

Uporaba tiristorsko krmiljene serijske dušilke za zmanjšanje flikerja elektroobločne peči

Ljubiša Spasojević, Boštjan Blažič, Igor Papič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: ljubisa.spasojevic@fe.uni-lj.si

Povzetek. Članek opisuje osnovne obratovalne značilnosti serijskih krmiljenih dušilk za zmanjšanje negativnega vpliva elektroobločnih peči na prenosno omrežje. V izračunih in simulacijah je uporabljen model prenosnega omrežja ter obločne peči s sinusnim spreminjanjem dolžine obloka. Koncept uporabe krmiljenih dušilk je predstavljen na simulacijskih primerih. Iz rezultatov simulacij je razvidno, da lahko uporaba krmiljenih dušilk pri obratovanju obločne peči uspešno zmanjša nivoje flikerja v prenosnem omrežju.

Ključne besede: kakovost napetosti, fliker, obločna peč, serijska krmiljena dušilka

Application of a thyristor-controlled series reactor to reduce arc furnace flicker

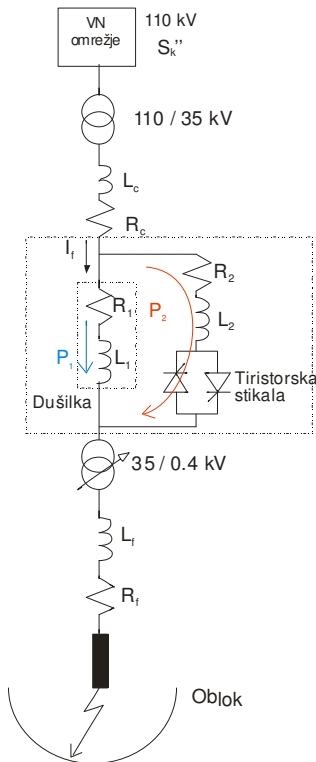
This paper presents the basic principles of a thyristor controlled series reactor for the reduction of arc-furnace flicker which negatively impacts the transmission network. The developed models of transmission network and arc furnace with sinusoidal variation of arc length were used for simulations and calculations. The concept of flicker compensation using thyristor controlled series reactor is presented with simulation examples. These simulations showed that integration of a thyristor controlled series reactor can successfully reduce flicker levels in the transmission network.

1 UVOD

Električna energija je blago in kot taka mora ustrezati standardom kakovosti. Ohranjanje določene ravni kakovosti je nujno za pravilno delovanje naprav, priključenih na električno omrežje. Za kakovost napetosti v določeni točki omrežja sta odgovorna tako operater omrežja in kot tudi uporabnik. Vsak uporabnik omrežja (porabnik ali proizvajalec električne energije) mora omejiti negativni vpliv na omrežje (injekcija harmonikov, odjem jalove moči, fliker, nesimetrična obremenitev) in ga ohraniti znotraj vnaprej dogovorjenih ravni. Kršitev standardov kakovosti lahko pripelje do odstopanj osnovnih parametrov napetosti v stacionarnem stanju in do deformacije oblike napetostnega signala.

2 SIMULACIJSKI MODEL IN PRINCIP OBRATOVANJA SERIJSKE KRMILJENE DUŠILKE

Serijska krmiljena dušilka se uporablja za izboljšanje stabilnosti visokonapetostnega obloka in s tem zmanjšanje flikerja. Cilj je, da s serijsko dušilko stabiliziramo oblok peči, pri čemer se za krmiljenje dušilke uporabijo polprevodniška stikala (tiristorji). S pravilnim vodenjem serijske dušilke, ki je priključena med transformatorjem in pečjo, stabiliziramo oblok obločne peči. Pri tem dušilka deluje kot dinamična vzmet [1, 2]. Tehnologija temelji na možnosti hitrih preklpov pri sodobnih polprevodniških stikalih in naprednem prediktivnem računalniškem vodenju. Slika 1 prikazuje enopolno shemo elektroobločne peči, priključene na visokonapetostno omrežje, z vgrajeno krmiljeno serijsko dušilko. Krmiljena dušilka deluje na principu preusmerjanja toka obločne peči iz serijske dušilke (L_1) v paralelno dušilko (L_2). Z vklopom in izklopom paralelne dušilke, ki ima manjšo induktivnost, lahko vplivamo na tok oziroma moč peči. Ko regulacijski algoritem zazna prevelik tok, polprevodniška stikala ne prevajajo in tok steče preko serijske dušilke (na sliki 1 označeno s P1), z večjo induktivnostjo. Tako omejimo najvišjo vrednost, ki jo tok doseže. Kadar algoritem vodenja zazna stabilen oblok, stikala prevajajo in priključijo paralelno dušilko (označeno s P2), kar omogoča obratovanje peči pri večji moči [1, 2, 3].



Slika 1. Enopolna shema simuliranega omrežja

Slika 1 prikazuje simulirano omrežje. Prikazan je del električnega omrežja jeklarne, kjer obratuje obločna peč. Omrežje se napaja prek transformatorske postaje 110/35 kV. Deli omrežja so še pečni transformator 35/0,4 kV, dušilki, tiristorska stikala ter impedanca napajalnega kabla med transformatorsko postajo in pečnim transformatorjem. Vrednosti posameznih parametrov so podane v tabeli 1. S_k'' predstavlja kratkostično moč omrežja na zbiralkah 110 kV. Vrednosti kratkostične napetosti (u_k) pečnega transformatorja so za različne stopnje regulatorja odcefov podane v tabeli 2. Omrežje je bilo modelirano v programskem paketu PSCAD [5, 6].

Napetost $U_{omrežja}$ [kV]	110
Kratkostična moč S_k'' [MVA]	3750
Kratkostična napetost $u_{k,110/35}$ [%]	7,69
Induktivnost serijske dušilke L_1 [H]	0,02
Induktivnost kabla L_c [H]	0,0002
Induktivnost peči L_f [H]	0,00035
Induktivnost paralelne dušilke L_2 [H]	0,001
Upornost paralelne dušilke R_2 [Ω]	0,015
Upornost dušilke R [Ω]	0,3
Upornost kabla R_c [Ω]	0,062
Upornost peči R_f [Ω]	0,00035

Tabela 1. Vrednosti parametrov modela na sliki 1

Odcep transformatorja	Napetost na NN strani transformatorja [V]	u_k [%]
7	343,1	4,19
8	363,3	3,96
9	383,2	3,75
10	4,038	3,54
11	425,1	3,33
12	444,9	3,14
13	464,6	2,94
14	481,7	2,78
15	500	2,61

Tabela 2. Vrednosti u_k za različne stopnje regulatorja odcefov pečnega transformatorja.

2.1 Opis modela obločne peči

V nadaljevanju je opis nelinearnega modela elektroobločne peči. Nelinearna napetostno-tokovna karakteristika, $U-I$, je podana z naslednjim izrazom [5, 6]:

$$U_a = U_a(I) = U_{at} + \frac{C}{D+I_a} \quad (1)$$

kjer sta U_a in I_a napetost in tok peči, U_{at} je najnižja napetost peči, ki nastopi, kadar je tok peči najvišji, C in D pa sta konstanti, ki podajata razliko med naraščajočo in padajočo karakteristiko toka [5].

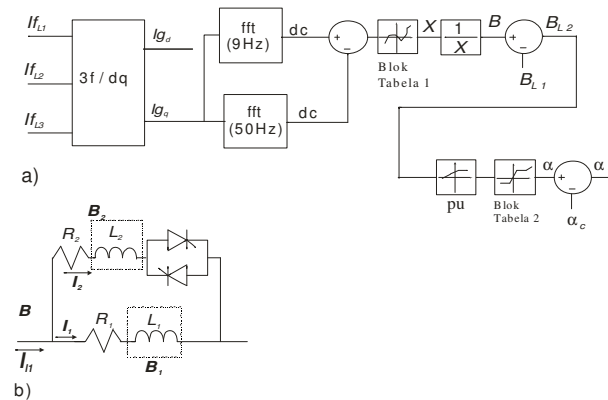
Za simulacijo spreminjanja dolžine obloka peči se uporabljajo stohastične in deterministične metode. S stohastičnimi metodami dobimo naključno spreminjanje dolžine obloka, kar je bližje realnosti, vendar pa je matematična analiza kompleksna in zahteva statistično obdelavo rezultatov. Deterministične metode po drugi strani upoštevajo sinusno spreminjanje dolžine obloka z določeno frekvenco, kar poenostavljeno odraža realno fizikalno sliko. To nam omogoči enostavnejše izračune, ki zahtevajo manj procesorske moči. Deterministični model v primerjavi s stohastičnim daje višje vrednosti flikerja, zato so rezultati, ki jih dobimo z uporabo tega modela, konservativni. To so razlogi za izbiro determinističnega spreminjanja dolžine obloka pri modeliranju peči. Dolžina obloka je določena z naslednjim izrazom:

$$l(t) = l_0 - \frac{D_1}{2} \sin \omega t \quad (2)$$

kjer je D_1 podan z amplitudo sinusne krivulje, l_0 pa je konstanta. Kadar je dejanska dolžina obloka enaka l_0 , model obločne peči ne generira harmonikov. Ker so človeške oči najdovzjetnejše za nihanja svetlobnega toka s frekvenco 8,8 Hz, je bila krožna frekvenca ω v izrazu (2) nastavljena na 9 Hz [5, 6].

2.2 Opis algoritma vodenja

Algoritem vodenja temelji na meritvah jalove moči (tokov) obločne peči. Blokovna shema algoritma je prikazana na sliki 2. Jalova komponenta (q -komponenta) toka je proporcionalna jalovi moči peči. Ker je tok popačen s harmoniki, q -komponenta toka ni konstantna vrednost. Z uporabo hitre Fourierove transformacije (FFT) algoritem izloči nizkofrekvenčna nihanja jalovega toka, ki so vir flikerja. S 50 Hz FFT izločimo harmonske komponente toka, z 9 Hz FFT pa osnovno harmonsko komponento. Izhodni vrednosti obeh filtrov v naslednjem koraku odštejemo. To predstavlja vhodni signal v blok 1, ki razliko pretvori v reaktanco X . Kadar je razlika minimalna, dobimo na izhodu tabele 1 vrednost $6,28 \Omega$, kar je najvišja vrednost obeh reaktanc. Kadar razlika doseže maksimalno vrednost, dobimo na izhodu tabele 1 vrednost $0,30 \Omega$, kar je najmanjša vrednost reaktanc. V naslednjem koraku vrednost reaktance pretvorimo v susceptanco B . Susceptanca B predstavlja vrednost susceptance obeh dušilk (slika 2. b).



Slika 2. Blokovna shema algoritma vodenja

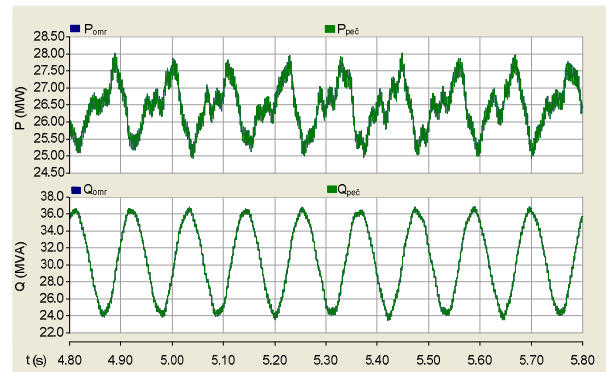
Vrednost susceptance B_1 je konstantna in enaka $0,159 \text{ S}$, medtem ko je vrednost susceptance B_2 odvisna od toka tiristorjskih stikal. Kot α je nelinearna funkcija susceptance B_2 in je določen s pomočjo tabele 2 [5]. Ta je zaradi faznega zamika med napetostjo na 35 kV in toka čez tiristorje korigiran z α_c . Vrednost kota korekcije je enaka 53° . Končno dobimo kot α_1 , ki predstavlja kot proženja tiristorjskih stikal. Predstavljen algoritem vodenja se lahko uporabi za izbrano frekvenco spreminjanja dolžine obloka.

3 SIMULACIJE OBRATOVANJA

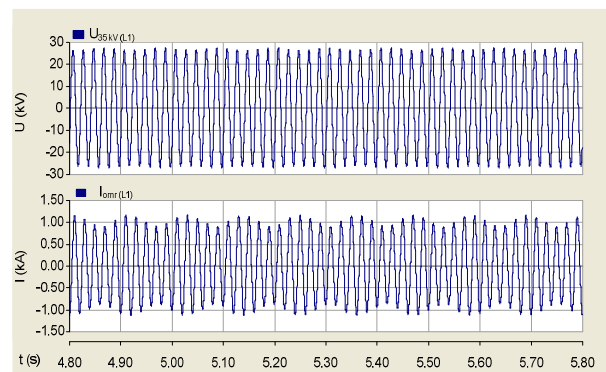
V nadaljevanju so predstavljeni trije primeri simulacij. V prvi simulaciji je predstavljeno obratovanje peči brez serijskih dušilk, v drugem primeru dušilke obratujejo z "grobo regulacijo", v tretjem primeru pa so dušilke vodene s predstavljenim algoritmom. Na koncu sledi še primerjava rezultatov. Kot osnovo za primerjavo smo privzeli rezultate simulacij obratovanja peči brez kompenzacije flikerja.

3.1 Simulacija brez kompenzacije

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati simulacije obratovanja peči brez kompenzacije, tj. brez serijskih dušilk. Časovni poteki moči, napetosti in toka so prikazani na slikah 3 in 4. Vrednosti delovne in jalove moči ter flikerja so podane v tabeli 3. S slik 3 in 4 so razvidna visokofrekvenčna in nizkofrekvenčna nihanja napetosti, toka ter delovne in jalove moči. Prav tako je razvidno, da sta delovna in jalova komponenta moči peči enaki delovni in jalovi komponenti moči omrežja. Jakost flikerja P_{st} na 110 kV zbiralkah je enaka $1,03$.



Slika 3. Časovna poteka delovne in jalove komponente moči peči (P_{fir} , Q_{fir}) brez tiristorjsko krmiljenih dušilk, 13. stopnja transformatorja.



Slika 4. Časovna poteka napetosti zbiralk 35 kV in toka omrežja brez tiristorjsko krmiljenih dušilk, 13. stopnja transformatorja.

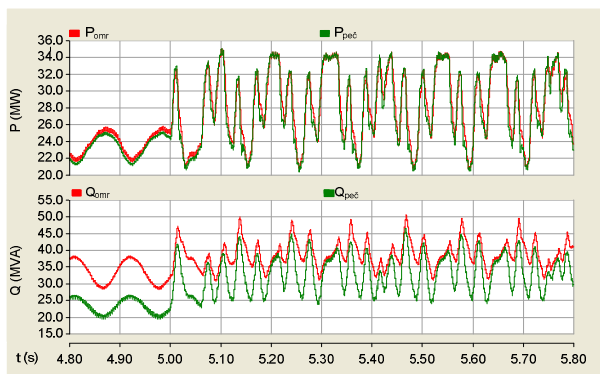
Izvedene so bile tudi simulacije za različne stopnje regulatorja napetostnih odcepkov pečnega transformatorja. Rezultati za posamezne stopnje so podani v tabeli 3. Da bi omogočili primerjavo rezultatov, smo vse nadaljnje simulacije izvedli pri približno enaki obratovalni točki peči.

Odcep transformatorja	15	14	13	12
$P_{st,35kV}$	9,51	8,91	8,36	7,71
$P_{st,110kV}$	1,21	1,15	1,10	1,03
P_{fur} [MW]	31,15	29,74	28,28	26,51
Q_{fur} [MVar]	40,71	37,37	34,20	30,51

Tabela 3. Vrednosti veličin za različne stopnje regulatorja odceпов pečnega transformatorja, brez krmiljenih dušilk (srednje vrednosti P in Q).

3.2 Simulacija z “groboregulacijo”

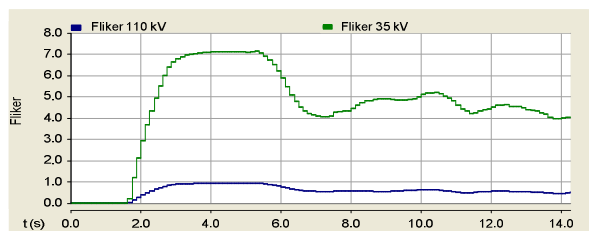
Simulirano je bilo delovanje peči s kompenzacijo flikerja, kjer je imela tiristorsko krmiljena paralelna dušilka samo dve mogoči stanji – popolnoma odprta ($\alpha = 90^\circ$) ali popolnoma zaprta ($\alpha = 180^\circ$). Od tod tudi poimenovanje “groboregulacija”. Pri popolnoma odprti dušilki tok doseže maksimalno vrednost. Pri popolnoma zaprti dušilki algoritem vodenja tiristorskih stikal ne deluje. Slika 5 prikazuje časovna poteka delovne in jalove moči. Algoritem začne delovati po 5 s od začetka simulacije. Pred tem serijska dušilka deluje kot vklopna induktivnost. Iz poteka delovne in jalove moči vidimo, da je prisotno izrazito nihanje obeh veličin, kar je posledica grobe regulacije. Pri tem je bil regulator odceпов pečnega transformatorja nastavljen na stopnjo 16.



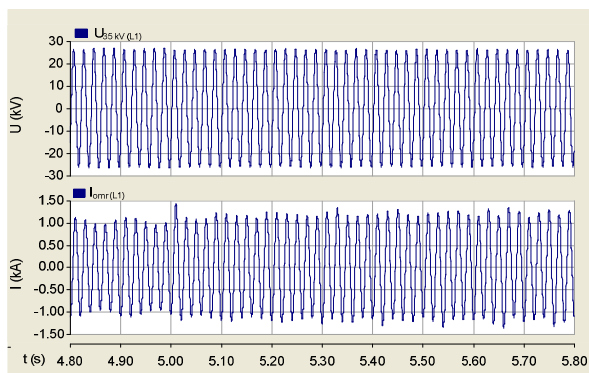
Slika 5. Poteki delovne in jalove moči peči ter delovne in jalove moči omrežja pri “groboregulaciji”, 16. stopnja regulatorja odceпов

Algoritem vodenja uporabljen v prikazani simulaciji temelji na stalnem merjenju razlike med referenčno in dejansko vrednostjo q -komponente toka. Referenčna vrednost je enaka 0. Kadar algoritem zazna, da je razlika vrednosti večja od 0, se stikala odpro in tok steče čez induktivnost L_I . Kadar je razlika manjša od nič, se tiristorska stikala zapro ter tako kratkostičijo serijsko induktivnost L_I . Posledično prihaja do velikih nihanj delovne in jalove komponente moči. Fliker na zbiralkah 35 kV in 110 kV je prikazan na sliki 6. Omeniti je potrebno, da model flikermetra v programu PSCAD prvi dve sekundi simulacije ne izračunava velikosti flikerja. Na sliki 7 je prikazana amplituda napetosti zbiralk 35 kV pred in po začetku obratovanja regulacijskega

algoritma. V tabeli 4 so podane srednje vrednosti parametrov peči.



Slika 6. Potek vrednosti flikerja zbiralk 35 kV in 110 kV za “groboregulacijo” pred in po začetku delovanja kompenzatorja



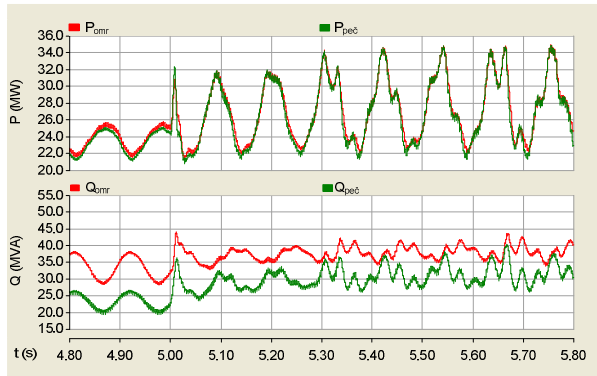
Slika 7. Poteka napetosti zbiralk 35 kV in toka omrežja pri “groboregulaciji” pred in po začetku delovanja kompenzatorja, 16. stopnja regulatorja odceпов

Odcep	16
$P_{st,35kV}$	4,79
$P_{st,110kV}$	0,56
P_{fur} [MW]	28,99
Q_{fur} [MVar]	34,80
P_{grid} [MW]	29,24
Q_{grid} [MVar]	39,62

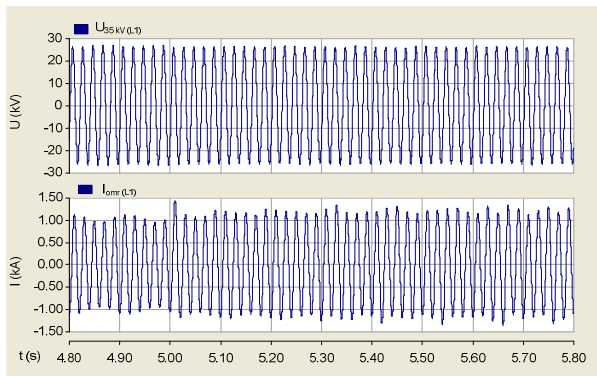
Tabela 4. Vrednosti parametrov peči pri “groboregulaciji”, 16. stopnja regulatorja odceпов (srednje vrednosti moči P in Q)

3.3 Simulacija s popolno regulacijo

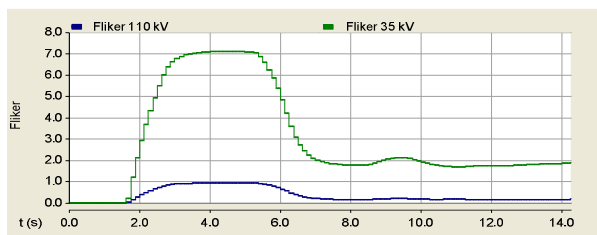
V nadaljevanju so prikazani rezultati simulacij obratovanja peči s popolno regulacijo kompenzacije flikerja. Pri tem se krmilni kot α spreminja med 90° in 180° [7]. Zaradi faznega zamika med napetostjo zbiralk 35 kV in toka čez tiristorje tok doseže najvišjo vrednost pri kotu proženja $\alpha = 90^\circ$. Najnižjo vrednost doseže pri kotu 180° . V prvih 5 s simulacije algoritem vodenja ne deluje. V tem času serijska sušilka deluje kot vklopna induktivnost. Po preteku 5 s regulacijski algoritem začne delovati in izračunavati kot α . Na slikah 8 in 9 so prikazani poteki delovne in jalove moči ter tok in fliker pred in po začetku delovanja regulacijskega algoritma. V tabeli 5 so podane vrednosti moči in flikerja za 16. stopnjo regulatorja odceпов pečnega transformatorja.



Slika 8. Poteki delovne in jalove moči peči (P_{fur} , Q_{fur}) in delovne in jalove moči omrežja (P_{grid} , Q_{grid}) pred in po začetku delovanja regulacijskega algoritma, 16. stopnja regulatorja odceпов



Slika 9. Poteka napetosti zbiralk 35 kV in toka omrežja pred in po začetku delovanja regulacijskega algoritma, 16. stopnja regulatorja odceпов



Slika 10. Potek vrednosti flikerja zbiralk 110 kV in 35 kV pred in po začetku delovanja regulacijskega algoritma, 16. stopnja regulatorja odceпов

Odcep	16
P_{st_35kV}	1,83
P_{st_110kV}	0,16
P_{fur}	27,29
Q_{fur}	30,82
P_{grid}	27,55
Q_{grid}	37,80

Tabela 5. Vrednosti moči za 16. stopnjo regulatorja odceпов pečnega transformatorja (srednje vrednosti moči P in Q)

4 ANALIZA REZULTATOV SIMULACIJ

Lahko vidimo, da je po začetku delovanja regulacijskega algoritma nihanje omrežne jalove moči manjše, medtem ko je nihanje delovne moči nekoliko večje (slika 8). Nekoliko se poveča tudi poraba energije, kar je posledica načina obratovanja kompenzatorja.

Da bi prikazali prednosti kompenzacije jalove moči s krmiljeno serijsko dušilko, prvih 5 s simulacije regulator ne obratuje. V tem času kompenzator obratuje kot fiksna serijska dušilka. Vrednosti parametrov za ta čas simulacije in za čas po preteku 5 s so prikazani v tabeli 6. Podani so tudi rezultati obratovanja brez kompenzatorja. Opazimo lahko, da se z začetkom obratovanja kompenzacije nivo flikerja občutno zniža. Hkrati se poraba energije v primerjavi z obratovanjem brez kompenzacije nekoliko poveča, kar je posledica večjih izgub na serijski dušilki.

Odcep	16	16	13
Čas	Prvih 5 s	Po preteku 5 s	Brez kompenzatorja
P_{st_35kV}	7,11	1,83	8,36
P_{st_110kV}	0,92	0,16	1,10
P_{fur} [MW]	23,31	27,29	28,28
Q_{fur} [MVA]	23,16	30,82	34,20
P_{grid} [MW]	23,80	27,55	28,28
Q_{grid} [MVA]	33,37	37,80	34,20

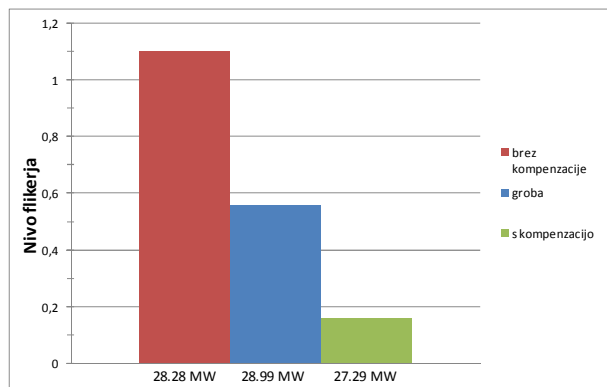
Tabela 6. Vrednosti električnih parametrov za prvih 5 s simulacije, po preteku 5 s simulacije in za obratovanje brez kompenzacije (srednje vrednosti moči P in Q)

Iz tabele 6 je razvidno, da je obratovalna točka peči s kompenzacijo flikerja pri $P = 27,29$ MW in $Q = 30,82$ MVA približno enaka obratovalni točki brez kompenzacije flikerja pri 13. stopnji regulatorja odceпов pečnega transformatorja. Prav tako lahko zaključimo, da je delovna moč peči pri obratovanju z "grobno regulacijo" kompenzacije približno enaka delovni moči brez kompenzacije z obratovanjem peči pri 13. stopnji regulatorja odceпов (glej tabelo 7).

Regulacija	"Groba"	Brez kompenzacije	S kompenzacijo
Odcep	16	13	16
P_{st_35kV}	4,79	8,36	1,83
P_{st_110kV}	0,56	1,10	0,16
P_{fur}	28,99	28,28	27,29
Q_{fur}	34,80	34,20	30,82

Tabela 7. Primerjava rezultatov simulacij

Rezultati simulacij so prikazani tudi na sliki 11. Opazimo lahko, da pri približno enaki delovni moči peči s kompenzacijo dosežemo občutno znižanje nivoja flikerja. Ta je s kompenzacijo približno 7-krat nižji kot brez kompenzacije. Z uporabo tiristorso krmiljenih dušilk lahko torej dosežemo občutno znižanje flikerja v visokonapetostnem omrežju.



Slika 11. Grafična primerjava vrednosti flikerja pri približno enaki delovni moči peči

5 SKLEP

V članku je prikazana uporaba tiristorsko krmiljenih serijskih dušilk kot učinkovitega načina kompenzacije flikerja. S primerjavo z drugimi načini kompenzacije (pasivna dušilka) je bilo ugotovljeno, da ima uporaba krmiljenih dušilk več prednosti: manjše nihanje jalove moči, bolj stabilno obratovanje peči, peč lahko obratuje z večjo delovno močjo pri isti stopnji regulatorja odcepov transformatorja. Uporaba serijskih krmiljenih dušilk je dražja, a hkrati tudi bolj učinkovita rešitev za zmanjšanje flikerja.

ZAHVALA

Operacijo delno financira Evropska unija, in sicer iz Evropskega socialnega sklada. Operacija se izvaja v okviru Operativnega programa razvoja človeških virov za obdobje 2007 – 2013, 1. razvojne prioritete: Spodbujanje podjetništva in prilagodljivosti, prednostne usmeritve 1.1.: Strokovnjaki in raziskovalci za konkurenčnost podjetij.

LITERATURA

- [1] J. Mulcahy, T. L. Ma, "The SPLC A New Technology for Arc Stabilization and Flicker Reduction on AC Electric Arc Furnaces", Toronto, Ontario, Canada IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors, IEEE Standard 1036-1992, 1992.
- [2] T. Gerritsen, T. Ma, M. Sedighy, J. Janez, F. Stober, N. Voermann, J. R. Frias, "SPLC – A Power Supply for Smelting Furnaces", Santo Domingo, Dominican Republic.
- [3] United State Patent, patent no. US 6.603.795 B2, Date of patent 05.08.2003
- [4] www.pscad.com.
- [5] I. Papič, "Analiza vpliva obratovanja porabnikov na ZGK železarna Ravne in ZGK železarna Štore na kakovost napetosti v prenosnem omrežju", Ljubljana, February 2005, pp. 75-96
- [6] I. Papič, B. Blažič, "Kompenzacija flikerja s statičnim kompenzatorjem", 7. Konferenca slovenskih elektroenergetikov, stran, Velenje, 2005.

Ljubiša Spasojević je diplomiral leta 2008 na Tehnični fakulteti Univerze v Novem Sadu. Od leta 2008 je mladi raziskovalec v Laboratoriju za električna omrežja in naprave. Raziskovalno delo Ljubiše Spasojevića je usmerjeno na problematiko kakovosti električne energije v velikih industrijskih postrojih.

Boštjan Blažič je diplomiral leta 2000, magistriral leta 2003 in doktoriral leta 2005 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je od leta 2007 zaposlen kot asistent. Poleg poučevanja njegovo delo zajema še raziskave na področjih kakovosti električne energije, sodobnih kompenzacijskih naprav in razpršenih virov električne energije.

Prof. dr. Igor Papič je diplomiral leta 1992, magistriral leta 1995 in doktoriral leta 1998 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. V letih 1994–1996 je bil na izpopolnjevanju na Siemensovem oddelku za prenos in razdelitev električne energije v Erlangu v Nemčiji. V letu 2001 je bil gostujoči profesor na University of Manitoba v Winnipegu (Kanada). Od leta 2009 je redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Njegova raziskovalna dejavnost vključuje aktivne kompenzatorje, naprave FACTS, kakovost električne energije in vključevanje razpršenih virov v omrežje.