

Мрежом комутовани фазно регулисани исправљачи са адаптивним дигиталним регулаторима

Владимир Ђ. Вукић

Електротехнички институт “Никола Тесла”, Универзитет у Београду, Београд,
Србија

vladimir.vukic@ieent.org

Кратак садржај: У раду је приказан утицај увођења линеарно променљивог коефицијента пропорционалног појачања ПИ регулатора напона на динамичке карактеристике мрежом комутованог фазно регулисаног исправљача. Испитиван је исправљач са дигиталним регулатором типа “ДРИ 07Б”, заснован на микроконтролеру “Intel” 80C196. Код реализованих адаптивних ПИ регулатора напона исправљача вредност коефицијента пропорционалног појачања (K_p) се линеарно мења у широком границама, смањујући се сразмерно расту тренутне вредности струје исправљача у области прекидних струја. Након достизања граничне вредности непрекидне струје, коефицијент пропорционалног дејства регулатора напона исправљача остаје константан. Поред побољшања статичке стабилности рада тиристорског исправљача приликом рада са малим излазним струјама, употреба адаптивног ПИ регулатора је довела и до побољшања одзива регулатора напона у случају тренутне промене струје потрошача у опсегу 13 - 90 % номиналне вредности струје исправљача. Анализиране су преносне функције појединих склопова фазно регулисаног исправљача ДРИ 110-100, номиналних излазних параметара 116 V и 100 A. Детаљно су испитане промене вредности коефицијената линеарног пригушења, као и геометријско место полова.

Кључне речи: адаптивно управљање, ПИ регулатор, промена пропорционалног појачања, фазно регулисани исправљач, дигитални регулатор, микроконтролер 80C196, коефицијент релативног пригушења, геометријско место корена

1. Увод

Претходних година је у неколико радова [1]-[4] представљен развој дигитално регулисаних тиристорских исправљача у Електротехничком институту “Никола Тесла”. Поред регулатора исправљача заснованих на програмабилним логичким контролерима (ПЛЦ) [1],[2], приказан је и развој регулатора исправљача заснованих на 16-битним микроконтролерима “Intel” 80C196KB16 [3],[4] (дигитални регулатори исправљача типа “ДРИ 05” и “ДРИ 07”). Будући да током првих година развоја најчешће нису постављани захтеви везани за рад тиристорских исправљача без прикључене батерије, употреба стандардних дигиталних ПИ регулатора је била задовољавајуће решење.

У електранама и великим индустријским објектима обично тиристорски исправљачи већих снага и оловне акумулаторске батерије представљају основу система непрекидног напајања једносмерном струјом. По правилу, најважнији део система непрекидног напајања је батерија, и она треба да обезбеди вишечасовну аутономију напајања критичних потрошача у случају нестанка наизменичног напона напајања система сопствене потрошње. Због тога се често у електранама користе једноставнији пуњачи батерија, односно тиристорски исправљачи без излазних филтерских кондензатора. Оваква једноставна конфигурација има извесне предности, које се првенствено огледају у знатно једноставнијем одржавању. У овом случају у енергетском колу тиристорског исправљача нема електролитских филтерских кондензатора, као ни пратећих енергетских компонената. Тиме је знатно олакшан рад руковалаца приликом годишњег циклусирања батерија. Избегавање коришћења електролитских кондензатора може да буде веома значајно у случајевима рада исправљача у термоелектранама, где, у случају непостојања или квара локалне климатизације, температура лако може да премаши дозвољених 40-45°C [5]. Такође, приликом рада исправљача без филтерских кондензатора испад батерије може да се детектује тренутно, док то није могуће у случају рада са излазним филтерским кондензаторима [1],[3]. Прикључена батерија на излазу тиристорског исправљача се понаша као изузетно велика капацитивност и готово струјни понор, што омогућава лако филтрирање утицаја сметњи и пренапона у постројењу на исправан рад исправљача и снабдевање потрошача стабилном једносмерном струјом [6].

Са друге стране, корисник не може да се ослони на батерију као потпуно сигуран и у свим случајевима стабилан извор једносмерне струје. До привремених или трајних испада батерије може да дође због мноштва узрока, од реаговања осигурача батерије, преко повећања прелазног отпора међувеза ћелија батерије, па све до механичких оштећења и прекида ланца саме батерије. Тако може да се деси да у критичној ситуацији, због пролазног испада батерије дође и до испада

тиристорског исправљача и останка свих потрошача без једносмерног напона, укључујући ту и заштитне уређаје. Тада је изузетно важно да исправљач остане у погону и настави да напаја потрошаче стабилном једносмерном струјом, чак и у случају појаве изузетно великих електричних поремећаја у локалној мрежи једносмерне струје.

Због тога су последњих година корисници задавали све строжије експлоатационе захтеве за мрежом комутоване фазно регулисане исправљаче. Унапређење регулатора “ДРИ 07” на стандард “ДРИ 07Б” и уградња филтерских кондензатора са пратећим компонентама извршени су ради подизања робустности тиристорских исправљача у разводима једносмерне струје електропривреде и индустрије. На овај начин је омогућен рад система непрекидног напајања једносмерном струјом и у случајевима пролазних или трајних испада акумулаторских батерија [6], као и у случају појаве великих транзијентних поремећаја у дистрибутивним мрежама једносмерне струје.

У наведеним случајевима долази до изражаја нелинеарна природа тиристорског исправљача као објекта управљања. Такође, додатне нелинеарности објекта управљања настају као последице наглих промена природе оптерећења исправљача, првенствено код прелазних процеса приликом испада или прикључивања батерије. У случају рада са изразито нелинеарним објектима управљања потребно је применити одговарајуће регулаторе, који могу да се прилагоде насталим специфичностима процеса. Наведене захтеве испуњавају адаптивни системи аутоматског управљања [7].

У раду је приказан даљи развој фазно регулисаних исправљача, заснованих на микроконтролеру “Intel” 80C196KB16. Описан је унапређени регулатор тиристорског исправљача типа “ДРИ 07Б”, а упоређене су и динамичке карактеристике уређаја са примењеним адаптивним управљањем и обичним ПИ регулаторима.

2. Карактеристике фазно регулисаних исправљача са дигиталним регулатором типа “ДРИ 07Б”

Даљим усавршавањем регулатора исправљача типа “ДРИ 07” добијен је унапређени регулатор “ДРИ 07Б”. Нови регулатор исправљача типа “ДРИ 07Б” је, као и претходни модел, монтиран у алуминијумској заштитној кутији. Димензије и тежина регулатора су приближно исти као и у случају уређаја “ДРИ 07”. Извршена унапређења се првенствено огледају у уградњи унапређене картице аналогне електронике, “ДИГИСП 07Б”, као и у развоју унапређеног управљачког програма за микроконтролер “Intel” 80C196KB16.

Основно унапређење тиристорских исправљача заснованих на микроконтролеру “Intel” 80C196KB16 са излазним LC филтером огледа

се у увођењу адаптивних ПИ регулатора напона са линеарно променљивим коефицијентом пропорционалног дејства у функцији тренутне вредности струје исправљача. Дигитални регулатори струје су реализовани као обични ПИ регулатори, док су дигитални регулатори напона реализовани у форми адаптивних ПИ регулатора, са линеарно променљивим коефицијентом пропорционалног дејства зависним од тренутне вредности струје исправљача. У зависности од тренутне вредности струје, коефицијент пропорционалног дејства регулатора напона (K_p) се мења у веома широком опсегу, од рада у празном ходу (K_{p0}), па до вредности у стационарном стању, за веће вредности струје исправљача (K_{p1}) [6]. Адаптивно дејство регулатора има највећи ефекат приликом наглих промена струје у опсегу од неколико ампера, па све до 29 А (за исправљач ДРИ 110-100; граница прекидне струје варира у зависности од карактеристика пригушнице и излазног напона [8], и обично има вредности од 20 - 30 % I_{nom}). На овај начин омогућено је непрекидно напајање потрошача једносмерном струјом и у случајевима пролазног или трајног испада батерије, уз истовремене нагле промене струје потрошача у опсегу од 1 – 100 % номиналне струје исправљача [6].

Активирање или искључивање адаптивног дејства регулатора, почетна (K_{p0}) и стационарна (K_{p1}) вредност коефицијента пропорционалног појачања регулатора напона, као и праг достизања стационарног стања коефицијента пропорционалног дејства (у функцији струје исправљача), могу директно да се задају преко рачунара посредством галвански изоловане серијске комуникације стандарда RS 485.

Поред наведеног основног поступка унапређења дигиталног регулатора, примењен је и нови поступак за брзу детекцију несиметрије тиристорског моста. Несиметрија тиристорског моста настаје у случају испада неког од ултрабрзих осигурача или квара тиристора. У тим случајевима раде само једна или две гране трофазног тиристорског моста (са два или четири тиристора), а у случају рада исправљача са испразњеном батеријом или великим оптерећењем може да дође и до преоптерећења преосталих тиристора у мосту. Такође, због рада са прекидним струјама, које могу да имају изузетно велике амплитуде, могуће је и веома брзо активирање аналогне краткоспојне заштите након отказа тиристора или ултрабрзог осигурача у трофазном мосту. Због тога је приликом детекције несиметрије моста смањен лимит струје исправљача (у режиму допуњавања) на 35 – 50 % номиналне вредности. Ове вредности омогућавају трајан рад исправљача само са једном граном тиристорског моста, али се, наравно, одмах активирају локална и даљинска сигнализација квара исправљача. Због знатно мањих лимита струје у режимима пуњења и форсираног пуњења (тада исправљач ради само са батеријом, без потрошача), ограничење лимита струје у случају несиметрије моста је примењено само у случају рада у режиму допуњавања.

Поред модификације енергетског кола, изузетно важно је било и додавање нових LC филтера за сузбијање електромагнетних сметњи које су се шириле са енергетских компонената ка дигиталном регулатору исправљача типа “ДРИ 07Б”. Управљачка електроника старијих исправљача серије ДРИ није била много осетљива на утицај електромагнетних сметњи, будући да су исправљачи стално радили са прикљученим акумулаторским батеријама. Ипак, када су велики

филтерски кондензатори додати на излаз исправљача, комутациони пренапони или краткотрајни поремећаји, на које је утицала високонапонска опрема у дистрибутивним мрежама електране, довели су до појаве бројних неправилности у раду управљачке електронике, посебно у случајевима када су исправљачи радили са малом струјом потрошача. Уградња додатних РСО филтера довела је до поузданог рада управљачке електронике исправљача у свим режимима пуњења исправљача.

На стандард “ДРИ 07Б” је током 2011. и 2012. године унапређено девет исправљача снаге од по 90 kVA (пет ДРИ 220-250 и четири ДРИ 110-500), испоручених између 2007. и 2010. године термоелектрани “Никола Тесла А”. У 2012. и 2013. години направљен је по један нови исправљач ДРИ 110-100 (снаге 20 kVA) са управљачком електроником типа “ДРИ 07Б” за хидроелектране “Овчар Бања” и “Међувршје”.

3. Поступак испитивања исправљача ДРИ 110-100 и мерна опрема

Критичне ситуације у експлоатацији исправљача и батерија првенствено настају у случајевима када дође до симултаног испада батерије и наглог повећања струје потрошача. Тада се за врло кратко време драстично мењају карактеристике објекта управљања, будући да се прикључена батерија понаша као изузетно велика капацитивност, а исправљач остаје у раду са много мањом капацитивношћу сопствених филтерских кондензатора. У оваквим специфичним ситуацијама, али и приликом великих промена струје оптерећења (нпр. са 10 % на 90 - 100 % номиналне струје), често су потребне веома добре динамичке карактеристике да би се сузбио негативан утицај поремећаја.

Претходних година су објављени бројни радови у којима су наведене велике предности алтернативних поступака управљања у односу на класичне ПИД регулаторе [9]-[11]. Ипак, како су запазили истакнути аутори из области регулације [11], у већини наведених радова су на нелинеарним системима вршена упоређивања одзива класичних ПИД регулатора (пројектованих за линеарне системе) са алтернативним методама управљања (пројектованих за нелинеарне системе аутоматског управљања) [9]. Разумљиво је да у тим случајевима ПИД регулационе структуре нису имале задовољавајуће резултате. Међутим, већ приликом увођења променљивог коефицијента пропорционалног појачања (енг. “*gain scheduling*”) постигани су одзиви ПИД регулатора који нису заостајали за много комплекснијим законима управљања [10],[11]. Према томе, уместо промене типа регулатора и неминовне замене старог микроконтролера “Intel” 80C196KB16 (максимална брзина обраде података 1,5 MIPS [3]), на дигиталном регулатору исправљача типа “ДРИ 07Б” извршено је увођење адаптивног ПИ регулатора са

променљивим коефицијентом пропорционалног појачања. Основни утицај адаптивног регулатора требало је да се испољи приликом рада са релативно малим, прекидним струјама исправљача ДРИ 110-100 (од 0 до 29 А). Секундарно унапређење би требало да дође до изражаја приликом наглих промена оптерећења, и то у случајевима изразитих прелазака из области прекидних струја (0 – 29 А) у област непрекидних струја (29 – 100 А). У наведеним случајевима, примена адаптивног ПИД регулатора са променљивим коефицијентом пропорционалног појачања требало би да доведе до побољшања прелазних процеса на излазу исправљача.

У претходном раду [3] детаљно је анализиран одзив ПИ регулатора напона исправљача ДРИ 220-10 на промену референтне вредности напона. Испитивање је вршено на лабораторијском исправљачу снаге 2,5 kVA, заснованом на дигиталном регулатору исправљача типа “ДРИ 07”. У овом раду је много више пажње посвећено анализи одзива различитих структура регулатора напона (обичан и адаптивни дигитални ПИ регулатор) на широке промене струје оптерећења (са 13 % на 90 % и обрнуто). Испитивања су вршена на реалном индустријском исправљачу ДРИ 110-100, произведеном за хидроелектрану “Међувршје”. Анализиране су преносне функције делова система аутоматског управљања, положаји полова преносних функција, фактори релативног пригушења процеса, као и карактеристике геометријског места полова.

Приликом испитивања у радионици исправљача ДРИ 110-100 (номинални напон допуњавања 116 V, номинална струја 100 А) извршено је снимање одзива регулатора напона и струје. Праћење таласних облика струје и напона вршено је помоћу 100 MHz двоканалног дигиталног осцилоскопа “Fluke” 196C. Сигнал струје је добијен помоћу струјних клешта “Chauvin Arnoux” PAC22 (1400 А, 0-10 kHz), док је за мерење сигнала напона коришћена сонда “Metrix” HX0004 (250 MHz, 10:1, 14 pF).

4. Резултати испитивања и дискусија

Испитивање исправљача ДРИ 110-100 вршено је на паралелном резистивно – капацитивном оптерећењу, састављеном од два потрошача отпорности 9 Ω и 1,5 Ω , као и електролитских кондензатора, укупне капацитивности 9400 μF . Индуктивност излазне пригушнице исправљача ДРИ 110-100 је била 0,9 mH. Приликом испитивања задати су следећи (емпиријски одређени) параметри дигиталног ПИ регулатора напона: $K_{po} = 2$ (коефицијент пропорционалног појачања за рад исправљача у празном ходу), $K_{p1} = 0,25$ (коефицијент пропорционалног појачања за рад исправљача са непрекидном струјом: $I \geq I_K$; I – тренутна вредност струје; $I_K = 29$ А – емпиријски одређена граница прекидне струје за референцу напона од 116 V), $T_i = 25$ ms (временска константа интегралног дејства),

$\Delta t = 1,66 \text{ ms}$ (периода одабирања). Приликом рада са прекидним струјама исправљача, коефицијент пропорционалног појачања (K_p) је линеарно мењан између вредности K_{p0} и K_{p1} , у зависности од тренутне вредности струје на излазу исправљача:

$$K_p = K_{p0} - \frac{(K_{p0} - K_{p1})I}{I_K} \quad (1)$$

Пуноуправљиви тиристорски исправљач представља изразито нелинеаран објекат управљања у области прекидних струја [8]. Промена коефицијента K_p се врши линеарно у области прекидних струја исправљача, док у области непрекидних струја коефицијент пропорционалног појачања адаптивног ПИ регулатора има константне вредности. Наведени поступак линеарне промене коефицијента пропорционалног дејства је први пут примењен на дигиталним ПИД регулаторима исправљача ДРИ 220-160ПТД, заснованог на ПЛЦ-у "Omron" CJ1G [2]. Значајан разлог за коришћење адаптивног ПИ регулатора на управљачкој електроници типа "ДРИ 07Б" представља рад микроконтролера "Intel" 80C196KB16 са релативно великом периодом одабирања од 1,66 ms. Будући да је комплетан управљачки програм написан на програмском језику "C" [6], микроконтролер 80C196KB16 је доведен до граница хардверских могућности, па даље смањивање периоде одабирања није било могуће. Из литературе је познато да ПИ регулатори дају добре резултате код управљања системима 1. реда, док су за управљање системима 2. реда погоднији ПИД регулатори [12]. Међутим, код дигиталних система аутоматског управљања морају да буду задовољени захтеви везани за минимално трајање периоде одабирања. Код ПИ регулатора однос периоде одабирања (Δt) и интегралне временске константе регулатора (T_i) треба да буде највише [13]:

$$\frac{\Delta t}{T_i} = 0,1 - 0,3 \quad (2)$$

да би се верно репродуковао основни сигнал. Код регулатора исправљача типа "ДРИ 07Б" овај услов је лако испуњен (у конкретном случају, код исправљача ДРИ 110-100 је било $\Delta t = 1,66 \text{ ms}$ и $T_i = 25 \text{ ms}$). Међутим, за успешну примену ПИД регулатора треба да буде испуњен услов максималне вредности количника [13]:

$$\frac{N\Delta t}{T_i} = 0,2 - 0,6 \quad (3)$$

где је N – коефицијент апроксимативног диференцијалног дејства (обично има вредности између 8 и 20) [13]:

$$sT_d \approx \frac{sT_d}{1 + \frac{sT_d}{N}} \quad (4)$$

Дакле, у случају рада са уобичајеном варијантом “умекшаног” диференцијалног дејства ($N = 10$), за $T_i = 25$ ms периода одабирања Δt би смела да буде највише $\Delta t = 0,5 - 1,5$ ms. Приликом рада са минималном вредношћу коефицијента апроксимативног диференцијалног дејства ($N = 3$) могло би да се користи и диференцијално дејство ПИД регулатора, али у том случају се поставља питање утицаја прорачуна Тустинове апроксимације на време извршавање управљачког програма. Дуго време прорачуна могло би да доведе до потребе за даљим повећавањем периоде одабирања. Такође, за овако малу вредност коефицијента N , утицај диференцијалног дејства на излаз регулатора је скроман.

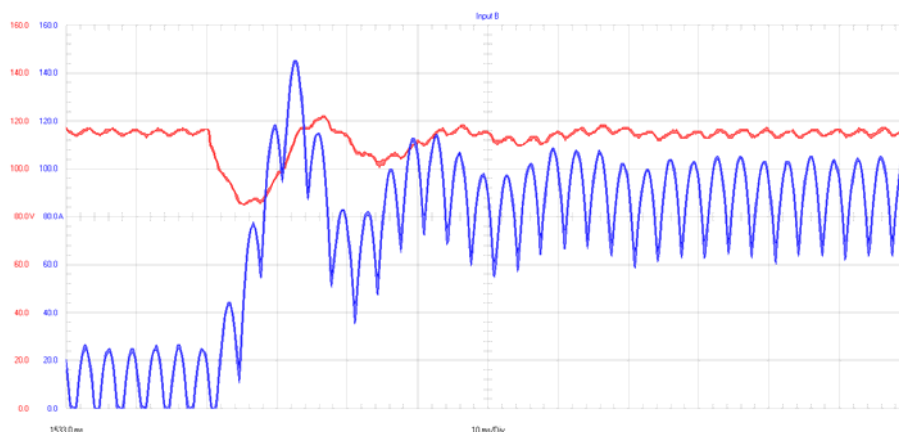
Будући да је карактеристична временска константа пуноуправљивог тиристорског моста $T_t = 3,3$ ms, у случају рада са истом периодом одабирања било би омогућено успешно управљање тиристорским мостом помоћу ПИ регулатора. Ипак, задржана је периода одабирања од $\Delta t = 1,66$ ms ради унификације дигиталног фазног померања за различите варијанте тиристорских мостова (трофазног полууправљивог и пуноуправљивог, као и дванаестопулсних фазно регулисаних исправљачких мостова).

На сликама 2 и 3 приказани су таласни облици напона и струје исправљача ДРИ 110-100 приликом промене струје потрошача са 13 % I_{nom} на 90 % I_{nom} . На слици 2 је приказан одзив ПИ регулатора напона исправљача без адаптивног дејства, док је на слици 3 приказан одзив адаптивног ПИ регулатора.

Приликом испитивања одзива регулатора исправљача није постојала могућност да буде снимљен и трећи сигнал, односно тренутак настанка степ-поремећаја изазваног прикључивањем отпорника од 1,5 Ω прекидачем за једносмерну струју. Због тога није могуће прецизно одређивање времена кашњења, T_k (раст од 0 % до 50 % крајње вредности одзива), на начин приказан у раду [3]. Ипак, могуће је одређивање времена успона, T_u (раст од 10 % до 90 % крајње вредности), као и одређивање амплитуде промене напона и времена смиривања прелазног процеса, T_s (ипак, не од тренутка задавања степ-поремећаја оптерећења већ од тренутка појаве прескока; рачунато до уласка промене сигнала напона у опсег ± 3 % номиналне вредности). У случају промене струје исправљача са 13 % I_{nom} на 90 % I_{nom} , измерене су следеће вредности приликом одзива обичног ПИ регулатора (слика 2): $V(0) = 115,6$ V, $V_{min} = 84$ V, $\Delta V = -31,6$ V, $T_u = 3,2$ ms, $T_s = 47,8$ ms. У случају промене струје исправљача са 13 % I_{nom} на 90 % I_{nom} , приликом одзива адаптивног ПИ регулатора измерене су следеће вредности (слика 3): $V(0) = 116,4$ V, $V_{min} = 89,2$ V, $\Delta V = -27,2$ V, $T_u = 2,8$ ms, $T_s =$

27,4 ms.

Иако је адаптивна промена коефицијента струјног појачања уведена првенствено због рада са малим струјама потрошача, одзиви приказани на слици 2 и 3 указују на приметан утицај адаптивног дејства на смањивање подбачаја напона. У случају рада адаптивног у односу на обичан ПИ регулатор, промена напона је значајно мања ($\Delta V = -27,2$ V уместо $\Delta V = -31,6$ V; подбачај напона од 23,4 % у односу на 27,3 %). Такође, није без значаја ни минимална вредност напона забележена приликом нагле промене оптерећења: рад са 85 V или 90 V може да представља разлику између испода осетљивог потрошача једносмерне струје или нормалног останка у трајном раду. Наравно, забележена појава изузетно кратко траје (слике 2 и 3) и код већине потрошача једносмерне струје не може да дође до штетних последица. Ипак, смањивање подбачаја напона за око 4 % номиналне вредности напона може да оправда увођење линеарног адаптивног регулатора и у случају веома изражених транзијентних процеса.

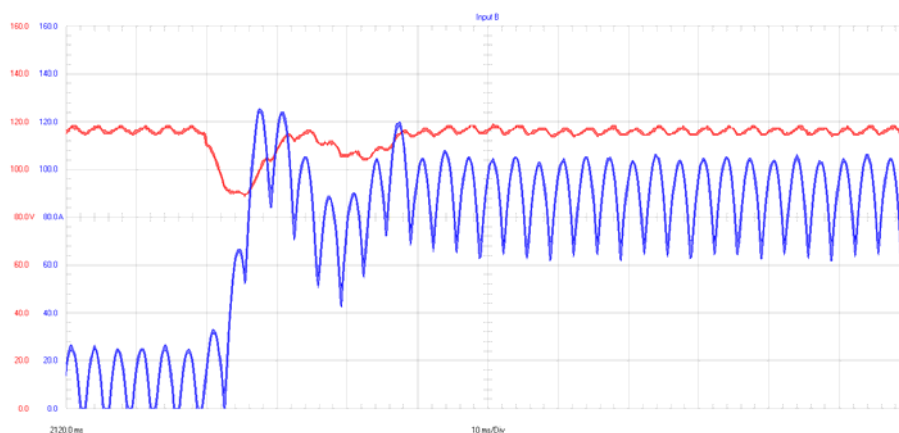


Слика 2. Таласни облици напона (горе, црвено) и струје (доле, плаво) исправљача ДРИ 110-100 током промене струје потрошача са 13 % I_{nom} на 90 % I_{nom} – рад без адаптивног дејства ПИ регулатора напона

Поред смањеног подбачаја напона за око 14 % у односу на вредност ΔV ПИ регулатора, посебно је време смиривања прелазног процеса знатно краће код адаптивног у односу на обичан ПИ регулатор (за око 42 %; 27,4 ms у односу на 47,8 ms). Ипак, упоређивањем слика 2 и 3 лако се долази до закључка да се највећи ефекат примењеног адаптивног дејства регулатора напона уочава код смањивања пребачаја струје приликом промене оптерећења са 13 % на 90 % номиналне вредности од 100 A. У случају када је био активан обичан ПИ регулатор напона, максимална измерена вредност струје током прелазног процеса била је 143,2 A (38 % изнад амплитуде излазне струје исправљача од 104 A), док је у случају деловања адаптивног ПИ регулатора напона измерена максимална вредност струје од 124,8 A (пребачај од око 20 % у односу на амплитуду излазне струје). Дрastiчним смањивањем пребачаја

излазне струје исправљача добија се могућност подешавања нижег прага реаговања краткоспојне заштите исправљача у односу на уобичајену вредност. Такође, постиже се и мање напрезање компонената енергетског кола тиристорског исправљача приликом појаве прелазних процеса.

У претходном раду [3] је анализа прелазних процеса тиристорског исправљача са излазним LC филтером спроведена на излазном RLC колу 2. реда. Анализа одзива регулатора приказана у наведеном тексту заправо представља поједностављен приказ реалних прелазних процеса на исправљачу ДРИ 220-10. Да би се добила тачна преносна функција исправљача, поред излазног RLC кола у обзир треба узети и тиристорски мост. Пуноуправљиви тиристорски мост се, по правилу, моделује као систем 1. реда [14], са карактеристичном временском константом $T_t = 3,3$ ms. У том случају би за верно моделовање комплетног тиристорског исправљача био потребан систем 3. реда, а самим тим употреба ПИ или ПИД регулатора не би давала задовољавајуће резултате. Са друге стране, због једноставности анализе и примењеног закона управљања веома је важно да преносна функција процеса не буде превише сложена, односно да се реалан модел вишег реда апроксимира моделом 1. или 2. реда, уколико је то могуће. Због тога је потребно да се посебно анализирају преносне функције тиристорског моста и излазног RLC кола исправљача.



Слика 3. Таласни облици напона (горе, црвено) и струје (доле, плаво) исправљача ДРИ 110-100 током промене струје потрошача са 13 % I_{nom} на 90 % I_{nom} – рад са адаптивним дејством ПИ регулатора напона

Преносна функција тиристорског моста може да се представи на следећи начин [14]:

$$G_t(s) = \frac{K_t}{sT_t + 1} \quad (5)$$

где су K_t – појачање тиристорског моста и T_t – временска константа пуноуправљивог тиристорског моста ($T_t = 3,3 \text{ ms}$). На основу преносне функције система 1. реда [13], добија се вредност пола тиристорског моста [15]:

$$p_t = -\frac{1}{T_t} = -300 \quad (6)$$

Сада прелазимо на анализу излазног RLC кола 2. реда. На основу диференцијалне једначине за RLC коло са редном пригушницом ($L = 0,9 \text{ mH}$) и паралелним кондензатором ($C = 9400 \text{ }\mu\text{F}$) и отпорником (укупне отпорности $R_u = 9 \text{ }\Omega$ или $R_u = 1,29 \text{ }\Omega$) [3],[16],[17]:

$$\frac{d^2 v_c}{dt^2} + \frac{1}{R_u C} \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{LC} = \frac{V_d}{LC} \quad (7)$$

(где су V_d – улазни напон RLC филтера (са тиристорског моста) и v_c – излазни напон RLC филтера, односно напон на кондензатору и отпорнику); потом Лапласове трансформације једначине у фреквентном домену [17]:

$$G(s) = \frac{V_d(s)}{V_c(s)} = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + s \frac{1}{RC} + \frac{1}{LC}} \quad (8)$$

потом преносне функције система 2. реда [16]:

$$KG(s) = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} \quad (9)$$

као и вредности фактора пригушења за наведено RLC коло другог реда [17]:

$$\xi = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (10)$$

и на крају непригушене природне учестаности RLC кола другог реда [17]:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (11)$$

добијају се вредности фактора релативног пригушења излазног RLC кола једнаке $\xi_{13} = 0,0172$ (за $R_u = 9 \text{ }\Omega$; 13 % I_{nom}) и $\xi_{90} = 0,12$ (за $R_u = 1,29 \text{ }\Omega$; 90 % I_{nom}). Непригушена природна учестаност RLC кола другог реда има вредност $\omega_n = 343,8 \text{ rad/s}$. За седмоструко повећање струје оптерећења и релативно пригушење излазног RLC кола се повећава седам пута.

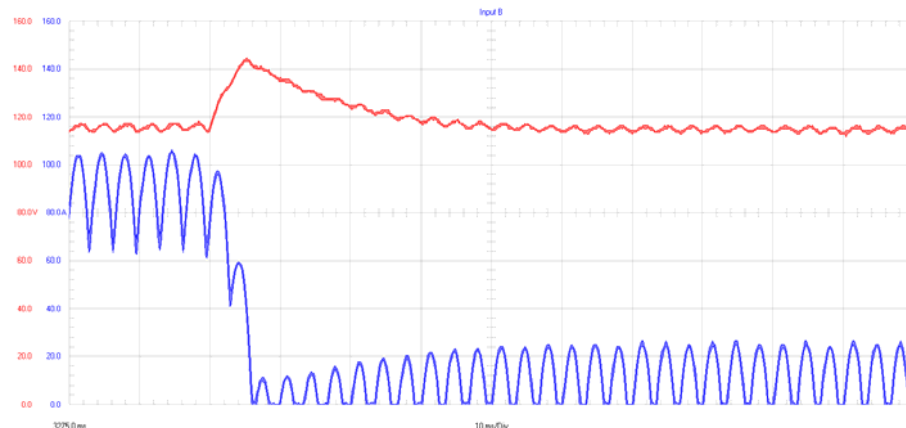
На основу наведених података можемо да израчунамо вредности полова RLC кола 2. реда, за факторе релативног пригушења при раду исправљача ДРИ 110-100 са 13 % и са 90 % номиналног оптерећења. За рад исправљача са 13 А и $\xi_{13} = 0,0172$, добијају се вредности конјуговано-комплексних полова [16]:

$$p_{1,2}^{13} = -\xi_{13}\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi_{13}^2} = -6,31 \pm j343,74 \quad (12)$$

За рад исправљача са 90 А и $\xi_{90} = 0,12$, добијају се следеће вредности полова [16]:

$$p_{1,2}^{90} = -\xi_{90}\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi_{90}^2} = -40,22 \pm j341,44 \quad (13)$$

Из наведених израза за конјуговано-комплексне полове система 2. реда, за вредности фактора релативног пригушења од $\xi_{13} = 0,0172$ и $\xi_{90} = 0,12$, уочава се да се геометријско место конјуговано-комплексних полова налази са леве стране имагинарне осе. Ипак, и у широком опсегу варијација струје оптерећења, од 13 % до 90 % номиналне вредности, коефицијенти релативног пригушења су задржали веома ниске вредности, због чега се и полови налазе близу имагинарне осе, односно границе осцилаторног одзива система.

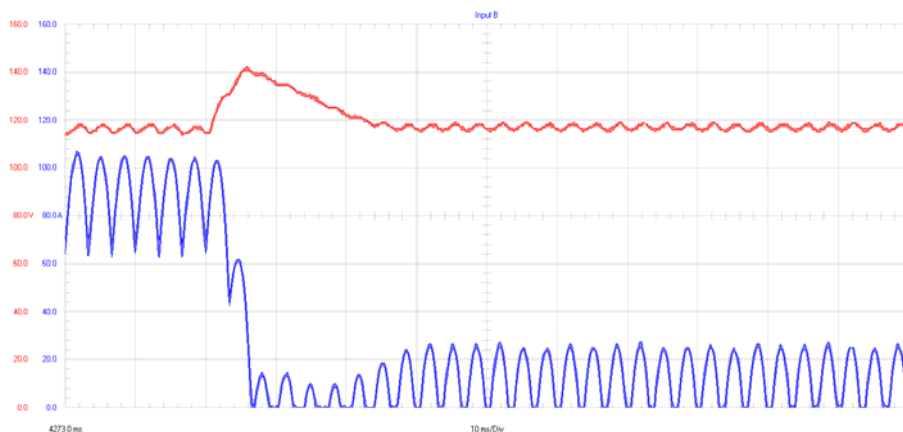


Слика 4. Таласни облици напона (горе, црвено) и струје (доле, плаво) исправљача ДРИ 110-100 током промене струје потрошача са 90 % $I_{ном}$ на 13 % $I_{ном}$ – рад без адаптивног дејства ПИ регулатора напона

Најважнији закључак добијен из анализе геометријског места полова је да су реалне вредности конјуговано-комплексних полова излазног RLC кола веома далеко од пола тиристорског моста [15] (вредности од $-6,3$ до $-40,22$, у односу на -300). Када је однос реалних вредности полова 5-10 или већи [15] (у наведеном случају су односи између 7,5 и 48), полови далеко од имагинарне осе губе значај. Због тога конјуговано-комплексни полови RLC кола представљају доминантне полове, док је пол тиристорског моста мање значајан. Тиме је омогућено да се исправљач ДРИ 110-100 представи моделом редукованог реда, односно да се за

анализу користи модел 2. реда уместо комплетног модела 3. реда. У том случају, преносна функција исправљача може да буде сведена на преносну функцију излазног RLC кола 2. реда. Према томе, коришћење ПИ или ПИД регулатора за регулацију процеса остаје оправдано.

На сликама 4 и 5 приказани су таласни облици напона и струје исправљача ДРИ 110-100 приликом промене струје потрошача са 90 % I_{nom} на 13 % I_{nom} . На слици 4 је приказан одзив ПИ регулатора напона исправљача без адаптивног дејства, док је на слици 5 приказан одзив адаптивног ПИ регулатора. У случају промене струје исправљача са 90 % I_{nom} на 13 % I_{nom} , измерене су следеће вредности приликом одзива обичног ПИ регулатора (слика 4): $V(0) = 115,6 \text{ V}$, $V_{max} = 141,2 \text{ V}$, $\Delta V = +25,6 \text{ V}$, $T_u = 3,4 \text{ ms}$, $T_s = 33 \text{ ms}$. У случају промене струје исправљача са 90 % I_{nom} на 13 % I_{nom} , приликом одзива адаптивног ПИ регулатора измерене су следеће вредности (слика 5): $V(0) = 116,4 \text{ V}$, $V_{max} = 141,6 \text{ V}$, $\Delta V = +25,2 \text{ V}$, $T_u = 3,6 \text{ ms}$, $T_s = 21,8 \text{ ms}$.



Слика 5. Таласни облици напона (горе, црвено) и струје (доле, плаво) исправљача ДРИ 110-100 током промене струје потрошача са 90 % I_{nom} на 13 % I_{nom} – рад са адаптивним дејством ПИ регулатора напона

У случају наглог растеређења исправљача ДРИ 110-100 снимљене су нешто мање разлике у одзивима обичног ПИ регулатора и адаптивног регулатора. Првенствени разлог је потпуна неактивност адаптивног дејства на почетку прелазног процеса, будући да до линеарне промене коефицијента пропорционалног појачања долази тек након пада тренутне вредности струје испод прага од 29 А. Због тога адаптивно дејство не утиче значајно на смањивање прескока регулатора напона (21,6 % са адаптивним регулатором, 22,1 % са обичним ПИ регулатором), али се ипак уочава утицај промене пропорционалног појачања на за трећину краће време смиривања прелазног процеса (адаптивни ПИ регулатор: 21,8 ms; обичан ПИ регулатор: 33 ms). Активирање адаптивног дејства дигиталног регулатора напона није значајно утицало на трајање успона узлазне ивице (односно пада

силазне ивице) сигнала напона током прелазних појава.

5. Закључак

У раду је описано даље унапређење мрежом комутованих фазно регулисаних исправљача заснованих на микроконтролеру "Intel" 80C196KB16. Описана су техничка унапређења спроведена на уређајима са дигиталним регулатором исправљача типа "ДРИ 07Б". На свим исправљачима су уграђени излазни електролитски филтерски кондензатори, уз пратеће компоненте енергетског кола. Уз модификацију енергетског кола било је потребно и усавршавање дигиталних регулатора, додавање нових РСО филтера и унапређивање појединих заштитних функција.

Основно примењено унапређење је увођење адаптивног ПИ регулатора напона са променљивим коефицијентом пропорционалног појачања. Промена коефицијента K_p се врши линеарно у области прекидних струја исправљача, док у области непрекидних струја коефицијент пропорционалног појачања адаптивног ПИ регулатора има константне вредности. Будући да линеарна промена коефицијента пропорционалног појачања важи за тренутне вредности струје исправљача до 29 А (област прекидних струја исправљача), основни задатак адаптивног дејства регулатора је постизање стабилнијег рада исправљача са малим струјама.

Извршено је свођење преносне функције исправљача ДРИ 110-100 са комплетног модела 3. реда на поједностављени модел 2. реда. Разлог је велика разлика појачања пола тиристорског моста (-300) у односу на појачања конјуговано-комплексних полова излазног RLC кола (од -6 до -40, за струје оптерећења од 13 % и 90 % номиналне струје исправљача). За промене струје исправљача у наведеном опсегу израчунате су вредности коефицијената релативног пригушења једнаке $\xi_{13} = 0,0172$ и $\xi_{90} = 0,12$.

Приликом упоређивања одзива обичног ПИ регулатора напона и адаптивног ПИ регулатора на велике промене оптерећења, уочене су предности адаптивног дејства ПИ регулатора. Приликом промене струје исправљача са 13 % на 90 % номиналне вредности дошло је до смањивања подбачаја напона (са -27,3 % на -23,4 %). Уочава се веома велики утицај адаптивног дејства регулатора напона на смањивање пребачаја тренутне вредности струје исправљача приликом промене оптерећења са 13 % на 90 % номиналне вредности. У случају супротне промене оптерећења, са 90 % на 13 % номиналне струје исправљача, дошло је до минорног смањивања пребачаја напона у случају постојања адаптивног дејства регулатора напона (са 22,1 % на 21,6 %). У оба случаја је постојање адаптивног дејства довело до значајног скраћивања

времена смиривања прелазне појаве (за 34 – 42 %).

Захвалница

Рад је настао у оквиру пројекта ТР33020, „Повећање енергетске ефикасности хидроелектрана и термоелектрана Електропривреде Србије развојем технологије и уређаја енергетске електронике за регулацију и аутоматизацију”, који је финансирало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

Литература

- [1] В. Вукић, “Тиристорски исправљач управљан програмабилним логичким контролером са модуларним чоперским излазним степеном”, *Зборник радова, Електротехнички институт „Никола Тесла”*, Књига 19, стр. 85-92, 2008.-2009.
- [2] В. Вукић, Р. Проле и Д. Јевтић, “Ново постројење са тиристорским исправљачима и разводом једносмерне струје за напајање хидроелектране”, *Зборник радова, Електротехнички институт „Никола Тесла”*, Књига 20, стр. 143-156, 2010.
- [3] В. Вукић, “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.
- [4] В. Вукић, “Енергетска ефикасност и дигитална комуникација фазно регулисаних исправљача за индустријске системе непрекидног напајања”, *Пољопривредна техника*, Година XXXVI, бр. 3, стр. 19-28, 2011.
- [5] K. Abdennadher, P. Venet, G. Rojat, J. M. Rétif, and C. Rosset, “A Real-Time Predictive-Maintenance System of Aluminum Electrolytic Capacitors Used in Uninterrupted Power Supplies”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 4, pp. 1644-1652, 2010.
- [6] V. Đ. Vukić, “Upgrade of thyristor rectifiers in a thermal power plant “Nikola Tesla A”,” in *Proc. Conf. Power Plants 2012* (Zlatibor, Serbia, October 30-November 2, 2012), pp. 372-381.
- [7] K. J. Åström and B. Wittenmark, *Adaptive Control*, 2nd ed. Menlo Park, CA: Addison-Wesley, 1995.

- [8] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics – Converters, Applications, and Design*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [9] K. M. Passino and S. Yurkovich, *Fuzzy Control*. Menlo Park, CA: Addison-Wesley-Longman, 1998.
- [10] T. Hägglund and K. J. Åström, "Revisiting the Ziegler-Nichols tuning rules for PI control", *Asian Journal of Control*, vol. 4, no. 4, pp. 364-380, 2002.
- [11] K. J. Åström and T. Hägglund, "The future of PID control", *Control Engineering Practice*, vol. 9, 1163-1175, 2001.
- [12] K. J. Åström and T. Hägglund, *PID Controllers – Theory, Design, and Tuning*, 2nd ed. Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1995.
- [13] K. J. Åström and B. Wittenmark, *Computer-Controlled Systems - Theory and Design*, 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- [14] М. Јанковић, Ђ. Стојић и Ј. Бебић, „Приказ реализације модуларног исправљачког степена СБН-а на бази микроконтролера 80535”, на конф. *VIII симпозијум „Енергетска електроника”*, (Нови Сад, Србија, 27. – 29. септембар 1995), стр. 599 - 606.
- [15] C. L. Philips and R. D. Harbor, *Feedback Control Systems*. New Jersey: Prentice Hall International, 1996.
- [16] М. Матаушек, *Регулација (предавања)*. Београд: Електротехнички факултет Универзитета у Београду, 1997.
- [17] С. Љ. Теших и Д. М. Васиљевић, *Основи електронике*. Београд: Гроскњига, 1995.

Abstract: This article deals with the influence of PI controller linear gain scheduling on the dynamic characteristics of the line-frequency phase-controlled rectifier. The examined device has digital control electronics of the DRI 07B type, based on the Intel 80C196 microcontroller. The realized adaptive PI controllers utilize wide variations of the current gain (K_p), decreasing linearly in proportion to the increase in the rectifier output current in the area of the discontinuous currents. Reaching the threshold of the rectifier's discontinuous current, the current gain of the PI voltage controller remains constant. Beside the improvement of the thyristor rectifier's static stability during operation with small output currents, implementation of the adaptive PI control also led to improvement of the voltage controller response in the case of load disturbance in the range of 13–90 % of the nominal rectifier output current. Transfer functions were analysed for specific parts of the phase-controlled rectifier DRI 110-100 having nominal output parameters of 116 V and 100 A. The values of the relative damping and root-locus characteristics were analysed in detail.

Key words: adaptive control, PI controller, gain scheduling, phase-controlled rectifier, digital controller, microcontroller 80C196, damping ratio, root-locus analysis

Line-Frequency Phase-Controlled Rectifiers with Adaptive Digital Controllers

Рад примљен у уредништво 20.9.2013. године
Рад прихваћен 4.10.2013. године