled izmjerenih veličina	42
4.5 Eksperimentalna provjera učinkovitosti aktivnog filtera u mreži	44
5. ZAKLJUČAK	47
LITERATURA.....	48
Popis slika	51
Popis tablica	52
SAŽETAK.....	53
ABSTRACT	54
ŽIVOTOPIS	55

1. UVOD

U današnjim elektroenergetskim mrežama prisutno je sve više uređaja koji se temelje na elementima energetske elektronike. Prisutnost tih nelinearnih trošila u mreži uzrokuje razne poremećaje i nepoželjne pojave u opskrbi električnom energijom. Osim toga, nelinearna trošila u mrežu generiraju više harmonike, ali su istovremeno i osjetljiva na njih. Harmonici u mreži stvaraju niz problema koji narušavaju rad mreže i uzrokuju kvarove na trošilima, smanjuju njihovu učinkovitost i radni vijek. Realno je očekivati da će se u budućnosti povećavati broj nelinearnih potrošača mreži, a s time će rasti i problemi s harmonicima. Stoga, pitanje kvalitete električne energije postaje sve važnije te se nastoje pronaći načini za ublažavanje harmonijskog izobličenja. Tradicionalna metoda je korištenje pasivnih filtera, a posljednjih godina se sve više primjenjuju aktivni filteri.

Diplomski rad podijeljen je u pet poglavlja. Prvo poglavlje daje uvod u problematiku viših harmonika u distribucijskoj mreži uslijed sve veće prisutnosti nelinearnih trošila i uređaja energetske elektronike. Osim toga, bilo je nužno dati pregled literature korištene u području istraživanja kvalitete električne energije, viših harmonika i aktivnih filtera snage. Drugo poglavlje sadrži temeljnu teorijsku podlogu o harmonicima i harmonijskom izobličenju signala. Nadalje, opisani su najvažniji izvori viših harmonika, a zatim problemi koje harmonici uzrokuju u elektroenergetskoj mreži i opremi. U posljednjem dijelu poglavlja definirani su pokazatelji harmonijskog izobličenja te norme i pravila elektroenergetskog sustava relevantnih za kvalitetu električne energije i ograničenje iznosa viših harmonika. Metode za snižavanje intenziteta viših harmonika nalaze se u trećem poglavlju. Posebnu važnost za ovaj rad donosi potpoglavlje 3.3. koje je vezano uz aktivne filtere snage. Objašnjena je funkcija aktivnog filtera, način rada, a zatim i njihova podjela na temelju topologije, nazivne snage, brzini odziva, broju faza, itd.. Potom se nastoji opisati način rada serijskog, paralelnog, UPQS i hibridnog aktivnog filtera. Četvrto poglavlje daje opis i rukovanje s aktivnim filterom snage PQFS proizvođača ABB. Opisane su smjernice za podešavanje strujnih harmonika u aktivnom filteru, a zatim su navedene upute za pregled rezultata mjerenja. Na kraju je prikazan utjecaj aktivnog filtera u mreži ako se u nju injektiraju 3. i 5. strujni harmonik preko generatora harmonika. Peto poglavlje predstavlja zaključak.

1.1 Zadatak diplomskog rada

Definirati osnovne pojmove uz kvalitetu električne energije, s naglaskom na više harmonike te metode za snižavanje njihovog iznosa. Opisati aktivni filter snage te generator harmonika koji se nalazi na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Obraditi rezultate mjerenja kvalitete električne energije, te analizirati učinkovitost aktivnog filtera snage na snižavanje iznosa viših harmonika u elektroenergetskoj mreži.

1.2 Pregled literature

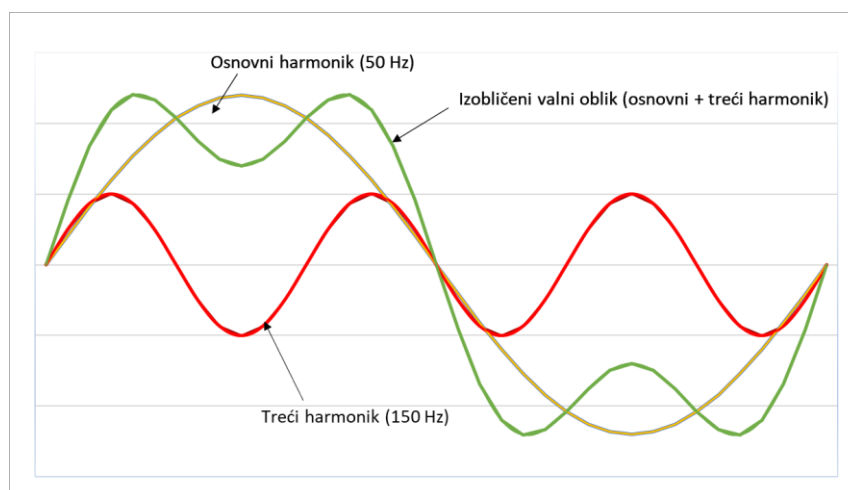
Pitanje kvalitete električne energije, opis osnovnih poremećaja i smetnji, kao i način poboljšanja kvalitete opskrbnog napona, opisani su u literaturi [3] i [4]. U istoj literaturi, navedena je i teorijska podloga o harmonicima, njihova klasifikacija i način prikaza harmonijskog izobličenja signala. U literaturi [4] i [9] se nalazi prikaz i detaljan opis svih važnijih uređaja koji su izvori viših harmonika u mreži. Iz ove literature izvučene su informacije o transformatorima, motorima i generatorima, dok je literatura [10] i [11] korištena za opis trošila s električnim lukom. U literaturi [12] i [13] kroz simulacijski model i eksperimentalna mjerenja prikazane su osnovne karakteristike fluorescentne i LED rasvjete te je dana analiza viših harmonika koje emitiraju u mrežu, a potom i njihov utjecaj na kvalitetu električne energije. Uz pomoć literature [14] i [15] opisane su karakteristike elektroničkih energetske pretvarača kao izvora viših harmonika. Unutar literature [16] izneseni su negativni učinci koji se javljaju kao posljedica postojanja viših harmonika u elektroenergetskoj mreži. Standardi, norme i pravila elektroenergetskog sustava u području kvalitete električne energije, kao i tablice s graničnim vrijednostima harmonika preuzete su iz literatura [3], [15] i [17]. Više o mjerenju kvalitete električne energije prema normi HRN EN 50160 može se pročitati u literaturi [21]. Autori S. Mikkili i A.K. Panda u literaturi [22] govore o suvremenim problemima u mreži uslijed pojave viših harmonika i ističu važnost razvoja tehnologije aktivnih filtera za njihovo suzbijanje. Literatura [23] prvo prikazuje konvencionalne metode snižavanja viših harmonika pomoću pasivnih filtera, a zatim opisuje aktivne filtere. Navedena je njihova podjela, glavne topologije, a potom i strategije upravljanja. Literatura [25] bavi se optimizacijom veličine i lokacije aktivnog filtera kako bi on što učinkovitije smanjiti udio harmonika u mreži. Literatura [29] donosi opis i tehničke specifikacije, te upute za instalaciju, rukovanje i održavanje aktivnog filtera snage PQFS proizvođača ABB.

2. HARMONICI

2.1 Osnovno o harmonicima

Mrežni napon i struja bi idealno trebali imati savršeni sinusni valni oblik, ali u stvarnosti je gotovo nemoguće održavati takve idealne uvjete. Zbog sve većeg udjela nelinearnih opterećenja u elektroenergetskoj mreži, ovi valni oblici postaju izobličeni, [1]. Ako bi u sustavu prevladava linearna trošila, ne bi se javljali izobličeni valni oblici napona i struje. Razlog tomu je što linearna trošila imaju linearnu U-I karakteristiku što znači da struja prati promjenu sinusnog napona mreže. Ovakvo ponašanje napona i struje može se objasniti Ohmovim zakonom: $i(t) = \frac{v(t)}{R}$, [2]. Za razliku od linearnih trošila, kod nelinearnih trošila struja ne prati promjenu sinusnog napona mreže, te dolazi do izobličenja valnog oblika struje. Ova trošila u mrežu injektiraju strujne harmonike koji stvaraju padove napona na impedancijama mreže, odnosno uzrokuju izobličenje valnog oblika napona. Tako nastali naponski harmonici proširit će se po cijeloj mreži i doći će do izobličenja napona napajanja drugih uređaja. To znači da harmonijsko izobličenje struje uzrokuje izobličenje napona, [2].

Odstupanje valnog oblika od željenog sinusnog vala upućuje na prisutnost harmonika u signalu napona ili struje. Harmonici su definiraju kao neželjene sinusne komponente čija je frekvencija cjelobrojni višekratnik osnovne frekvencije signala, [1]. Npr. ako je elektroenergetski sustav projektiran za frekvenciju 50 Hz, drugi harmonik je komponenta koja ima dva puta veću frekvenciju od osnovne, dakle 100 Hz, treći harmonik ima frekvenciju 150 Hz (slika 2.1.), itd.



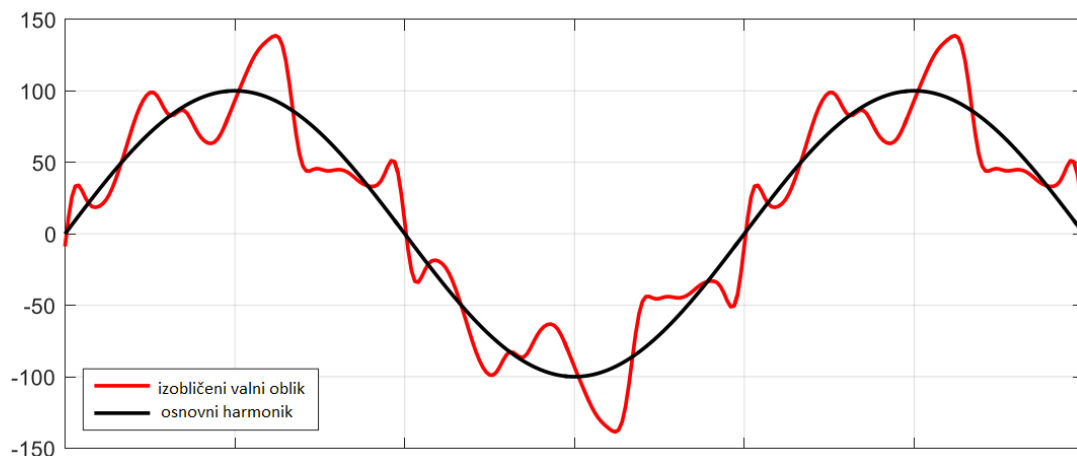
Slika 2.1. Signal s izraženim trećim harmonikom

U nekim slučajevima mogu se pojaviti i valni oblici s frekvencijama koje nisu cjelobrojni višekratnik osnovne frekvencije sustava, a zovemo ih međuharmonici. Međuharmonike obično proizvode statički frekvencijski pretvarači, uređaji s električnim lukom i asinkroni motori. Osim toga, postoje i komponente signala s frekvencijama manjim od osnovne frekvencije koje se zovu subharmonici, dok su supraharmonici harmonici s višim frekvencijama do 150 kHz, [3].

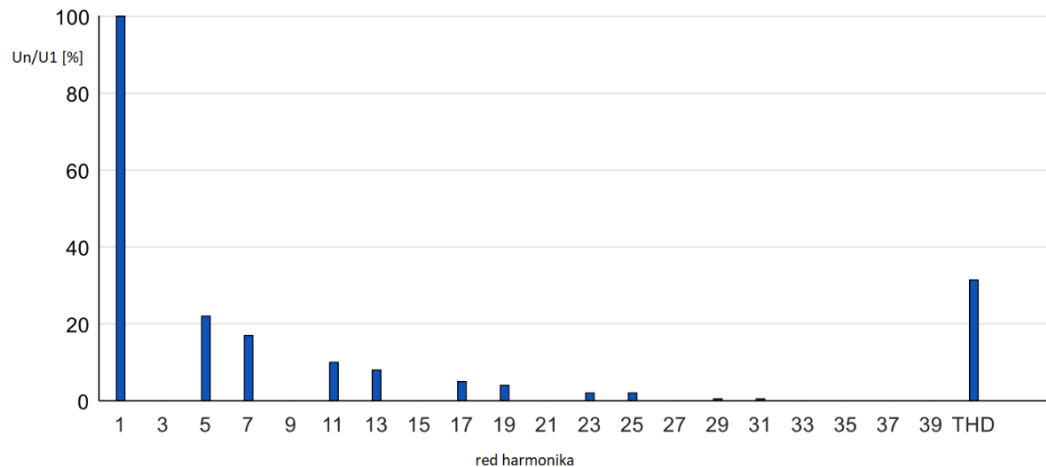
2.1.1 Harmonijsko izobličenje

Svaki izobličeni valni oblik koji se ponavlja u vremenu može se sastaviti od harmonijskih komponenti, odnosno može se raščlaniti na harmonijske komponente. Matematičkom analizom svaki se periodični valni oblik može raščlaniti na sinusnu funkciju na osnovnoj frekvenciji i na niz sinusnih funkcija na harmonijskim frekvencijama. Ovisno o vrsti valnog oblika, ti koeficijenti mogu, ali ne moraju postojati. Francuski matematičar Jean Baptiste Joseph Fourier predstavio je ovu metodu 1822. godine, koja se stoga naziva Fourierova transformacija, [4].

Na primjer, slika 2.2. prikazuje izobličeni signal koji se može rastaviti na temeljni harmonik i nekoliko viših harmonika. Dekompozicija izobličenog valnog oblika sa slike 2.2. može se prikazati pomoću harmonijskog spektra (slika 2.3).



Slika 2.2. Izobličeni valni oblik [5]



Slika 2.3. Harmonijski spektar izobličenog valnog oblika [5]

Općenito, za neku periodičnu funkciju $x(t)$ Fourierov red se definira kao zbroj trigonometrijskih sinusnih i kosinusnih funkcija s osnovnom frekvencijom ($\omega = 2\pi f$) i njezinim cjelobrojnim višekratnicima. Fourierov red funkcije $x(t)$ prikazan je formulom (2-1): [6]

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (2-1)$$

gdje je a_0 istosmjerna komponente, a_n i b_n su koeficijenti niza, n je red harmonika, a $\omega = 2\pi f$ je kutna (osnovna) frekvencija, a f osnovna frekvencija.

a_0 , a_n i b_n računaju se prema sljedećim izrazima:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \omega t \, d\omega t \quad (2-2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \omega t \cos(n\omega t) \, d\omega t \quad (2-3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \omega t \sin(n\omega t) \, d\omega t \quad (2-4)$$

Parni i neparni harmonici odgovaraju parnim i neparnim komponentama Fourierovog reda. Harmonici nultog i prvog reda odgovaraju osnovnoj frekvenciji i istosmjernoj komponenti valnog oblika. Ako je signal simetričan u odnosu na apscisu (vremenska os), spektar tog signala sastoji se isključivo od neparnih harmonika. To je uobičajen slučaj s naponima i strujama elektroenergetskih sustava, [3].

2.1.2 Simetrične komponente

Harmonici u trofaznom sustavu mogu se opisati pomoću metode simetričnih komponenti. Harmonici različitog reda imaju različiti slijed faza. Slijed faza je red rotacije faznih vektora u odnosu na osnovnu frekvenciju. Razlikuju se harmonici direktnog, inverznog i nultog redoslijeda, [4].

Tablica 1. prikazuje redove harmonika i njihov pripadajući slijed faza.

Tablica 2.1 Fazorska rotacija harmonika [4]

Simetrične komponente	Direktni niz	Inverzni niz	Nulti niz
Red harmonika	1	2	3
	4	5	6
	7	8	9
	10	11	12

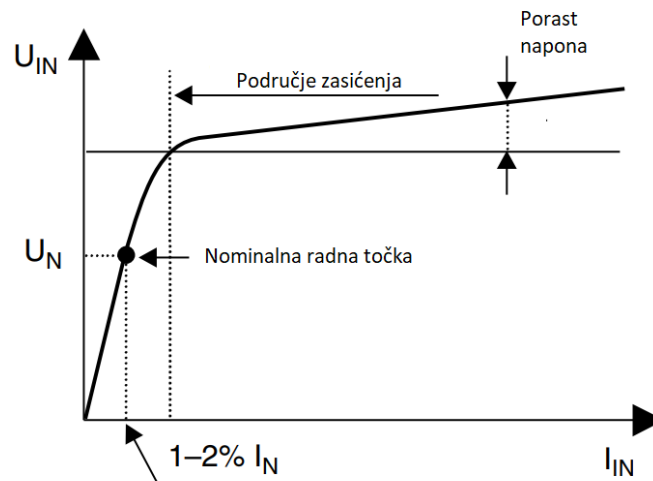
	$3k+1$	$3k+2$	$3k+3$ za $k = 0, 1, 2, 3,$...

- Harmonici direktnog slijeda (1., 4., 7., ...) okreću se u smjeru u kojem se okreće i osnovni harmonik. Ovi harmonici pridonose stvaranju zakretnog momenta motora zato što stvaraju okretno polje koje rotira u istom smjeru u kojem se okreće motor.
- Harmonici inverznog slijeda (2., 5., 8., ...) rotiraju u suprotnom smjeru u odnosu na osnovni harmonik. Ukoliko se kao pozitivni smjer rotacije faza uzme $L1 \rightarrow L2 \rightarrow L3$, harmonici negativnog slijeda okreću se u smjeru $L1 \rightarrow L3 \rightarrow L2$. Ovi harmonici stvaraju moment suprotan nego što je moment motora te na taj način smanjuju okretni moment motora i guraju motor u suprotnom smjeru. Smanjeni zakretni moment prouzrokuje povlačenje veće struje iz mreže što prouzrokuje dodatno zagrijavanje i vibracije motora, [4].
- Harmonici nultog slijeda (3., 6., 9., ...), poznati su još i kao harmonici 3. reda, kruže između faze i nule ili uzemljenja. Ovi harmonici su nepomični i ne stvaraju okretno polje, to znači da se njihova harmonijska energija rasipa kao toplina i uzrokuje zagrijavanje komponenti, [7]. Za razliku od harmonika direktnog i inverznog slijeda, harmonici nultog slijeda ne poništavaju se nego se zbrajaju u neutralnom vodiču trofaznih sustava. Iz tog razloga, u prisutnosti komponenti koje značajno emitiraju takve harmonike, neutralni vodič mora biti predimenzioniran (u usporedbi s faznim vodičima) kako bi podnio veće struje, [8].

2.2 Izvori harmonika

2.2.1 Transformatori

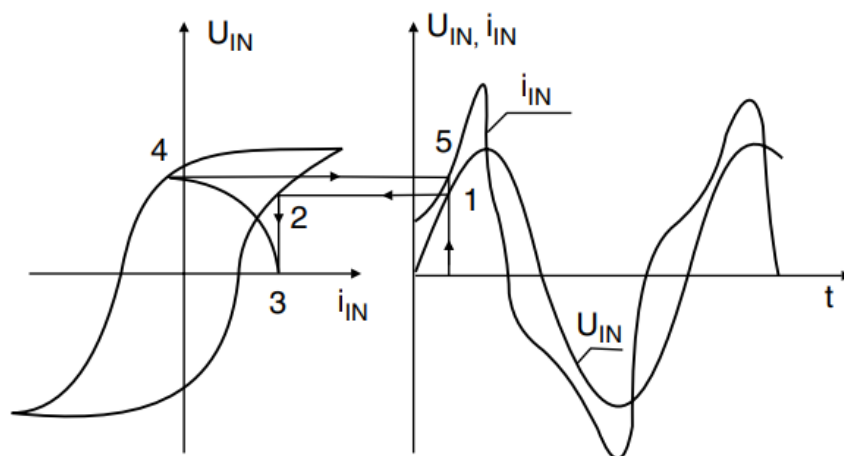
Transformatori su povijesno gledano bili prvi izvori harmonika u elektroenergetskom sustavu. Odnos između primarnog napona i struje prikazan na slici 2.4. poznat je kao krivulja magnetiziranja. Ova krivulja je izrazito nelinearna, a posebno u području zasićenja, [4].



Slika 2.4. Krivulja magnetizacije transformatora [4]

U normalnim radnim uvjetima nazivna radna točka se nalazi ispod koljena krivulje magnetiziranja, unutar linearnog područja gdje će mali porast napona rezultirati malim povećanjem struje magnetiziranja. Iako je struja uzbude transformatora bogata harmonicima pod normalnim radnim uvjetima, transformatori u ovom slučaju nisu značajan izvor harmonika jer su dizajnirani tako da struja magnetiziranja ne prelazi 1-2 % nazivne struje, [4], [9].

Međutim, prilikom zasićenja magnetske jezgre transformatora radna točka se pomiče iznad koljena na krivulji magnetiziranja. U području zasićenja čak će i mali porast napona iznad nazivnog napona uzrokovati veliko povećanje struje magnetiziranja. Također, doći će i do značajnog rasta sadržaja harmonika, posebno trećeg harmonika. Dakle, struja magnetiziranja više nema sinusni valni oblik. Slika 2.5. ilustrira princip generiranja harmonika iz zasićene magnetske jezgre, [4].



Slika 2.5. Princip generiranja harmonika u transformatoru [4]

Uobičajeno je primijetiti značajno povećanje harmonijskog sadržaja u ranim jutarnjim satima kada je opterećenje nisko, a napon visok, [9]. Osim toga, prijelazne pojave prilikom sklapanja kondenzatorskih baterija i velikih reaktivnih opterećenja mogu uzrokovati zasićenje transformatora, [4].

2.2.2 Motori i generatori

Motori, kao i transformatori, mogu biti izvor harmonika jer stvaraju magnetsko polje. Međutim njihov doprinos harmonijskom sadržaju je vrlo mal jer je krivulja magnetiziranja motora mnogo linearnija u odnosu na karakteristiku magnetiziranja transformatora. Korak namota motora također može biti uzrok harmonijskih struja. Tipičan namot motora ima 5-7 utora po polu, što rezultira stvaranjem petog ili sedmog harmonika.

Generatori proizvode harmonike napona vrlo male veličine budući da prostorni raspored namota statora nije praktičan i ekonomičan. Stoga su inducirani naponi blago izobličeni, a obično je treći harmonik dominantan koji će prouzrokovati strujanje trećeg harmonika struje, [4].

2.2.3 Trošila s električnim lukom

U trošila s električnim lukom ubrajamo lučne peći i uređaje za zavarivanje. Lučne peći su nelinearna i vremenski promjenjiva trošila. Tijekom rada opterećenje ovih trošila mijenja se i na dinamički i stohastički način, što dovodi do stvaranja harmonika, međuharmonika i flikera napona i time narušavanja kvalitete električne energije u EES, [10].

Izvor viših harmonika lučnih peći je nelinearna priroda luka. Električni luk se dinamički mijenja tijekom tehnološkog procesa taljenja ili zavarivanja, [11]. Postoje tri karakteristična režima rada elektrolučne peći koje se mogu podijeliti na početnu fazu taljenja, taljenje, rafiniranje zraka i rafiniranje. U početnoj fazi taljenja kada se luk još nije uspostavio očekuju se najviše razine harmonika, dok je u ostalim fazama taj iznos manji i valni oblik struje je bliži sinusu, [10].

Zbog različitih faza rada lučne peći i stohastičkih promjena duljine luka, moguć je širok spektar harmonika do 1 kHz. Harmonijski spektar se sastoji od parnih i neparnih harmonika te je teško odrediti pravilo po kojem se njihove vrijednosti mijenjaju, [5].

2.2.4 Fluorescentna rasvjeta

Fluorescentna rasvjeta energetski je učinkovita rasvjeta koja se koristi kao zamjena za konvencionalne žarulje sa žarnom niti. Karakteristika izvora svjetlosti s izbojem u plinovima, a posebno fluorescentnih cijevi je nelinearnost, koja uzrokuje harmonijsko izobličenje struje. Fluorescentne cijevi generiraju samo spektar neparnih harmonika reda $2k + 1$, a dominantno treći harmonik čiji iznos može biti i do 25% osnovnog harmonika. Struje trećih harmonika zatvaraju se kroz neutralni vodič te dolazi do njegovog preopterećenja, [12].

Pojedinačan utjecaj fluorescentne rasvjete je vrlo mal, međutim kombinirani učinak ove vrste rasvjete može biti jako velik harmonijski izvor štetan za elektroenergetsku mrežu. Harmonička struja koja teče kroz mrežu uzrokovat će izobličenje napona i probleme sa kvalitetom električne energije.

2.2.5 LED žarulje

U posljednje vrijeme LED žarulje postupno su zamijenile tradicionalne žarulje sa žarnom niti, halogene i fluorescentne žarulje. LED rasvjeta danas ima široku primjenu kako za unutarnju rasvjetu tako i za javnu rasvjetu. Glavna prednost korištenja LED žarulja je ušteda energije zbog niske potrošnje električne energije i dobre učinkovitosti. Također, LED žarulje imaju duži životni vijek i manje su osjetljive na poremećaje u mrežnom naponu, [12].

Međutim, LED žarulje sadrže elemente energetske elektronike što ih čini nelinearnim potrošačima koji utječu na kvalitetu električne energije. Primarni problem je injektiranje viših harmonika u distribucijsku elektroenergetsku mrežu. Generiraju širok harmonijski spektar, do 50. reda, s dominantnim trećim harmonikom. Valni oblici struja su vrlo izobličeni tj. imaju visoki koeficijent ukupnog harmonijskog izobličenja – THD (engl. Total Harmonic Distortion), [13]

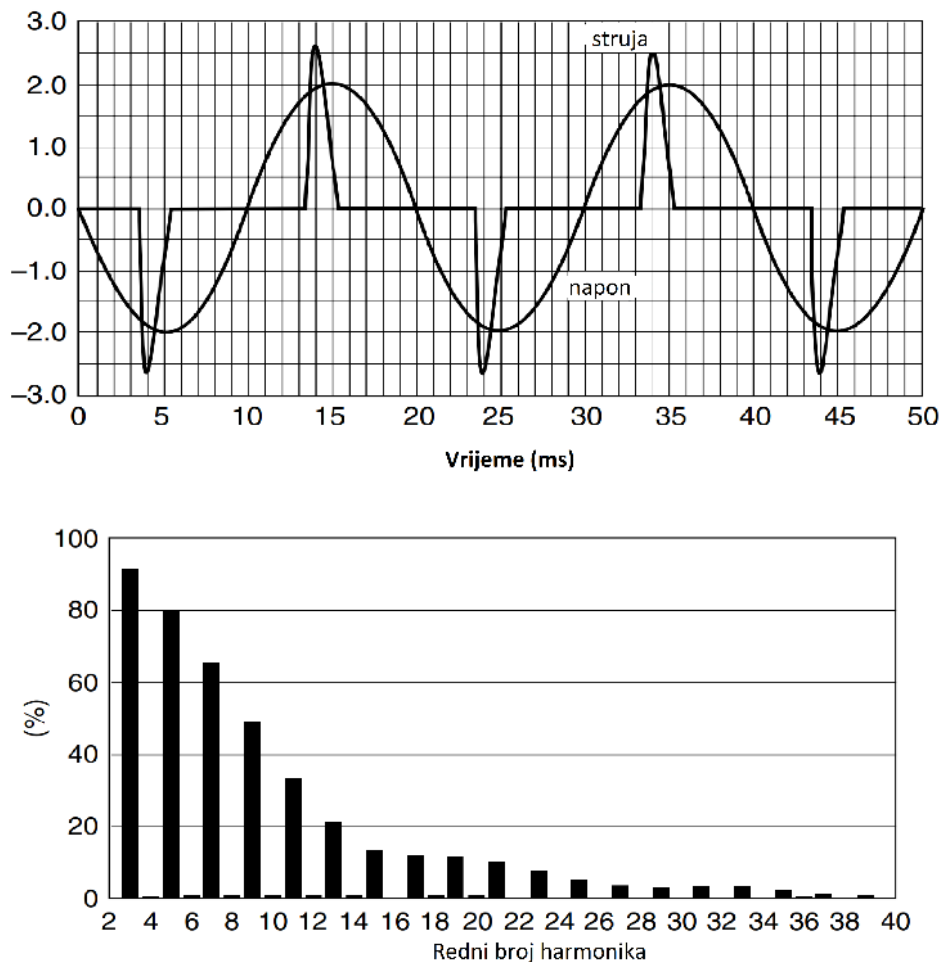
Pojedinačno djelovanje ovih žarulja, zbog male nazivne snage, neće bitno utjecati na kvalitetu električne energije. Međutim, ako se promatra kumulativni efekt rada velikog broja LED žarulja i drugih nelinearnih potrošača na nivou distribucijske mreže, onda je utjecaj na kvalitetu električne energije znatno veći, [13].

2.2.6 Trošila s energetsom elektronikom

Ispravljači su jedan od najčešće korištenih elektroničkih energetske pretvarača i jedan od glavnih izvora viših harmonika. Sklopni način rada ima za posljedicu stalne promjene konfiguracije ispravljača što dovodi do izobličenja valnog oblika struje ispravljača. Protjecanje nesinusoidalne struje kroz mrežu izaziva pad napona na impedanciji mreže i distorziju napona napajanja, [14].

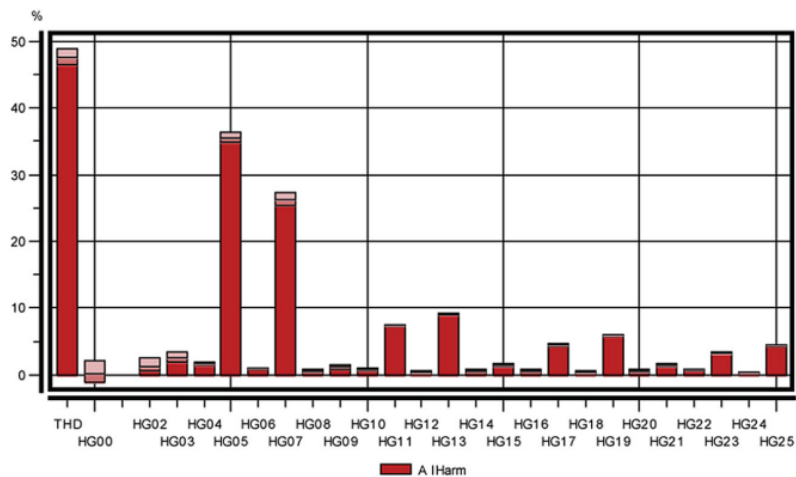
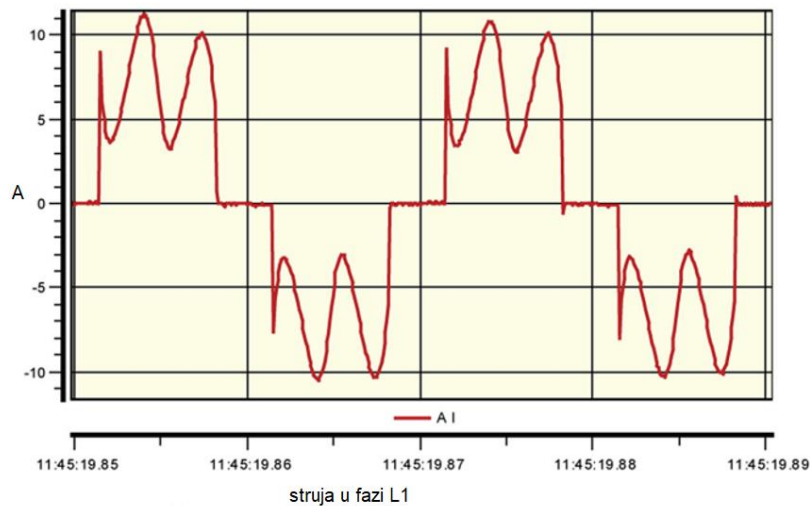
Najveći dio suvremenih elektroničkih uređaja, kao što su osobna računala, pisači i fotokopirni uređaji napajaju se s jednofaznim ispravljačima, [9]. Najčešće se radi o diodnim ispravljačima s kondenzatorom na DC strani ili u novije vrijeme su to pretvarači u sklopnom načinu rada (engl. Switched Mode Power Supplies - SMPS), [14].

Na slici 2.6. prikazan je tipičan valni oblik struje (u odnosu na mrežni napon) i harmonijski spektar struje za slučaj jednofaznog ispravljača. Karakteristično za sklopne izvore napajanja je vrlo visok sadržaj trećeg harmonika, a izraženi su i ostali neparni harmonici (5., 7., 9., itd.), [14].



Slika 2.6. Valni oblik struje (u odnosu na mrežni napon) i harmonijski spektar SMPS-a [4]

Trofazni mosni ispravljač se najčešće koristi u elektromotornim pogonima i to najčešće u reguliranim istosmjernim pogonima, a u novije vrijeme i u izmjeničnim pogonima, kao prvi dio u frekvencijskim pretvaračima, [14]. Trofazni mosni ispravljač poznat je još i kao 6-pulsni ispravljač. Ova vrsta ispravljača generira strujne harmonike reda $6n \pm 1$ (5, 7, 11, 13, 17, 19 itd.) tzv. parove jednog broja manjeg i jednog broja većeg od svakog višekratnika broja 6, [2]. Stoga je prednost trofaznih elektroničkih pretvarača u odnosu na jednofazne uglavnom u tome što ne stvaraju treći harmonik struje koji zauzima najveći udio u ukupnom harmoničnom spektru, [9]. Na slici 2.7. prikazana je trenutna vrijednost i harmonijski spetkar struje koju proizvodi 6-pulsni ispravljača.



Slika 2.7. Struja i harmonijski spektar 6-pulsnog ispravljača [15]

Općenito vrijedi da harmonijski spektar ovisi o broju pulseva p , gdje se redni broj generiranih harmonika može izračunati pomoću relacije (2-5):

$$h = (n * p) \pm 1 \quad (2-5)$$

Gdje je h red harmonika, n cijeli broj ($n = 1, 2, 3, \dots$), a p je broj pulseva.

Kako bi se smanjila harmonijska struja koriste se 12-pulsni ispravljači umjesto 6-pulsnih ispravljača. Oni u većoj mjeri stvaraju 11. i 13. harmonik i gotovo pa poništavaju problematični 5. i 7. harmonik. Prednost 12-pulsnog ispravljača u odnosu na 6-pulsni ispravljač je što smanjena harmonijska struja smanjuje i ukupnu struju pa to rezultira i manjim gubicima I^2R , [15].

2.3 Štetne posljedice harmonika

Harmonici mogu negativno utjecati i na opskrbnu mrežu i na opremu unutar elektroenergetskog sustava. Prema trajanju, učinci harmonika klasificiraju se na kratkoročne i dugotrajne efekte. Kratkotrajni ili trenutni efekti harmonika su kvarovi ili neispravan rad električnih uređaja izloženih visokim harmonicima, dok su dugotrajni efekti toplinske prirode. Harmonici uzrokuju porast temperature u električnoj mreži i opremi. Posljedično, viša temperatura će uzrokovati gubitke, ubrzano starenje i oštećenje opreme, [16].

Harmonici će kod transformatora uzrokovati povećanje gubitaka u željezu i bakru. Gubici u željezu transformatora nastaju zbog gubitaka histereze i gubitaka vrtložnih struja. Gubici histereze rastu proporcionalno s povećanjem frekvencije, dok gubici vrtložnih struja rastu s kvadratom frekvencije, [4]. Povećana efektivna vrijednost struje povećava gubitke u bakru, odnosno Jouleove gubitke (I^2R) što rezultira zagrijavanjem transformatora i naprežanjem izolacije namota transformatora, [7]. Dodatne gubitke također može uzrokovati moguća rezonancija između induktivnosti namota transformatora i kondenzatora koji se koristi za poboljšanje faktora snage u trafostanicama, [16]. Svi ovi gubici rezultiraju višom radnom temperaturom i kraćim životnim vijekom trajanja transformatora, [4].

Osim gubitka, drugi nepovoljan utjecaj vezan je uz harmonike trećeg reda. Obično su transformatori u distribucijskoj mreži realizirani u spoju trokut-zvijezda. Pošto je primarni namot transformatora spojen u trokut, harmonici trećeg reda (3, 9, 15, ...) zatvaraju se u krugu primara i ne mogu se širiti po ostatku mreže, uzrokujući lokalno zagrijavanje transformatora. Poznato je da rezultantna struja kroz neutralni vodič u trofaznom sustavu mora biti jednaka nuli. Ovo pravilo vrijedi samo u slučaju kada su potrošači čisto linearnog karaktera. Međutim, kada se napajaju nelinearna opterećenja, harmonici trećeg reda se ne poništavaju već se zbrajaju u neutralnom vodiču. Visoka vrijednost struje kroz neutralni vodič može dovesti do pregrijavanja transformatora te pregrijavanja i taljenja neutralnog vodiča. Zbog gore opisanih učinaka, potrebno je poduzeti mjere zaštite transformatora. Metode uključuju rasterećenje transformatora ili korištenje posebno projektiranih transformatora za napajanje nelinearnih potrošača koji se zovu „K-factor“ transformatori koji su manje osjetljivi na gubitke izazvane višim strujnim harmonicima, [16]

Harmonici će kod motora i generatora, slično kao i kod transformatora, uzrokovati pojačano zagrijavanje zbog gubitaka u željezu i bakru. Rezultat toga je naprežanje izolacije i kraći životni vijek opreme, [4]. Drugi učinak povezan je s harmonicima inverznog slijeda koji djeluju

suprotno od zakretnog momenta motora pa mogu uzrokovati mehaničke vibracije motora i oštećenje strojeva, [2].

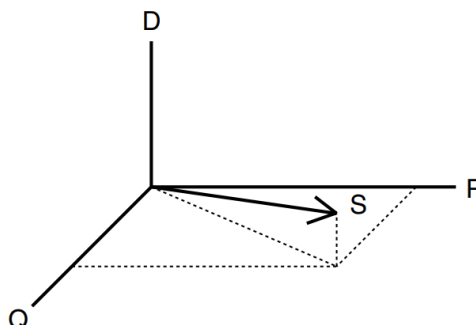
Kondenzatori, koji se koriste za popravak faktora snage, izloženi su naponskim i strujnim preopterećenjima. Povećanje vršne vrijednosti napona zbog viših naponskih harmonika uzrokuje dodatno dielektrično naprezanje i oštećenje kondenzatora. Struje koje teku kroz kondenzator pri harmoničnom izobličenju su mnogo veće od onih bez prisutnih harmonika. Ova visoka vrijednost struje kroz kondenzatorsku bateriju dovodi do dodatnih gubitaka koji rezultiraju ubrzanim starenjem izolacije i kraćim vijekom trajanja ili trajnim oštećenjima. Učinci postaju ozbiljniji ako se povećaju paralelnom ili serijskom rezonancijom, [2].

Ostali učinci harmonika: [4] , [8]

- Skin efekt: pojava nejednolike raspodjele struje po presjeku vodiča - struja teče po vanjskoj površini vodiča. Skin efekt je zanemariv na osnovnoj frekvenciji (50 Hz), tek pri višim frekvencijama (350 Hz - sedmi harmonik i viši) učinak postaje izraženiji, uzrokujući dodatne gubitke i zagrijavanje vodiča, [4].
- Preopterećenje faznih i neutralnih vodiča: harmonijsko izobličenje struje uzrokuje povećanje Jouleovih gubitaka (I^2R) koji se manifestiraju u oblike topline. Osim toga, harmonici trećeg reda zbrajaju se u neutralnom vodiču tako da struja kroz neutralni vodič može dosegnuti vrijednosti i do 170 % vrijednosti fazne struje, [4].
- Smanjeni vijek trajanja komponenti i opreme
- Interferencija s telekomunikacijskim signalima
- Neispravan rad ili kvar IT sustava/opreme, kao što je gubitak podataka
- Oštećenje osjetljive elektroničke opreme
- Treperenje napona (flikeri) fluktuacije u intenzitetu svjetlosti uzrokovano harmonicima napona
- Utjecaj na zaštitne uređaje (lažno okidanje)
- Utjecaj na mjerne instrumente (greške prilikom mjerenja)

Harmonično izobličenje napona i struje promijenit će izraz za ukupnu prividnu snagu i faktor snage. U sinusnim uvjetima odnos između prividne, djelatne i jalove snage opisan je trokutom snage, međutim kada su valni oblici napona i struje nesinusoidalni, taj odnos više ne vrijedi. Zbog prisutnosti viših harmonika u naponu i struji definira se snaga distorzije-izobličenja (D). Prividna snaga se računa prema izrazu (2-6), a slika 2.7. daje prikazuje odnos između snaga u nesinusoidalnim uvjetima.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (2-6)$$



Slika 2.8. Odnos snaga u nesinusoidalnim uvjetima [9]

Faktor snage (engl Power Factor - PF) računa prema izrazu:

$$PF = \frac{\cos\varphi}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (2-7)$$

To znači da će visoke razine harmonijskog izobličenja (veći THDI) smanjiti faktor snage, a ako napon i struja ne sadrže više harmonike onda je $PF = \cos\varphi$, [8].

2.4 Pokazatelji harmonijskog izobličenja

Učinci harmonika mogu se procijeniti korištenjem različitih parametara. Dva najčešća korištena indeksa za mjerenje harmonijskog sadržaja valnog oblika napona i struje su ukupno harmonijsko izobličenje i ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na puno opterećenje, [9].

2.4.1 THD

Ukupno harmonijsko izobličenje ili THD (engl. Total Harmonic Distortion) je najčešće korištena mjera za označavanje harmonijskog sadržaja izobličenog valnog oblika napona ili struje. Definira se kao omjer zbroja efektivnih vrijednosti svih harmonijskih komponenti prisutnih u signalu i efektivne vrijednosti osnovnog harmonika, [3].

Ukupno harmonijsko izobličenje napona (THD_U) se izračunava prema sljedećoj relaciji:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} [\%] \quad (2-8)$$

Gdje je h red harmonika ($h = 1$ osnovni harmonik), U_h je efektivna vrijednost napona harmonika h -tog reda, U_1 je efektivna vrijednost napona osnovnog harmonika.

Ukupno harmonijsko izobličenje struje (THD_I) računa se pomoću izraza:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_1} [\%] \quad (2-9)$$

Gdje je I_h je efektivna vrijednost struje harmonika h -tog reda, a I_1 efektivna vrijednost osnovnog harmonika struje. [6]

THD faktor izražava se u postotcima. Općenito, što je vrijednost viša, izobličenje signala je veće. Dakle, nizak THD pokazatelj je dobre kvalitete napona, [2]. Ograničenje do četrdesetog harmonika je uobičajeno.

Prednosti THD-a su:

- Koristi se za brzo mjerenje harmonijskog izobličenja
- Može se lako izračunati

Nedostaci THD-a su:

- Ne daje informacije o amplitudi
- Gube se detaljne informacije o harmonijskom spektru [3]

2.4.2 TDD

Trenutne razine harmonijskog izobličenja mogu se opisati pomoću THD-a, međutim to često može biti pogrešno u slučaju strujnih harmonika. Mala struja može imati visok THD, ali ne mora predstavljati ozbiljan problem za mrežu. Na primjer, mnogi pogoni s promjenjivom brzinom imaju visoke vrijednosti THD-a za ulaznu struju kada rade pri vrlo malim opterećenjima. To nije nužno ozbiljan problem jer je iznos (amplituda) harmonijske struje niska, iako je njeno strujno izobličenje veliko. Radi izbjegavanja ove pogreške i dobivanja realnije slike često se za analizu koristi ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na puno opterećenje ili TDD (engl. Total Demand Distortion), [9].

TDD se definira kao omjer korijena efektivnih vrijednosti struje svih harmonijskih komponenti (obično do 50. reda) i maksimalne izmjerene struje opterećenja na mjestu priključka.

TDD se dobiva pomoću sljedećeg izraza:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_L} [\%] \quad (2-10)$$

Gdje je: I_h efektivna vrijednost struje harmonika h -tog reda, h je red harmonika, I_L struja vršnog opterećenja na osnovnoj frekvenciji u zajedničkom točki priključka (PCC), [9].

2.5 Norme i pravila elektroenergetskog sustava

Električna energija je roba koja na tržištu ima određenu cijenu i koja kao takva mora imati i određenu kvalitetu. Poželjno je da električna energija koja se isporučuje korisnicima bude konstantne frekvencije, idealnog sinusoidalnog oblika, konstantnog iznosa napona te da su tri faze idealno simetrične. [17] U svijetu se primjenjuju različite norme koje definiraju bitne značajke i dozvoljena odstupanja navedenih parametara kako bi se osigurala zadovoljavajuća kvaliteta električne energije. Razlikujemo sjedeće norme: EN (CENELEC, europske), IEC i IEEE. Norme služe i operatorima sustava i krajnjim potrošačima. Operator sustava odgovoran je za održavanje kvalitete napona na mjestu priključka korisnika mreža unutar određenih granica. S druge strane, korisnik mreže odgovoran je svesti povratna djelovanja svoje opreme na propisane granične vrijednosti, odnosno odgovoran je za iznos izobličenja struje, [18].

2.5.1 EN 50160

Europska norma EN 50160 definira i opisuje bitne karakteristike opskrbnog napona na mjestu predaje električne energije korisniku mreže u javnim niskonaponskim, srednjenaponskim i visokonaponskim mrežama pri normalnim pogonskim uvjetima, [17].

Ovu normu je izradila organizacija CENELEC (engl. European Committee for Electrotechnical Standardization, sjedište je u Bruxelles-u), a službeno je u upotrebi od 1995. godine, [19]. Navedena norma prihvaćena je i kao hrvatska norma pod nazivnom HRN EN 50160:2012/A3:2019 „Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža“. Bitno je napomenuti da ova norma ne vrijedi za vrijeme kvarova i kad se provode mjere privremene opskrbe ili u iznimnim situacijama na koje ne može utjecati isporučitelj električne energije, [19].

Svrha je ove norme utvrditi i opisati obilježja opskrbnog napona glede:

- frekvencije
- iznosa (amplitude)
- valnog oblika
- simetrije napona faznih vodiča, [17].

Parametri koji po EN 50160 karakteriziraju kvalitetu napona su:

- frekvencija
- veličina opskrbnog napona
- treperenja napona (flikeri)
- propadi napona
- prekidi napona
- kratkotrajni prenaponi
- nesimetrija napona
- naponi viših harmonika i
- naponi međuharmonika, [20].

Norma propisuje trajanje mjerenja kvalitete električne energije, dogovorno je da se mjerenja provode tjedan dana, bez prekida. Mjerni periodi, u kojima se promatra pojedini parametar, uglavnom su 10 minutni intervali. EN 50160 propisuje najveća odstupanja pojedinih parametara koji moraju biti zadovoljeni unutar 95 % perioda mjerenja, dok su u ostalih 5 % slučajeva granice parametara šire, ili čak nisu propisane, [20]

Pri normalnim pogonskim uvjetima 95% 10-minutnih srednjih vrijednosti efektivne vrijednosti napona svakog pojedinog višeg harmonika ne smije ni u jednom tjednom intervalu prelaziti vrijednost iz tablice I. [21] U tablici 2.2. navedena su ograničenja do 25. harmonika, a za više harmonike do 40. dane su granične vrijednosti u normi HRN EN 61000-2-2:2008 (Elektromagnetska kompatibilnost (EMC) – Dio 2-2: Okoliš – Razine kompatibilnosti za niskofrekvencijske vođene smetnje i dojavu u javnim niskonaponskim energetske sustavima). Rezonancija kod pojedinih viših harmonika može uzrokovati više napone.

Ukupno harmonijsko izobličenje opskrbnog napona (THD) ne smije prijeći vrijednost 8 %. Vrijednost THD-a se računa tako da se u obzir uzmu svi viši harmonici do 40. reda.

Tablica 2.2. Granične vrijednosti pojedinih harmonika napona prema EN 50160 [17]

Neparni harmonici				Parni harmonici	
Nisu višekratnici od 3		Višekratnici od 3			
Red h	Relativna amplituda Uh	Red h	Relativna amplituda Uh	Red h	Relativna amplituda Uh
5	6,0%	3	5,0%	2	2,0%
7	5,0%	9	1,5%	4	1,0%
11	3,5%	15	0,5%	6 do 24	0,5%
13	3,0%	21	0,6%		
17	2,0%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

2.5.2 IEC 61000

Serijski standard IEC 61000 (ili EN 61000) jedna je od najčešće korištenih standarda za kvalitetu električne energije u Europi, a razvila ju je Međunarodna elektrotehnička komisija (engl. International Electrotechnical Commission - IEC), [3].

IEC 61000-3-2 i IEC 61000-3-4 definiraju razine strujnih harmonika koje trošila mogu proizvesti i injektirati u javnu mrežu. Cilj standarda je ograničiti emisije strujnih harmonika kako bi mrežni napon bio zadovoljavajuće kvalitete. IEC 61000-3-2 je ograničen na uređaje s nazivnom strujom do 16 A po fazi, [15].

Standard IEC 61000-3-2 dijeli uređaje u četiri klase:

- Klasa A: simetrični trofazni uređaji, kućanski uređaji, osim onih koji spadaju u klasu D, alati, osim prijenosnih alata, zvučni uređaji i svi ostali uređaji koji ne spadaju u klase B, C i D
- Klasa B: Prijenosni alati, oprema za lučno zavarivanje
- Klasa C: Rasvjetna oprema
- Klasa D: osobna računala i monitori, televizori, oprema snage od 75 W do 600 W [15]

Svaka klasa ima različite granice za harmonike do 40. reda koje se ne smiju prekoračiti. U tablica 2.3. dane su granične vrijednosti strujnih harmonika za sve pojedine klase uređaja.

Tablica 2.3. Granične vrijednosti strujnih harmonika prema normi IEC 61000-3-2 [3]

Red harmonika h	Granične vrijednosti harmonika struje			
	Klasa A [A]	Klasa B [A]	Klasa C [% od osnovne frekvencije]	Klasa D [mA/W]
2	1,08	1,62	2	-
3	2,30	3,45	30*λ (faktor snage)	3,4
4	0,43	0,65	-	-
5	1,14	2,16	10	1,9
6	0,30	0,45	-	-
7	0,77	1,12	7	1
8	0,23	0,35	-	-
9	0,40	0,60	5	0,5
10	0,18	0,28	-	-
11	0,33	0,50	3	0,35
12	0,15	0,23	-	-
13	0,21	0,32	3	0,296
14-40 (parni)	1,84/h	2,76/h	-	-
15-39 (neparni)	2,25/h	3,338/h	3	3,85/h

2.5.3 IEEE 519

Standard IEEE 519 postavlja ograničenja na naponske i strujne harmonike kako bi se osigurala zadovoljavajuća kvaliteta električne energije u točki zajedničkog priključka (obično sekundar transformatora).

Postoje dva kriterija koja se koriste za ograničavanje harmonijskog izobličenja:

- ograničiti strujne harmonike, koje korisnik mreže može injektirati u elektroenergetski sustav (THD_I)
- ograničiti harmonijsko izobličenje napona u mreži, kojeg elektroenergetski sustav isporučuje korisniku mreže (THD_U) [3]

Tablica 2.4. prikazuje maksimalno dopuštenu vrijednost strujnih harmonika u točki zajedničkog priključka (PCC) za naponski nivo od 2,4 kV do 69 kV. I_{sc} je maksimalna struja kratkog spoja u točki zajedničkog priključka (PCC), a I_L maksimalna struja opterećenja (osnovna frekvencija) u točki zajedničkog priključka (PCC).

Tablica 2.4. Granične vrijednosti strujnih harmonika prema standardu IEEE- 519 [3]

I _{sc} /I _L	Samo neparni harmonici					THDI
	3 ≤ h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h < 50	
<20C	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
10<1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Tablica 2.5. prikazuje ograničenja za harmonijsko izobličenje napona u točki zajedničkog priključka. Ove vrijednosti ovise o naponskom nivou mreže.

Tablica 2.5. Granične vrijednosti naponskih harmonika prema standardu IEEE- 519 [3]

	Napon mreže		
	2,3-69 kV	69-138 kV	>138 k
Maksimalna vrijednost za pojedinačne harmonike	3,0	1,5	1,0
Ukupna harmonijska distorzija (THDU)	5,0	2,5	1,5

3. METODE SNIŽAVANJA VIŠIH HARMONIKA U MREŽI

U prethodnom poglavlju navedeni su negativni učinci viših harmonika na elektroenergetsku mrežu, stoga je vrlo bitno poduzeti mjere za suzbijanje viših harmonika u mreži kada njihov intenzitet prekorači dozvoljene granične vrijednosti.

Za smanjenje ili uklanjanje harmonika postoji nekoliko osnovnih metoda: [14]

1. smanjenje intenziteta harmonijskih struja
2. promjena rezonantne frekvencije sustava
3. ugradnja filtera (pasivni i aktivni)

Svaka metoda ima svoje prednosti i nedostatke, pa nije moguće definirati koja je najbolja. Kako bi se izbjegli veliki troškovi na neprikladno i neučinkovito rješenje, potrebno je provesti početnu analizu problema i odabrati najučinkovitije rješenje, [4].

3.1 Smanjenje intenziteta harmonijskih struja

Metode za smanjenje intenziteta harmonijskih struja podrazumijevaju promjenu načina rada uređaja koji stvaraju harmonike. Ovu metodu je vrlo teško praktično provesti jer utječe na cjelokupan proizvodni proces, a moguće ju je provesti samo prilikom faze projektiranja. Riječ je zapravo o promjeni topologije mreže. Drugi način smanjivanja intenziteta harmonijskih struja je spoj namota transformatora u trokut, čime se blokira tok svih harmonika koji su višekratnici broja 3 dalje u elektroenergetsku mrežu. Da bi se poništili 5. i 7. harmonik potrebno je unijeti fazni pomak od 30 stupnjeva te spojiti sekundar transformatora u zvijezdu i trokut. U ovoj izvedbi transformator ima isti učinak kao 12-pulsni ispravljač, [14].

Cik-cak transformatori se također mogu koristiti za blokiranje harmonika nultog slijeda, a posebno najvećeg trećeg harmonika. Cik-cak transformator djeluje kao filter za struju nultog slijeda, pa će se smanjiti količina struje koja teče u neutralnom vodiču. Da bi bio učinkovit, transformator mora biti smješten u blizini opterećenja koje se štiti, [9].

3.2 Promjena rezonantne frekvencije sustava

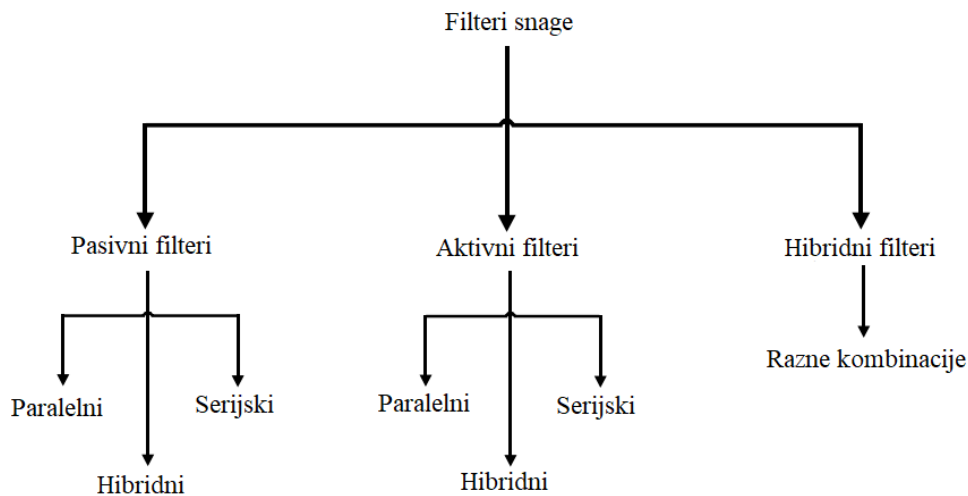
Promjena rezonantne frekvencije sustava je potrebna kad u sustavu ili kod potrošača postoje kondenzatorske baterije za kompenzaciju jalove energije. Problem je što je rezonantna frekvencija kondenzatorskih baterija često blizu frekvencije karakterističnih harmonika. Kako bi se izbjegle neželjene negativne pojave, potrebno je provesti određene mjere. Ovi problemi se najčešće rješavaju promjenom dimenzija kondenzatorske baterije, spajanjem kondenzatorskih baterija na drugu sabirnicu ili njihovo potpuno uklanjanje iz mreže, [14].

Rizik od rezonancije se također izbjegava spojem serijske prigušnice s kompenzacijskim kondenzatorom. Ova mjera smanjit će harmonike na prihvatljivu razinu, [9].

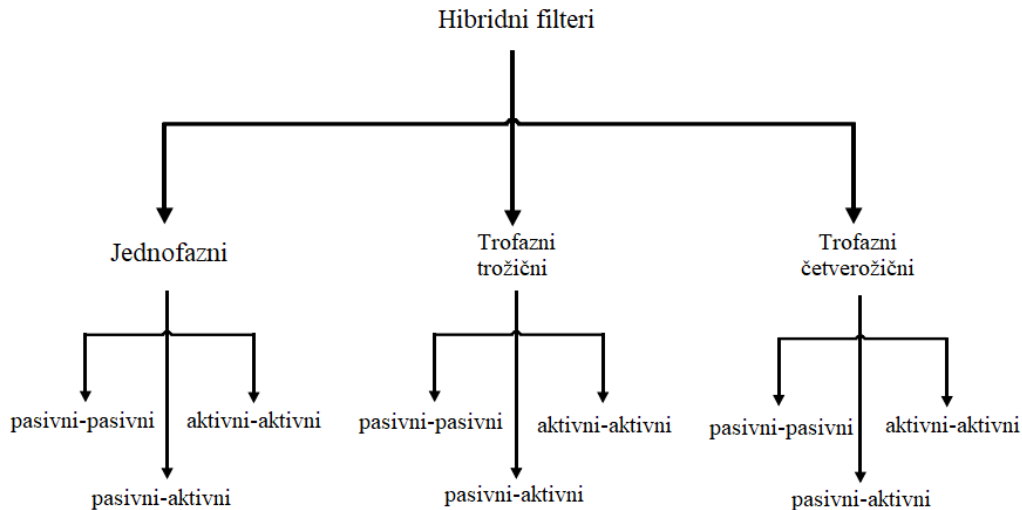
3.3 Ugradnja filtera

Ugradnja filtera predstavlja efikasnu mjeru za smanjenje utjecaja viših harmonika i poboljšanje kvalitete električne energije u mrežama gdje se javljaju visoke razine harmonika. Slika 3.1. prikazuje općenitu podjelu filtera. Postoje pasivni, aktivni i njihova kombinacija tj. hibridni filteri. Pasivni i aktivni filteri se ovisno o topologiji i načinu spajanja na mrežu dijele na serijske i paralelne filtere. Više o pasivnim i aktivnim filterima bit će napisano u potpoglavlju 3.3.1 i 3.3.2.

Hibridni filteri koriste se u jednofaznim, trofaznim trožilnim i trofaznim četverožilnim sustavima (slika 3.2.), a klasificiraju se na: serijsko-paralelni pasivni filter, serijsko-paralelni aktivni filter, paralelni aktivni filter sa serijskim pasivnim filterom i serijski aktivni s paralelnim pasivnim filterom, [22].



Slika 3.1. Podjela filtera snage [22]



Slika 3.2. Podjela hibridnih filtera [22]

Izbor odgovarajućeg filtera ovisi o prirodi opterećenja, vrsti sustava napajanja (jednofazni ili trofazni sustavi), potrebnoj kompenzaciji struje ili napona, potrebnoj razini kompenzacije (THD ili smanjenje pojedinih harmonika), čimbenicima okoliša (temperatura okoline, nadmorska visina, vlažnost), cijeni, veličini i težini filtera te učinkovitosti i pouzdanosti filtera, [22].

3.3.1 Pasivni filter

Pasivni filteri izvedeni su od pasivnih komponentni - prigušnica, kondenzatora ili otpornika koji su podešeni na harmonijsku frekvenciju napona ili struja koju treba eliminirati (npr. 5., 7., 11., 13. itd.), [7]. Pasivni filteri imaju bolje performanse kada su priključeni u blizini nelinearnih opterećenja koja su izvor viših harmonika, [3]. Broj ugrađenih harmonijskih filtera ovisi o broju harmonika koje treba filtrirati, [4].

Pasivni filteri se obično spajaju paralelno s nelinearnim trošilom i podešeni su tako da predstavljaju nisku impedanciju za harmonijsku frekvenciju koja se mora ukloniti, [7]. Zbog starenja, filteri se moraju podesiti na frekvenciju harmonika manju od frekvencije najmanjeg generiranog harmonika. Postoje razne opcije kako bi se trebalo izvesti to podešavanje, najčešće je to na 3 - 15% ispod frekvencije harmonika koji se eliminira, [23].

Serijski pasivni filteri priključeni su serijski na nelinearno trošilo. Filter je dizajniran kao paralelni spoj prigušnice i kondenzatora te podešen na način da predstavlja visoku impedanciju za podešeni harmonik i nisku impedanciju za osnovni harmonik, [9]. Uloga serijskog pasivnog

filtera je da blokira tok harmonika koje stvaraju nelinearna trošila kako se harmonici ne bi širili dalje u mrežu. Serijski pasivni filteri rjeđe se koriste od paralelnih, [23].

Prednosti pasivnih filtera je što smanjenju harmoničko izobličenje i omogućuju kompenzaciju jalove snage, [22]. Jednostavni su i relativno jeftiniji u odnosu na druge metode za snižavanje harmonika. S druge strane, nedostaci su ti što imaju probleme s rezonancijom, učinkovitost filtera ovisi o impedanciji mreže, filtriraju samo odabrani harmonik, teški su i glomazni, [4] ; [22]. Osim toga, u praktičnim primjenama, iznad 13. harmonika, pasivni filteri pokazuju lošije performanse pa se stoga rijetko koriste za eliminiranje harmonika viših redova, [7].

3.3.2 Aktivni filteri

Aktivni filter je sofisticirani uređaj koji se koristi za smanjivanje harmonijskog izobličenja u elektroenergetskoj mreži, [2]. Tijekom posljednjih godina došlo je do povećanja broja uređaja baziranih na energetskej elektronici, koja je izvor harmonijskog izobličenja u mreži. Tradicionalna rješenja za uklanjanje harmonika, kao što je to pasivni filter, postala su neučinkovita, [24]. Aktivni filteri predstavljaju dobru alternativu pasivnim filterima, pogotovo u onim primjenama u kojima se mijenja konfiguracija sustava ili mijenja harmonijski spektar nelinearnih opterećenja, [3]. Uređaj se temelji na poluvodičkim komponentama: IGBT tranzistor (bipolarni tranzistor s izoliranom upravljačkom elektrodom) i DC sabirnica koja služi kao jedinica za pohranu energije, [7]. Aktivni filter radi tako da kontinuirano prati struju ili napon u sustavu i mjeri intenzitet svakog pojedinog višeg harmonika. Kompenzacija harmonijskog izobličenja se vrši tako što filter u mrežu injektira harmonike iste amplitude, ali suprotne faze od harmonika stvorenih od strane nelinearnog opterećenja, [2].

Blok dijagram aktivnog filtera sastoji se od sljedećih elemenata: senzori i transformatori za mjerenje valnih oblika i injektiranje kompenzacijske struje i napona, identifikator izobličenja, invertera, regulatora (obično pulsno širinska modulacija - PWM), sinkronizatora za obradu signala kako bi se kompenzirane veličine sinkronizirale s naponom u sustavu i DC sabirnice za pohranu energije, [3].

Općenito, aktivni filteri mogu se instalirati u bilo kojoj točki u niskonaponskoj mreži i za razliku od pasivnih filtera mogu kompenzirati više od jednog harmonika i eliminirati harmonike do 50. reda. Osim toga, uz primarnu funkciju filtriranja harmonika, mogu se koristiti i za kompenzaciju jalove snage i popravljjanja faktora snage, kompenzaciju treperenja napona te djeluju kao prigušni otpornik kako bi se izbjegla rezonancija u sustavu, [2]. U usporedbi s pasivnim

filterima, aktivni filteri su skuplji i složeniji uređaji, manjih fizičkih dimenzija i učinkovitije rade. Zbog navedenih karakteristika, aktivni filteri predstavljaju najbolji izbor za širok raspon komercijalnih i industrijskih primjena radi poboljšanja kvalitete električne energije, [2] ; [3].

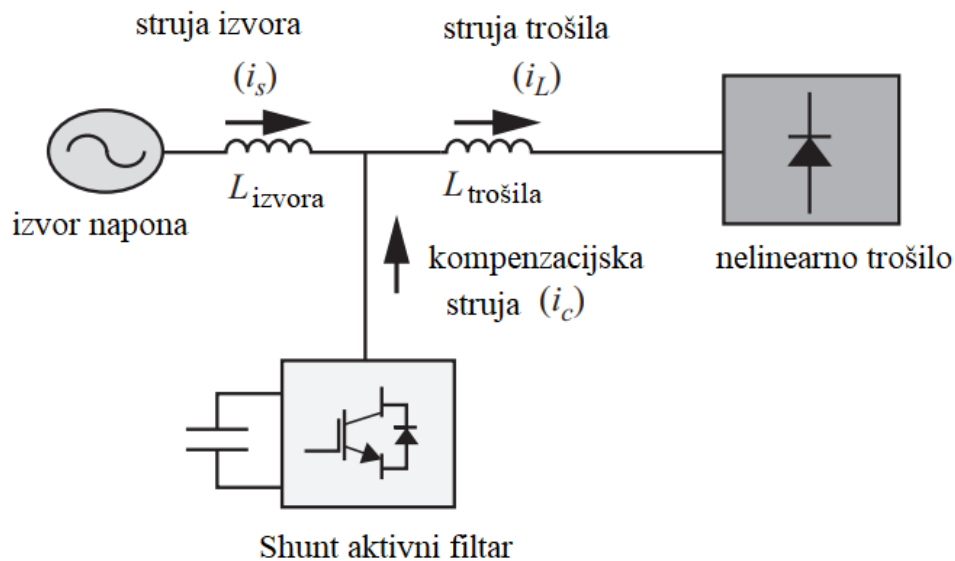
Aktivni filteri se mogu podijeliti na temelju topologije (paralelni ili serijski), nazivne snage i brzine odziva, tipu pretvarača (strujni ili naponski), broju faza (jednofazni i trofazni), vrsti kompenzirane veličine (napon ili struja), strategiji upravljanja i tehnici procjene referentnog signala, [3].

Prema topologiji aktivni filteri se dijele na paralelne i serijske filtere. Paralelni filter u mrežu injektira struju, a serijski napon. Bez obzira na vrstu filtera, generirana struja ili napon dovode do smanjenja viših harmonika u struji i naponu napajanja, [25]. Odabir odgovarajuće topologije ovisi o vrsti izvora harmonika u EES-u i utjecaju koje bi pojedini filter imao na ukupne performanse sustava, [3].

Prema nazivnoj snazi i brzini odziva, aktivne filtere dijelimo na filtere male, srednje i velike snage. Aktivni filteri snage manje od 100 kVA i brzine odziva od 10 μ s do 10 ms obično se koriste u stambenim područjima, malim i srednjim tvornicama, poslovnim zgradama i bolnicama. Filteri male snage se izrađuju za jednofazne i trofazne sustave. Jednofazni aktivni filteri se uglavnom koriste za niske nazivne snage, te stoga mogu raditi na visokim frekvencijama što poboljšava performanse i smanjuje trošak. Primjenjuju se uglavnom u poslovnim i obrazovnim objektima s mnogo računala. Primjena aktivnih filtera nazivne snage od 100 kVA do 10 MVA i brzinom odziva od 100 ms do 1 s, uglavnom je povezana sa sustavima srednjeg do visokog napona gdje je neuravnoteženost faza zanemariva. Zbog ekonomskih razloga i problema povezanih s visokonaponskim sustavima, ovi filteri su dizajnirani za smanjenje harmonika bez mogućnosti kompenzacije jalove snage. Aktivni filteri velike snage primjenjuju se u prijenosnim mrežama i visokonaponskim istosmjernim sustavima (HVDC). Snaga je iznad 10 MVA i brzina odziva je do nekoliko desetaka sekundi. Ovi filteri nisu financijski isplativi. Općenito, u visokonaponskim sustavima nemamo previše problema s kvalitetom električne energije, [3].

3.3.2.1 Paralelni aktivni filteri

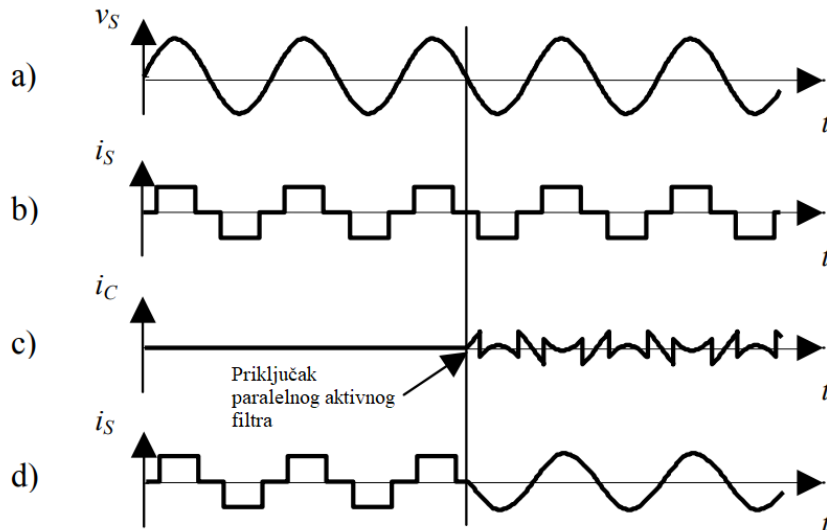
Na slici 3.3. prikazana je načelna shema paralelnog (ili shunt) aktivnog filtera. Ovi uređaji spojeni su paralelno s nelinearnim opterećenjem preko točke zajedničkog priključka (engl. *Point of Common Coupling* – PCC). Shunt aktivni filteri koriste za poboljšanje kvalitete električne energije, smanjenje strujnih harmonika, poboljšanje faktora snage i kompenzaciju jalove snage. Konfiguracija filtera ovisi o pretvaraču (strujni ili naponski), topologiji pretvarača, vrsti linijskog filtera, broju faza i načinu upravljanja, [23].



Slika 3.3. Paralelni aktivni filter [23]

Paralelni aktivni filter radi kao idealni strujni izvor koji kompenzira harmonijske struje koje generira nelinearno trošilo. Regulator filtera mjeri struju koju stvara nelinearno trošilo, te zatim u mrežu injektira struju istog harmonijskog spektra, ali suprotne faze kako bi se uklonile harmonijske komponente u struji nelinearnog trošila. Cilj filtera je dobiti sinusnu struju osnovne frekvencije koja teče iz mreže (i_s), [26].

Princip rada shunt aktivnog filtera prikazan je na slici 3.4. Slika 3.a prikazuje sinusni napon mreže v_s , slika 3.b prikazuje valni oblik struje nelinearnog trošila, a slika 3.c struju koja se injektira u mrežu prije i nakon spajanja paralelnog aktivnog filtera u mrežu. Slika 3.d prikazuje struju izvora.



Slika 3.4. Princip rada paralelnog aktivnog filtera [24]

Općenito, struja nelinearnog trošila i_L može se zapisati kao zbroj osnovnog harmonika ($i_{L,f}$) i viših harmonika struje ($i_{L,h}$) prema: [26]

$$i_L = i_{L,f} + i_{L,h} \quad (3-1)$$

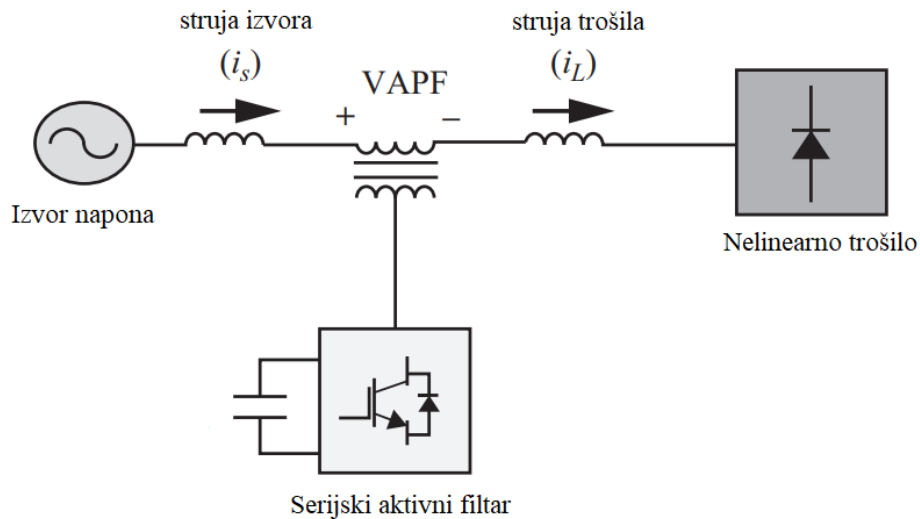
Injektirana kompenzacijska struja filtera jednaka je sumi viših harmonika struje trošila: $i_c = i_{L,h}$

Struja mreže se definira kao razlika struje trošila i struje filtera. Dodavanjem filtera u sustav osigurala se sinusna struja mreže bez viših harmonika:

$$i_s = i_L - i_f = i_{L,f} \quad (3-2)$$

3.3.2.2 Serijski aktivni filteri

Serijski aktivni filter spojen je s izvorom napajanja i trošilom izravno ili pomoću priključnog transformatora, kao što je prikazano na slici 3.5. Serijski aktivni filteri obično se koriste za kompenzaciju napona. Neke od primjena uključuju uklanjanje naponskih harmonika, kompenzacija propada, padova i previsokih napona, regulaciju napona u trofaznim sustavima i prigušenje širenja harmonika uzrokovanih rezonancijom, [23].



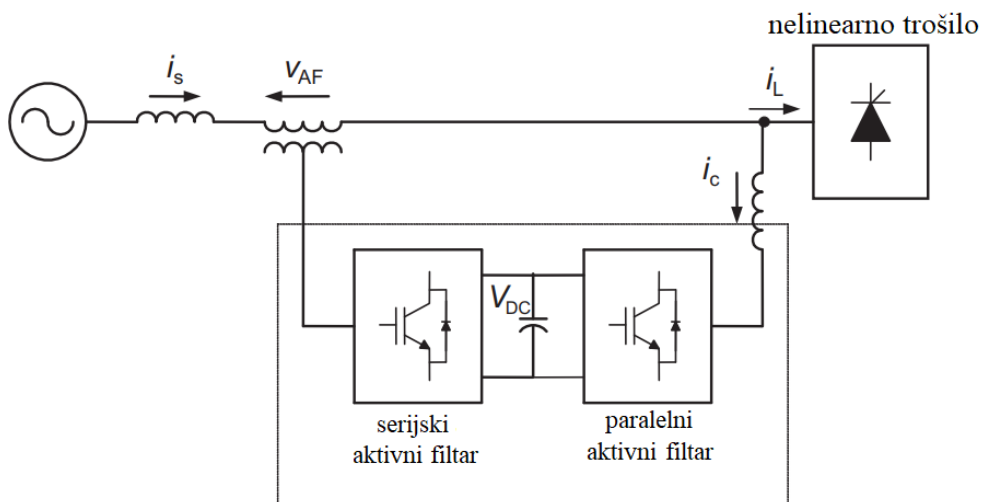
Slika 3.5. Serijski aktivni filter [23]

Princip rada serijskog aktivnog filtera temelji se na harmonijskoj izolaciji između izvora napajanja i nelinearnog opterećenja. To se postiže injektiranjem naponskih harmonika odgovarajuće frekvencije i amplitude preko priključnog transformatora. Ubrizgani naponski harmonici se zbrajaju/oduzimaju s naponom izvora napajanja kako bi se osigurao čisti sinusni valni oblik napona na nelinearnom trošilu. Upravlja se na način da filter predstavlja nultu impedanciju za osnovnu komponentu, dok se za komponente harmonijskih frekvencija ponaša kao otpornik visoke impedancije. To znači da nikakvi strujni harmonici ne mogu teći od nelinearnog opterećenja do izvora, i obrnuto, [26]. Stoga se serijski filteri mogu zamisliti kao izolatori harmonika, a ne kao generatori harmonika.

Glavna prednost serijskih aktivnih filtera u odnosu na paralelne filtere je da su vrlo učinkoviti za uklanjanje naponskih harmonika, trošilima osiguravaju čisti sinusni napon, što je posebno važno za uređaje osjetljive na promjene napona kao što su uređaji za zaštitu elektroenergetskog sustava, [26].

3.3.2.3 UPQC aktivni filteri

Slika 3.6. prikazuje kombinaciju paralelnog i serijskog aktivnog filtera, poznatu pod nazivom Unified Power Quality Conditioner ili skraćeno UPQC, [27]. Ova konfiguracija objedinjuje prednosti obje vrste aktivnih filtera. Dakle, omogućuje istovremeno postizanje sinusne struje i napona. Uloga serijskog aktivnog filtera je ukloniti naponske harmonike, dok je uloga paralelnog aktivnog filtera ukloniti više strujne harmonike, [28]. Glavni nedostatak ove konfiguracije je relativno visoka cijena i kompleksan način upravljanja, [27].

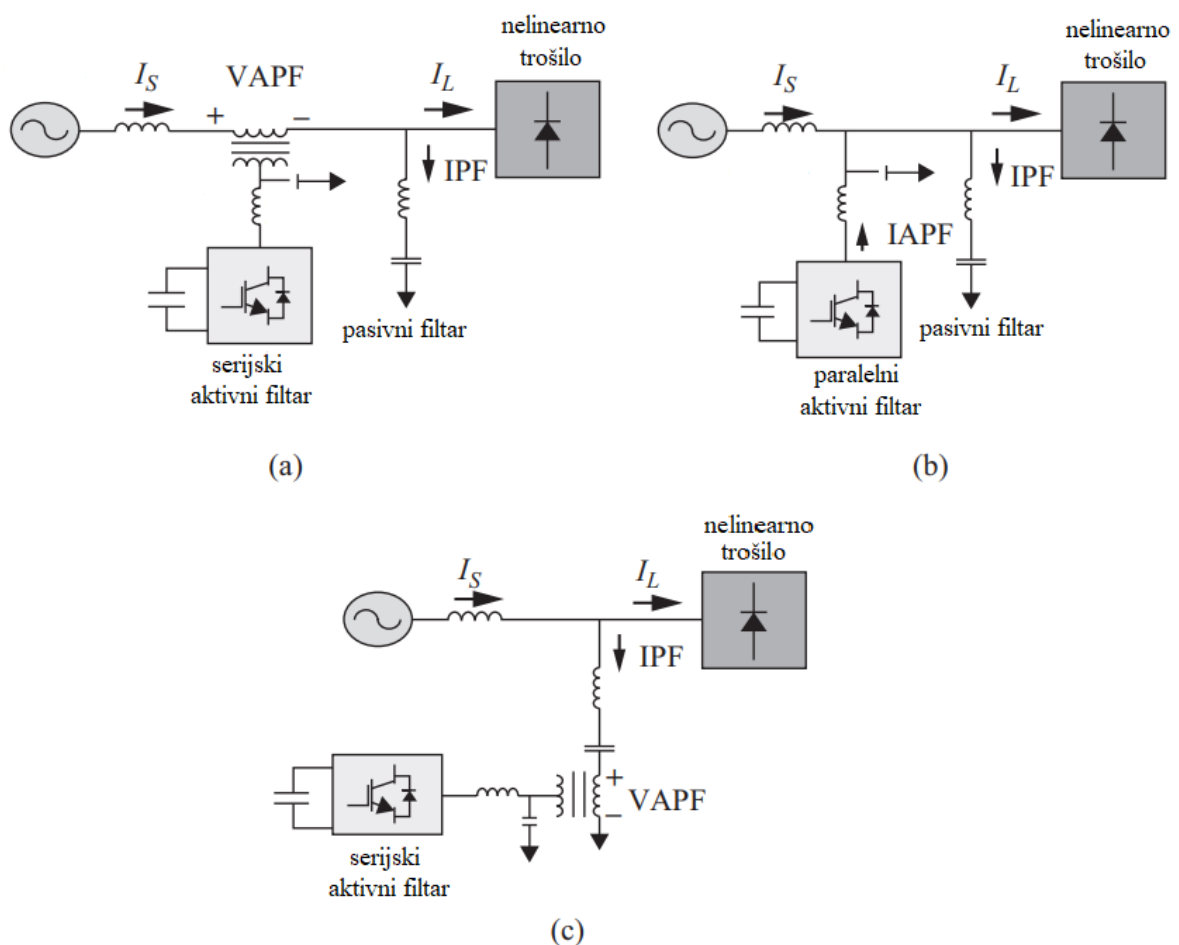


Slika 3.6. Shema UPQC filtera [27]

3.3.2.4 Hibridni aktivni filteri

Hibridni aktivni filteri predstavljaju kombinaciju aktivnih filtera (serijski/paralelni) i pasivnih filtera. Ovi uređaji objedinjuju prednosti pasivnih i aktivnih filtera te nude bolje performanse u kompenzaciji harmonika od konvencionalnih aktivnih filtera uz manje troškove, [23]. Također prednost hibridnih aktivnih filtera je što se mogu koristiti s postojećim pasivnim filterima i predstavljaju alternativu za paralelne ili serijske aktivne filtere koji se koriste samostalno, [27]. Aktivni filter koristi za uklanjanje harmonika nižeg reda, dok se jeftiniji pasivni filter koristi za uklanjanje viših harmonika, [26].

Slika 3.7. prikazuje tri različite konfiguracije hibridnih aktivnih filtera.



Slika 3.7. Hibridni filteri: (a) serijski aktivni filter s paralelnim pasivnim filterom, (b) paralelni aktivni filter s paralelnim pasivnim filterom, (c) serijski aktivni filter u seriji s paralelnim pasivnim filterom [23]

4. RUKOVANJE AKTIVNIM FILETROM SNAGE PQFS

Aktivni filter harmonika i generator harmonika, za koje će u ovom poglavlju biti opisano rukovanje, instalirani su na trećem katu zgrade Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Oprema je nabavljena sredstvima Hrvatske zaklade za znanost (HRZZ) u sklopu projekta „Distribucijska elektroenergetska mreža s velikim udjelom aktivnih kupaca – ProPowerNet“ sredstvima.

4.1 Opis opreme

Filterski sustav čine dva jednaka uređaja koja su programirana na način da jedan od njih radi kao generator harmonika, a drugi kao aktivni filter. Oba uređaja su montirana na zid i postavljena jedan do drugog (slika 4.1.).

Generator harmonika, kao što i sam naziv sugerira, generira strujne harmonike u mrežu. Harmonici se unose i podešavaju proizvoljno prema potrebama korisnika. Npr., to mogu biti podatci dobiveni stvarnim mjerenjem kvalitete električne energije kako bi se simuliralo stanje u mreži. Uloga aktivnog filtera je da prati i održava ispravno stanje u mreži. Filteri to rade uklanjanjem viših harmonika injektiranjem odgovarajuće struje u mrežu.



Slika 4.1. Aktivni filter (lijevo) i generator harmonika (desno)

Natpisna pločica postavljena je u gornjem desnom kutu na vratima svake jedinice, s vanjske strane kućišta (slika 4.2.). Informacije na natpisnoj pločici moraju uvijek biti čitljive kako bi se osigurala ispravna identifikacija tijekom životnog vijeka filtera. Nazivna pločica filtera sadrži informacije o tipu filtera, rasponu nazivnog napona i frekvencije, nazivnoj struji, serijski broj i ABB-ov interni kod proizvoda te mjesto proizvodnje.



Slika 4.2. Natpisna pločica

Aktivni filter uklanja sve više harmonike, od 2. do 50. reda u apsolutnom iznosu od 60 A. U trofaznom sustavu u četverožilnoj izvedbi filter može eliminirati 15 harmonika istovremeno, po fazama i u neutralnom vodiču. Nasuprot tome, u trožilnoj izvedbi, kada nije spojen neutralni vodič, filter može filtrirati do 20 harmonika. Pritom je moguće ručno podesiti stupanj filtriranja za svaki pojedini harmonik. Učinkovitost filtriranja je oko 97%. Uz glavnu funkciju filtriranja viših harmonika u mreži, aktivni filter ima i mogućnost kompenzacije jalove snage. Dodatno, aktivni filter može smanjiti nesimetrično opterećenje među fazama, [29].

Tijekom rada ovi uređaji vrlo su bučni. Razina buke ovisi o uvjetima rada i o snazi filtera, pa o tome treba voditi računa prilikom odabira mjesta postavljanja filtera.

Svaka jedinica u filterskom sustavu mora nadzirati mrežnu struju kako bi se utvrdio intenzitet harmonijskog opterećenja. U tu svrhu koriste se strujni mjernih transformatori (SMT). Na slici 4.3. vidimo da postoje tri strujna mjerna transformatora povezana na generator harmonika i tri strujna mjerna transformatora za aktivni filter. Strujni transformatori moraju biti spojeni uzvodno od priključne točke filtera i opterećenja. Za pravilan rad sustava preporuka je koristiti SMT istih karakteristika: klasa točnosti 1 ili bolje, sekundarna nazivna struja od 5 A itd., [29].



Slika 4.3. Strujni mjerni transformatori

Više o opremi i uputama za instalaciju može se pročitati u ABB-ovom priručniku iz literature [29].

4.2 O korisničkom sučelju

Sva interakcija korisnika s filterom ostvaruje se kroz PQF-Manager, odnosno korisničko sučelje kojeg čini zaslon osjetljiv na dodir. Sve korisničke radnje, poput prelaska iz jednog izbornika u drugi ili unosa podataka, obavljaju se izravno dodirivanjem tipki ili ikona na zaslonu. Po ekranu se može tipkati prstom ili nekim drugim tupim predmetom (npr. olovka) . Preporuka je zaslon ne dodirivati oštrim predmetima koji bi mogli oštetiti njegovu površinu.

PQF-Manager ima sljedeće funkcije:


- pokretanje i zaustavljanje filtera
- obavijest o pogrešci
- mjerenje i analiza izmjerenih veličina
- podešavanje filtra
- nadzor opterećenja filtra, bilježenje događaja i statusa pojedinačnih jedinica
- osigurava informacije o identifikaciji filtera

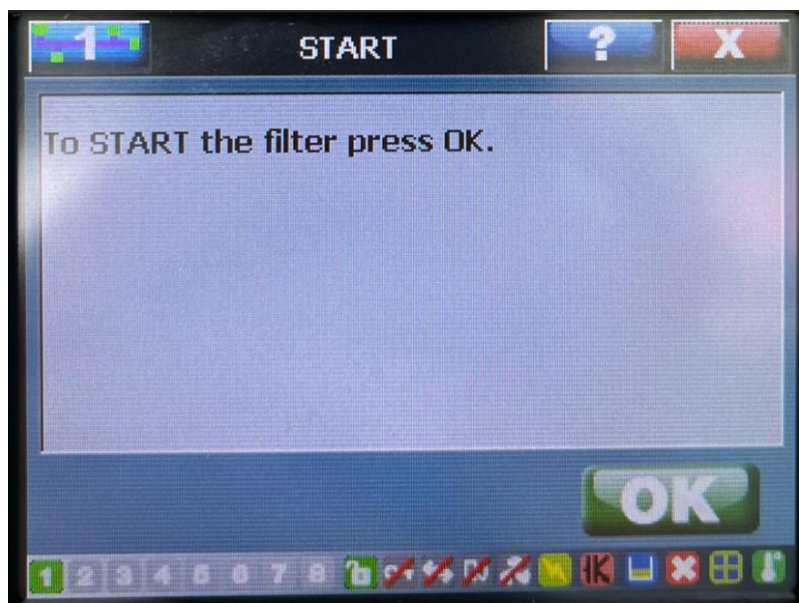
Na slici 4.4. prikazan je početni zaslon korisničkog sučelja (PQF-Manager).




Slika 4.4. PQF-Manager – početni zaslon [29]


Filter se pali pritiskom na tipku „PQF START“  koja se nalazi na početnom zaslonu.


Filter će tražiti potvrdu. Sada treba pritisnuti tipku  (slika 4.5.). Nakon pritiska na ovaj gumb uvijek postoji vrijeme provjere valjanosti.





Slika 4.5. Pokretanje filtera

Nakon što filter proradi, indikator „PQF START“ mijenja se u indikator „PQF STOP“ . Napomena: aktivni filter se treba pokrenuti tek kada je instaliran i pušten u rad u skladu s uputama opisanim u literaturi [29]. Svako nepridržavanje ovih smjernica može oštetiti filter i poništiti jamstvo.

Ako se želi zaustaviti rad filtera, potrebno se vratiti na početni zaslon korisničkog sučelja te označiti tipku „PQF STOP“ . Nakon potvrde, pritiskom na gumb „OK“, filter se će zaustaviti. Glavni prekidač će se otvoriti te se indikator „PQF STOP“ mijenja u indikator „PQF START“.

Za izlazak iz bilo kojeg prozora potrebno je koristiti gumb  dostupan na svakom zaslonu u gornjem desnom kutu. Za povratak na početni zaslon potrebno je više puta pritisnuti taj gumb sve dok se ne dođe do početnog zaslona.

U svim izbornicima prisutan je simbol pomoć . Klikom na ovaj gumb i gumb za koji korisnik traži pomoć, otvorit će se prozor s kratkim opisom gumba za koji je korisnik zatražio pomoć.

U slučaju greške, filter će se zaustaviti i signalizirati grešku na zaslonu pomoću ikone „ACK. FAULT“ (engl. *acknowledge fault*) . Problem je potrebno ispraviti prije pokretanja filtera.

Dvije su moguće posljedice pojave greške koje rezultiraju potpunim gašenjem sustava filtera:

- Ako je greška trajna (npr. trajni podnapon u mreži zbog gubitka faze), pogreška se ne može otkloniti i poruka „ACK. FAULT“ će ostati na zaslonu. U tom slučaju, uzrok problema mora se identificirati i ukloniti prije ponovnog pokretanja filtera.
- Ako greška više nije prisutna kada se prikaže poruka „ACK. FAULT“, izbornik će se promijeniti u „PQF START“ što ukazuje da se filter može ponovno pokrenuti.

U sustavu s više jedinica, poruka greške „ACK.FAULT“ pojavit će se samo kada se cijeli sustav filtera isključi. Ako se jedna od jedinica u sustavu s više jedinica isključi zbog pogreške, ta se greška može potvrditi i resetirati u izborniku PQF Monitoring [/Welcome/PQF Monitoring/Status of module]. U procesu resetiranja cijeli sustav će se isključiti. Ako se greška ne može resetirati, ponovno će se prikazati poruka „ACK. FAULT“ za odgovarajuću jedinicu. Sustav filtera može se ponovno pokrenuti i jedinice koje su na raspolaganju će raditi normalno, [29]

Analiza kvarova može se izvršiti u izborniku „PQF Monitoring“ prikazanog na slici 4.6. S početnog zaslona izborniku se pristupa putem [/Welcome/PQF Monitoring].



Slika 4.6. PQF Monitoring [29]

Ovaj izbornik ima nekoliko podizbornika u kojima se može pratiti opterećenje filtera, pregled njegove radne točke u usporedbi s nazivnom snagom filtera. Osim toga, zabilježeni su svi događaji, mrežni uvjeti i status pojedinačnih jedinica u sustavu s više filtera.

4.3 Upute za podešavanje harmonika

Korisnik podešava postavke rada filtera prema svojim potrebama u izborniku „Customer Settings“. Ovom izborniku se pristupa putem [/Welcome/Settings/Customer set.] (slika 4.7.).

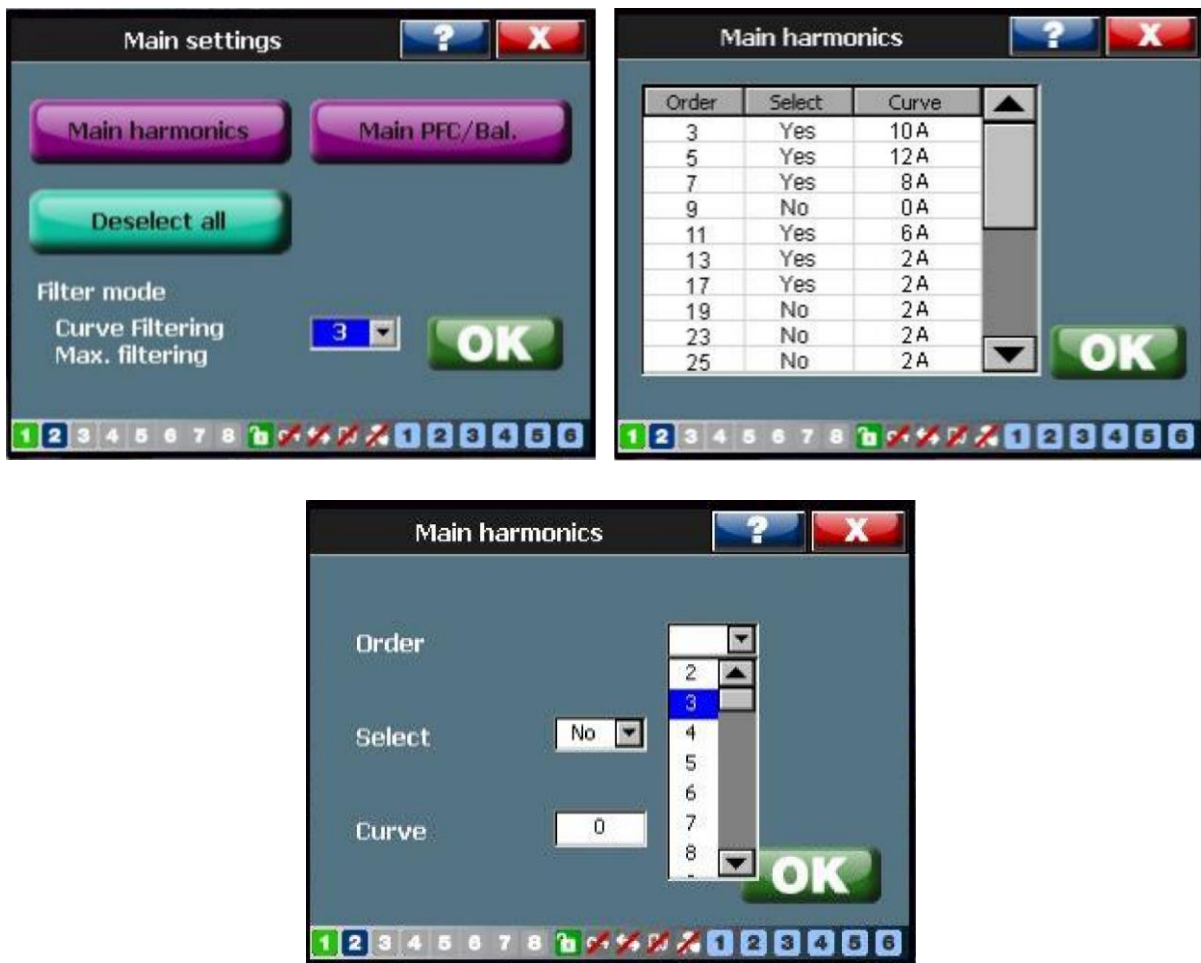


Slika 4.7. Izbornik Settings i podizbornik Customer settings [29]

Zatim se odabire opcija „Main settings“. U ovom prozoru se podešavaju postavke filtracije harmonika i kompenzacija jalove snage, odabire se način rada filtera te postoji opcija deselekcije svih harmonika. Iste ove opcije podešavanja dostupne su i u pomoćnom prozoru kojem se pristupa klikom na [/Welcome/Settings/Customer set./Aux. settings]. Zbog postojanja dva prozora, korisnik može postaviti dva različita skupa postavki, npr. jedan set postavki za glavni rad i drugi za rad generatora, ili jedan set postavki za dan, a drugi za noć.

U glavnom prozoru filtera harmonici se podešavaju klikom na: [/Welcome/Settings/Customer set./Main settings/Main harmonics]. Za podešavanje harmonika u pomoćnom prozoru filtera idite na: [/Welcome/Settings/Customer set./Auxiliary settings/Aux. harmonics]. Postupak u oba prozora je isti.

Nakon otvaranja prozora „Main harmonics“ otvorit će tablica harmonika. Odabirom bilo kojeg reda otvara se novi prozor s dva padajuća izbornika (jedan za odabir reda harmonika i drugi za odabir filtriranja tog harmonika) i treći izbornik za unos vrijednosti struje. Na slici 4.8. prikazani su pojedini prozori koji će se otvoriti na ekranu.




Slika 4.8. Podešavanje harmonika [29]

Stupac „Order“ predstavlja red harmonika. Ovdje su navedeni svi harmonici od 2. do 49. reda. Korisnik odabire redove harmonika koje želi na popisu, a oni harmonici koji se već nalaze na popisu su „zasivljeni“. Nakon odabira novog harmonijskog reda, tablica se automatski sortira uzlaznim redoslijedom. Da bi se uklonio bilo koji harmonijski red s popisa, potrebno je kliknuti na taj red, a zatim iz padajućeg izbornika zamijeniti taj harmonik s harmonikom po izboru.

Zatim, korisnik mora odabrati one harmonike koje filter mora uzeti u obzir prilikom filtriranja. Ovaj postupak se odvija klikom na određene harmonike i odabirom opcija „Yes“ ili „No“ iz padajućeg izbornika. „Yes“ znači da je harmonik označen i da se filtrira, a „No“ da se harmonik neće filtrirati.

Vrijednost struje se podešava klikom na prozor za unos podataka „Curve“. Nakon što se dodirne prozor, pojavljuje se numerička tablica koja omogućuje korisniku postavljanje željene vrijednosti struje (u amperima) koju će filter injektirati u mrežu. Postoje određena ograničenja jer se vrijednosti zaokružuju na najbliži cijeli broj, što znači da decimalne vrijednosti brojeva nisu podržane.

Nakon što se podese svi željeni harmonici, iz tablice se izlazi pritiskom na ikonu  u gornjem desnom kutu prozora.

Opcija „Deselect all“ omogućava korisniku da brzo odznači sve harmonike koji bi se trebali filtrirati. U glavnom prozoru, svi harmonici se deselektiraju klikom na [/Welcome/Settings/Customer set./Main settings/Deselect all]. Slično, svi harmonici u pomoćnom prozoru se odznačavaju klikom na [/Welcome/Settings/Customer set./Auxiliary settings/Deselect all].

Zatim je potrebno odabrati način rada filtera (slika 4.9.). Postoje tri moguća načina rada:

- Mode 1 – U prvom načinu rada filter prvo filtrira odabrane harmonike dok njihove veličine ne dosegnu razinu definiranu od strane korisnika (prioritet je filtriranje prema krivulji). Nakon što se ovaj zahtjev ispuni, izvršit će se tzv. maksimalno filtriranje, filtriraju se odabrani harmonici na vrijednost što bliže nuli. Ako su dostupni daljnji resursi, prema potrebi će se izvršiti i kompenzacija jalove snage.
- Mode 2 – U drugom načinu rada, drugi prioritet nakon filtriranja prema krivulji je kompenzacija jalove snage. Maksimalno filtriranje je na trećem mjestu prioriteta.
- Mode 3 – U trećem načinu rada, filter će prvo filtrirati prema zadanoj krivulji. Ako tada još ima dostupnih resursa, filter će izvršiti kompenzaciju jalove snage i balansiranje opterećenja.



Slika 4.9. Mode rada filtera [29]

Osim toga, filter mora biti obaviješten o tome koristili li postavke glavnog ili postavke pomoćnog prozora. To se radi pomoću funkcije „Activate“. Ovoj funkciji se pristupa preko [/Welcome/Settings/Userset/Activate]. Prozor koji se tada otvara prikazan je na slici 4.10.. Ako korisnik u ovom izborniku odabere „Main“, tj. glavni, onda će filter raditi prema podacima koje je korisnik naveo u postavkama „Main Settings“. Isto vrijedi ako se odabere „Auxiliary“. Ako se odabere „Ext. Input“, mijenja se rad filtera na temelju odabira „Digital Input“ [/Welcome/Setting/Customer Setting/Digital Inputs] koje je odabrao korisnik.



Slika 4.10. Opcija Activate [29]

Osim navedenih postavki, izbornik „Settings“ u podizborniku „Commissioning“ ovlaštenim osobama omogućuje postavljanje mrežnih parametara, karakteristike filtera, broj jedinica u sustavu. Nadalje, mogu se podesiti i parametri strujnih transformatora i faktor smanjenja koji je potrebno primijeniti kada je uređaj instaliran na velikoj nadmorskoj visini ili u uvjetima visoke temperature okoline.

U podizborniku „Installation settings“ podešavaju se napredne funkcije sustava, kao što su: automatsko ponovno pokretanje i stanje pripravnosti. Osim toga, ovdje se mijenjaju postavke datuma i sata, te se postavlja lozinka za zaključavanje sustava i podešava vanjska komunikacija.

U podizborniku „Set language“ podešava se jezik „PQF Manager-a“. Podržano je šest jezika: engleski, njemački, španjolski, francuski, kineski i korejski, dok je zadana postavka engleski jezik.

4.4 Pregled izmjerenih veličina

Nakon što je podešeno filtriranje harmonika, potrebno je analizirati spektar linijskih struja kako bi se provjerilo da li je odabrani harmonik ispravno filtriran. Općenito, da bi se provjerila mjerenja koja je izvršio filter, treba otići na prikaz rezultata mjerenja [/Welcome/Measurements].

Unutar izbornika “Measurements” postoje tri podizbornika prikazanih na slici 4.11.



Slika 4.11. Izbornik Measurements [29]

Podizbornik “Overview” (slika 4.12.) prikazuje popis mjerenih parametara iskazanih kao numeričke vrijednosti. Neki od tih parametara su: efektivna vrijednost napona i struje, THD napona i struje, frekvencija, nesimetrija napona, efektivna vrijednost napona i struje na osnovnoj frekvenciji, djelatna, jalova i prividna snaga, faktor snage, temperatura IGBT-a.

The image shows a software interface window titled "Overview". At the top, there is a header bar with a small icon on the left, the title "Overview" in the center, and a question mark icon and a red "X" icon on the right. Below the header, there are four tabs: "Overview", "Voltages", "Currents", and "Powers/Temp". The "Overview" tab is selected. Below the tabs, there is a table with three columns: "Measurements", "System values", and "Unit". The table contains the following data:

Measurements	System values	Unit
Vrms (L1-L2)	414.0	V
Vrms (L2-L3)	415.0	V
Vrms (L3-L1)	416.0	V
THDV (L1-L2)	3.2	%
THDV (L2-L3)	3.3	%
THDV (L3-L1)	3.4	%
V1 (L1-L2)	413.8	V
V1 (L2-L3)	414.6	V
V1 (L3-L1)	415.4	V
Frequency	50	Hz

At the bottom of the window, there is a toolbar with various icons, including a green "1" button, a blue "2" button, and several other numbered buttons (3-8) in different colors, along with some red and blue icons.

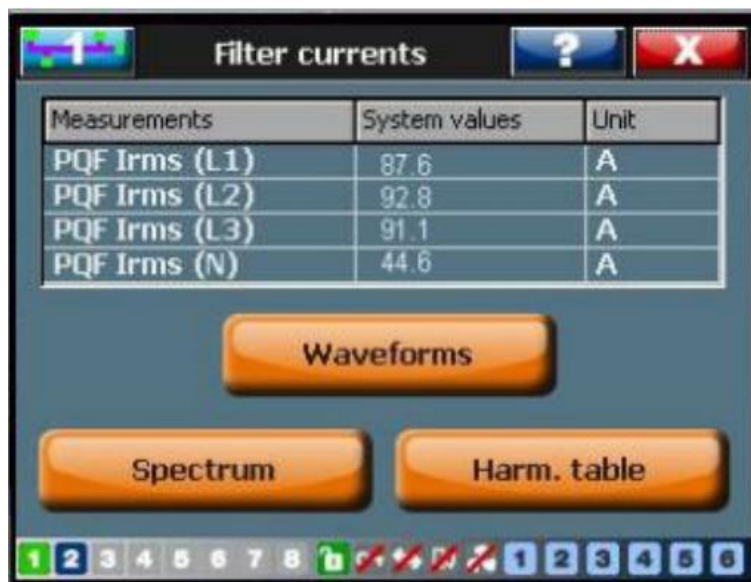
Slika 4.12. Podizbornik Overview [29]

U izborniku „System values“ (slika 4.13.) dane su pojedinosti o sljedećim parametrima: napon, linijska struja, struja filtera, snaga, temperatura. Svaka se veličina može prikazati u različitom formatu: brojčana vrijednosti, valni oblik u vremenskoj domeni, spektar ili popis harmonika.



Slika 4.13. Podizbornik System values [29]

Npr. za pregled filterskih struja treba otići na [/Welcome/Measurements/System Values/Filter currents]. Nakon što se otvori prozor sa slike 4.14., potrebno je odabrati format u kojem se želi prikazati željena struja. Prozor „Waveforms“ prikazat će struje filtera po fazama. Opcija „Spectrum“ prikazuje harmonijski spektar struje filtera. Harmonici se također mogu prikazati i tablično pod opcijom „Harmonic table“.



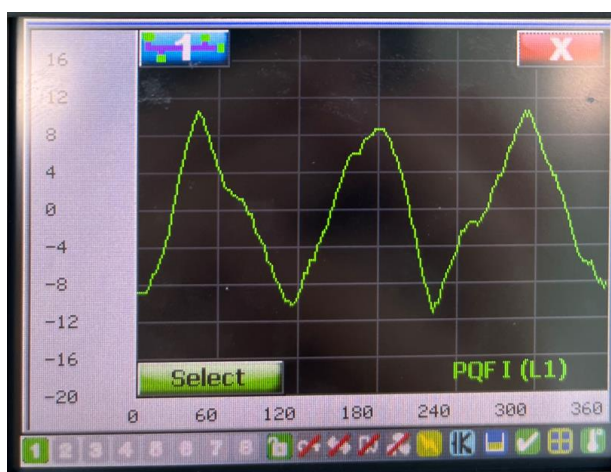
Slika 4.14. Podizbornik Filter currents [29]

4.5 Eksperimentalna provjera učinkovitosti aktivnog filtera u mreži

Eksperimentalna provjera učinkovitosti filtriranja aktivnog filtera u mreži provedena je na način da se u mrežu preko generatora harmonika injektira treći strujni harmonik. Zatim se aktivnim filterom pokušalo povećane vrijednosti harmonika u sustavu svesti na zadovoljavajuće razine. Paralelno se promatra i utjecaj strujnih harmonika na naponski THD. Na temelju dobivenih rezultat prikazana je učinkovitost aktivnog filtera pri slabljenju strujnih harmonika u mreži.

Prozoru u kojem se podešavaju harmonici, prema uputama opisanim u potpoglavlju 4.3, pristupamo na: [/Welcome/Settings/Custom settings/Main Settings/Main harmonics]. Označen je treći harmonik i podešen na vrijednost od 7 A. Način rada („Filter mode“) postavljen je na 3.

U ovom trenutku generator harmonika injektira treći harmonik prema podešenim vrijednostima, a aktivni filter još ne radi, budući da nismo označili niti jedan harmonik koji se treba filtrirati. Struja koju generator harmonika ukucava u mrežu, prikazana je na slici 4.15. Harmonijski sadržaj ove struje dan je u tablici 4.1.



Slika 4.15. Struja generatora harmonika u fazi L1

Tablica 4.1. Harmonijski sadržaj generatorske struje

	Red harmonika								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
L1	0,60 A	0,07 A	5,89 A	0,03 A	0,72 A	0,02 A	1,20 A	0,02 A	0,47 A
L2	0,86 A	0,11 A	5,79 A	0,06 A	0,68 A	0,02 A	1,01 A	0,02 A	0,46 A
L3	0,67 A	0,09 A	5,75 A	0,08 A	0,91 A	0,02 A	0,97 A	0,01 A	0,50 A

Filter mjeri parametre mreže. Iz harmonijskog spektra linijske struje [/Welcome/Measurements /System values /Line currents/] očitane su vrijednosti harmonika po fazama (tablica 4.2.). Uz dominantni treći harmonik, struja sadrži uglavnom još peti i sedmi harmonik.

Tablica 4.2. Vrijednost harmonika linijske struje bez filtracije

	Red harmonika								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
L1	9,5 A	0,06 A	5,65 A	0,09 A	1,21 A	0,06 A	2,28 A	0,03 A	0,55 A
L2	9,8 A	0,03 A	5,46 A	0,07 A	1,52 A	0,03 A	1,81 A	0,02 A	0,54 A
L3	11,5 A	0,25 A	5,84 A	0,03 A	1,24 A	0,08 A	1,91 A	0,04 A	0,8 A

U idućem se koraku u postavkama aktivnog filtera [/Welcome/Settings/Custom settings/Main Settings/Main harmonics] podesila vrijednost struje trećeg harmonika na 1 A. Filter sada, u sve tri faze u mreži, ubacuje struju (slika 4.16.) čiji je harmonijski sadržaj prikazan u tablici 4.3.



Slika 4.16. Filterska struja u fazi L1

Tablica 4.3. Harmonijski sadržaj filterske struje

	Red harmonika								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
L1	0,75 A	0,09 A	4,65 A	0,01 A	2,57 A	0,01 A	0,05 A	0,01 A	0,3 A
L2	0,58 A	0,13 A	4,70 A	0,01 A	2,68 A	0,03 A	0,12 A	0,02 A	0,33 A
L3	0,54 A	0,11 A	4,57 A	0,04 A	2,62 A	0,02 A	0,13 A	0,03 A	0,27 A

Ova struja ublažit će utjecaj trećeg harmonika u mreži. Npr. ako se promatra faza L1, onda će se vrijednost trećeg harmonika smanjiti sa 5,65 A na 1,51 A. Harmonijski sadržaj linijske struje prikazan je u tablici 4.4..

Tablica 4.4. Harmonijski sadržaj linijske struje (1 A)

		Red harmonika								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
L1		9,5 A	0,17 A	1,51 A	0,06 A	2,93 A	0,06 A	1,44 A	0,03 A	0,64 A
L2		9,96 A	0,12 A	1,51 A	0,06 A	3,05 A	0,04 A	1,24 A	0,02 A	0,63 A
L3		9,86 A	0,14 A	1,45 A	0,12 A	2,20 A	0,04 A	1,76 A	0,06 A	0,98 A

Ako se sada u aktivnom filtru podese vrijednost struje trećeg harmonika na 2 A, opet će doći do promjene stanja u mreži. U ovom slučaju treći strujni harmonik mrežnoj struji se smanjio na oko 2,3 A (tablica 4.5.), ali se strujni THD u svim fazama povećao na vrijednosti: L1:43,36%, L2: 39,65%, L3:37,91%.

Tablica 4.5. Harmonijski sadržaj linijske struje (2 A)

		Red harmonika								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
L1		9,42 A	0,11 A	2,52 A	0,06 A	2,40 A	0,06 A	1,58 A	0,02 A	0,55 A
L2		9,87 A	0,11 A	2,20 A	0,01 A	2,52 A	0,04 A	1,32 A	0,04 A	0,51 A
L3		10,1 A	0,08 A	2,37 A	0,04 A	1,95 A	0,05 A	1,41 A	0,05 A	0,82 A

5. ZAKLJUČAK

Pitanje kvalitete električne energije postaje sve važnija tema i nameće se kako opskrbljivačima električne energije tako i krajnjim potrošačima. Jedan od glavnih uzročnika problema s kvalitetom napajanja su nelinearna trošila koja čine velik broj potrošača u elektroenergetskoj mreži. Nelinearna trošila su, između ostaloga, odgovorna za pojavu viših harmonika u mreži. Ova trošila proizvode strujne harmonike koji na impedanciji mreže uzrokuju harmonično izobličenje napona. Loša kvaliteta električne energije uzrokovana višim strujnim i naponskim harmonicima uzrokuje brojne probleme poput: smanjenje učinkovitosti sustava, povećani gubitak u sustavu, smanjen faktor snage, lošija kvaliteta napajanja, pregrijavanje i oštećenje opreme, poteškoće u proradi zaštitnih elementa, itd. Lošija kvaliteta napajanja kod potrošača može uzrokovati kvarove i smanjiti vijek trajanja uređaja. Uslijed daljnjeg tehnološkog razvoja i povećane potražnje za električnom energijom, izgledno je za očekivati da će se broj nelinearnih trošila u mreži povećavati, a time i problemi koje stvaraju. Ograničenja za strujne i naponske harmonike definirana su u normama, standardima i mrežnim pravilima.

Najčešće rješenje za ublažavanje utjecaja viših harmonika je primjena pasivnih i aktivnih filtera. Danas su se aktivni filteri pokazali kao učinkovito rješenje za suzbijanje štetnog djelovanja harmonika u mreži. Aktivni filteri su uređaji koji nadziru stanje u mreži i u nju utiskuju strujne harmonike po iznosu iste, ali po kutu suprotne od povišenih harmonika u mreži kako bi se smanjili upravo ti harmonici. Aktivni filter neće uspjeti svesti razine viših harmonika na nulu, ali to nije ni cilj. Zadaća aktivnog filtera je da ublaži i održava vrijednost harmonika unutar dozvoljenih ograničenja koja su propisana normama. Maksimalno smanjenje harmonika može se postići simulacijama u programskim paketima (npr. DIgSilent PowerFactory) gdje vladaju idealni uvjeti i moguće je unijeti točan iznos i fazni kut struje harmonika koji se želi poništiti. Međutim u realnoj mreži, koja se konstantno mijenja, to nije slučaj. Osim glavne zadaće filtriranja viših harmonika, današnji aktivni filteri dizajnirani su i za kompenzaciju jalove snage i poboljšanje faktora snage.

LITERATURA

- [1] “D. Galzina, Harmonici u visokonaponskoj mreži, HEP – operator prijenosnog sustava.”
- [2] “2014 Six tough topics about harmonic distortion and Power Quality indices in electric power systems A white paper of the Schaffner Group Written by Alexander Kamenka,” 2014. [Online]. Available: <http://www.schaffner.com>
- [3] M. A. S. Masoum and E. F. Fuchs, *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*. Elsevier, 2015. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128007822000014>
- [4] A. Baghini, Ed., *Handbook of Power Quality*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2008. doi: 10.1002/9780470754245.
- [5] “C. Hribernik, Oberschwingungsanalyse in einem Industrienetz, Graz, 2021.”
- [6] Y. Wang, “Yuge Wang: „Harmonic Analysis in Power Distribution Networks“, Departmen of Electrical and Electronic Engineering, School of Engineering, 2020.”
- [7] “Siemens, Whitepaper (2013). Harmonics in Power Systems – Causes, Effects and Control.”
- [8] R. Pinyol, “Harmonics: Causes, effects and minimization,” Aug. 2015.
- [9] R. C. , et al. Dugan, “Electrical Power Systems Quality, Second Edition,” McGraw-Hill, New York, 2002.
- [10] T. Teklić, “Metoda proračuna širenja flikera uzrokovanih priključkom elektrolučne peći na elektroenergetsku mrežu.” [Online]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:082165>
- [11] Z. Olczykowski, “Arc Voltage Distortion as a Source of Higher Harmonics Generated by Electric Arc Furnaces,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 10, p. 3628, May 2022, doi: 10.3390/en15103628.
- [12] “A. Tokić, M. Kasumović, D. Bago, V. Milardić, B. Filipović-Grčić, Led sijalice kao izvori viših harmonika, CIRED BH, Mostar, 2018.”
- [13] S. Jović, M. Ikić, M. Banjanin, and G. Vuković, “Uticaj CFL i LED rasvjetnih tijela na kvalitet električne energije.”

- [14] “V. Katić, A. Tokić, T. Konjić, ‘Kvalitet električne energije’, knjiga u sklopu EU Tempus projekta.”
- [15] “Front Matter,” in *Power Quality in Modern Power Systems*, Elsevier, 2021, p. iii. doi: 10.1016/b978-0-12-823346-7.01001-x.
- [16] D. Stevanović, “Harmonici u elektroenergetskom sistemu-praktični problemi i rešenja,” 2013.
- [17] “Barukčić, Dražen; Pavić, Ante; Periša, Ivan; Lasić, Mate Osvrt na novo izdanje norme EN50160 iz 2010. godine // Treće savjetovanje Hrvatskog ogranka Međunarodne elektrodistribucijske konferencije / HO CIRED / Zdenko Tonković (ur.). Zagreb: Hrvatski ogranak Međunarodne elektrodistribucijske konferencije, 2012. (predavanje, domaća recenzija, cjeloviti rad (in extenso), stručni).”
- [18] “Tomasović, Ana; Lasić, Mate; Nekić, Slaven; Veža, Marijan; Šimić, Jandro Negativno povratno djelovanje nelinearnih trošila na kvalitetu napona // Prvo savjetovanje Hrvatskog ogranka Međunarodne elektrodistribucijske konferencije, Šibenik, 18.-21.05.2008., HO CIRED / Zdenko Tonković (ur.). Zagreb: Hrvatskog ogranak Međunarodne elektrodistribucijske konferencije, 2008. (predavanje, domaća recenzija, cjeloviti rad (in extenso), stručni).”
- [19] I. Ramljak, “Power quality according to EN 50160,” 2013. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/256693111>
- [20] “Razdjelne mreže i distribuirana proizvodnja, Održavanje naponskih prilika u razdjelnim mrežama, FER, materijali s predavanja.”
- [21] “Klaić, Zvonimir; Nikolovski, Srete Kvaliteta električne energije : mjerenja prema normi EN 50160 // 6.savjetovanje HK cigre Zagreb: HK cigre, 2003. str. C4-14 (predavanje, nije recenziran, cjeloviti rad (in extenso), stručni).”
- [22] S. Mikkili and A. K. Panda, *Power Quality Issues*. CRC Press, 2018. doi: 10.1201/9781315222479.
- [23] A. F. Zobaa and S. H. E Abdel Aleem, “IET ENERGY ENGINEERING SERIES 92 Power Quality in Future Electrical Power Systems.”
- [24] A. Moreno-Muñoz, Ed., *Power Quality*. London: Springer London, 2007. doi: 10.1007/978-1-84628-772-5.

- [25] M. Maciązek, D. Grabowski, and M. Pasko, “Active power filters - Optimization of sizing and placement,” *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, vol. 61, no. 4, pp. 847–853, 2013, doi: 10.2478/bpasts-2013-0091.
- [26] Z. Salam, T. Perng Cheng, and A. Jusoh, “Review of active power filter technologies.”
- [27] S. Jain, “Control Strategies of Shunt Active Power Filter,” in *Modeling and Control of Power Electronics Converter System for Power Quality Improvements*, Elsevier, 2018, pp. 31–84. doi: 10.1016/B978-0-12-814568-5.00002-8.
- [28] P. S. Revuelta, J. P. Thomas, and S. P. Litrán, *Active Power Line Conditioners : Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality*.
- [29] “Power Quality Filter PQFS Installation, operation and maintenance instructions.”

Popis slika

Slika 2.1. Signal s izraženim trećim harmonikom	3
Slika 2.2. Izobličeni valni oblik [5].....	4
Slika 2.3. Harmonijski spektar izobličenog valnog oblika [5].....	5
Slika 2.4. Krivulja magnetizacije transformatora [4]	7
Slika 2.5. Princip generiranja harmonika u transformatoru [4].....	8
Slika 2.6. Valni oblik struje (u odnosu na mrežni napon) i harmonijski spektar SMPS-a [4].	11
Slika 2.7. Struja i harmonijski spektar 6-pulsnog ispravljača [15]	12
Slika 2.8. Odnos snaga u nesinusoidalnim uvjetima [9]	15
Slika 3.1. Podjela filtera snage [22]	23
Slika 3.2. Podjela hibridnih filtera [22].....	24
Slika 3.3. Paralelni aktivni filter [23]	27
Slika 3.4. Princip rada paralelnog aktivnog filtera [24]	28
Slika 3.5. Serijski aktivni filter [23]	29
Slika 3.6. Shema UPQC filtera [27]	30
Slika 3.7. Hibridni filetri: (a) serijski aktivni filter s paralelnim pasivnim filterom, (b) paralelni aktivni filter s paralelnim pasivnim filterom, (c) serijski aktivni filter u seriji s paralelnim pasivnim filterom [23].....	31
Slika 4.1. Aktivni filter (lijevo) i generator harmonika (desno).....	32
Slika 4.2. Natpisna pločica	33
Slika 4.3. Strujni mjerni transformatori	34
Slika 4.4. PQF-Manager – početni zaslon [29]	35
Slika 4.5. Pokretanje filtera	36
Slika 4.6. PQF Monitoring [29]	37
Slika 4.7. Izbornik Settings i podizbornik Customer settings [29]	38
Slika 4.8. Podešavanje harmonika [29]	39
Slika 4.9. Mode rada filtera [29]	40
Slika 4.10. Opcija Activate [29].....	41
Slika 4.11. Izbornik Measurements [29]	42
Slika 4.12. Podizbornik Overview [29].....	42
Slika 4.13. Podizbornik System values [29]	43
Slika 4.14. Podizbornik Filter currents [29].....	43
Slika 4.15. Struja generatora harmonika u fazi L1	44

Slika 4.16. Filterska struja u fazi L1	45
--	----

Popis tablica

Tablica 2.1 Fazorska rotacija harmonika [4]	6
Tablica 2.2. Granične vrijednosti pojedinih harmonika napona prema EN 50160 [17]	19
Tablica 2.3. Granične vrijednosti strujnih harmonika prema normi IEC 61000-3-2 [3].....	20
Tablica 2.4. Granične vrijednosti strujnih harmonika prema standardu IEEE- 519 [3].....	21
Tablica 2.5. Granične vrijednosti naponskih harmonika prema standardu IEEE- 519 [3]	21
Tablica 4.1. Harmonijski sadržaj generatorske struje	44
Tablica 4.2. Vrijednost harmonika linijske struje bez filtracije	45
Tablica 4.3. Harmonijski sadržaj filterske struje.....	45
Tablica 4.4. Harmonijski sadržaj linijske struje (1 A)	46
Tablica 4.5. Harmonijski sadržaj linijske struje (2 A)	46

SAŽETAK

Ovaj diplomski rad govori o problematici pojave naponskih i strujnih harmonika u distribucijskoj mreži, kao i o metodama za ublažavanje njihovog utjecaja na mrežu i kvalitetu električne energije. Prvotno je definiran pojam harmonika i nelinearnih trošila, objašnjeno je harmonijsko izobličenje signala matematičkom analizom te je dana podjela i opis harmonika u trofaznom sustavu. Osim toga predstavljeni su najvažniji izvori strujnih i naponskih harmonika, a potom i utjecaj harmonika na elektroenergetsku mrežu i uređaje. Također, definirani su i pokazatelji harmonijskog izobličenja, a bilo je nužno i predstaviti norme kvalitete električne energije koje propisuju udio viših harmonika napona i struje u distribucijskoj mreži. Nadalje, navedena i objašnjena su neka od postojećih rješenja za snižavanje utjecaja viših harmonika, s naglaskom na ugradnji aktivnih filtera. Opisan je princip rada paralelnih, serijskih, UPQC i hibridnih aktivnih filtera. Na kraju, opisana je sama oprema i dane su upute za rukovanje aktivnim filterom. Prikazan je primjer unosa harmonika u generator harmonika i aktivni filter, te na temelju izmjerenih veličina, analiziran povratni utjecaj filtera na mrežu. Donesen je zaključak o utjecaju harmonika na mrežu i učinkovitosti aktivnog filtera na snižavanje iznosa viših harmonika u distribucijskoj mreži.

Ključne riječi: harmonici, nelinearna trošila, distribucijska mreža, aktivni filter, generator harmonika

ABSTRACT

This master's thesis deals with the issue of voltage and current harmonics that occur in distribution networks, as well as the methods to mitigate their impact on the power grid and power quality. First, the definitions of harmonics and nonlinear loads are defined, the harmonic signal distortion is explained by mathematical analysis, and the description of harmonics in a three-phase system is given. Furthermore, the most important sources of current and voltage harmonics are presented and the impact of harmonics on the power grid and equipment is described. Besides that, harmonic distortion indicators were defined, as well as power quality standards that specify the content of higher voltage and current harmonics in distribution networks. In addition, some solutions for harmonic effects minimization are listed and explained, focusing on the installation of active power filters. The working principle of shunt, series, UPQC, and hybrid active power filters is described. Finally, the device description and operating instructions of active power filter are given. An example of harmonic input into the harmonic generator and active filter is shown. The effect active power filter have on distribution networks is analyzed based on the measured values. The conclusion gives an insight about the influence harmonics have on the distribution network and the effect of active power filters have in reducing harmonic distortion.

Key words: harmonics, nonlinear loads, distribution network, active filter, harmonic generator

ŽIVOTOPIS

Nives Čosić rođena je 7. rujna 1998. godine u Našicama. Pohađala je osnovnu školu Ivan Goran Kovačić u Zdencima. Po završetku osnovne škole upisuje Opću gimnaziju Stjepana Ivšića u Orahovici koju je završila 2017. godine. Iste godine upisuje preddiplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Na drugoj godini preddiplomskog studija odlučuje se za izborni blok elektroenergetike. 2020. godine upisuje diplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika, izborni blok Održiva elektroenergetika (DEB).