

OPTIMALNO VODENJE KOMPENZATORJEV JALOVE MOČI V INDUSTRIJSKIH OMREŽJIH Z UPOŠTEVANJEM HARMONIKOV V NAPETOSTI IN TOKU

Leopold HERMAN, Igor PAPIČ

POVZETEK

V sodobnih industrijskih procesih delež nelinearnih bremen, ki so vir tokovnega harmonskega popačenja, nenehno raste. Hkrati se povečuje tudi število kompenzatorjev jalove moči. Kompenzatorji sami sicer niso vir harmonskega popačenja, lahko pa povzročijo ojačenje harmonikov z ustvarjanjem resonančnih razmer, posledica tega pa je nepravilno delovanje naprav ali celo njihov izpad iz obratovanja. Z večanjem števila kompenzacijskih naprav, ki so priključene na različnih napetostnih nivojih, postaja tudi vodenje teh omrežij čedalje zahtevnejše. Operater industrijskega omrežja ima težavno nalogo, da iz množice konfiguracij kompenzacijskih naprav poišče optimalno, ki zadovoljuje potrebe po jalovi moči in hkrati ne povzroči nevarnih resonančnih stanj. V članku je predstavljen koncept virtualnega kompenzatorja jalove moči, ki združuje vse kompenzacijske naprave nekega zaključenega industrijskega omrežja znotraj enotne regulacijske sheme. Tako lahko neodvisno reguliramo vsak posamezen kompenzator v realnem času ter za vsako obratovalno točko dosežemo optimalno konfiguracijo kompenzatorjev. Učinkovitost delovanja predlaganega algoritma je s simulacijo prikazana na modelu realnega industrijskega omrežja.

ABSTRACT

In modern industrial processes, the number of nonlinear loads, which are known to be a major source of current harmonics, is constantly growing. At the same time, the number of reactive power compensators operating in these networks is also growing. Although compensators are not sources of harmonic distortions, they may cause high amplifications of harmonics by creating resonance conditions. This can cause malfunctions or even loss of equipment. Due to the growing number of reactive power compensators in a typical industrial network, the control of these networks is also becoming increasingly demanding. An industrial network operator has a difficult task of finding an optimal configuration of compensators, which covers reactive power demands and at the same time does not cause resonance amplifications of harmonics. Thus, in this paper, a concept of a virtual compensator is proposed. It combines all reactive power devices of a certain network within a single control scheme. This gives the operator the ability to control each compensator independently in real time and to achieve optimal configuration of compensators, for every operation point of the network. The effectiveness of the proposed algorithm is demonstrated on the realistic industrial network model by means of simulation.

1. UVOD

Kompenzacija jalove moči je pomembno področje obratovanja industrijskih električnih omrežij. Industrijska bremena so večinoma porabniki delovne in jalove moči, pri čemer mora biti jalova moč ustrezno kompenzirana, da se zagotovita ustrezen faktor moči na prevzemno-predajnem mestu in učinkovit prenos delovne moči do bremen. Po navadi so za izboljšanje faktorja moči na prevzemno-predajnem mestu zainteresirani tako operater omrežja kot tudi odjemalci. Zadnji imajo pri tem koristi zaradi manjših izgub energije, večjih prenosnih zmogljivosti, izboljšane napetostnega profila in nižjega računa za električno energijo, saj so za slab faktor moči predvideni penali. Obseg teh koristi je odvisen predvsem od lokacije, velikosti, tipa in števila kompenzacijskih naprav v omrežju, kakor tudi od načina vodenja teh naprav [1, 2].

Optimalno dimenzioniranje in umestitev kompenzacijskih naprav v omrežje v sinusnih razmerah je zelo dobro raziskano področje. V bogati literaturi s tega področja so predstavljene različne metode iskanja optimalne rešitve, ki večinoma dajejo zelo dobre rezultate. Razvrstili bi jih lahko v naslednje kategorije: analitične, numerično programiranje, hevristične in metode, temelječe na umetni inteligenci [3-6]. V novejši literaturi se upošteva tudi harmonsko popačenje električnih veličin omrežja [7-10]. Tudi tu se za reševanje nelinearnega optimizacijskega problema uporabljajo najrazličnejše metode, kot so npr. genetski algoritmi, teorija mehkih množic itd. Številne od teh tehnik so zelo hitre pri iskanju rešitve, vendar pa lahko zahtevajo veliko procesorsko moč. Zato si avtorji prizadevajo najti najprimernejše metode reševanja nelinearnega optimizacijskega problema, ki bi dale rešitev (globalni optimum) hitro, s čim manj koraki računanja.

Na splošno lahko rečemo, da za področje dimenzioniranja kompenzatorjev in njihovega umeščanja v omrežje obstaja precejšnje zanimanje raziskovalcev, kar pa ne velja za področje vodenja teh naprav. Zelo malo pozornosti se namenja študiju optimalnega vodenja kompenzacijskih naprav. Ker se v moderna industrijska omrežja vgrajuje čedalje več kompenzatorjev jalove moči, pri čemer še vedno prevladujejo pasivne izvedbe teh naprav (*LC*-členi), ter hkrati tudi vedno večje število nelinearnih porabnikov električne energije, kot so npr. pretvorniško napajani motorji, se čedalje pogosteje srečujemo s problemom resonančnih ojačenj harmonikov, prisotnih v omrežju. Klasični pasivni kompenzator namreč nima možnosti za dinamično prilagajanje razmeram v omrežju, zato lahko s spremembo predpostavk, ki so veljale ob njegovem načrtovanju (npr. topologija omrežja, vrednosti električnih parametrov), hitro pride do nepravilnega delovanja. Kadar se resonančna frekvenca kompenzatorja ujame s harmonikom, prisotnim v omrežju, so posledice lahko pregrevanje in s tem krajša življenjska doba nekaterih naprav (transformatorji, kabli, kompenzatorji ...), nastajanje hrupa in vibracij pri obratovanju motorjev in generatorjev, nepravilno delovanje elektronskih naprav (računalniki, tiskalniki ...), v skrajnih primerih pa tudi izpad naprav iz obratovanja ali celo njihovo uničenje.

V večjih industrijskih obratih je po navadi priključenih več deset kompenzacijskih naprav na različnih napetostnih nivojih. Tako obstaja veliko konfiguracij teh naprav, od katerih pa niso vse primerne z vidika resonančnih razmer v omrežju. V teh okoliščinah ima operater omrežja zelo težko nalogo, da s pravilnim vodenjem zadosti potrebam po jalovi moči in hkrati

nikjer v omrežju ne povzroči nevarnih resonančnih stanj. Naloga je dovolj zahtevna že v stacionarnih razmerah, medtem ko lahko med prehodnimi pojavi postane neobvladljiva.

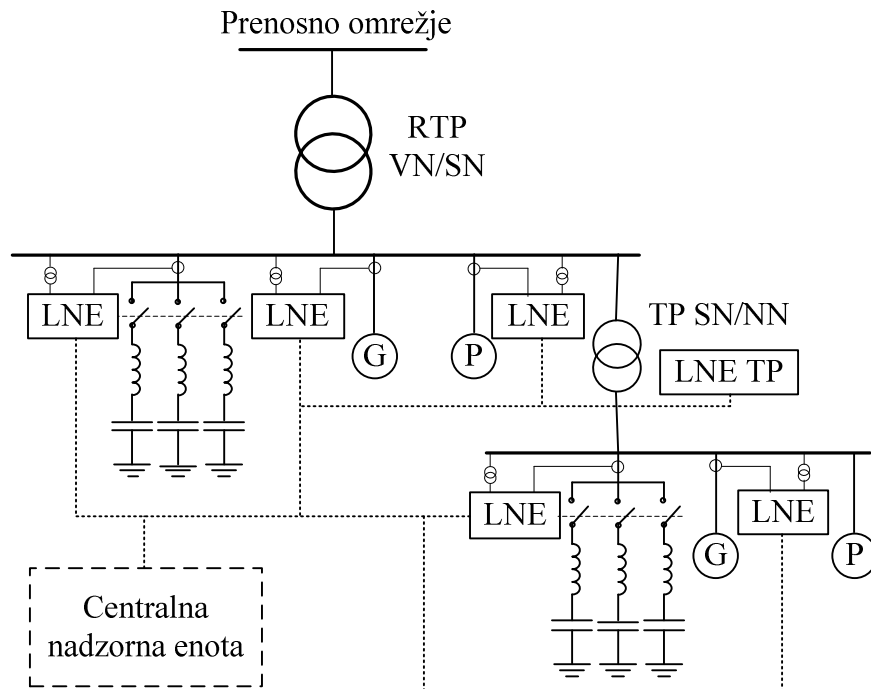
Zato v članku predstavljamo koncept virtualnega kompenzatorja kot način optimalnega vodenja kompenzacije jalove moči v nekem zaključenem omrežju. Članek je razdeljen na več poglavij. Najprej je v drugem poglavju opisana osnovna ideja virtualnega kompenzatorja. V 3. poglavju je opisan model realnega industrijskega omrežja, na katerem so predstavljeni rezultati, ki so podani v 4. poglavju. Na koncu, v 5. poglavju, sledi še sklep.

2. VIRTUALNI KOMPENZATOR

Na sliki 1 je poenostavljeno prikazan koncept virtualnega kompenzatorja. Predlagan sistem regulacije jalove moči je centralnega tipa. Osnovna ideja je združiti vse naprave, ki lahko prispevajo svoj delež pri regulaciji jalove moči (kompenzatorji, nekateri razpršeni viri) znotraj enotne regulacijske sheme, ki se izvršuje na centralnem računalniku v centru vodenja industrijskega omrežja. Tako lahko neodvisno reguliramo vsak posamezen kompenzator v realnem času ter za vsako obratovalno točko dosežemo optimalno konfiguracijo kompenzatorjev. Pri tem se kot kriterij optimalnosti poleg resonančnega ojačenja harmonikov lahko uporabijo tudi parametri, kot so npr. električne izgube in napetostni profil omrežja.

S slike 1 je razvidno, da kot vmesni člen med centrom vodenja in posameznimi napravami nastopajo lokalne nadzorne enote (LNE). Imajo funkcijo zajemanja meritev relevantnih veličin (napetosti, tokovi), spremljanja stanj stikalnih elementov, posredovanja podatkov v centralno enoto in sprejemanja ukazov nastavitve stikalnih elementov. Poleg regulacijskih opravljajo tudi zaščitne in druge funkcije.

V nadaljevanju je problem zapisan v matematični obliki, definirana je kriterijska funkcija in podrobneje predstavljen regulacijski algoritem.



Sl. 1: Shema koncepta virtualnega kompenzatorja.

2.1 Definicija problema

Zapišimo naslednja izraza za vsak napetostni harmonik h in tokovni harmonik m , prisoten v omrežju:

$$A_{h,ser} = k_{ser,h} \cdot \int_{f_h-5Hz}^{f_h+5Hz} |Z(f)_{opt,ser} - Z(f)_{ser}| \cdot df \quad (1)$$

$$A_{m,par} = k_{par,m} \cdot \int_{f_m-5Hz}^{f_m+5Hz} |Z(f)_{opt,par} - Z(f)_{par}| \cdot df, \quad (2)$$

kjer sta $k_{ser,h}$ in $k_{par,m}$ proporcionalna faktorja, ki podajata harmonski spekter ustreznega nelinearnega bremena. Za primer vzemimo 6-pulzni pretvornik, za katerega lahko zapišemo proporcionalni faktor kot: $k_h = 1/h$ in $h = 6i \pm 1$, kjer je $i = 1, 2, 3 \dots$. $Z(f)_{opt,ser}$ in $Z(f)_{opt,par0}$ sta serijska in paralelna ekvivalentna impedanca za primer omrežja brez kompenzatorjev jalove moči in za vsa bremena v omrežju z enakim faktorjem moči 0,95. Ti dve impedančni frekvenčni karakteristiki sta podani kot optimalni frekvenčni odziv omrežja. $Z(f)_{ser}$ in $Z(f)_{par}$ sta dejanski frekvenčni karakteristiki. Kot je razvidno iz izrazov (1) in (2), sta absolutni vrednosti razlike obeh karakteristik integrirani v mejah ± 5 Hz od ustreznega harmonika. Izraza $A_{h,ser}$ in $A_{m,par}$ torej podajata površino med optimalno in dejansko frekvenčno karakteristiko (serijsko in paralelno) v okolici ± 5 Hz od ustreznega harmonika. Pomenita

merilo za prilaganje dejanske frekvenčne karakteristike optimalni v okolici značilnih harmonikov [1, 11].

Kriterijsko funkcijo definiramo kot:

$$f = \sum_{i=1}^I S_{izg,i} + \sum_{h=3,5,7,\dots} A_{h,ser} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=3,5,7,\dots} A_{jm,par}, \quad (3)$$

ob pogojih:

$$\begin{aligned} 0,95 \leq FM_{ind} &\leq 1, \\ S_{TR,j} &< S_{r,j}. \end{aligned} \quad (4)$$

I podaja skupno število vej omrežja in J število nelinearnih bremen v omrežju. Faktor moči se meri na prevzemno-predajnem mestu, $S_{TR,j}$ pa je dejanski pretok moči ustreznega transformatorja, ki mora biti seveda nižji od njegove nazivne moči $S_{r,j}$.

Algoritem vodenja se izvaja v naslednjih korakih:

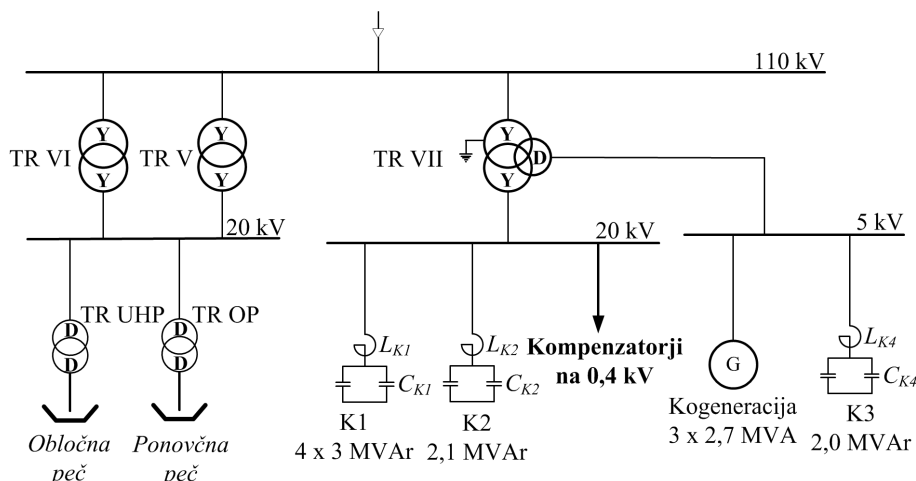
1. inicializacija in zajem podatkov z LNE,
2. nastavitev nove konfiguracije kompenzacijskih naprav,
3. izračun trenutnih potreb po jalovi moči, izračun izgub omrežja in izračun drugih spremenljivk, ki se upoštevajo v kriterijski funkciji,
4. izračun kriterijske funkcije,
5. preverjanje pogojev kriterijske funkcije; če kateri od pogojev ni izpolnjen, se izvajanje vrne na 2. korak,
6. če so bile upoštevane vse konfiguracije kompenzacijskih naprav, se izvajanje konča, sicer se vrne na 2. korak.

Algoritem regulatorja deluje ciklično. Vsak cikel traja določen čas (segment), ki pa mora biti kratek v primerjavi s časom, ki je določen kot interval povprečenja vrednosti faktorja moči. Pri določitvi trajanja posameznega cikla je treba upoštevati kompromis med doseganjem zelenega faktorja moči in številom preklpov stikalnih elementov, ki mora biti seveda čim manjše. Procesorska moč in hitrost zajemanja meritev prav tako močno vplivata na to vrednost. Za reševanje nelinearnega optimizacijskega problema je bila uporabljena metoda Monte Carlo.

3. OPIS OMREŽJA

Na sliki 2 je prikazana poenostavljena enopolna shema realnega industrijskega omrežja. Omrežje se napaja prek 110 kV prenosnega omrežja, s kratkostično močjo na prevzemno-predajnem mestu 1200 MVA. Brena so priključena na dvozbralni sistem na 20 kV napetostnem nivoju in 5 kV napetostnem nivoju. V normalnih obratovalnih razmerah sta

obločna in ponovčna peč priključeni na 20 kV zbiralke sistema II, ki se napaja prek dveh transformatorjev 110/20 kV, nazivnih moči 20 MVA (TR V in TR VI). Druga bremena so priključena na zbiralke sistema I na 20 kV in 5 kV napetostnem nivoju. Ta del omrežja se napaja prek trinavitega 40 MVA transformatorja TR VII, kot prikazuje slika 2. Na 5 kV napetostnem nivoju obratujejo tri kogeneracijske enote nazivnih moči 2,7 MVA.



Sl. 2: Poenostavljena enopolna shema realnega industrijskega omrežja.

V omrežju obratuje več kot 20 pasivnih kompenzatorjev jalove moči – K1 in K2 na 20 kV, K3 na 5 kV in več manjših kompenzatorjev na 0,4 kV napetostnem nivoju. Kompenzatorji na 0,4 kV so bili razdeljeni v tri skupine: G1 s kompenzatorji nazivnih moči od 0,4 do 0,48 MVar (skupne nazivne moči 2,147 MVar), G2 od 0,52 do 0,65 MVar (skupne nazivne moči 6,7 MVar) in G3 od 0,8 do 1,2 MVar (skupne nazivne moči 2,887 MVar). Nekateri podatki posameznih kompenzatorjev so podani v tabeli 1.

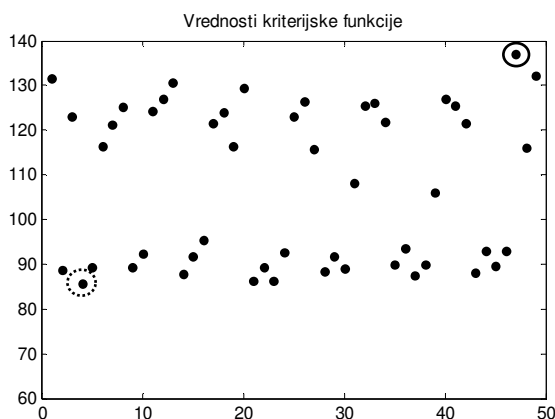
Tab. 1: Nazivni podatki kompenzatorjev.

Kompenzator	Nazivna napetost (kV)	Nazivna moč (MVar)	Reaktanca (mH)
K1	20	4 x 3	3,63
K2	20	2,1	24,98
K3	5	2	0,100
G1-G3	0,4	0,4 – 1,2	/

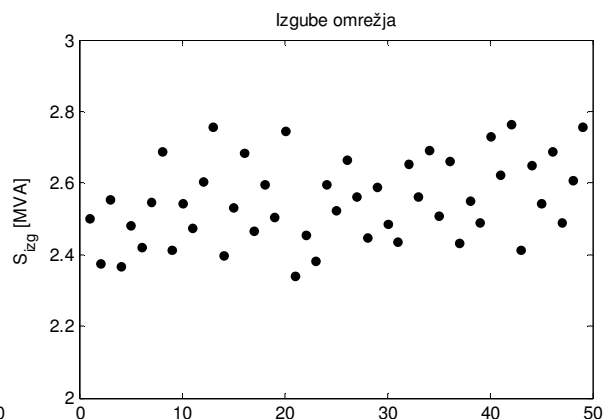
4. REZULTATI IN KOMENTAR

Rezultati so prikazani za tipično obratovalno stanje omrežja. Kot je razvidno s slike 3, 49 konfiguracij kompenzacijskih naprav izpolnjuje podane pogoje. Pri teh konfiguracijah je faktor moči omrežja med 0,95 in 1 induktivno in hkrati noben od transformatorjev v omrežju ni preobremenjen. Na sliki 4 so prikazane izgube omrežja za vseh 49 konfiguracij. Opazimo lahko, da so najmanjše izgube za okrog 15 odstotkov manjše od največjih izgub.

Kriterijska funkcija doseže minimalno vrednost pri naslednji konfiguraciji kompenzacijskih naprav (konfiguracija št. 4 – obkroženo s prekinjeno črto): kompenzator K1 obratuje s 3 MVar, K2 z 2,1 MVar in K3 ne obratuje. Vsi kompenzatorji v skupini G2 (6,7 MVar) in G3 (2,887 MVar) obratujejo, kompenzatorji v skupini G1 (2,147 MVar) ne obratujejo. Najslabši primer nastopi, ko so kompenzatorji v naslednji konfiguraciji (konfiguracija št. 47 – obkroženo s polno črto): K1 obratuje z 12 MVar, K2 z 2.1 MVAR, K3 z 2 MVar in izključenimi preostalimi kompenzatorji.



Sl. 3: Vrednosti kriterijske funkcije za vseh 49 konfiguracij.



Sl. 4: Izgube omrežja.

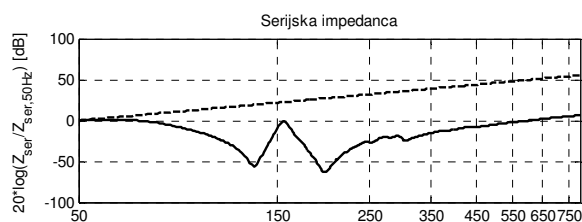
Slike 5-7 in 8-10 ločeno prikazujejo serijske in paralelne impedančne frekvenčne karakteristike za optimalno konfiguracijo kompenzatorjev in za najslabši primer. Impedance so podane relativno glede na impedanco pri 50 Hz. S prekinjenimi črtami so prikazane tudi karakteristike za omrežje brez kompenzatorjev. Opozoriti velja, da je y-os v logaritmичnem merilu. Prav tako je treba omeniti, da je bila serijska impedanca računana z zbiralk 110 kV in da sta bili paralelni impedanci računani z bremenske strani, z zbiralk 20 kV in 5 kV. Harmonske komponente, prisotne v omrežju, so 3., 5., 7., 11., in 13.

S slik 5-7 je razvidno, da pri optimalni konfiguraciji kompenzatorjev v omrežju ne prihaja do izrazitih resonančnih ojačenj značilnih harmonikov. Nasprotno velja za karakteristike na slikah 8-10, ki prikazujejo frekvenčni odziv za najslabši primer. Kot je razvidno s slike 10, nastopa izrazita resonančna točka blizu 7. harmonika. Vrednost ekvivalentne impedance doseže 42-kratnik (75 dB) vrednosti impedance pri 50 Hz, medtem ko pri optimalni konfiguraciji doseže le 4-kratnik (28 dB) te vrednosti (glej tabelo 2).

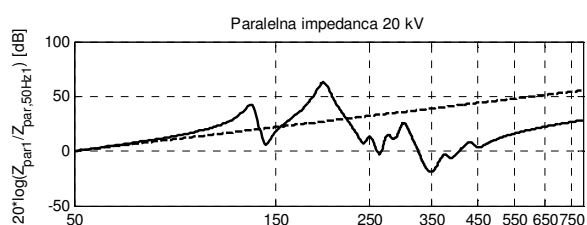
Tab. 2: Vrednosti ekvivalentnih impedanc pri značilnih harmonikih za optimalni in najslabši primer.

[dB]	3	5	7	11	13
Opt. Z_{ser}	-9.8	-26.7	-15.5	-2.3	1.8
Opt. Z_{par1}	17.6	13.1	-18.8	15.9	22.2
Opt. Z_{par2}	19.9	19.9	28.8	39.9	43.6

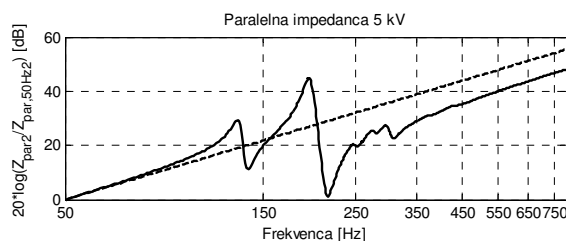
Najslabši Z_{ser}	-20.4	-19.8	-14.3	1.8	5.8
Najslabši Z_{par1}	8.3	-4.6	19.1	24.1	28.9
Najslabši Z_{par2}	20.8	35.1	75.1	23.2	12.9



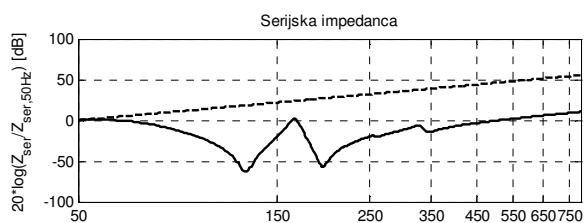
Sl. 5: Impedančne frekvenčne karakteristike za optimalni primer – serijska impedanca.



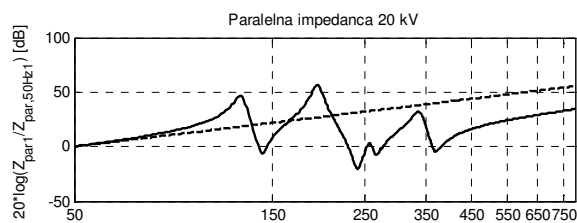
Sl. 6: Impedančne frekvenčne karakteristike za optimalni primer – paralelna impedanca 20 kV.



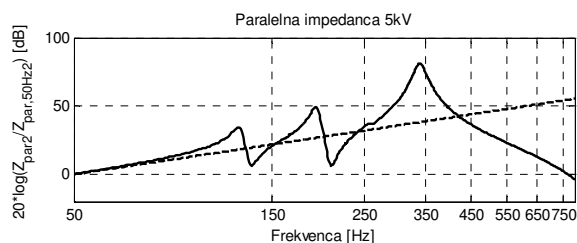
Sl. 7: Impedančne frekvenčne karakteristike za optimalni primer – paralelna impedanca 5 kV.



Sl. 8: Impedančne frekvenčne karakteristike za najslabši primer – serijska impedanca.



Sl. 9: Impedančne frekvenčne karakteristike za najslabši primer – paralelna impedanca 20 kV.



Sl. 10: Impedančne frekvenčne karakteristike za najslabši primer – paralelna impedanca 5 kV.

5. SKLEP

Z uvedbo koncepta virtualnega kompenzatorja v moderna industrijska omrežja omogočimo vodenje kompenzatorjev jalove moči tako, da ne prihaja do resonančnih ojačenj harmonikov. Hkrati dosežemo minimalno izgubo energije in sprostitev prenosnih zmogljivosti.

Učinkovitost delovanja predlaganega algoritma je bila s simulacijami predstavljena na modelu realnega industrijskega omrežja. Rezultati kažejo, da je predstavljeni algoritem učinkovit pri iskanju optimalne konfiguracije kompenzacijskih naprav.

ZAHVALA

Delo je finančno podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v sklopu raziskovalnega programa Elektroenergetski sistemi P2-356.

6. LITERATURA

- [1] R.C. Dougan, M.F. McGranaghan, S. Santoso, H.W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, 2002.
- [2] IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors, IEEE Standard 1036-1992, 1992.
- [3] H.N. Ng, M.M.A. Salama and A.Y. Chikhani, "Classification of capacitor allocation techniques," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 1, pp. 387–392, January 2000.
- [4] T.H. Fawzi, S.M. El-Sobki and M.A. Abdel-Halim, "New approach for the application of shunt capacitors to the primary distribution feeders," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 102, No. 1, pp. 10–13, Jan. 1983.
- [5] T.S. Abdel-Salam; A.Y. Chikhani and R. Hackam, "A new technique for loss reduction using compensating capacitors applied to distribution systems with varying load condition," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. 2, pp. 819–827, Apr. 1994.
- [6] H.C. Chin, "Optimal shunt capacitor allocation by fuzzy dynamic programming," *Electric Power Systems Research*, Vol. 35, pp. 133–139, 1995.
- [7] Y. Baghzouz, "Effects of nonlinear loads on optimal capacitor placement in radial feeders," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PD-6, No. 1, pp. 245–251, January 1991.
- [8] M.A.S. Masoum, M. Ladjevardi, M. Jafarian and E.F. Fuchs, "Optimal placement, replacement and sizing of capacitor banks in distorted distribution networks by genetic algorithms," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 4, October 2004.
- [9] H.C. Chin, "Optimal shunt capacitor allocation by fuzzy dynamic programming," *Electric Power Systems Research*, Vol. 35, pp. 133–139, 1995.

- [10] Z.Q. Wu and K.L. Lo, "Optimal choice of fixed and switched capacitors in radial distributions with distorted substation voltage," *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 142, No. 1, pp. 24–28, January 1995.
- [11] J. Arrillaga, D. A. Bradley, P. S. Bodger, *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, 1985.

NASLOV AVTORJEV

Leopold Herman,
prof. dr. Igor Papič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta, za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana,
Slovenija

Tel: + 386 1 47 68 178,

Elektronska pošta: poldi.herman@fe.uni-lj.si, igor.papic@fe.uni-lj.si