Kompenzacije neaktivne snage potrošača sa promjenljivom strujom primjenom kondenzatora i pasivnog filtra

Milan Ivezić, Milan Jović, Aleksandra Grujić
Nove energetske tehnologije
Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija
Beograd, Srbija
milan.ivezic@viser.edu.rs, milanj@viser.edu.rs, aleksandrag@viser.edu.rs

Sadržaj—**U ovom radu je prikazana uporedna analiza efekata kompenzacije neaktivne snage jednosmjernog motora napajanog preko trofaznog tiristorskog ispravljača korišćenjem kondenzatorskih baterija i jednostrukog, dvostrukog odnosno trostrukog pasivnog filtra. Za dimenzionisanje kondenzatorskih baterija, odnosno određivanje parametara pasivnog filtra je korišćena metoda minimizacije linijskih struja.**

Ključne riječi-neaktivna snaga, kompenzacija, kondenzatorske baterije, pasivni filtar, viši harmonici

I. UVOD

Više harmonične učestanosti (skraćeno viši harmonici) postoje već dugi niz godina u elektroenergetskom sistemu. Pojava viših harmonika je dobila na značaju i postala predmet proučavanja usljed dva trenda u oblasti elektroenergetike: sve većeg korišćenja kondenzatorskih baterija za kompenzaciju reaktivne snage kao i rasprostranjene upotrebe energetske elektronike u cilju povećanja pouzdanosti i efikasnosti sistema. [1]

Navedene tendencije za posljedicu imaju pojavu viših harmonika kako u struji tako i u naponu, pa se definicije snaga koje se koriste u prostoperiodičnim sistemima sa simetričnim naponima i strujama ne mogu koristiti. [2], [3]. Zbog toga pojam reaktivne snage nije relevantan sa stanovišta kompenzacije, već se uvodi pojam neaktivne snage. Neaktivna snaga obuhvata svu nekorisnu snagu potrošača, tj. onu snagu koja ne doprinosi Džulovim gubicima, a koja se pojavljuje kao posledica recipročne razmene energije izmedju izvora i potrošača, harmonijskih izobličenja i nesimetrija napona i struja potrošača u trofaznom sistemu [4].

U ovom radu će biti izloženo poređenje kompenzacije neaktivne snage potrošača korišćenjem kondenzatorskih baterija i pasivnih filtara. Simulacija kompenzacije neaktivne snage je izvršena u Simulinku, a kao potrošač je korišćen jednosmjerni motor koji se napaja preko tiristorskog ispravljača. Tiristorski ispravljač se napaja iz mreže naponom bez harmoničnih izobličenja preko realnog četvorožilnog priključnog voda. Predviđena su dva režima rada jednosmjernog motora koji se manifestuju promjenom struje motora.

Efekti kompenzacije će biti sagledani kroz efektivne vrijednosti struja u napojnom vodu potrošača, napona na mjestu priključenja potrošača, kao i totalnog harmonijskog sadržaja tih struja i napona.

II. KOMPENZACIJA NEAKTIVNE SNAGE POTROŠAČA KORIŠĆENJEM KONDENZATORA [5]

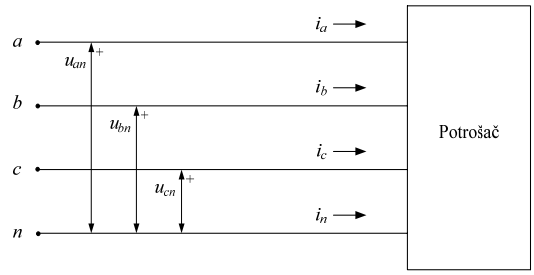
Za potrošač u trofaznom četvorožičnom sistemu (slika 1), trenutne vrednosti napona potrošača v_a, v_b, v_c i v_n, i trenutne vrednosti struja i_a, i_b, i_c i i_n u provodnicima napojnog voda potrošača mogu se predstaviti kao složenoperiodične veličine na sledeći način:

$$v_j = \sum_{k=1}^{n_j} \sqrt{2} V_{jk} \cos(k\omega t + \theta_{jk}), \quad j = a,b,c,n \tag{1}$$

$$i_j = \sum_{k=1}^{m_j} \sqrt{2} I_{jk} \cos(k\omega t + \psi_{jk}), \quad j = a,b,c,n \tag{2}$$

$$i_n = -i_a - i_b - i_c \tag{3}$$

gde V_{jk} i I_{jk} predstavljaju efektivne vrijednosti k-tih harmonika napona i struje sa odgovarajućim faznim uglovima θ_{jk} i ψ_{jk}, n_j je red najvišeg harmonika napona, m_j je red najvišeg harmonika struje, a ω je osnovna ugaona učestanost (jednaka $2\pi f$)



Slika 1. Potrošač u četverožičnom trofaznom sistemu

Aktivna, prividna i neaktivna snaga potrošača pri simetričnim naponima se izračunavaju na sljedeći način:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T (v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c + v_n i_n)\, dt \tag{4}$$

$$S = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2 + V_n^2}\,\sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2} \tag{5}$$

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \tag{6}$$

gdje V_a, V_b, V_c i V_n predstavljaju efektivne vrednosti napona na potrošaču a I_a, I_b, I_c i I_n predstavlaju efektivne vrednosti linijskih struja.

Ako se kao kompenzator koriste kondenzatori C_a, C_b, i C_c vezani u zvijezdu, kao na Sl. 2, linijske struje su:

$$i_a = C_a\, D(v_a - v_0) + i_{\mathrm{p}a} \tag{7}$$

$$i_b = C_b\, D(v_b - v_0) + i_{\mathrm{p}b} \tag{8}$$

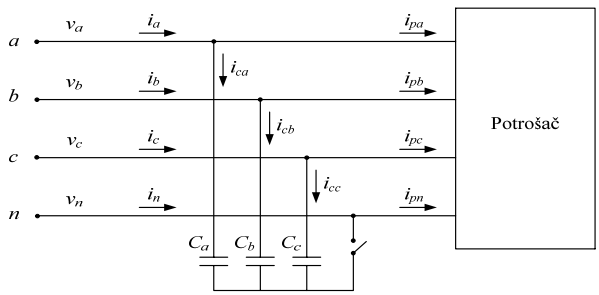
$$i_c = C_c\, D(v_c - v_0) + i_{\mathrm{p}c} \tag{9}$$

$$i_n = -C_a\, D(v_a - v_0) - C_b\, D(v_b - v_0) - C_c\, D(v_c - v_0) + i_{\mathrm{p}n} \tag{10}$$

gdje $D=d/dt$ predstavlja operator diferenciranja, v_0 je napon zvezdišta, $i_{\mathrm{p}a}$, $i_{\mathrm{p}b}$, $i_{\mathrm{p}c}$ i $i_{\mathrm{p}n}$ su struje potrošača (linijske struje prije kompenzacije).

Kada je zvezdište kondenzatora izolovano, napon zvezdišta v_0 u opštem slučaju može da se razlikuje od napona neutralnog provodnika v_n [5]:

$$v_0 = \frac{C_a}{C_a + C_b + C_c} v_a + \frac{C_b}{C_a + C_b + C_c} v_b + \frac{C_c}{C_a + C_b + C_c} v_c \tag{11}$$



Slika 2. Kompenzacija neaktivne snage potrošača korišćenjem kondenzatora

Kada je zvezdište kondenzatora povezano sa neutralnim provodnikom, ili kada su fazni naponi potrošača uravnoteženi, napon zvezdišta v_0 je:

$$v_0 = v_n \tag{12}$$

Kriterijum za određivanje optimalnih kapacitivnosti kondenzatora za kompenzaciju je minimizacija efektivnih vrijednosti struja u napojnom vodu potrošača definisan na sljedeći način:

$$J = I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2 \tag{13}$$

$$J = \int_0^T f(i(t))dt = \frac{1}{T}\int_0^T \left(i_a^2 + i_b^2 + i_c^2 + i_n^2\right) dt \to \min \tag{14}$$

Zamjenom jednakosti (7)-(10) u kriterijum (14), njegovim diferenciranjem i izjednačavanjem diferencijala sa nulom se dobijaju izrazi za optimalne kapacitivnosti kondenzatora za kompenzaciju:

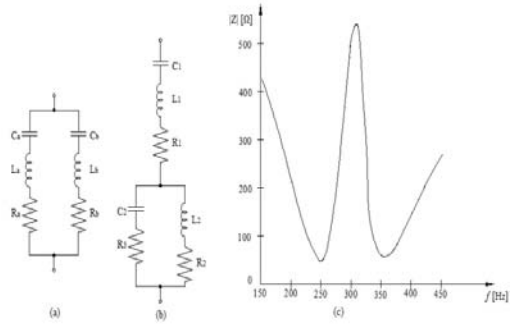
$$C_{j\,\mathrm{opt}} = -\frac{\frac{1}{T}\int_0^T i_{\mathrm{p}j}\, D(v_j - v_0)\, dt}{\frac{1}{T}\int_0^T \left(D(v_j - v_0)\right)^2 dt}, \quad j = a,b,c \tag{15}$$

III. KOMPENZACIJA NEAKTIVNE SNAGE KORIŠĆENJEM PASIVNOG FILTRA [5]

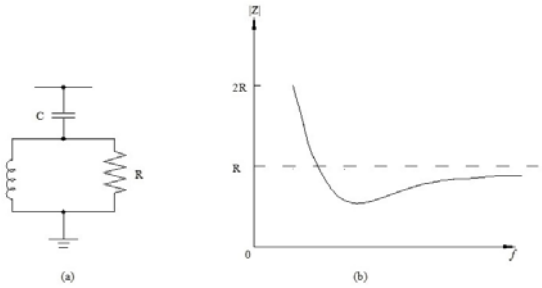
Pasivni filtri se dobijaju vezivanjem prigušnice na red sa kondenzatorom tako da oni za određenu harmoničnu učestanost predstavljaju granu veoma male impendanse. Glavna svrha filtara je da redukuju amplitude jedne ili više harmoničnih komponenti određene frekvencije u struji, odnosno naponu, ali se mogu koristiti i za kompenzaciju neaktivne snage potrošača. [1]. Ideja korišćenja pasivnih filtara je se izbjegnu negativne posljedice kompenzacije korišćenjem kondenzatora. Veličina filtra je definisana kao reaktivna snaga koju filtar može da da pri osnovnoj učestanosti. Ona je zapravo srazmjerna reaktivnoj snazi koju generiše kondenzator.

Pasivni filtri se mogu podijeliti na usklađene ili rezonantne (oni koji predstavljaju malu impedansu za jednu harmoničnu učestanost, Sl. 3) i neusklađene ili prigušne (koji predstavljaju malu impedansu za širi spektar harmonika, Sl. 4). [6] Neusklađeni filtar predstavlja malu impedansu za širok spektar harminika bez potrebe za raščlanjivanjem paralelnih grana filtra čime se izbjegava povećanje broja prekidačkih elemenata, a time i problemi održavanja filtra. Međutim, da bi se postigao nivo filtriranja kao kod usklađenih filtara, on mora biti dimenzionisan na veću snagu.

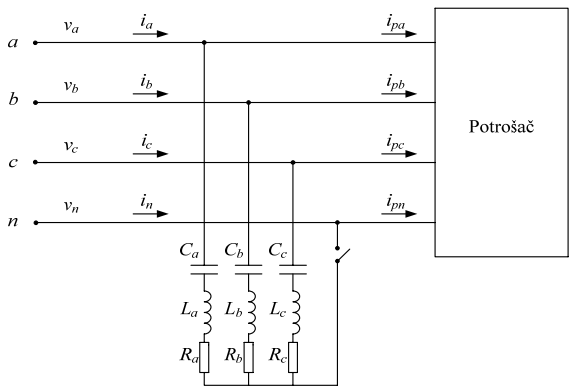
Na Sl. 5 je prikazan princip kompenzacije neaktivne snage potrošača korišćenjem pasivnog filtra.



Slika 3. Transformacija (a) dva jednostruka u (b) jedan dvostruki usklađeni filtar. (c) Impedansadvostrukog usklađenog filtra za 5. i 7. harmonik u funkciji frekvencije



Slika 4. (a) Prigušni filtar 2. reda i (b) njegova impedansa u funkciji frekvencije



Slika 5. Kompenzacija neaktivne snage potrošača korišćenjem pasivnog filtra

Rezonantna učestanost ω_{rj} grane pasivnog filtra se odabirom induktivnosti prigušnice L_i podešava na frekvenciju harmonika koji treba suzbiti:

$$\omega_{\mathrm{r}\,j} = \frac{1}{\sqrt{L_j C_j}}, \quad j = a,b,c \tag{16}$$

Kod kompenzacije neaktivne snage korišćenjem pasivnog filtra treba voditi računa da se rezonantna učestanost filtra ne podudari sa nekom od viših harmoničnih učestanosti koje su prisutne u naponu kojim se napaja potrošač. Zbog toga se pasivni filtri koriste za suzbijanje harmonika do reda 5 jer se smatra da u tom opsegu frekvencija ne postoje izraženi viši harmonici napona. [7]

Kapacitivnost potrebna za kompenzaciju neaktivne snage se postiže kondenzatorom u grani filtra. Kriterijum za odabir kapacitivnosti kondenzatora u grani filtra je da ekvivalentna kapacitivnost grane filtra bude jednaka optimalnoj kapacitivnosti kondenzatora $C_{j\,\mathrm{opt}}$ za osnovnu učestanost ω_1:

$$C_{j\,\mathrm{e}} = \frac{1}{\omega_1} \cdot \mathrm{Im}\left\{\underline{Y}_j(\omega_1)\right\} = C_{j\,\mathrm{opt}}, \quad j = a,b,c \tag{17}$$

gdje je sa $\underline{Y}_i(\omega_1)$ označena admitansa i-te grana filtra pri kružnoj učestanosti ω_1:

$$\underline{Y}_j(\omega_1) = \frac{1}{R_j + \mathrm{j}\omega_1 L_j + \dfrac{1}{\mathrm{j}\omega_1 C_j}}, \quad j = a,b,c \tag{18}$$

Zamjenom izraza (18) u izraz (17) dobija se ekvivalentna kapacitivnost grane filtra:

$$C_{j\mathrm{e}} = \frac{C_j(1-\omega_1^2 L_j C_j)}{(\omega_1 R_j C_j)^2 + (1-\omega_1^2 L_j C_j)^2} = C_{j\,\mathrm{opt}}, \quad j = a,b,c \tag{19}$$

Faktor dobrote prigušnice u grani filtra je:

$$Q_{\mathrm{z}} = \frac{\omega_{\mathrm{r}\,j} L_j}{R_j}, \quad j = a,b,c \tag{20}$$

Zamjenom jednačina (16) i (20) u jednačinu (19) dobija se izraz za kapacitivnost kondenzatora C_j u grani filtra:

$$C_j = \frac{\left(\dfrac{1}{Q_{\mathrm{z}}}\dfrac{\omega_1}{\omega_{\mathrm{r}\,j}}\right)^2 + \left(1 - \dfrac{\omega_1^2}{\omega_{\mathrm{r}\,j}^2}\right)^2}{\left(1 - \dfrac{\omega_1^2}{\omega_{\mathrm{r}\,j}^2}\right)} C_{j\,\mathrm{opt}}, \quad j = a,b,c \tag{21}$$

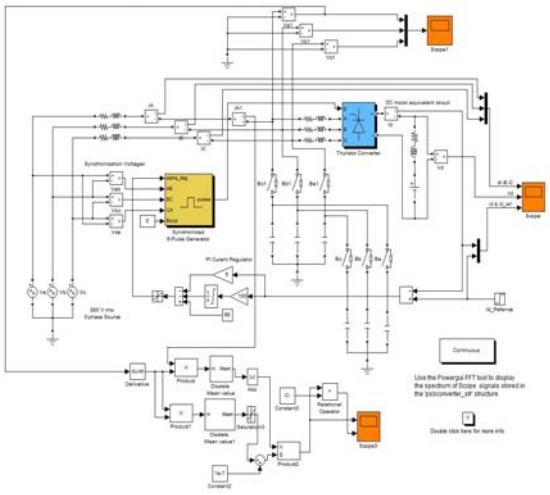
Kako je $\omega_{\mathrm{r}\,j}^2 >> \omega_1^2$ i $Q_{\mathrm{z}}^2 >> 1$, prethodni izraz se može uprostiti, pa je kapacitivnost grane filtra:

$$C_j \approx \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_{\mathrm{r}\,j}^2}\right) C_{j\,\mathrm{opt}}, \quad j = a,b,c \tag{22}$$

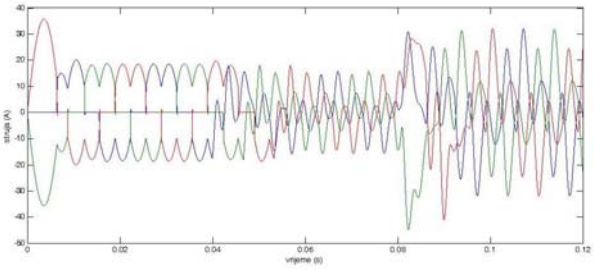
IV. SIMULACIJA KOMPENZACIJE KORIŠĆENJEM KONDENZATORA

Radi simulacije kompenzacije neaktivne snage potrošača je razvijed Simulink model prikazan na Sl. 4. Pretpostavljeno je da napon mreže ne sadrži više harmonike i ima efektivnu vrijednost 380 V. Napojni vod potrošača ima otpornost 1 Ω i induktivnost 1 mH. Kao potrošač je uzet motor jednosmjerne struje čija se struja na početku simulacije ima vrijednost 10 A. Nakon 2 periode mrežnog napona, uključuje se prvi stepen kompenzacije realizovan sa 3 kondenzatora spregnuta u zvijezdu, svaki kapacitivnosti 160 μF. Nakon 2 periode mrežnog napona, struja motora mijenja vrijednost na 25 A i istovremeno se uključuje drugi stepen kompenzacije dodavanjem 3 kondenzatora kapacitivnosti 100 μF paralelno postojećim. Uključenje kondenzatora je izvedeno prekidačima, a potrebna kapacitivnost kondenzatora je određena prema jednačini (15).

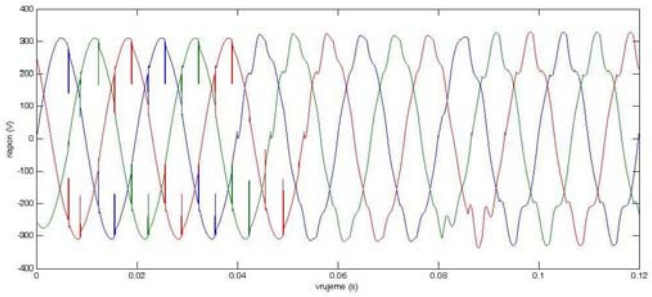
Na Sl. 7 su prikazane struje u napojnim vodovima potrošača prije kompenzacije i nakon uključenja prvog, odnosno drugog stepena kompenzacije. Na Sl. 8 su prikazani fazni naponi na priključcima potrošača prije kompenzacije i nakon uključenja prvog, odnosno drugog stepena kompenzacije.



Slika 6. Simulink model za kompenzaciju korišćenjem kondenzatora



Slika 7. Struje u napojnom vodu prije i nakon kompenzacije



Slika 8. Naponi na priključcima potrošača

Kao što se može promijetiti na Sl. 7, pri uključenju drugog stepena kompenzacije dolazi do pojave rezonanse, prvenstveno zbog inuktivnosti u napojnom vodu potrošača. Kao mjera za suzbijanje ove pojave se može ostvariti dodavanjem antirezonantne prigušnice u svaku od grana, čime bi se formirao tzv. *detuned* filtar čija bi rezonantna učestanost bila različita od postojećih učestanosti u harmonijskom spektru struje. Rezonantna učestanost ovako dobijenog filtra je data izrazom:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \tag{23}$$

U praksi se rezonantna učestanost ovakvog filtra podešava na neku od standardizovanih vrijednostim, najčešće 189 Hz [8].

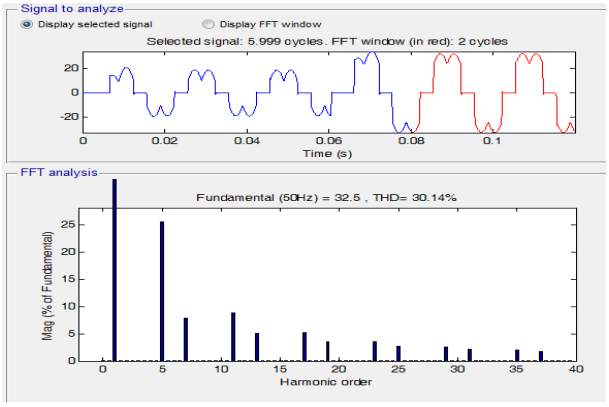
V. SIMULACIJA KOMPENZACIJE KORIŠĆENJEM PASIVNOG FILTRA

Za kompenzaciju neaktivne snage potrošača korišćenjem pasivnog filtra treba poznavati poznavati harmonijski sadržaj struja potrošača kako bi se podesila rezonantna učestanost filtra prema dominantnim harmoničnim učestanostima u struji. Na Sl. 9 je prikazana harmonijska analiza struja potrošača prije kompenzacije.

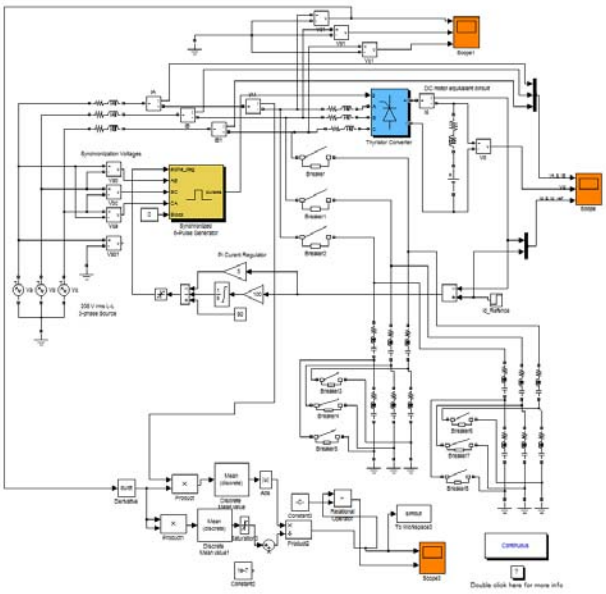
Kao što se vidi sa Sl. 9 dobijene FFT analizom linijskih srtruja, najveći udio od viših harmoničnih komponenti imaju 5.,7.11. harmonik.

Koristeći optimalnu kapacitivnost kondenzatora C_{opt}, pomoću izraza (21) i (20) se dobijaju parametri pasivnog filtra za kompenzaciju. Za prigušnicu u pasivnom filtru je usvojen faktor dobrote 60. Izvršena je kompenzacija na tri načina: Jednostrukim filtrom rezonantne učestanosti 500π rad/s, dvostrukim filtrom rezonantne učestanosti 700π rad/s i trostrukim filtrom rezonantne učestanosti 1100π rad/s. Svaka od rezonantnih grana filtra je se sastoji od dva stepena koji su vezani na red pri prvom stepenu kompenzacije, za struju od 10A, dok se donja grana filtra kratkospaja u drugom stepenu kompenzacije, za struju od 25A (Sl. 10).

Pri određivanju parametara filtra treba voditi računa da, u svakom od stepena kompenzacije, ekvivalentna kapacitivnost filtra koji se sastoji iz redno i paralelno vezanih grana bude jednaka optimalnoj kapacitivnosti kondenzatora za kompenzaciju, kao što je to određeno jednačinom (22).

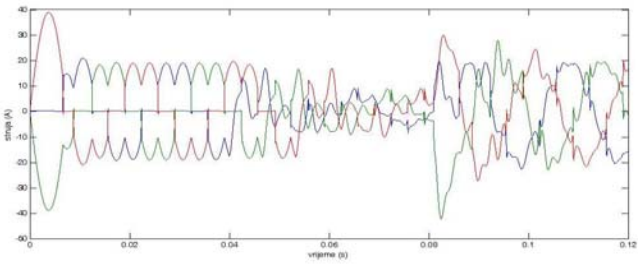


Slika 9. Harmonijska analiza struja prije kompenzacije

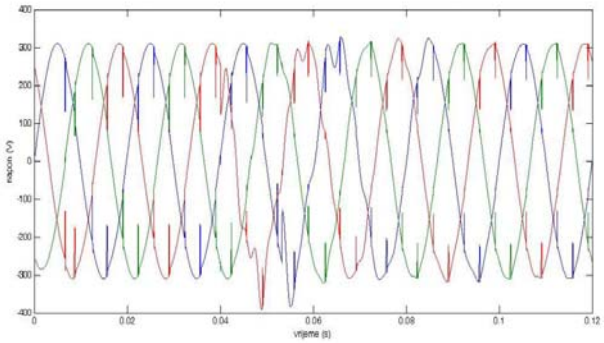


Slika 10. Simulink model za kompenzaciju korišćenjem dvostrukog pasivnog filtra

Na Sl. 11 su prikazane struje u napojnim vodovima potrošača prije kompenzacije i nakon uključenja prvog, odnosno drugog stepena kompenzacije pasivnim filtrom. Na Sl. 12 su prikazani fazni naponi na priključcima potrošača prije kompenzacije i nakon uključenja prvog, odnosno drugog stepena kompenzacije.



Slika 11. Struje u napojnom vodu prije i nakon kompenzacije



Slika 12. Naponi na priključcima potrošača

U Tabeli 1 su prikazane efektivne vrijednosti ukupnih struja i napona, vrijednosti struje i napona osnovnog harmonika, kao i THD faktori prije kompenzacije i nakon kompenzacije za sva četiri opisana načina kompenzacije.

TABELA I. PRIKAZ EFEKATA RAZLIČITIH NAČINA KOMPENZACIJE

		Prije kompenzacije				Nakon kompenzacije			
		I [A]	U[V]	I [A]	U[V]	I [A]	U[V]	I [A]	U[V]
Kndenzator	I_1/U_1	15,71	215,06	32,60	209,22	11,27	215,96	13,87	214,33
	THD [%]	37,56	7,84	30,12	11,79	87,12	9,69	147,40	12,79
	RMS	16,78	215,60	34,05	210,67	14,95	216,97	24,70	216,08
Jednostruki filtar	I_1/U_1	15,71	215,06	32,60	209,22	9,02	216,35	12,64	214,89
	THD [%]	37,56	7,84	30,12	11,79	31,29	6,35	23,88	7,37
	RMS	16,78	215,60	34,05	210,67	9,45	216,79	12,99	215,32
Dvostruki filtar	I_1/U_1	15,71	215,06	32,60	209,22	8,85	216,09	10,75	215,45
	THD [%]	37,56	7,84	30,12	11,79	20,62	5,15	22,08	6,38
	RMS	16,78	215,60	34,05	210,67	9,04	216,37	11,01	215,88
Trostruki filtar	I_1/U_1	15,71	215,06	32,60	209,22	5,49	215,11	9,35	214,08
	THD [%]	37,56	7,84	30,12	11,79	18,21	5,78	19,13	4,90
	RMS	16,78	215,60	34,05	210,67	5,58	215,47	9,52	214,34

VI. ZAKLJUČAK

Iz rezultata simulacija se može zaključiti da je kompenzacija korišćenjem pasivnih filtara učinkovitija od kompenzacije korišćenjem kondenzatora i u pogledu smanjenja efektivnih vrijednosti struja u napojnom vodu i u pogledu smanjenja THD faktora. Važno je napomenuti da je ovako nizak THD faktor struja posljedica činjenice da u naponu mreže nema viših harmoničnih komponenti. Iz istog razloga je moguća i kompenzacija filtrima rezonantne učestanost reda 7. i 11. harmonika, jer ona ne bi dala dobre rezultate u prisustvu viših harmonika u naponu.

LITERATURA

[1] G. J. Wakileh, "Power System Harmonics", Springer, 2001

[2] IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE Std 1459-20.

[3] H. Spath, "A general purpose definition of active current and non-active power based on German standard DIN 40110", *Electrical engineering*, vol 19, no. 4, pp. 1968-1974, October 2004.

[4] L. Czarnecki, "Physical Reason of Current RMS Value Increase in Power Systems with Nonsinusoidal Voltage", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol 8, No. 1, pp. 437-447, January 1993.

[5] T.B. Šekara, J.Č.Mikulović, "Optimal Non-Active Power Compensation Under Non-Sinusoidal Condition", Electrical Engineering, Volume 88, No. 5, June 2006.

[6] M. B. Kostić, "Teorija i praksa projektovanja električnih instalacija", Akademska misao, Beograd, 2005.

[7] E. W. Kimbark, "Direct Current Transmission", John Wiley & Sons, Inc. 1971.

[8] P. Riese, Manual of Power Factor Corection, FRAKO Kondensatoren- und Anlagenbau GmbH, Teningen, 2012.

ABSTRACT

This paper presents a comparative analysis of the effects of compensation non-active power of DC motor, which supplied with the three-phase thyristor rectifier, using capacitor bank and a single, double or triple passive filter. For sizing of capacitor bank and determination the parameters of passive filter, the procedure minimization of line current was used.

NON-ACTIVE POWER COMPENSATION OF VARIABLE LOADS BY USING CAPACITOR BANK AND A PASSIVE FILTER

Milan Ivezić
Milan Jović
Aleksandra Grujić