

Ivana Damjanović¹
Fakultet elektrotehnike i računarstva
ivana.damjanovic@fer.hr

Ivica Pavić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
ivica.pavic@fer.hr

Frano Tomašević
Fakultet elektrotehnike i računarstva
frano.tomasevic@fer.hr

Božidar Filipović-Grčić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
bozidar.filipovic-grcic@fer.hr

Harmonijska analiza utjecaja SVC-a na prijenosnu mrežu

SAŽETAK

Statički var kompenzator (SVC) je uređaj za kompenzaciju jalove snage koji se sastoji od poprečnih kondenzatora i/ili prigušnica kojima se upravlja pomoću tiristora. Tiristorski upravljiva prigušnica (TCR) je tip SVC-a kojeg čini prigušnica spojena u seriju s protuspojem tiristora. Struja prigušnice se kontinuirano kontrolira kutom paljenja tiristora, čime se jednostavno upravlja iznosom apsorbirane jalove snage. TCR se primjenjuje za regulaciju iznosa napona, smanjenje titranja napona te povećanje prijenosne moći elektroenergetskog sustava (EES-a).

U ovom radu promatrat će se utjecaj SVC-a kojeg čine dvije TCR grane na harmonijska izobličenja u mreži. Promatrani SVC uzrok je harmonika struje čiji je utjecaj na mrežu potrebno procijeniti te će se kao mjera za smanjenje tog utjecaja odabrati filteri harmonika. Harmonijska analiza za određivanje tehničkih karakteristika filtera promatranog SVC-a, provedena u ovom radu, obuhvaća određivanje frekvencijskog odziva mreže na mjestu spajanja SVC-a u svrhu provjere paralelne rezonancije između filtera i mreže te harmonijske proračune tokova snaga kako bi se povjerilo jesu li harmonijska izobličenja u mreži unutar zahtijevanih granica.

Ključne riječi: Statički var kompenzator (SVC), harmonijska analiza, filter harmonika

Harmonic performance analysis of static var compensator connected to the power transmission network

SUMMARY

The static var compensator (SVC) is a device designed to compensate reactive power which is composed of shunt capacitors and/or reactors controlled by thyristors. Thyristor controlled reactor (TCR) is made of reactor in series with bidirectional pair of thyristors. Current through reactors can be controlled continuously by changing the firing angle of thyristor valves, thus the inductive power can be easily controlled. Typical applications of TCRs in AC systems are voltage control, temporary overvoltage reduction and increase of transmission capacity of a power system.

In this paper, harmonic performance analysis of SVC equipped with TCRs is presented. SVCs utilizing TCRs generate harmonic currents and therefore it is necessary to determine the effect of harmonics generated by the SVC on the power system and as countermeasure to design appropriate filters. Harmonic performance analysis for determining the filter technical characteristics of the observed SVC, carried out in this paper, includes: determination of the network frequency response at the point

¹ Stavovi izneseni u referatu su osobna mišljenja autora, nisu obvezujući za poduzeće/instituciju u kojoj je autor zaposlen te se ne moraju nužno podudarati sa službenim stavovima poduzeća/institucije.

of common coupling (PCC) for the purpose of checking the parallel resonance between the filter and the network, and harmonic power flow calculations in order to check if harmonic distortion are within the limits at the PCC.

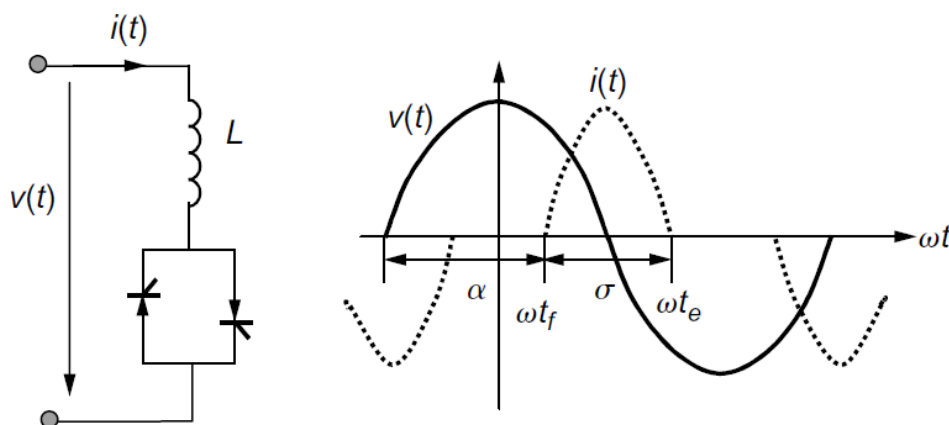
Key words: Static var compensator (SVC), harmonic analysis, harmonic filter

1. OSNOVNO O HARMONICIMA

1.1. Uzroci harmonika

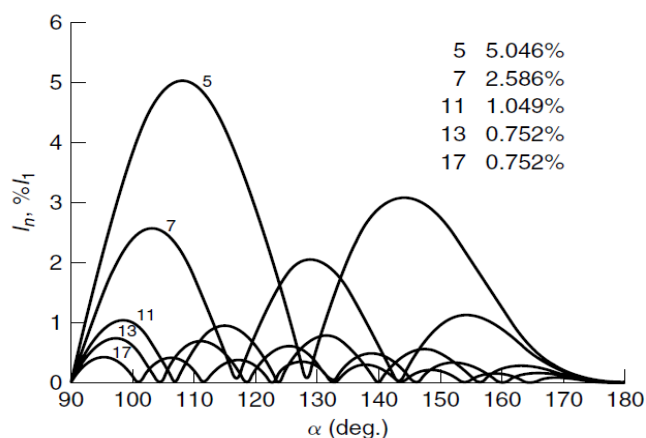
Izvori harmonika uzrokuju harmonijsku distorziju injektiranjem struje određenog harmonijskog spektra u sustav. Uzroci pojave harmonika mogu se podijeliti u dvije skupine: uređaji učinske elektronike te uređaji u kojima je nelinearan odnos napona i struje. Primjeri harmonijskih izvora iz prve skupine su SVC i TCR, dok u drugu skupinu spadaju lučne peći i transformatori u zasićenju.

TCR je tiristorski kontrolirana prigušnica kojoj se mijenja iznos reaktancije kutom paljenja tiristora, a jednopolna nadomjesna shema uređaja i pripadni valni oblici napona i struje prikazani su na slici 1.1.



Slika 1.1 Tiristorski kontrolirana prigušnica i pripadni valni oblici napona i struje [1]

Kut upravljanja tiristora kod TCR-a obično se nalazi između 90° i 180° te se definira u odnosu na prolazak napona na tiristoru kroz nulu. Pri kutu paljenja 90° tiristori propuštaju punu sinusoidu struje na prigušnicu, dok je pri 180° iznos struje jednak nuli. Između navedenih granica kuta upravljanja pojavljuju se izobličenja valnog oblika struje kroz prigušnicu koja su jednaka u pozitivnom i negativnom poluvlaku zbog čega se pojavljuju samo neparni harmonici struje. Za različite iznose kuta upravljanja tiristora dominantni su određeni harmonici, a tipični iznosi amplitude određenog harmonika u odnosu na nazivnu struju prikazani su na slici 1.2.



Slika 1.2 Grafički prikaz ovisnosti struje određenog harmonika i kuta paljenja kod TCR-a [2]

TCR kakav će biti modeliran u ovom radu, imat će za svaku fazu po jedan protuspoj tiristora kakav je prikazan na slici 1.1, koji će biti spojeni u trokut zbog čega se djelovanje uređaja može promatrati kao 6-pulsni TCR. Uz pretpostavku da su prigušnice u svakoj grani identične te da se svi tiristori pale istim kutom upravljanja SVC generira samo neparne harmonike, dok spoj trokut sprječava prodiranje harmonika koji su cjelobrojni višekratnici broja tri u mrežu.

Zaključak prethodnog razmatranja je da će TCR dovesti do pojave harmonika $6p \pm 1$ gdje je $p=0,1,2,3,\dots$ odnosno doći će do pojave 5., 7., 11., 13.,... harmonika pri čemu će najznačajniji utjecaj na kvalitetu električne energije u mreži imati 5. i 7. harmonik zbog toga što je njihova amplituda najveća.

1.2. Definirana ograničenja harmonijskih izobličenja

Indikatori za harmonijska izobličenja u mreži su pojedinačna harmonijska distorzija (IHD) i ukupna harmonijska distorzija (THD). Prema literaturi [3], navedeni faktori se definiraju kao:

$$IHD_n = \frac{I_n}{I_1} \quad (1.)$$

$$THD = \frac{I_H}{I_1} * 100\% \quad (2.)$$

$$I_H = \sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + I_6^2 + \dots)} \quad (3.)$$

gdje je: n - red harmonika, odnosno cjelobrojni višekratnik osnovne frekvencije.

Formule (1.), (2.) i (3.) vrijede i za proračun distorzije napona. IEEE 519-2014 standard definira ograničenja distorzije napona ovisno o naponskoj razini promatranog čvorišta u mreži te su granice harmonijskih izobličenja napona prikazane u tablici 1.1.

Tablica 1.1 Definirana ograničenja pojedinačnog i ukupnog faktora distorzije napona [4]

Nazivni napon	IHD (%)	THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

1.3. Harmonijska analiza

Harmonijska analiza obuhvaća određivanje frekvencijskog odziva mreže i harmonijski proračun tokova snaga te se provodi pri planiranju rada sustava i dimenzioniranja opreme. Frekvencijski odziv je bitan za određivanje mogućih problema paralelne rezonancije i rješenja kojima se može izbjeći navedeni problem, a obično se provodi na mjestu gdje se spaja nelinearan izvor, kapacitivne baterije ili filter harmonika. Harmonijski proračun tokova snaga daje uvid u harmonijska izobličenja napona i struje za promatrano stanje mreže čime se može provjeriti jesu li navedena izobličenja unutar definiranih ograničenja.

2. DEFINIRANJE TEHNIČKIH KARAKTERISTIKA FILTERA

Uloga filtera je eliminirati harmonike u mreži te se općenito mogu podijeliti na pasivne i aktivne. Osnovna razlika je u načinu filtriranja gdje pasivni filteri rade prema zadanim parametrima, a aktivni prilagođavaju svoj rad trenutnom stanju u mreži. Hibridni filteri su kombinacija navedene dvije skupine.

Pasivni filteri se najčešće koriste te mogu biti dizajnirani kao *single-tuned* ili *band-pass* [5]. *Single-tuned* predstavljaju jako malu impedanciju za određeni harmonik struje, dok *band-pass* filtriraju harmonike određenog frekvencijskog opsega.

2.1. Single-tuned filteri

Najčešće korišteni tip filtera je *single-tuned* koji je serijska kombinacija kapaciteta i induktiviteta čije su veličine određene tako da se njihovom kombinacijom ostvari serijska rezonancija na onoj frekvenciji za koju je filter dimenzioniran. Filter u paralelnom spoju s ostatkom mreže tvori rezonantni krug, odnosno dolazi do paralelne rezonancije pri određenoj frekvenciji. Ako se koristi više filterskih grana, potrebno je voditi računa o tome da svaka grana kompenzira određenu količinu jalove snage te da svaka grana u paraleli s ostatkom mreže može dovesti do paralelne rezonancije.

2.2. IEEE 18-2012

Prema IEEE 18-2012 standardu određene su maksimalne granice napona, struje i snage poprečnih kapaciteta filtera [6]. Navedena ograničenja su osnova za dimenzioniranje filtera te su dana u sljedećoj tablici 2.1.

Tablica 2.1 Ograničenja za poprečne kapacitete filtera prema IEEE standardu

Q	135%
Napon (rms)	110%
Napon (peak)	120%
Struja (rms)	135%

2.3. Primjer određivanja tehničkih karakteristika filtera

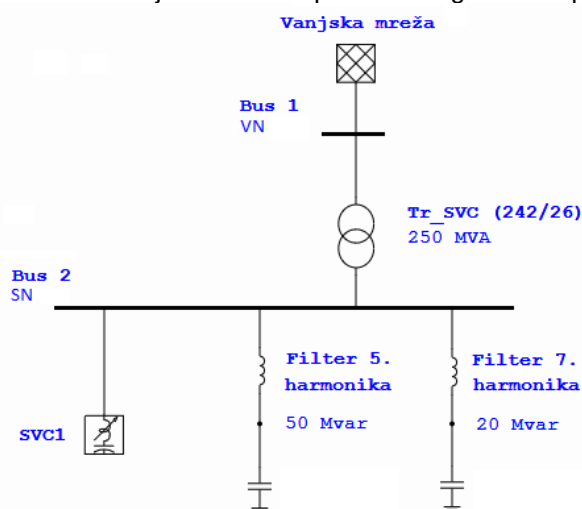
Određivanje tehničkih karakteristika filtera iterativan je postupak u kojem se početno pretpostavljene nazivne vrijednosti filtera (nazivna snaga i nazivni napon) provjeravaju prema ograničenjima IEEE 18 standarda iz tablice 2.1. Potrebno je poznavati harmonička izobličenja koja stvara uređaj za koji se filter dimenzionira te postojeće distorzije struje i napona u mreži.

U ovom članku se odabiru filteri za SVC, odnosno TCR uređaj koji unosi harmonijska izobličenja u mreži kako su prikazana na slici 1.2. Pretpostavlja se da je jedini uzrok harmonika SVC te se odabiru filteri za 5. i 7. harmonik.

Promatra se SVC postrojenje koje se sastoji od dvije TCR grane ukupne snage 250 Mvar priključeno na 220 kV čvorište prijenosne mreže preko transformatora prijenosnog omjer 242/26 kV.

2.3.1. Provjera tehničkih karakteristika filtera prema IEEE 18 standardu

Nakon nekoliko iteracija određene su tehničke karakteristike promatranih filtera za 5. i 7. harmonik. Filter 5. harmonika nazivnih vrijednosti 50 Mvar / 27 kV i filter 7. harmonika nazivnih vrijednosti 20 Mvar / 27 kV zadovoljavaju definirana ograničenja napona, struje i snage za poprečne kapacitete filtera prema IEEE 18 standardu. Nadomjesna shema promatranog sustava prikazana je na slici 2.1.



Slika 2.1 Prikaz nadomjesne sheme promatrane mreže

3. FREKVENCIJSKI ODZIV MREŽE

Nakon što su određeni parametri filtera koji odgovaraju IEEE ograničenjima, potrebno je dodatno provjeriti točku paralelne rezonancije za svaki filter. Ako je rezonantna frekvencija između mreže i filtera jednaka frekvenciji harmonika koji se tipično pojavljuju u mreži, tada se kao rezultat javljaju visoki iznosi prenapona koji imaju negativno djelovanje na izolaciju opreme u sustavu. Programskim paketom ETAP odredit će se frekvencijski odziv mreže na mjestu spajanja SVC-a kako bi se utvrdile rezonantne točke.

3.1. Paralelna rezonancija

Interakcija filtera i mreže rezultira paralelnom rezonancijom koju karakterizira visoki iznos impedancije te frekvencija nešto niža od frekvencije za koju je dimenzioniran filter. Frekvencija pri kojoj dolazi do paralelne rezonancije računa se prema:

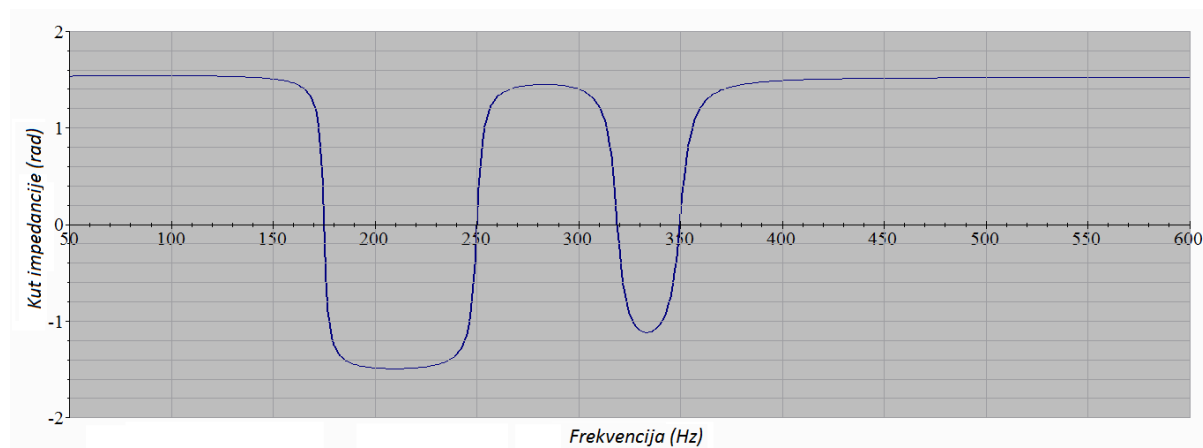
$$f_{par_rez} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_s + L)C}} \quad (4.)$$

gdje su: L i C - parametri filtera, L_s - induktivitet mreže.

3.2. Paralelna rezonancija promatranog sustava

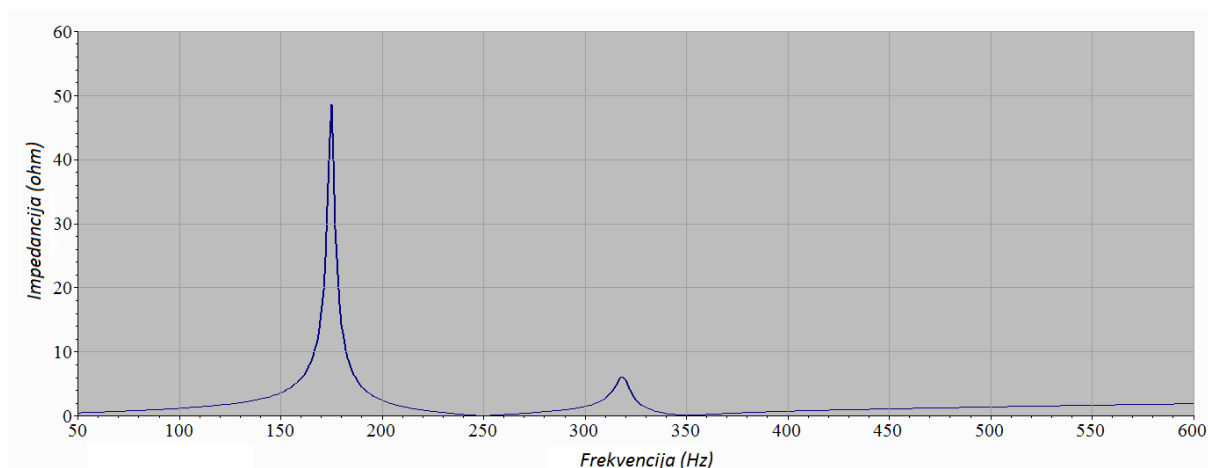
Do promjene rezonantne frekvencije dolazi pri svakoj promjeni uklopno-pogonskog stanja vanjske mreže zbog čega je potrebno provjeriti rezonanciju za različita stanja mreže. Minimalna i maksimalna struja kratkog spoja u sabirnici *Bus 1* sa slike 2.1 iznose 10 kA, odnosno 20 kA.

Proračunom *Frequency Scan* u ETAP-u određena je frekvencijska ovisnost impedancije za sabirnicu *Bus 2* sa slike 2.1 te su grafički prikazi rezultata prikazani na slikama 3.1 i 3.2. Na slici 3.1 prikazana je frekvencijska ovisnost kuta impedancije na mjestu spajanja SVC-a. Može se primijetiti da kut impedancije četiri puta poprima iznos 0° što odgovara rezonantnim frekvencijama.



Slika 3.1 Ovisnost kuta impedancije o frekvenciji na mjestu spajanja SVC-a

Na slici 3.2 prikazan je iznos impedancije koji ima dvije vršne vrijednosti, što odgovara paralelnim rezonancijama, i dva puta poprima vrijednost 0Ω (pri frekvencijama petog i sedmog harmonika) što odgovara serijskim rezonancijama.



Slika 3.2 Ovisnost iznosa impedancije o frekvenciji na mjestu spajanja SVC-a

Rezultati *Frequency Scan* proračuna za minimalnu i maksimalnu struju kratkog spoja prikazani su u tablici 3.1 te se može primijetiti da se povećanjem struje kratkog spoja smanjuje iznos impedancije pri paralelnoj rezonanciji.

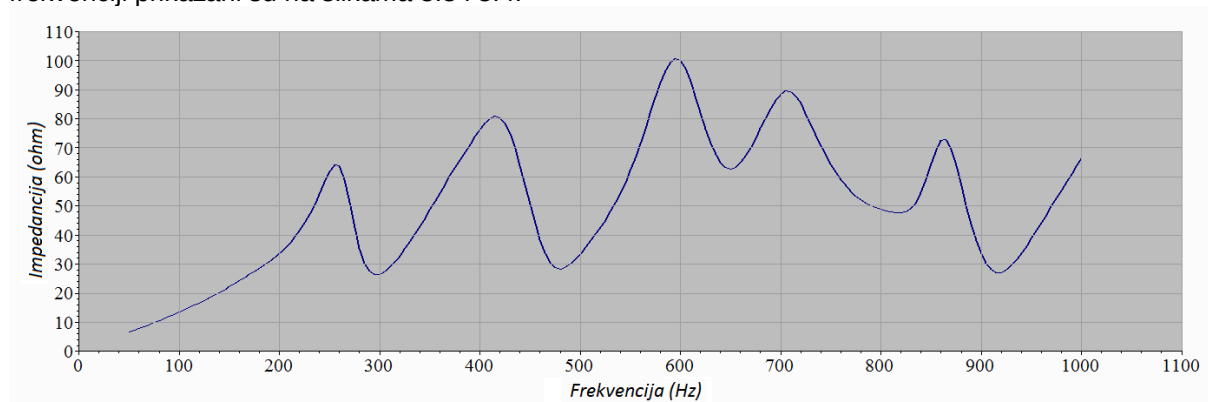
Tablica 3.1 Rezonantne frekvencije i iznosi impedancije pri tim frekvencijama

$I_{KS} = 20 \text{ kA}$			$I_{KS} = 10 \text{ kA}$		
Sabirnica	Iznos impedancije	Rezonantna frekvencija	Sabirnica	Iznos impedancije	Rezonantna frekvencija
Bus 2	48.51 Ω	175 Hz	Bus 2	55.68 Ω	168 Hz
Bus 2	6.1 Ω	318 Hz	Bus 2	6.42 Ω	317 Hz

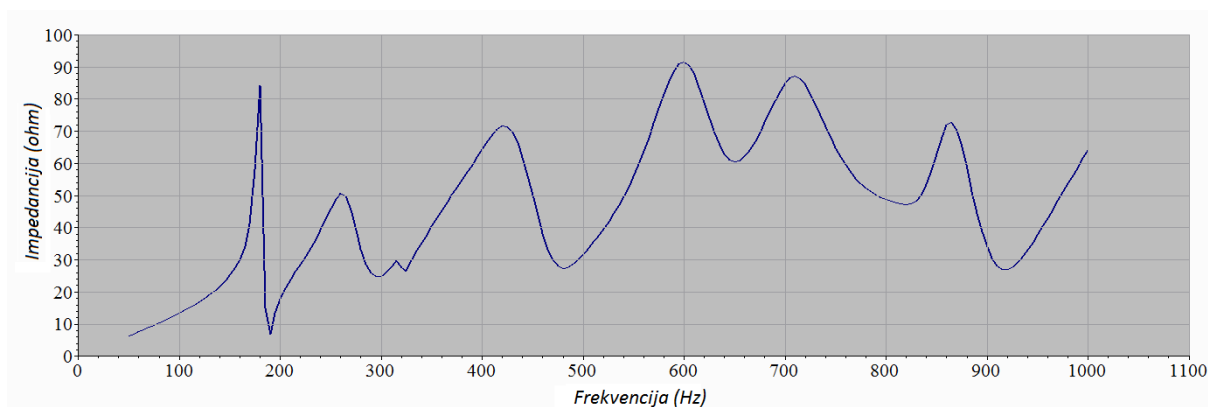
3.3. Frekvencijski odziv stvarne mreže

U prethodnom poglavlju vanjska je mreža nadomještена reaktancijom koja je izračunata na temelju podataka o struji kratkog spoja. Pokazano je da će grane filtera u paraleli s vanjskom mrežom dovesti do pojave nove dvije paralelne rezonantne frekvencije. Za detaljan frekvencijski odziv, kao i za točniju procjenu utjecaja spajanja filtera na moguću pojavu rezonancije u mreži, potrebno je detaljno modelirati vanjsku mrežu.

Frequency Scan je proveden za sabirnicu *Bus 1* prije i nakon spajanja SVC postrojenja s odabranim filterima na realnu prijenosnu mrežu, a grafički rezultati iznosa impedancije u ovisnosti o frekvenciji prikazani su na slikama 3.3 i 3.4.



Slika 3.3 Ovisnost iznosa impedancije o frekvenciji za sabirnicu *Bus 1* u realnoj prijenosnoj mreži



Slika 3.4 Ovisnost iznosa impedancije o frekvenciji za sabirnicu *Bus 1* u realnoj prijenosnoj mreži na koju je priključeno SVC postrojenje s odabranim filterima harmonika

Iz prikazanih grafova mogu se očitati rezonantne frekvencije mreže te se uočava pojava nove dvije rezonantne frekvencije nakon ugradnje SVC-a s pripadnim filterima. Slijedi tablični prikaz rezultata.

Tablica 3.2 Rezonantne frekvencije i iznos impedancije pri tim frekvencijama za sabirnicu *Bus 1* u realnoj prijenosnoj mreži s SVC postrojenjem

Z [Ω]	Frekvencija [Hz]
84.12	180.00
50.65	260.00
29.72	315.00
71.57	420.00
91.44	600.00
87.08	710.00
72.85	865.00

Detaljan model vanjske (prijenosne) mreže, u odnosu na pojednostavljeni model korišten u poglavlju 3.2, nije značajno utjecao na frekvenciju pri kojoj može doći do paralelne rezonancije između mreže i filtera, ali se može uočiti veći iznos impedancije u paralelnim rezonantnim točkama filtera i mreže u slučaju potpunog modela vanjske mreže.

4. HARMONIJSKI PRORAČUN TOKOVA SNAGA

Za proračun viših harmonika primjenjuju se različite metode, ovisno o točnosti modela EES-a te se harmonijska analiza može podijeliti na simetričnu i nesimetričnu metodu. Uz pretpostavku simetričnog modela EES-a i simetričnih izvora viših harmonika mrežu je dovoljno modelirati jednofazno, a proračun se provodi metodom superpozicije tako da se struje izvora viših harmonika zasebno injektiraju u svaki čvor u kojem je priključen takav izvor. Harmonijske analize prijenosnog sustava obično pripadaju ovoj metodi [1]. Nesimetrični harmonijski izvori zahtijevaju harmonijski proračun tokova snaga u trofaznom sustavu.

4.1. Trenutna harmonijska izobličenja u mreži

U mreži može postojati više izvora harmonika pri čemu svaki od njih pridonosi harmonijskoj distorziji. Prilikom dizajniranja filtera potrebno je utvrditi trenutna harmonijska izobličenja u mreži te provjeriti zadovoljava li trenutno stanje mreže definiranim limitima.

Postojeći izvori harmonika se unutar programskog paketa ETAP mogu modelirati na osnovu poznatih, mjerenih vrijednosti harmonijskog spektra. Moguće je modelirati strujni ili naponski izvor harmonika tako da se za svaku harmoničku komponentu, koju promatrani izvor proizvodi, unese postotni iznos amplitude u odnosu na amplitudu osnovnog harmonika te fazni kut.

4.2. Utjecaj SVC-a na harmonijska izobličenja

Utjecaj rada SVC-a na harmonijska izobličenja za slučaj kada je jedini izvor harmonika u mreži daje harmonijska analiza. U programskom paketu ETAP modeliran je harmonijski spektar SVC-a prema ranije navedenim podacima iz literature. Rezultati harmonijskog proračuna tokova snaga, odnosno ukupna i pojedinačna distorzija napona u promatranim sabirnicama, prikazani su u tablici 4.1.

Tablica 4.1 Utjecaj rada SVC-a na THD i IHD napona u mreži

Bus 1 (20 kV)			Bus 2 (220 kV)		
THD = 6.92 %			THD = 1.27 %		
Red harmonika	Frekvencija	IHD	Red harmonika	Frekvencija	IHD
5	250	5.56	5	250	1.23
7	350	3.56	7	350	0.49
11	550	2.28	11	550	0.27
13	650	1.79	13	650	0.20
17	850	2.30	17	850	0.20

4.3. Utjecaj filtera na harmonijska izobličenja u mreži

Nakon što se priključe filteri 5. i 7. harmonika s ranije definiranim parametrima, harmonijskim proračunom tokova snaga provjerava se jesu li pojedinačna i ukupna distorzija napona unutar definiranih granica.

Tablica 4.2 Utjecaj SVC-a i filtera na THD i IHD napona u mreži

Bus 1 (20 kV)			Bus 2 (220 kV)		
THD = 1.33 %			THD = 0.16 %		
Red harmonika	Frekvencija	IHD	Red harmonika	Frekvencija	IHD
5	250	0.13	5	250	0.03
7	350	0.15	7	350	0.02
11	550	0.83	11	550	0.11
13	650	0.74	13	650	0.09
17	850	1.01	17	850	0.09

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirao se utjecaj harmonijskih izobličenja koje proizvodi SVC postrojenje. Kako bi se smanjio negativni utjecaj rada SVC-a na kvalitetu električne energije u mreži, odabrani su filteri petog i sedmog harmonika zato što oni imaju najveći utjecaj u harmonijskom spektru SVC-a.

Prvi korak predstavljene metode odabira filtera harmonika je provjera nazivnih vrijednosti filterskih grana prema ograničenjima IEEE 18 standarda. Harmonijskom analizom, koja se sastoji od frekvencijskog odziva te harmonijskog proračuna tokova snaga, određuju se rezonantne frekvencije te provjeravaju iznosi distorzije napona u mreži.

Zaključno, prikazana metoda se može primijeniti za bilo koji scenarij te je učinkovit alat pri odabiru parametara filtera harmonika i pri harmonijskoj analizi rada uređaja učinkne elektronike spojenih na prijenosu mrežu.

LITERATURA

- [1] A. Gómez-Expósito, A. J. Conejo i C. Canizares, *Electric Energy Systems Analysis and Operation*, Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [2] R. M. Mathur i R. K. Varma, *Thyristor-based FACTS Controllers for Electrical Transmission System*, New York: John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2002.
- [3] C. Sankaran, *Power Quality*, New York: CRC Press LLC, 2002.
- [4] IEEE, *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, New York: IEEE, 2014.
- [5] F. De La Rosa, *Harmonics and power system*, Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [6] IEEE, *IEEE Standard for Shunt power Capacitors*, New York: IEEE , 2012.