

Originalan naučni rad/ Original scientific paper

UDK/UDC: 621.311.1: 621.3.011.72

<https://doi.org/10.5937/bizinfo2102039B>

## Izbor parametara C-filtra u distributivnim mrežama sa nelinearnim opterećenjem

### Selection of C-filter parameters in nonlinear load distribution networks

Slobodan Bjelić<sup>a</sup>, Filip Marković<sup>a</sup>, Nenad Marković<sup>b\*</sup>, Violeta Milićević<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka Kosovska Mitrovica, Srbija

<sup>b</sup> Akademija strukovnih studija kosovsko metohijska, Odsek Uroševac, Srbija

<sup>c</sup> Akademija strukovnih studija Južna Srbija, Odsek Visoka poslovna škola Blace, Srbija

**Sažetak:** U radu je prikazan postupak određivanja C-filtra za poboljšanje oblika napona u distributivnim mrežama koje sadrže nelinearna opterećenja. Analizirana je i mogućnost da se klasični metodi analize uz pomoć Furijeovog reda i usvojene šeme u kojoj su parametri mreže, može izvesti proračun uticaja osnovnog harmonika na karakteristike režima. Na osnovu dobijenih rezultata o parametrima mreže pre i posle postavljanja C-filtra izabranih kapacitivnosti, možemo zaključiti da se pri izboru C-filtra u distributivnim mrežama moraju prvo definisati strujni harmonici.

**Кljučне речи:** C-filtar, nelinearno opterećenje, distributivna mreža, harmonici

**Abstract:** The paper describes the procedure for determining a C-filter for improving the voltage shape in distribution networks containing nonlinear loads. The possibility was also analyzed that the classical methods of analysis using the Fourier order and the adopted scheme containing the parameters of the network can calculate the influence of the fundamental harmonic on the regime characteristics. Based on the results obtained on the network parameters before and after the placement of the C-filter of the selected capacities, we can conclude that when selecting the C-filter in the distribution networks, the harmonic current must be first defined.

**Keywords:** C-filter, nonlinear load, distribution network, harmonics

## 1. Uvod

Oblici napona i struja su veoma važni u projektovanju i radu distributivnih mreža, ali metod projektovanja nije definisan (Mohan et. al., 2002). U referentnoj literaturi još

---

\*Corresponding author

E-mail address: [nen.mark74@yahoo.com](mailto:nen.mark74@yahoo.com)

uvek ne postoji dovoljno tačan i naučno zasnovan metod za određivanje C-filtra za poboljšanje oblika napona u distributivnim mrežama (Schonek, 1999; Verdelho & Marques, 1997; Arrillaga et. al., 2000).

Kompenzacija reaktivne snage sa baterijama kondenzatora takođe nije prikazana u ovom radu, jer IEC preporuke za ocenu kapacitivnosti nisu dobro definisane i njihova primena nije moguća. Jedna od IEC mera je da se ne vezuju baterije kondenzatora na sabirnice sa nelinearnim opterećenjem (SRPS IEC 61243-1:1997, IEC 60884-1:2002+AMD1:2006).

Primena uređaja energetske elektronike u distributivnoj mreži stvara dopunski problem. Problem je vrlo aktuelan zbog sve većeg uključenja uređaja energetske elektronike većih snaga u distributivnim mrežama kao i zbog nedostatka predloga i mera za izbor i uključenje C-filtra u mreže koje sadrže nelinearna opterećenja. Minimizacija uticaja harmonika u mreži se ostvaruje primenom filtra sa LC i C-spojem koji su u isto vreme izvori reaktivne energije i to suštinski utiče na efikasnost (Marković et. al., 2017). Kapacitivnost C-filtra za korekciju oblika struja i napona zavisi od toga da li je obuhvaćen ceo spektar harmonika, a u radu je, prema referenci (Bjelic, 2007) prikazana analiza za osnovni harmonik.

## 2. Pregled literature

Određivanje C-filtra za poboljšanje oblika napona u distributivnim mrežama koje sadrže nelinearna opterećenja je pojam koji je poznat u literaturi.

Autori (Rockhill et. al., 2011; Kostić, 2014; Akagi et. al., 1990) u svojim radovima pri izboru filtra koriste teorijski harmonički sistem naizmeničnog napona trofaznog PWM ispravljača koji zavisi od tipa modulacije širine impulsa. Na osnovu harmoničkog sastava napona i prenosne funkcije filtra računa se vrednost faktora ukupnog harmoničkog izobličenja (THD eng. *Total Harmonic Distortion*) struje i vrednosti viših harmonika za bilo koju kombinaciju osnovnih parametara LC filtra.

Pored toga, Rochil i ostali (Rockhill et. al., 2011) predlažu izvođenje CL filtra s prigušnicama istog induktiviteta koje imaju zajedničko jezgro što se opravdava potencijalno nižom cenom, manjim dimenzijama i manjim iznosom gubitaka u gvožđu prigušnica. Za razliku od Rochila i ostalih (Rockhill et. al., 2011), Kostić (Kostić, 2014) u svom radu kao meru veličine i cene komponenti filtra, za kriterijum optimizacije uvodi uskladištenu energiju u filtru. Metode optimizacije podrazumevaju definisanje kriterijumske funkcije koja predstavlja način na koji će se, iz skupa kombinacija osnovnih parametara filtra koji zadovoljavaju norme, izabrati optimalna kombinacija parametara. Svojevrsan presek objavljenih metoda izbora parametara LCL filtra korišćen je kao polazna osnova u radu Markovića i ostalih (Marković et. al., 2017). Takođe, Rochil i ostali (Rockhill et. al., 2011) uvode pojam virtuelnog harmoničnog sastava napona (VVHS, eng. *Virtual Voltage Harmonic Spectrum*). Kod modulacije širine impulsa promenom amplitudnog indeksa modulacije i izmenom ugla između referentnog signala napona i signala nosioca, menja se i harmonički sastav naizmeničnog napona. VVHS je spektar sastavljen od najviših vrednosti harmonika napona koji se javljaju u normalnom radu pretvarača, za očekivane

vrednosti amplitudnog indeksa modulacije i ugla referentnog signala. Iako taj harmonički sastav nema fizičkog značenja, u domenu vremena VVHS se omogućava proračun ekvivalentnog harmoničkog sistema struje i vrednosti pojedinih harmonika struje se mogu uporediti s onima u normama (Electromagnetic compatibility (EMC), 2011). Slični postupci su dati i u radovima (Леонидович et. al., 2015; Sadeq, 2014; Priya & Balu, 2014), uz zanemarenje uticaja rezonanse na širinu pojasa sistema (engl. *Clamp bandwidth*). Pretvarač se tretira kao „crna kutija“ i jedini podaci pretvarača uzeti u obzir pri izboru parametara filtra su nazivna prividna snaga i talas naizmenične struje.

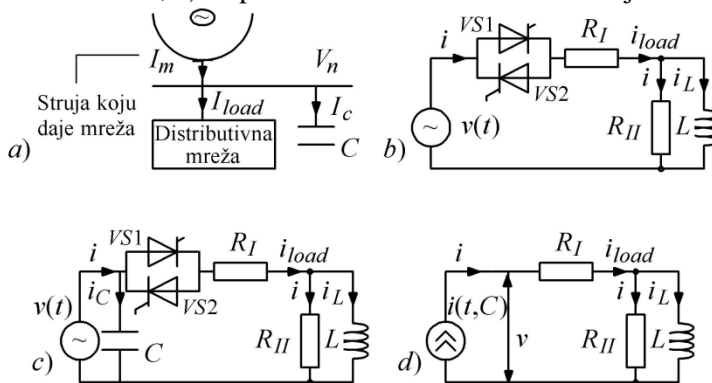
Iako su autori (Rockhill et. al., 2011; Kostić, 2014) u svojim radovima predlagali postupak sličan metodi koji je primenjen u ovom radu, metod nije detaljno referisan i verifikovan. Na osnovu uvida u pomenute referentne radove i ostalu dostupnu literaturu do danas, autori nisu našli prikladan i dovoljno tačan, teorijski postupak koji bi na adekvatan način odredio filtre za poboljšanje oblika napona u distributivnim mrežama koje sadrže nelinearna opterećenja. Iz tog razloga je i nastao ovaj rad, a rezultati simulacije su potvrdili da je predloženi metod i dobijeni teorijski model adekvatan i funkcionalan.

### 3. Eksperimentalni deo. Određivanje značajnih veličina distributivne mreže

Zbog preobimnih jednačina u nastavku će biti date samo konačne varijante korišćenih jednačina, ali ne i njihovo izvođenje.

Što se tiče distributivnih mreža najbolje je ugraditi C-filtar što bliže prijemniku koji uzima iz mreže reaktivnu snagu u trafostanici i preporuka je da se to izvede na strani sabirnica nižeg napona, Slika 1.a. Kompenzacijom reaktivne snage poboljšavaju se naponske prilike u mreži (smanjuju se padovi napona u mreži) i smanjuje se strujno opterećenje elemenata i gubici snage u mreži.

**Slika 1.** a) Šema distributivne mreže; ekvivalentna šema mreže: b) bez filtra, c) sa C-filtrom, d) za proces sa  $v = 1$  harmonikom struje



Izvor: Autori

Primenom teorije električnih kola za ekvivalentnu šemu na Slici 1.b može se odrediti struja opterećenja u prvoj i drugoj poluperiodi (Markovic et. al., 2017; Bjelic, 2007; Marković et. al., 2017):

$$i_{load} = \frac{V_m}{\sqrt{(R_1 + a)^2 + b^2}} \sin\left(\omega t + \psi_u - \arctg \frac{b}{(R_1 + a)}\right) - \left(\frac{V_m}{\omega L} \sin\left(\psi_u - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{V_m R_1}{\omega L \sqrt{(R_1 + a)^2 + b^2}} \sin\left(\psi_u - \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{b}{(R_1 + a)}\right)\right) e^{-\frac{R_1 R_2}{L(R_1 + R_2)} t} \quad (1)$$

$$a = B \cos \chi, \quad b = B \sin \chi, \quad B = \frac{R_2(\omega L)}{\sqrt{(\omega L)^2 + R_2^2}}, \quad \chi = \arctg\left(\frac{R_2}{\omega L}\right) \quad (2)$$

Za određivanje struje, poluperioda je podeljena na dva intervala-pre i posle komutacije tiristora VS1 i VS2:

$$i = i_C, \quad t \in \left[0, \frac{T}{8}\right] \Leftrightarrow i = i_{load} + i_C, \quad t \in \left[\frac{T}{8}, \frac{T}{2}\right], \quad i_C = V_m \omega C \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3)$$

Spektar struje se razlaže u Furijeov red, Slika 1.c. Koeficijenti razvoja u Furijeov red za 1-harmonik su (Bjelic, 2007; Marković et. al., 2017; Bjelic et. al., 2013):

$$A_v = \frac{4}{T} V_m \left[ \frac{C}{4} + \frac{1}{2Z} \left( \frac{3T}{8} \cos \alpha + \frac{T}{4\pi} (\sin \alpha + \cos \alpha) \right) \right] J - \frac{1}{\omega} \frac{G}{1 + D^2} \left[ e^{-\frac{3D\omega T}{8}} + \frac{\sqrt{2}}{2} (1 + D) - \frac{C}{4} \right] \quad (4)$$

$$A_v = \frac{4}{T} V_m \left[ \frac{\pi \cdot C}{8} + \frac{C}{4} - \frac{1}{2Z} \left( \frac{3T}{8} \sin \alpha + \frac{T}{4\pi} (\cos \alpha - \sin \alpha) \right) \right] - \frac{1}{\omega} \frac{G}{1 + D^2} \left[ D e^{-\frac{3D\omega T}{8}} + \frac{\sqrt{2}}{2} (1 - D) + \frac{3\pi C}{8} - \frac{C}{4} \right] \quad (5)$$

$$Z = \sqrt{(R_I + a)^2 + b^2}, \quad \alpha = \arctg \frac{b}{R_1 + a}, \quad G = \frac{R_I \cos \alpha}{Z\omega L} - \frac{1}{\omega L}, \quad D = \frac{R_I R_{II}}{\omega L (R_I + R_{II})} \quad (6)$$

Efektivna vrednost spektra harmonica struje je data jednačinom:

$$I = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} i^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \left( \int_0^{T/8} i^2 dt + \int_0^{T/2} i^2 dt \right)} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} \quad (7)$$

Efektivna vrednost napona i efektivna vrednost osnovnog-dominantnog harmonika struje je:

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m \sqrt{(R_I + m)^2 + n^2}}{\sqrt{2}}, \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

Za 1-harmonik aktivna snaga se računa prema relaciji:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \left[ I_m \sqrt{(R_I + m)^2 + n^2} \sin\left(\omega t + \chi_{v=1} + \arctg \frac{n}{R_I + m}\right) I_m \sin(\omega t + \chi_{v=1}) \right] dt$$

$$P = I_m^2 \frac{\sqrt{(R_I + m)^2 + n^2}}{2} \cos\left(\arctg \frac{n}{R_I + m}\right) \quad (9)$$

Za ukupni spektar harmonika aktivna snaga se računa na sledeći način:

$$P = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} p(t) dt = V_m^2 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\omega C}{4\pi} + \frac{1}{4Z} \left( \frac{3}{2} \cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\pi} + \frac{\cos \alpha}{\pi} \right) - \\ - \frac{1}{\omega} \frac{G}{1+D^2} \left[ e^{-\frac{3D\omega T}{8}} + \frac{\sqrt{2}}{2} (1+D) \right] - \frac{\omega CT}{8\pi} \end{array} \right\} \quad (10)$$

Iz jednačine (10) se dobija zavisnost parametara od kapacitivnosti C-filtra za slučaj kada je pun spektar harmonika struje, Slika 2, a iz jednačina (9) zavisnost samo za prvi harmonik struje.

Kapacitivnost po fazi filtra se određuje iz izraza  $V_n = \frac{I_C}{\omega \cdot C}$ , gde je  $I_C$  – struja koja kod nazivnog faznog napona  $V_n$  teče kroz filter, a  $\omega = 2\pi f$  kružna frekvencija gde je  $f = 50$  Hz.

Fazni pomeraj reaktivne snage osnovnog harmonika stvaraju prekidački elementi (tiristori) jer menjaju trenutne vrednosti otpornosti u kolu. Ta snaga nepotrebno opterećuje kolo napajanja jer izaziva povećanje prividne snage izvora napajanja u električnoj mreži. Za smanjenje gubitaka izazvanih faznim pomeranjem reaktivne snage, kao kompenzator se koristi filter kapacitivnosti C čija se vrednost bira po kriterijumu kompenzacije srednje vrednosti reaktivne snage u periodu faznog pomeranja te snage (Bjelic et. al., 2017):

$$Q_{sr} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi Q d\alpha = \frac{4V_m^2}{\pi R} = V_m^2 \omega C \Leftrightarrow C = \frac{4}{\pi} \frac{1}{\omega R} \quad (11)$$

#### 4. Rezultati i diskusija

Priprema računarskih programa u metodu organizovanog modelovanja se u tehničkoj literaturi naziva predprocesiranjem (formiranje modela tehničkog sistema). Sistem

prethodno datih jednačina se lako implementira u blokove koje nudi softverski paket MATLAB Simulink (MATLAB SIMULINK, 2000).

Pomoću modela u kome je implementirano nelinearno opterećenje, Slika 2, prikazan je postupak određivanja parametara C-filtra u distributivnoj šemi. Za dobijanje što vernijih odziva na izlazu (sinusoidalnog napona i nesinusoidalne struje) izabrani su sledeći parametri sa vrednostima: V-naponski izvor 10 kV, 50 Hz, opterećenje aktivnosti otpornosti  $R_I=4 \Omega$ ,  $R_{II}=4 \Omega$ ,  $L=10e^{-3}$  H i tiristorski most VS1 i VS2-koji stvara nesinusoidalnu struju u opterećenju. Vrednosti parametara mreže instalisanog filtra koji je korišćen su date u Tabeli 1.

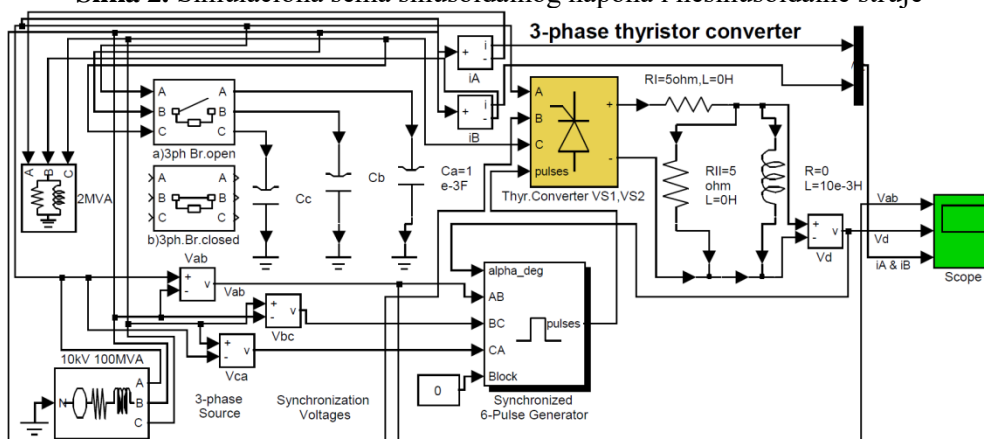
**Tabela 1.** Vrednosti parametara mreže instalisanog filtra

Br.	Parametar	Vrednost za 1-harmonik
1.	Faktor snage	$\cos\varphi=0.85$
2.	Efektivna vrednost ukupne struje mreže	IDNload=115.62 A
3.	Aktivna snaga mreže po fazi	P=0.566 MW
4.	Prividna snaga mreže po fazi	S=0.667 MVA

Izvor: Autori

Model je simuliran u MATLAB softverskom paketu (MATLAB SIMULINK, 2000), prema adaptiranoj šemi u subprogramu "psbconv1.mdl" koja je data na Slici 2.

**Slika 2.** Simulaciona šema sinusoidalnog napona i nesinusoidalne struje



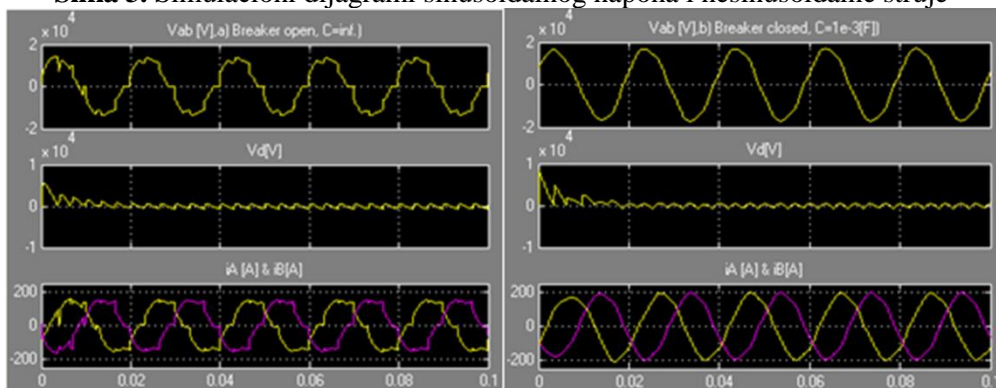
Izvor: Autori

Na Slici 3 su dati simulacioni dijagrami sinusoidalnog napona i nesinusoidalne struje.

Kao što je i u prethodnom delu rada rečeno da, iako u literaturi nije razmatran uticaj nelinearnosti na rad mreže, sa dijagrama u nastavku se može zaključiti da je vidljiv pad napona na poluprovodničkim ventilima, da je implementirano „mrtvo“ vreme kašnjenja pri uključenju/isključenju tiristorskog pretvarača i kašnjenje elektronskih kola pretvarača, kao i da dolazi do zasićenja magnetnih kola prigušnica LC filtra.

Pri projektovanju CL filtra se zbog uticaja nelinearnosti na harmonički sastav naizmeničnog napona pretvarača ne smeju zanemariti zasićenja glavnih magnetnih kola.

**Slika 3.** Simulacioni dijagrami sinusoidalnog napona i nesinusoidalne struje



Izvor: Autori

Iz relacija prikazanih u teorijskom modelu i modelu simulacije izdvajamo sledeće rezultate istraživanja:

- potvrđena je zavisnost parametara kapacitivnosti C-filtra od vrednosti opterećenja i harmonika; i
- komparacijom dobijenih vrednosti i dijagrama pokazuje se da se za faktor snage  $\cos\varphi=0.85$  i primenom filtra sa  $C=1\cdot 10^{-3}$  F određenom iz jednačine (9) znatno popravljaju oblici napona i struja u distributivnoj mreži.

Snaga C-filtra treba da se ograniči u distributivnoj mreži jer se radi o grupnoj kompenzaciji (kompenzacija reaktivne snage dela mreže, odnosno kompenzacija potrošnje reaktivne snage koju troši više prijemnika u mreži, ali i sama mreža-gubici reaktivne snage na vodovima, a posebno transformatorima).

## 5. Zaključak

Iz dobijenih relacija i dijagrama napona i struja pri simulaciji isključenog i uključenog C-filtra na sabirnice u distributivnoj mreži sa definisanim P, Q opterećenjem i izvorom na koje je uključen trofazni VS1, VS2 tiristorski pretvarač može se zaključiti da je on razlog deformacije sinusoidalnog oblika napona i struja.

Koeficijent izobličenja tih oblika sigurno je između (10-15%) iako IEC preporučuje manje od 5%. Zbog toga se mogu povećati gubici u elementima snage distributivne mreže (vod, transformator, motor), smanjiti njen kvalitet i pouzdanost zaštite i lokalne automatike.

Takođe, posmatrajući simulacionu šema možemo zaključiti da je najbolje ugraditi C-filtar što bliže prijemniku koji uzima iz mreže reaktivnu snagu u trafostanici i preporuka je da se to izvede na strani sabirnica nižeg napona. Kompenzacijom reaktivne snage se:

- poboljšavaju naponske prilike u mreži (smanjuju se padovi napona u mreži);

- smanjuje strujno opterećenje elemenata i gubici snage u mreži.

## Reference

- Akagi, H., Tsukamoto, Y. U. K. I. F. U. M. I., & Nabae, A. (1990). Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 26(1), 93-98. <https://doi.org/10.1109/28.52679>
- Arrillaga, J., Watson, N. R., & Chen, S. (2000). *Power System Quality Assessment*. Chichester, England; John Wiley & Sons, New York.
- Bjelic, S. (2007). *Power converters in networks and installations*. SVEN. Nis.
- Bjelić, S., Marković, N., Jakšić, U., & Živanić, J. (2013). Selection of linear filter elements parameters for measuring of voltage and currents components of direct and inverse order. *Przegľad Elektrotechniczny*, 89(1a), 172-176.
- Bjelić, S., Jovanović, B., Marković, N., Mitkić, A., & Jakšić, U. (2017). Simulation of operation and analysis of filters for stabilizing output voltages of the inverters. In *2017 25th Telecommunication Forum (TELFOR)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2017.8249386>
- Electromagnetic compatibility (EMC), (2011). -- Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current > 16 A and ≤ 75 A per phase (IEC 61000-3-12:2011 (EQV)). [https://infostore.saiglobal.com/preview/98701069932.pdf?sku=868606\\_saig\\_nsai\\_nsai\\_2065632](https://infostore.saiglobal.com/preview/98701069932.pdf?sku=868606_saig_nsai_nsai_2065632)
- Kostić, M. (2014). *Kompenzacija reaktivne energije i viši harmonici u električnim mrežama*. Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd.
- Леонидович, И. А., Витальевич, Ш. А., Анатольевич, Т. Д., Витальевич, Ш. А., Владимирович, В. И., Юрьевич, Г. Д., Олегович, М. Д., Александрович, Т. Е. (2015). Многоуровневый преобразователь электроэнергии для питания синхронных и асинхронных двигателей от источника высокого постоянного напряжения. Общество с ограниченной ответственностью „ЧЭАЗ-ЭЛПРИ“. <https://edrid.ru/rid/216.013.5b13.html>
- Marković, N., Bjelić, S., Stanojević, N., & Jovanović, B. (2017). Optimization of output passive filter parameters from PWM inverter. In *2017 25th Telecommunication Forum (TELFOR)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2017.8249381>
- Marković, N. A., Bjelić, S. N., & Živanić, J. M. (2017). Application of Passive CL Filters for Neutralizing of Zero Sequence Currents and Correction of Asymmetries of Phase Voltages in Electrical Networks. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 9(5), 10-18. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2017.05.02>
- Matlab Simulink. (2000). *Sim Power System*. Copyright 1984-2002 The Math Works, Version 6.5.0,180913a, June 2.
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2002). *Power electronics: Converters, applications, and design*. 3<sup>rd</sup> ed., Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Priya, M. S., & Balu, U. S. (2014). Simulation results of a shunt active power filter using p-q Theory Power Components Calculations. *International Journal of*



- Advance Research in Computer Science and Management Studies (IJARCSMS)*, 2(2), 247-254.
- Rockhill, A. A., Liserre, M., Teodorescu, R., & Rodriguez, P. (2010). Grid-filter design for a multimegawatt medium-voltage voltage-source inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(4), 1205-1217. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2087293>
- Sadeq, J. M. (2014). *Comparative Study Of Passive, Series And Shunt Active Power Filters With Hybrid Filters On Nonlinear Loads*. Nicosia, 2014. <http://docs.neu.edu.tr/library/6344303366.pdf>
- Schonek, J. (1999). *Low voltage hybrid harmonic filters, technical & economic analysis*. Power Quality, Schneider Electric.
- SRPS IEC 61243-1:1997, IEC 60884-1:2002+AMD1:2006. [https://iss.rs/sr\\_Cyrl/project/show/iss:proj:13642](https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:13642); <https://webstore.iec.ch/publication/3802>
- Verdelho, P., & Marques, G. D. (1997). An active power filter and unbalanced current compensator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 44(3), 321-328. <https://doi.org/10.1109/41.585829>

Rad je primljen: 05.09.2021. Prihvaćen: 17.10.2021.

Received: 5 September, 2021; Accepted: 17 October, 2021.

