

РАЗМАТРАЊЕ ПАСИВНИХ И АКТИВНИХ ИСПРАВЉАЧКИХ ИЗВЕДБИ У СВРХУ СМАЊЕЊА ХАРМОНИЈСКОГ ИЗОБЛИЧЕЊА СТРУЈЕ МРЕЖЕ

ANALYSIS OF THE PASSIVE AND ACTIVE RECTIFIER CONFIGURATIONS AIMED TO REDUCE GRID CURRENT HARMONIC DISTORTION

Теодора Рашковић, Марко Векић, Факултет техничких наука

Област – ЧИСТЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ

Кратак садржај У овом раду је разматрано дејство различитих изведби пасивних и активних исправљача на хармонијско изобличење струје мреже, као и сачинилац снаге и валовитост излазног једносмерног напона. Развијени су одговарајући модели претварача, укључујући и софтвер којим се аутоматизује испитивање утицаја параметара на рад диодног исправљача и извршене су симулације. Приказани су и анализирани одговарајући одзиви који укључују таласне облике напона и струје, као и присуство виших хармоника и THD-a.

Кључне речи: активни исправљач, пасивни исправљач, виши хармоници, Boost PFC, хармонијско изобличење, пад напона, фактор снаге

Abstract In this paper, the effect of various derived passive and active rectifiers on the harmonic distortion of the grid current, as well as the power factor and ripple of the output DC voltage, is considered. Appropriate converter models were developed, including software that automates the examination of the influence of parameters on the operation of the diode rectifier, and simulations were performed. Corresponding responses including voltage and current waveforms, as well as the presence of higher harmonics and THD are presented and analysed.

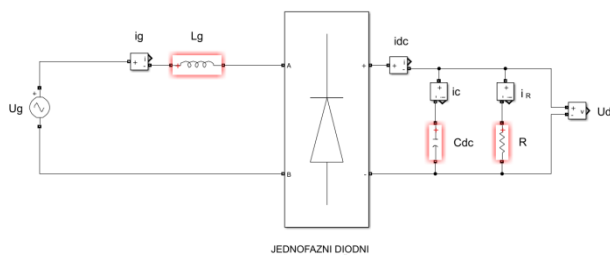
Keywords: Active and passive rectifier, higher harmonics, Boost PFC, harmonic distortion, voltage drop, power factor.

1. УВОД

Један од најчешће коришћених електроенергетских претварача и уједно главни узрочник виших хармоника јесте диодни исправљач [1]. Када је реч о предностима ове врсте претварача истиче се једноставна конструкција, малих су димензија, те их је лако интегрисати у шире склопове [2]. Због тога се примењују у склопу напајања од домаћинства до индустрије. Са друге стране, недостаци су им што, није могуће управљање, што за последицу има неконтролисан пад напона и повећане губитке. Избор параметара пасивног исправљача као што су улазна индуктивност или улазни оточни или редни

филтар, као и излазна капацитивност у значајној мери утичу како на хармонијски састав струје мреже, тако и на сачинилац снаге и пад излазног напона [3]. Један од кључних циљева овог рада у том смислу је анализа утицаја поменутих параметара. Коначно понуђено је и једно решење активног исправљача, тзв. Boost Power Factor Correction као управљива, активна конфигурација која нуди поправку фактора снаге уз веома мало хармонијско изобличење мрежне струје [4].

2. ЈЕДНОФАЗНИ ДИОДНИ ИСПРАВЉАЧ



Слика 2.1. Једнофазни диодни исправљач

Једнофазни диодни исправљач је најчешће коришћен DC/DC претварач и узрочник појаве виших хармоника струје електричне мреже [5].

Једначине које описују рад диодног исправљача су:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{dc}}{dt} \\ \frac{du_{dc}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{1}{L_s} \\ \frac{1}{C_{dc}} & -\frac{1}{C_{dc}R_L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{dc} \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u_s \quad (1)$$

$$\frac{du_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C_{dc}R_L} \cdot u_{dc} \quad (2)$$

Израз (1) представља дејство исправљача када одговарајућа дијагонала диода проводи, а израз (2) када је диодни мост непроводан [6].

Пошто су једначине сложене за аналитичко решавање, развијен је софтвер који аутоматизује симулације за разне вредности параметара, пре свега C_{dc} и L_g . На тај начин је извршен значајан број симулација које јасно успостављају везу улазних параметара са одзивима од значаја какви су хармонијско изобличење, пад напона, валовитост излазног напона и фактор снаге.

НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Марко Векић, ванредни професор.

2.1. Разматрање струје мреже при разним вредностима улазне пригушнице и излазне капацитивности

Циљ је да се установи како се мења THD струје у зависности од вредности параметара филтарске капацитивности исправљача и индуктивности на улазу у исправљач.

Кориштен је систем базних вредности, које су чинили привидна снага од 1kVA, напон 230V, кружна фреквенција 100rad/s. Преко основних базних вредности су помоћу следећих формула изведене базна струја, индуктивност, капацитивност, отпорност и импеданса,

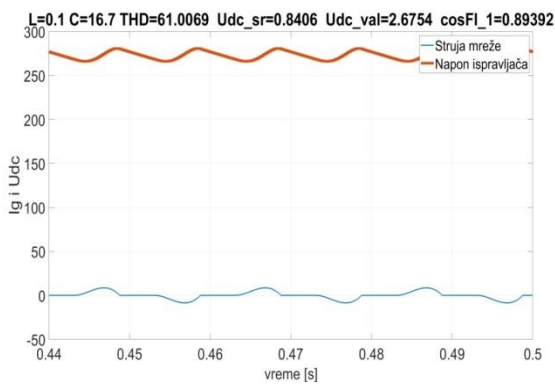
$$I_b = \frac{S_b}{U_b}, Z_b = \frac{U_b}{I_b}, C_b = \frac{1}{(\omega_b \cdot Z_b)}, R_b = Z_b, L_b = \frac{Z_b}{\omega_b}$$

Аутоматизованим извршењем модела са Сlike 2.1. су извршене симулације, комбинацијом шест различитих вредности за капацитивности и осам за индуктивности. Од укупно 48 симулираних случајева, табелом 1 је приказано одабраних 5 случајева у складу са критеријумом да се постигне што нижи THD струје мреже уз што мању валовитост и пад излазног напона, као и што виши фактор снаге.

Табела 1. Праћени параметри у релативним јединицама

C [p.u]	L [p.u]	THD (I _g) [%]	Udc _{sr} [p.u]	Del (Udc) [%]	DPF (I _g)
5	0,10	64	0,87	9,09	0,92
16,7	0,10	61	0,84	2,68	0,89
100	0,10	60	0,83	0,44	0,89
5	0,50	31	0,68	6,22	0,77
500	0,50	67	0,86	0,58	0,90

На Слици 2.1.1. је приказан одзив струје мреже и напон исправљача када је индуктивност 0,1[p.u.], а капацитивност 16,7[p.u.]. У овом случају је хармонијско изобличење 61%. Напон не пада испод 84%, валовитост је изузетно ниска са 2%, а фактор снаге је 0,89 што је нешто ниже од уобичајено захтеваних 0,95.

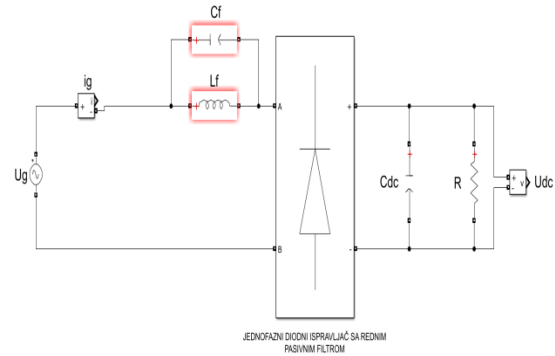


Слика 2.1.1. Струја мреже и напон исправљача када је $L=0,1$ [p.u.], $C=16,7$ [p.u.]

2.2. Једнофазни диодни исправљач са редним пасивним филтром

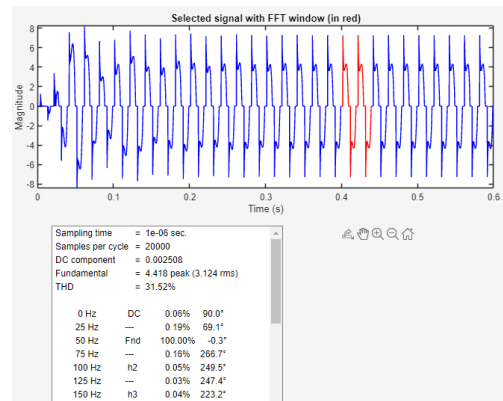
Након што се индуктивност израчуна је $L_f=0.31 \cdot L_b$ [7], капацитивност следи из услова резонансе за трећи хармоник:

$$L_f C_f = \frac{1}{(3^2 \cdot \omega_0^2)} \quad (3)$$



Слика 2.2.1. Једнофазни диодни исправљач са редним пасивним филтром

LC филтар је дакле подешен да сузбије доминантни хармоник, у случају једнофазног исправљача трећи и у исто време компензује реактивну снагу на основном хармонику. Циљ је да реактивна снага према мрежи буде што ближа нултој вредности, тј. Да фактор снаге буде близак јединици.

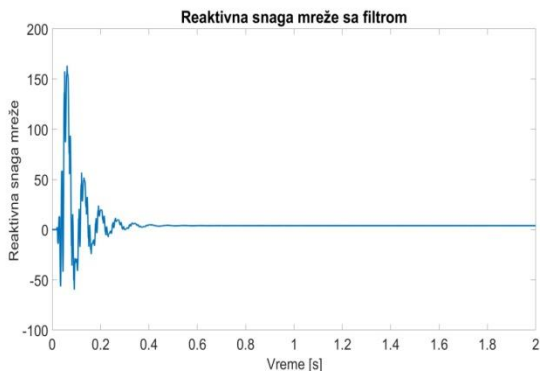


Слика 2.2.1. Вредности THD-а и струје виших хармоника са филтром

Код изворног стања, без филтра забележен је THD од 38,7%, а трећи хармоник је заступљен са 37,3%. На основу претходне две слике могуће је закључити да се употребом редног филтра THD спустио на вредност од 31,52%, а трећег хармоника готово да и нема (0,04%) када се угради редни пасивни филтар.

Активна и реактивна снага на основном хармонику, P и Q, се добијају прорачуном на основу U_g и I_g .

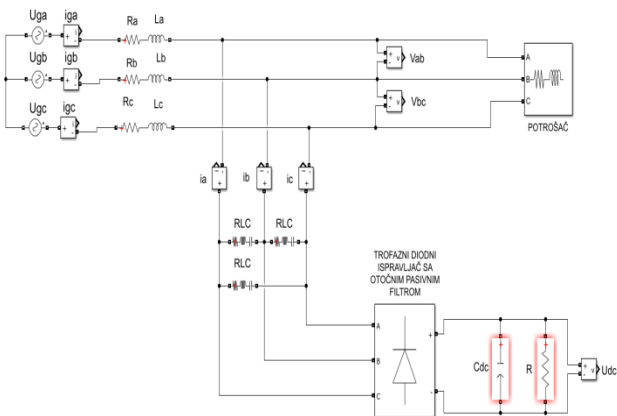
Ова врста модификованог исправљача, врши своју функцију да елиминисе трећи хармоник, али у исто време компензује и реактивну снагу на основном хармонику.



Слика 2.2.2. Реактивна снага мреже након уградње филтра

3. ТРОФАЗНИ ДИОДНИ ИСПРАВЉАЧ СА ОТОЧНИМ ФИЛТРОМ

Трофазни диодни исправљач у свом раду не производи трократнике (више хармонику чији је редни број дељив са 3). Доминантни хармоник у све три фазе је пети, па ће нагласак при пројектовању оточног филтра бити у његовом сузбијању. Изабран је у овом случају оточни трофазни филтар да би се испитао и овај тип конфигурације.



Слика 3.1. Шема трофазног диодног исправљача са оточним пасивним филтром

У овом случају нема пригушница на мрежи, већ су оточно везани RLC филтри између сваке две фазе трофазног диодног исправљача. Избор оточнофилтарске индуктивности и капацитивности је такав да производи на петом хармонику јако малу, теоријски нулту импедансу, док за први хармоник нема ниску импедансу, па задржава путању основног хармонику ка мрежи. Филтарска капацитивност C_5 се бира спрам потреба за реактивном снагом на основном хармонику.

$$C_5 = \frac{Q_F}{\omega_0 V^2} \quad (4)$$

Када се на овај начин добије C_5 , при чему су Q_F реактивна снага, V линијски напон и ω_0 кружна учестаност. Филтарска индуктивност L_5 се добије на основу услова резонансе за пети хармоник из следећег израза:

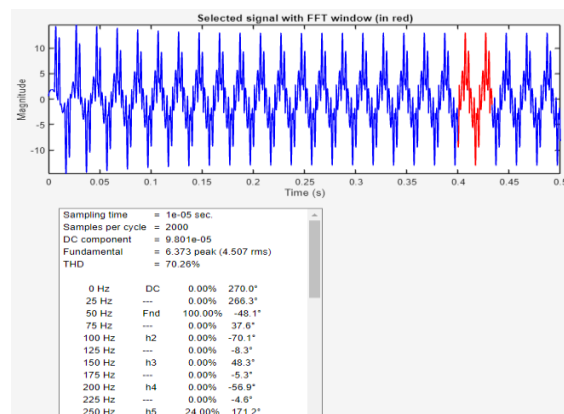
$$L_5 C_5 = \frac{1}{(5^2 \cdot \omega_0^2)} \quad (5)$$

Потребне су и пригушне отпорности, због стабилности система, по гранама филтра. Отпорност R_{f5} се бира на основу фактора добротe Q_{dob} :

$$R_{f5} = \frac{\sqrt{L_5}}{Q_{dob} C_5} \quad (6)$$

Извршена су три испитивања на моделу са Сликe 3.1. како би се установио утицај RLC филтра на сузбијање нежељеног хармонику и THD.

На Слици 3.2. су резултати са укљученим RLC филтром.



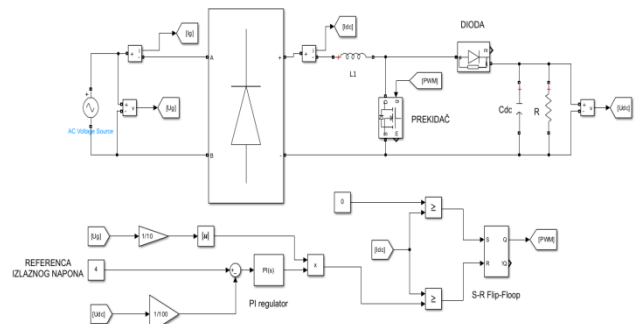
Слика 3.2. Заступљеност петог хармонику и THD за случај са RLC филтром, фактор добротe је 100

Када је фактор добротe 100, што значи да је сузбијање циљаног хармонику максимално, заступљеност петог хармонику је 24%, а THD 70,26%.

Будући да су диодни напонски исправљачи по природи капацитивни, потребно је ограничити вредност реактивне снаге при избору филтарске капацитивности. Проблем настаје код реактивне снаге, јер се у овом случају не компензује, већ се додаје.

4. BOOST POWER FACTOR CORRECTION

Из разлога што применом претходних исправљача не може да се постигне задовољавајућа вредност THD-а, уз задовољавајући напон на излазу, због тога се морало прибећи активном начину исправљања, где је једно решење Boost PFC.

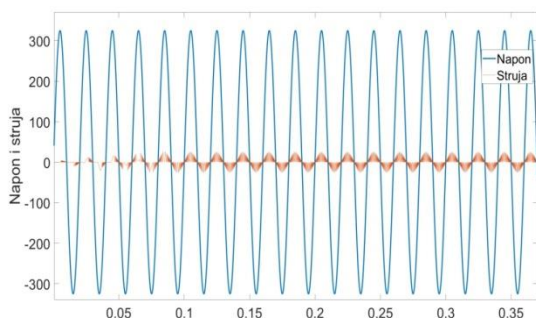


Слика 4.1. Boost PFC претварач

У односу на редни филтар, код ког се постиже THD од 30%, овде је могуће ограничити укупно хармонијско изобличење на жељених 5% [8]. Употребом исправљача са подизачким степеном могућа је активна контрола. Оваква топологија разликује исправљачки (диодни мост) и подизачки степен (boost).

У доњем делу Сlike 4.1. се налази приказ регулације Boost PFC исправљача. Напон који се мери се пореди са референцом, PI regulator генерише излаз, што се множи са апсолутном вредношћу напона мреже, а та се вредност затим пореди са нулом. На овај начин се побуђује RS Flip-Flop. Регулатор активно, на основу напона који се мери и жељеног напона (400 V), контролише прекидач да се отвара и затвара како би се напон повећавао или смањивао.

На слици 4.2 је приказан одзив струје и напона употребом исправљача са подизачким степеном.



Слика 4.2. Напон и струја Boost PFC претварача

Струја има облик синусне обвојнице испуњене тестерастим сигналом на високој учестаности што значи да је основни хармоник доминантан. Уочава се и да су струја мреже и напон мреже у фази.

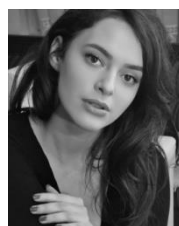
5. ЗАКЉУЧАК

У овом раду је анализирано неколико пасивних и једна активна исправљачка топологија. Развијен је софтвер за аутоматизовану анализу утицаја пасивних компоненти као што су улазна индуктивност и излазна капацитивност на неколико показатеља од значаја: THD, фактор снаге, пад напона и валовитост излазног напона. Уочени су параметри који у том смислу дају задовољавајуће резултате, али се у сврху даљег побољшања прибегло пројектовању пасивног редног и оточног филтра. Иако су филтри дали задовољавајући одзив, анализиран је и случај активне топологије, исправљача са подизачким степеном (Boost PFC) који омогућава контролу.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hojoon Shin, Jung-Ik Ha: Active DC-link circuit for single-phase diode rectifier system with small capacitance, International Power Electronics and Application Conference and Exposition, Electronics ISBN: 978-1-4799-6768-1, 2014.
- [2] Miloš R. Nedeljković, Srđan L. Srdić: Energetski pretvarači 2, Topologije energetskih pretvarača. Elektrotehnički fakultet-Beograd, 2015.
- [3] S.B.Dewan: Optimum input and output filters for a single-phase rectifier power supply, IEEE Trans. Industry Appl., vol. IA-17, no. 3, pp. 282-288, May/June 1981.
- [4] Hansen, S: Harmonic Distortion of Rectifier Topologies for Adjustable Speed Drives. Institut for Energiteknik, Aalborg Universitet, 2000.
- [5] A. Mansoor, W.M. Grady, R.S. Thallam, M.T. Doyle, S.D.Krein, M.J. Samotyj: Effect of supply voltage harmonics on the input current of single-phase diode bridge rectifier loads, IEEE Transactions on Power Delivery, 3, July 1995.
- [6] Marko S. Vekić, Vladimir A., Zoltan Čorba: "Kvalitet električne energije-računske i laboratorijske vežbe"-pomoćni udžbenik, Novi Sad, 2018.
- [7] A.R. Prasad, P.D. Zlogas, S. Manlas, "A novel passive waveshaping method for single-phase diode rectifiers"MPB Technologies Inc. 1725 North Service Road, Trans -Canada Highway Dorval, Quebec, December 1990.
- [8] Yujiao Cui, Hua Han, Younglu Liu, Guo Xu, Mei Su, Shiming Xie, An efficiency-improved single-phase PFC rectifier with active Power decoupling, IEEE Transactions on Power Electronics, 17 March 2022.

Кратка биографија:



Теодора Рашковић рођена је у Сивцу, 21. јуна 2000. године. Средњу школу је завршила у Врбасу 2019. године. Исте године је уписала на Факултету техничких наука у Новом Саду, смер Чисте енергетске технологије. Основне академске студије завршила је 2023. године. контакт: teodoraraskovic2000@gmail.com



Марко Веквић је ванредни професор на Факултету техничких наука у Новом Саду, на Катедри за Енергетску електронику и претвараче. Области интересовања су му енергетска електроника у преносним и дистрибутивним мрежама и квалитет електричне енергије. контакт: vekmar@uns.ac.rs