

Дијагностика квара тиристорског моста заснована на детекцији другог хармоника мрежне учестаности у излазној струји исправљача

ВЛАДИМИР Ђ. ВУКИЋ, Универзитет у Београду,

Електротехнички институт „Никола Тесла“, Београд
 РАЈКО Ђ. ПРОЛЕ, Универзитет у Београду,
 Електротехнички институт „Никола Тесла“, Београд

Стручни рад

UDC: 621.314.6:621.382.233
 DOI: 10.5937/tehnika1801097V

У раду је описано техничко решење примењено за дијагностику квара тиристорског моста АС/ДС претварача. Приликом развоја нове генерације дигиталних регулатора исправљача, захтева се да ови уређаји имају могућност детекције квара тиристорског претварача у реалном времену. Нерегуларан рад тиристорског моста је требало идентификовати без потребе за праћењем стања појединачних полупроводничких прекидача или ултрабрзих осигурача. Квар тиристорског моста је идентификован на основу мерења другог хармоника мрежне учестаности у сигналу излазне струје исправљача. Приказани су таласни облици напона и струје, као и спектри струје, у случајевима рада исправљачког моста без једног прекидача. Описана је заштита од несиметричног рада тиристорског моста. Анализиран је негативан утицај виших хармоника на поједине склопове исправљача, како у режиму регулације излазног напона, тако и приликом лимитирања струје исправљача.

Кључне речи: тиристорски мост, дијагностика, други хармоник, исправљач

1. УВОД

Дијагностика погонских стања енергетских претварача представља област којој истраживачи посвећују све већу пажњу [1]-[6]. Посебан значај има надзор претварача у системима непрекидног напајања.

У већини индустријских система непрекидног напајања једносмерном струјом, тиристорски исправљачи и даље представљају основне енергетске претвараче намењене за пуњење батерија и напајање потрошача једносмерном струјом [7]. Заједно са батеријама, исправљачи представљају извор сигурносног једносмерног напона у трансформаторским станицама и електропривредним објектима [8], [9].

Вишедеценијско искуство, стечено кроз експлоатацију тиристорских исправљача, јасно указује на њихову високу поузданост, енергетску ефикасност и робусност [10]-[12]. Претходних година

су произвођачи знатно усавршавали регулационе и комуникацион карактеристике управљачких електронских склопова исправљача. И даље се, као актуатори, најчешће користе трофазни тиристорски мостови, појединачни или у конфигурацијама са њиховим редним или паралелним повезивањем. И поред динамичног развоја високофреквентних прекидачких напајања, велики светски произвођачи индустријских пуњача батерија имају широку понуду тиристорских исправљача, са декларисаним номиналним веком експлоатације од 20 до 30 година [13], [14].

Последњих година је објављено више радова посвећених детекцији кварова тиристорских исправљача [4]-[6]. Методе за детекцију квара се обично заснивају на праћењу виших хармоника улазних наизменичних напона или струја исправљача [5], [6].

Поједини истраживачи су изводили закључак о неисправности трофазног диодног исправљача на основу дигиталне обраде сигнала наизменичне компоненте излазног напона [4].

У овом раду је описан поступак за детекцију неисправног рада тиристорског моста на основу мерења другог хармоника мрежне учестаности у сигналу излазне струје тиристорског исправљача.

Адреса аутора: Владимир Вукић, Универзитет у Београду, Електротехнички институт „Никола Тесла“, Београд, Косте Главинића 8а

e-mail: v.vukic@iecent.org

Рад примљен: 09.10.2017.

Рад прихваћен: 07.02.2018.

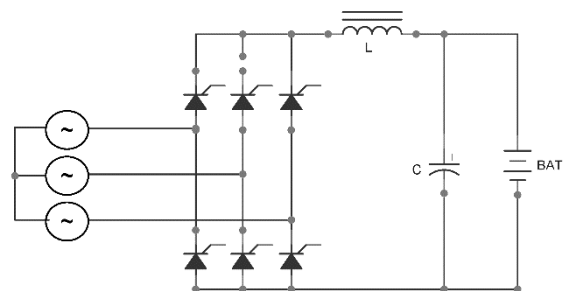
2. РАД ИСПРАВЉАЧА У СЛУЧАЈУ ПОЈАВЕ КВАРА ТИРИСТОРСКОГ МОСТА

У случају рада исправљача у објектима без посаде, што је чест случај у трансформаторским станицама, благовремена дијагностика отказа појединих склопова има велики значај. Брза детекција квара је посебно важна ако због насталог квара исправљача, обично праћеног пражњењем батерије, електроенергетски или индустријски објекат остане без сигурносног једносмерног напона, неопходног за функционисање заштитних, мерних и регулационих уређаја у постројењу. Отказ једног тиристора (због прекида или губитка упаљачких импулса) или ултрабрзог осигурача, када се у појединим гранама исправљачког моста појаве отворене везе, представљају кварове са којима исправљач може, мањом снагом, и даље да напаја потрошаче и пуни батерију. Са становишта произвођача опреме, најбоље решење је да се заштитне функције подесе на тај начин да искључе исправљач у случају појаве било каквог квара тиристорског моста или управљачке електронике. Међутим, оваквим решењем, којим се добија на сигурности, губи се на поузданости и непрекидности напајања. Због тога је неопходно да тиристорски исправљач, као систем аутоматског управљања, буде, у што већој мери, систем отпоран на отказе (енг. "fault-tolerant system"), који може да настави са радом и у случају настанка озбиљних кварова.

Када се тиристори исправљачког моста укључују симетрично, у случају да су на излазу исправљача прикључени филтерски кондензатори или батерија, добија се једносмерни напон са суперпопираном наизменичном компонентом фреквенције 150 Hz (полууправљиви мост), 300 Hz (пуноуправљиви мост) или 600 Hz (дванаестоимпулсни тиристорски исправљач). Уколико дође до реаговања ултрабрзог осигурача, неправилног укључивања тиристора или губитка појединих упаљачких импулса, тиристорски мост почиње да ради несиметрично. У овом случају се под „несиметријом моста” подразумева одсуство равномерног паљења свих тиристора за време трајања једне периоде улазне наизменичне струје. Таквим радом се нарушава хармонијски састав излазног напона, због чега знатно расте и таласност једносмерног напона (или, прецизније речено, таласност напона усмерене струје [15]) на излазу исправљача.

Могућности рада исправљача са несиметријом тиристорског моста зависе од карактеристика примењених тиристора и ултрабрзих осигурача, али и номиналних параметара излазне пригушнице, филтерских кондензатора и улазног трансформатора. Виши хармоници струје могу да изазову веома

изражене губитке, настале због постојања хистерезиса и, посебно, вихорних струја, као и драстично повећање магнетострикције у улазном трансформатору. Велике вршне вредности прекидне излазне струје исправљача могу да изазову засићење магнетног кола пригушнице. Важна је и анализа оптерећења преосталих полупроводничких прекидача тиристорског моста након отказа једног тиристора. У том случају, преостали полупроводници могу да постану преоптерећени због протицања изузетно великих импулсних струја. Дуг рад тиристора или диода у оваквом режиму може да доведе до њиховог прегревања и, на крају, отказа.



Слика 1 – Шема исправљача са пуноуправљивим тиристорским мостом и излазним LC филтером према батерији. Веза једног тиристора према излазу моста је у прекиду.

Због наведених разлога је веома важно да исправљач након квара тиристорског моста настави да ради, али са снагом знатно мањом од номиналне. Међутим, ако умањена снага није довољна за напајање нужних потрошача једносмерне струје, дошло би до претераног пражњења акумулаторске батерије. Овакво стање би, као последицу, имало губитак сигурносног напона на критичним потрошачима. Због тога је веома важно направити правилну процену расположиве снаге исправљача приликом детекције квара полупроводничког моста.

3. ИСПИТИВАЊЕ ИСПРАВЉАЧА

Испитивање детекције несиметричног рада пуноуправљивог тиристорског моста спроведено је на трофазном исправљачу ДРИ 220-250, номиналне привидне снаге 90 kVA, произведеном у Електротехничком институту „Никола Тесла”. Излазни LC филтер исправљача се састоји од пригушнице за једносмерну струју на гвозденом језгру ($L=0,7$ mH) и три електролитска кондензатора, укупне капацитивности $C=14100$ μ F. Пуноуправљиви мост исправљача ДРИ 220-250 је састављен од шест тиристора Semikron SKT250, номиналне струје 250 А. На исправљачу је уграђен дигитални регулатор типа „ДРИ 07”, заснован на микроконтролеру Intel 80C196KB16 [11], [16]. Нерегуларан

рад је изазиван скидањем конектора са упалача једног тиристора пуноуправљивог моста. На излазне контакте исправљача су били прикључени жицани отпорник и наливена оловна акумулаторска батерија, састављена од 110 ћелија, номиналног капацитета 800 Ah. Исправљач је испитиван у режиму пуњења батерије ($U_{nom}=266,2$ V, $I_{max}=115$ A), како у режиму регулације напона, тако и у случају активирања лимитера струје. Лимит струје исправног исправљача ДРИ 220-250 је, у режиму допуњавања, једнак његовој номиналној струји од 250 A, али је у режимима пуњења и форсираног пуњења знатно мањи. Лимити струје се, у поменутим режимима рада, усклађују са препорукама произвођача акумулаторских батерија.

Потребни подаци о раду уређаја добијени су на основу снимљених таласних облика напона и струје на излазу исправљача. Праћење таласних облика је вршено помоћу двоканалног дигиталног осцилоскопа Fluke 196C, фреквенцијског опсега до 100 MHz. Као и приликом претходних испитивања, „сигнал струје је добијен помоћу струјних клешта Chauvin Arnoux PAC22 (1400 A, 0-10 kHz), док је за мерење сигнала напона коришћена сонда Metrix NX0004 (250 MHz, 10:1, 14 pF)” [17].

На основу таласних облика напона и струје, обрађених у програмском алату „FlukeView” V.4.4, спектри хармоника напона и струје су генерисани у програмском пакету „OriginPro 8”. Снимљени таласни облици напона и струје имали су по 2400 тачака, са периодом одабирања од 25 μ s, односно $N=800$ одбирака у периоди мереног сигнала од 20 ms. Применом брзе Фуријеове трансформације [7]:

$$[X[k]] = \frac{1}{N} [W^{kn}] \cdot [x[n]], \quad k = 0 \dots N-1,$$

$$n = 0 \dots N-1, \quad W = e^{-j\frac{2\pi}{N}}. \quad (1)$$

у овом случају једнаке дискретној Фуријеовој трансформацији сигнала струје [7]:

$$i(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i[n] e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}, \quad k = 0 \dots N-1,$$

$$n = 0 \dots N-1, \quad N = 800. \quad (2)$$

добијен је дискретни спектар комплексних вредности струје у опсегу од $-19983,3333$ Hz до 20000 Hz, са елементарном спектралном фреквенцијом од 16,6667 Hz.

На основу добијених комплексних бројева, одређен је спектар амплитуда струје:

$$I_{mi} = \sqrt{I_{Rei}^2 + I_{Imi}^2}, \quad i = -1199 \dots 1200. \quad (3)$$

Приликом спектралне анализе сигнала струје, у обзир су узете и једносмерна компонента, и виши хармоници. Једносмерна компонента сигнала струје је једнака амплитуди хармоника фреквенције 0 Hz:

$$I_0 = I_{m0}. \quad (4)$$

Ефективне вредности хармоника струје су мање од израчунатих амплитуда:

$$I_i = \frac{I_{mi}}{\sqrt{2}}. \quad (5)$$

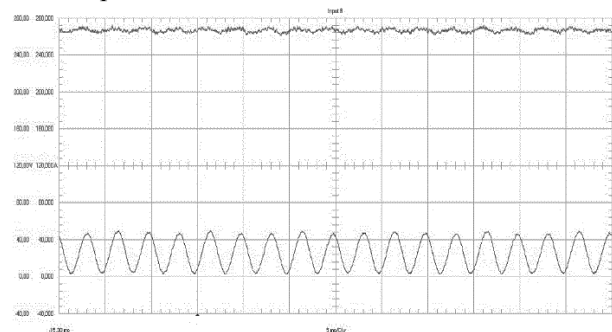
За приказ спектра ефективних вредности хармоника струје, у обзир су узете само ефективне вредности хармоника у опсегу од 50 Hz до 350 Hz. Хармоници мрежне учестаности, виши од седмог, имали су занемарљиве ефективне вредности (мање од 1 % једносмерне компоненте струје).

4. РЕЗУЛТАТИ

На слици 2 су приказани таласни облици напона и струје исправљача ДРИ 220-250, снимљени приликом рада са исправним тиристорским мостом у режиму пуњења батерије. За таласне облике са слике 2, измерене су средње вредности напона од 266 V и струје од 26 A.

На слици 2 се уочава значајна таласност струје, са основном фреквенцијом рипла од 300 Hz, типичном за исправан рад исправљача са пуноуправљивим тиристорским мостом.

Са друге стране, наизменична компонента напона батерије је много мања, и измерена је ефективна вредност од 0,9 V.

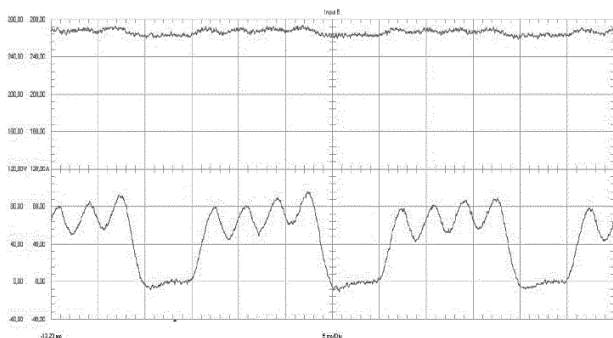


Слика 2 – Таласни облици напона (горе и лева подела на ординати) и струје (доле и десна подела на ординати), снимљени приликом исправног рада исправљача ДРИ 220-250 у режиму регулације напона

Таласни облици напона и струје исправног исправљача, приказани на слици 2, немају хармоници ниже од 300 Hz, а виши хармоници представљају целобројне умношке поменутог хармоника.

Табела 1. Спектар ефективних вредности хармоника струје (од једносмерне компоненте до 7. хармоника мрежне учестаности; $i = 0 - 7$), добијених на основу таласног облика приказаног на слици 3. Мерене вредности струје су добијене приликом рада исправљача ДРИ 220-250 у режиму регулације напона допуњавања, без упаљачких импулса једног тиристора

f [Hz]	0	50	100	150	200	250	300	350
I_i [A]	43,65	27,12	13,65	1,8	7,6	7,16	7,36	0,92
$(I_i/I_0) \cdot 100$ [%]	100	62,82	31,28	4,11	17,41	16,39	16,86	2,11



Слика 3 – Таласни облици напона (горе и лева подела на ординати) и струје (доле и десна подела на ординати), снимљени приликом рада исправљача ДРИ 220-250 у режиму регулације напона, без упаљачких импулса једног тиристора

На слици 3 су приказани таласни облици напона и струје, добијени приликом рада истог исправљача, али без упаљачких импулса на једном од шест тиристора. Уочава се повећање наизменичних компоненти, првенствено струје исправљача.

Регулатор напона је, у режиму пуњења батерије, одржавао средњу вредност напона од 267 V, док је средња вредност струје била 43,65 A (ефективна вредност: 54,88 A). Таласност напона је била већа него у случају исправног рада уређаја ($U_{rip1}=1,8$ V; приближно 0,7 % номиналног излазног напона исправљача у режиму пуњења), али знатно мања од максимално дозвољених 5 % U_{nom} [9].

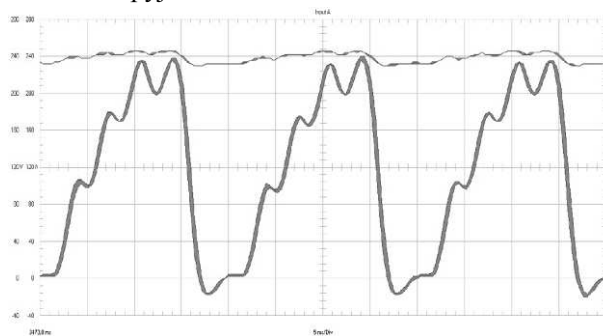
На основу таласних облика напона и струје, приказаних на слици 3, одређен је фреквенцијски састав ових сигнала. Са слике 3 се јасно уочава да су изобличења таласног облика напона, настала услед присуства виших хармоника, занемарљива у односу на једносмерну компоненту.

Укупно хармонијско изобличење ефективне вредности напона у односу на једносмерну компоненту је било само $THD_{f_0} = 1,37\%$. Међутим, сигнал струје је имао много веће изобличење, а ефективне вредности хармоника струје су приказане у табели 1.

Једносмерна компонента струје је била за 60 % већа од ефективне вредности основног хармоника мрежне учестаности, док је 2. хармоник струје био приближно двоструко мањи од основног (табела 1). Остали хармоници су били знатно мањи од 2. хармоника. За детекцију несиметрије тиристорског моста изабран је управо 2. хармоник струје, фреквенције 100 Hz.

У регулатору исправљача типа „ДРИ 07”, на картици аналогне електронике „ДИГИСП 07” налази се аналогни филтер, помоћу кога се, из сигнала излазне струје исправљача, детектује присуство наизменичне компоненте учестаности 100 Hz. На крају, бинарни сигнал о несиметричном раду тиристорског моста се прослеђује према микропроцесорској картици [11].

Таласни облици напона и струје исправљача ДРИ 220-250, приказани на слици 3, добијени су са релативно малим оптерећењем, где средња вредност излазне струје није прелазила 18 % номиналне излазне струје.



Слика 4 – Таласни облици напона (горе и лева подела на ординати) и струје (доле и десна подела на ординати), снимљени приликом рада исправљача ДРИ 220-250 у режиму регулације струје (лимит струје од 115 A), без упаљачких импулса једног тиристора

На слици 4 су приказани таласни облици напона и струје исправљача ДРИ 220-250 док је радио без једног тиристора у режиму регулације струје. Напон исправљача је био мањи од номиналне вредности у режиму пуњења, док је излазна струја била ограничена на 115 A.

Табела 2. Спектар ефективних вредности хармоника струје (од једносмерне компоненте до 7. хармоника мрежне учестаности; $i = 0 - 7$), добијених на основу таласног облика приказаног на слици 4. Мерене вредности струје су добијене приликом рада исправљача ДРИ 220-250 у режиму регулације струје (лимит струје од 115 А), без упаљачких импулса једног тиристора

f [Hz]	0	50	100	150	200	250	300	350
I_i [A]	114	82,61	24,56	12,18	12,74	12,33	6,18	2,03
$(I_i/I_0) \cdot 100$ [%]	100	72,47	21,54	10,68	11,18	10,81	5,42	1,78

Са таласних облика напона и струје, приказаних на слици 4, лако могу да се одреде излазни параметри исправљача ДРИ 220-250: средња вредност напона: $U_{DC}=238,63$ V, таласност излазног напона: $U_{AC}=5,3$ V, ефективна вредност излазног напона исправљача: $U_{RMS}=238,69$ V, средња вредност струје: $I_{DC}=114$ A, ефективна вредност излазне струје: $I_{RMS}=144,7$ A. Апсолутне и релативне ефективне вредности хармоника струје исправљача ДРИ 220-250 приказане су у табели 2.

Због рада исправљача ДРИ 220-250 са великом излазном струјом, хармонијска изобличења напона и струје на слици 4 су много израженија него на слици 3. То се посебно односи на хармонијско изобличење излазног напона, на коме је измерена ефективна вредност наизменичног напона од 5,3 V (2 % номиналног излазног напона исправљача у режиму пуњења). Измерене су вршне вредности струје од 239 A.

5. ДИСКУСИЈА

Таласни облици струје исправљача, на којима тиристорски мост не ради исправно (приказани на сликама 3 и 4), представљају школске примере сигнала са присуством виших хармоника. Виши хармоници струје могу да се искористе за тренутну детекцију неисправног рада тиристорског моста, било због реаговања осигурача, отказа тиристора или губитка упаљачких импулса. Из табела 1 и 2 се јасно уочава висок садржај 2. хармоника у односу на остале више хармонике мрежне учестаности, али и вишеструко нижа вредност у односу на основни хармоник мрежне учестаности.

Анализом спектра струје, снимљених приликом нерегуларног рада тиристорских мостова, намеће се питање: због чега за детекцију квара није искоришћен основни хармоник мрежног напајања, фреквенције 50 Hz?

Основни разлог за избегавање коришћења основног хармоника за детекцију нерегуларног рада тиристорског моста јесте могућност појаве споја (преко импедансе) између мреже наизменичне струје и система непрекидног напајања једносмерном струјом. Тада на батерији може да дође до суперпонирања делимично ослабљеног мрежног

напона на једносмерни напон исправљача. Уколико би дошло до детекције основног хармоника струје, овакав развој догађаја би, ипак, био мало вероватан. Разлог за то је мала ефективна вредност наизменичне струје, недовољна за активирање сигнализације несиметричног рада тиристорског моста. Ипак, 2. хармоник је веома погодан за дијагностику нерегуларних стања тиристорског исправљача, будући да, за разлику од основног хармоника, представља нетипичну фреквенцију, како у колу једносмерне струје, тако и у мрежи трофазне наизменичне струје, номиналних параметара 3·400 V, 50 Hz.

Међутим, ако исправљач ради са сложеним излазним филтером у енергетском колу, или ако је потребна висока осетљивост заштите од несиметрије моста, треба размотрити могућност употребе филтера пропусника основног хармоника (50 Hz) за детекцију нерегуларног рада тиристорског моста.

Основни хармоник мрежне учестаности је примењен за детекцију квара тиристорског моста приликом развоја два исправљача ДРИ 220-160ПТД, који раде са двоструким излазним LC филтером према батерији и потрошачима [18].

Приликом појаве великих изобличења таласног облика струје, вршне вредности струје треба да буду мање од максималне предвиђене тренутне вредности струје пригушнице. Важно је да се не прекорачи овај лимит, како гвоздено језгро пригушнице не би улазило у zasiћење.

Максимална измерена тренутна вредност струје на слици 4 је знатно мања од 325 A, односно максималне тренутне вредности струје за коју је пројектована излазна пригушница. Приликом пројектовања је усвојен фактор таласности [15] $\beta=0,3$, рачунајући у односу на номиналну струју исправљача од 250 A.

Рад исправљача у режиму пуњења, са излазном струјом једнаком 46 % I_{nom} , није изазвао zasiћење гвозденог језгра катодне пригушнице. Према томе, у случају несиметричног рада тиристорског моста, примењено програмско смањивање максималне излазне струје исправљача ДРИ 220-250 за 54 % (у режиму допуњавања) било је довољно да спречи

негативне ефекте виших хармоника струје на индуктивним елементима и полупроводничким прекидачима исправљача. Ни на једном од преосталих пет тиристора у мосту несиметричан рад није изазвао оштећења, чак ни након дужег рада исправљача са струјом од 115 А.

Већина потрошача једносмерне струје има дефинисане лимите таласности једносмерног напона. Исправљачи серије ДРИ, укључујући и ДРИ 220-250, имају уграђену заштиту од високог брума излазног напона, која искључује исправљач у случају појаве велике наизменичне компоненте напона учестаности 50 Hz на излазу уређаја [11].

Описано техничко решење је прво било примењено на 34 регулатора тиристорских исправљача, типова „ДРИ 05” и „ДРИ 07”. Следила је примена на још 52 регулатора исправљача, до сада произведених у Електротехничком институту „Никола Тесла”. Поред 15 нових уређаја, регулатори серије ДРИ су, уместо старих аналогних регулатора, уграђени и на 19 тиристорских исправљача, који су, пре реконструкције, провели у погону између 11 и 27 година.

6. ЗАКЉУЧАК

У раду је описан једноставан поступак за дијагностику квара тиристорског моста, који не захтева непосредно праћење стања појединачних полупроводничких прекидача или осигурача. Мерењем присуства другог хармоника струје мрежне учестаности у излазној струји исправљача, квар тиристорског моста може да се идентификује са задршком краћом од секунде.

Други хармоник струје се детектује из сигнала добијеног са сензора струје, помоћу аналогног филтерског кола. Потом се, у облику логичког сигнала, прослеђује према микропроцесору управљачке електронике. Исти принцип може да се примени и у случају дигиталне обраде сигнала струје исправљача, када посебно аналогно филтерско коло не би било потребно.

Анализиран је рад два исправљача велике снаге, у случајевима када уређаји раде без једног тиристора у полупроводничком мосту, са 18 – 46 % номиналног оптерећења, и то у режимима регулације напона и лимитирања струје исправљача. У свим случајевима је, након појаве квара, била доминантна једносмерна компонента струје.

Основни хармоник мрежне учестаности има два до три и по пута већи утицај у односу на други хармоник струје, док су остали виши хармоници знатно мање изражени у односу на 2. хармоник. Иако има вишеструко мање ефективне вредности од основног хармоника мрежне учестаности, 2.

хармоник струје је искоришћен због специфичне учестаности од 100 Hz, која не може да се појави приликом кварова или нерегуларних стања исправљача која нису везана за исправан рад полупроводничког моста. Основни хармоник струје је искоришћен за детекцију нерегуларног рада тиристорског моста на исправљачима са двоструким излазним LC филтером, код којих је таласност излазне струје веома мала.

Узимајући у обзир оптерећење појединих полупроводничких прекидача и индуктивних елемената приликом рада енергетског претварача без једног тиристора, лимит струје исправљача ДРИ 220-250 је, у режиму допуњавања батерије, подешен на 46 % номиналне струје (115 А).

Заштита од несиметричног рада тиристорског моста је, од 2005. године до тренутка писања овог чланка, примењена на укупно 86 дигиталних регулатора исправљача, произведених у Електротехничком институту „Никола Тесла”.

7. ЗАХВАЛНИЦА

Рад је настао током активности на потпројекту „Развој система непрекидног напајања једносмерном струјом” у оквиру пројекта TP33020, „Повећање енергетске ефикасности хидроелектрана и термоелектрана Електропривреде Србије развојем технологије и уређаја енергетске електронике за регулацију и аутоматизацију”, који је финансирао Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wang R, Cai J, Du X, Zhou L, Review of power semiconductor device reliability for power converters, *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 2, no. 2, pp. 101-117, 2017.
- [2] Wang R, Zhan Y, Zhou H, Application of S transform in fault diagnosis of power electronic circuits, *Scientia Iranica, Transactions D: Computer Science & Engineering and Electrical Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 721-726, 2012.
- [3] Yang S, Xiang D, Bryant A, Mawby P, Ran L, Tavner P. Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: a review, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 11, 2010, pp. 2734-2752
- [4] Rahiminejad M. Open-circuit fault diagnosis in three-phase power rectifier driven by a variable voltage source, M.Sc. Thesis, University of New Brunswick, Fredericton, Canada, 2016.
- [5] Liu H, Han J, Shen N, Lan H. Rectifier power thyristor failure in real-time detection methods, in

- Proc. *Power and Energy Engineering Conference APPEEC 2012 Asia-Pacific*, 27-29 March 2012, DOI: 10.1109/APPEEC.2012.6307672
- [6] Song G, Wang X, Tang J, Liu P. An on-line fault diagnosis method for power rectifier device based on fault current characteristics, in Proc. *CICED 2016 China International Conference on Electricity Distribution, Xi'an, 10-13 August, 2016*, pp. CP1002-1 – CP1002-6
- [7] Катић В. *Квалитет електричне енергије – виши хармоници (монографија)*, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, 2002.
- [8] Mohan N, Undeland TM, Robbins WP. *Power Electronics – Converters, Applications, and Design*, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [9] Јанда Ж, Вукић В. Интерни стандард ИС–ЕМС 133:2014 - Сопствена потрошња у трансформаторским станицама, разводним постројењима и диспечерским центрима, Електромрежа Србије, Београд, 2014.
- [10] King A, Knight W. *Uninterruptible power supplies and standby power systems*, Mc-Graw-Hill Companies, Inc, New York, 2003.
- [11] Вукић В. Тиристорски исправљачи са дигиталним регулаторима заснованим на микроконтролеру 80C196 за системе непрекидног напајања, *Зборник радова, Електротехнички институт „Никола Тесла“*, књига 21, стр. 139-155, 2011.
- [12] Vukić V. Đ. Upgrade of thyristor rectifiers in a thermal power plant “Nikola Tesla A”, in Proc. *Conf. Power Plants 2012*, Zlatibor, Serbia, pp. 372-381, October 30-November 2, 2012.
- [13] DC UPS Guide Specification, Document Q320.111 Revision 00, Gutor Electric LTD, 2007.
- [14] *Cyberex Cyberwave Battery Charger, Product brochure*, Thomas & Betts Power Solutions LCC, ABB Group, 2015.
- [15] Волчков И. Упрошћени прорачун катодних пригушница, Публикације Електро-техничког факултета Универзитета у Београду – Серија: електроенергетика, бр. 137, стр. 1-11, 1989.
- [16] Вукић В. Енергетска ефикасност и дигитална комуникација фазно регулисаних исправљача за индустријске системе непрекидног напајања, *Пољопривредна техника*, година XXXVI, бр. 3, стр. 19-28, 2011.
- [17] Вукић В. Ђ. Мрежом комутовани фазно регулисани исправљачи са адаптивним дигиталним регулаторима, *Зборник радова, Електротехнички институт „Никола Тесла“*, књига 23, стр. 1-18, 2013.
- [18] Вукић В, Проле Р, Јевтић Д, Ново постројење са тиристорским исправљачима и разводом једносмерне струје за напајање хидроелектране, *Зборник радова, Електротехнички институт „Никола Тесла“*, књига 20, стр. 143-156, 2010.

SUMMARY

DIAGNOSTICS OF THE THYRISTOR BRIDGE FAULT BASED ON THE DETECTION OF THE LINE-FREQUENCY SECOND HARMONIC IN THE OUTPUT CURRENT OF AN AC/DC CONVERTER

In this paper was presented the technical procedure implemented for the fault diagnostics of the thyristor bridge in an AC/DC converter. During the development of the new generation of digital controllers for AC/DC converters, it was required for these devices to have a possibility for a real-time detection of the thyristor converter fault. Thyristor bridge fault should be detected without the need for the state monitoring of the particular power semiconductor switches or rapid fuses. Thyristor bridge fault was identified using the measurement of the line-frequency second harmonic in the rectifier output current signal. Output voltage and current waveforms were presented, as well as the current spectra, in the cases of the thyristor bridge operation without one switch. The operation principle was described for a protection from an asymmetric operation of a thyristor bridge. A negative influence of high-order harmonics was analysed on the particular rectifier components, both in the cases of the output voltage control, as well as for operation in the current limit mode.

Key words: thyristor bridge, diagnostics, the second harmonic, AC/DC converter