

## Утицај интерфазних трансформатора и комутационих пригушница на дељење струја тиристорских мостова у осамнаестоимпулсним исправљачима

Владимир Ђ. Вукић<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Електротехнички институт “Никола Тесла”, Универзитет у Београду, Београд,  
Србија

[vladimir.vukic@ieent.org](mailto:vladimir.vukic@ieent.org)

**Кратак садржај:** У раду су представљени симулациони модели помоћу којих је анализиран рад две различите топологије осамнаестоимпулсног исправљача, са три паралелна пуноуправљива трофазна тиристорска моста и интерфазним трансформаторима. Анализиран је утицај распореда интерфазних трансформатора и промене индуктивности комутационих пригушница на дељење струја појединих тиристорских мостова. Испитивани су случајеви рада различитих конфигурација осамнаестоимпулсних исправљача приликом рада са симетричним улазним параметрима, као и у случајевима постојања несиметрије трофазног мрежног напона, прикључних каблова различите дужине и различитог пада напона на тиристорима појединих мостова. На основу резултата симулација одређена је оптимална топологија електричног кола осамнаестоимпулсног исправљача, са три комутационе пригушнице и два улазна интерфазна трансформатора, који би вршили и улогу комутационих реактанси. Применом предложене оптималне топологије омогућило би се смањивање броја комутационих пригушница са девет на три, док би се дисипирана снага најоптерећенијег тиристора у исправљачу смањила за око 11 %. Приликом симулације рада номинално оптерећеног исправљача у свим случајевима измерена је ефективна вредност рипла излазног сигнала мања од једног промила вредности излазног напона и струје.

**Кључне речи:** осамнаестоимпулсни исправљач, паралелни тиристорски мостови, интерфазни трансформатор, комутациона пригушница, дељење струја, рачунарска симулација

## 1. Увод

У савременим индустријским, медицинским и научно-истраживачким постројењима све је више технике која захтева изузетно квалитетно напајање. Обично се са аспекта квалитета електричне енергије посматра утицај виших хармоника, фактора снаге, изобличења струје или пропада напона у трофазним мрежама наизменичне струје [1]. Међутим, и поред наведених захтева везаних за квалитет наизменичне струје, и код потрошача једносмерне струје могу да се појаве захтеви за изузетно квалитетним напајањем. На пример, за напајање суперпроводних магнета треба обезбедити претварач са малим излазним напоном, али са излазном струјом од неколико килоампера [2], као и са изузетно малим риплом излазног напона и струје [2].

За напајање овако захтевних потрошача обично се користе прекидачка напајања, будући да, по правилу, тиристорски претварачи не могу да обезбеде довољно квалитетну струју за ове намене (било због утицаја на фактор снаге и хармонијско изобличење струје трофазне мреже [1],[3], било због постојања значајног рипла једносмерног напона и, поготово, једносмерне струје [4],[5]). Ипак, ако је потребно да се оствари напајање осетљивих потрошача једносмерне струје са килоамперским струјама, али са напонима од неколико стотина или чак неколико хиљада волти, због велике дисипације снаге на статичким прекидачима проблем степена корисног дејства претварача постаје веома значајан. У тим случајевима би употреба тиристорских претварача била потпуно оправдано техничко решење. Због потребе за великим излазним струјама, најбоље решење би била примена вишеимпулсних исправљача са паралелним тиристорским мостовима.

Будући да компензација реактивне снаге, односно подизање фактора снаге потрошача, може једноставно да се спроведе уградњом кондензаторских батерија, тежи проблем који треба решити пре употребе тиристорских исправљача остаје релативно велико хармонијско изобличење струје мреже.

Стандард IEEE 519-1992 ограничава укупно хармонијско изобличење напона на 5 % (односно 3 % за медицинску и ваздухопловну технику) [6]. Поменути стандард ограничава и максималне вредности свих виших хармоника струје на највише 3 % вредности првог хармоника, док је укупно хармонијско изобличење струје ограничено на 5 % [6]. Важан податак, наведен у литератури, јесте да осамнаестоимпулсни тиристорски исправљачи могу да раде са укупним хармонијским изобличењем струје мреже од само 2 - 3 % [6].

Процењено је да би осамнаестоимпулсни исправљач могао да буде успешно примењен за напајање потрошача велике снаге код којих се захтева рад са малим вредностима рипла једносмерног напона и струје, уз ниско хармонијско изобличење струје мреже. У раду су приказани резултати рачунарских симулација у програму PSIM<sup>®</sup> [7], спроведеним на

две топологије електричног кола осамнаестоимпулсног тиристорског исправљача. Анализиран је рад мрежом комутованог осамнаестоимпулсног исправљача, у конфигурацији са три паралелна пуноуправљива тиристорска моста, улазним комутационим пригушницама и интерфазним трансформаторима. На основу добијених резултата анализиран је утицај појединих елемената енергетског кола исправљача на уједначавање излазних струја паралелних тиристорских мостова.

## 2. Тренутно стање технике и уочени недостаци

Тиристорски исправљачи великих снага (и до неколико стотина MVA [8],[9]) првенствено су ограничени максималним вредностима струја уграђених четворослојних полупроводничких прекидача. Уколико је потребно да се постигне рад претварача са изузетно великим једносмерним струјама, потребно је да се паралелно прикључи више тиристорских мостова. Међутим, приликом рада исправљача са два или више паралелних пуноуправљивих тиристорских мостова може да дође до неуравнотеженог оптерећивања мостова, због чега би једни мостови били слабо оптерећени, док би други тиристорски мостови били преоптерећени. У том случају, са укупном струјом паралелног тиристорског претварача нижом од номиналне, може да дође до оптерећивања једног моста струјом већом од номиналне, што би довело до прегоривања заштитних осигурача или, чак, отказа самих тиристора.

Уобичајени поступци везани за уједначавање струја више паралелних тиристорских мостова везани су за уградњу интерфазних трансформатора [10], уједначавање углова паљења тиристора [10],[11], упаривање тиристора (приближно истих карактеристика) у мосту [12] итд. Уградња индуктивних елемената представља најједноставније решење, али, често, због велике масе и високе цене материјала, ово решење може да буде скупо и непрактично. Са друге стране, примена превише комплексних управљачких алгоритама, заснованих на изузетно прецизним мерењима бројних величина, драстично подиже сложеност целог система аутоматског управљања, што неминовно обара његову поузданост.

Да би се уравнотежиле струје паралелних тиристорских мостова, првенствено се користе топологије кола са излазним интерфазним трансформатором [10],[13] (често се користи и назив интерфазна пригушница [6]). Интерфазни трансформатор треба да уједначи струје на излазима тиристорских мостова на тај начин што се међусобно потиру разлике у тренутним вредностима наизменичног напона на излазима мостова [10]. Ако су средње вредности напона тиристорских мостова исте, интерфазни трансформатор посредно врши и успешно уједначавање излазних струја мостова [10]. Међутим, ако се средње вредности напона два паралелна тиристорска моста разликују, долази

до засићења интерфазног трансформатора [10]. Поменуто засићење, на крају, доводи до дисконтинуалног рада исправљача на тај начин што сваки од мостова проводи струју само током једне шестине периоде напона мреже, када на себе преузима пуну струју оптерећења [10]. Овај проблем може да се појави ако на два паралелна моста дванаестоимпулсног исправљача углови паљења тиристора нису једнаки [10].

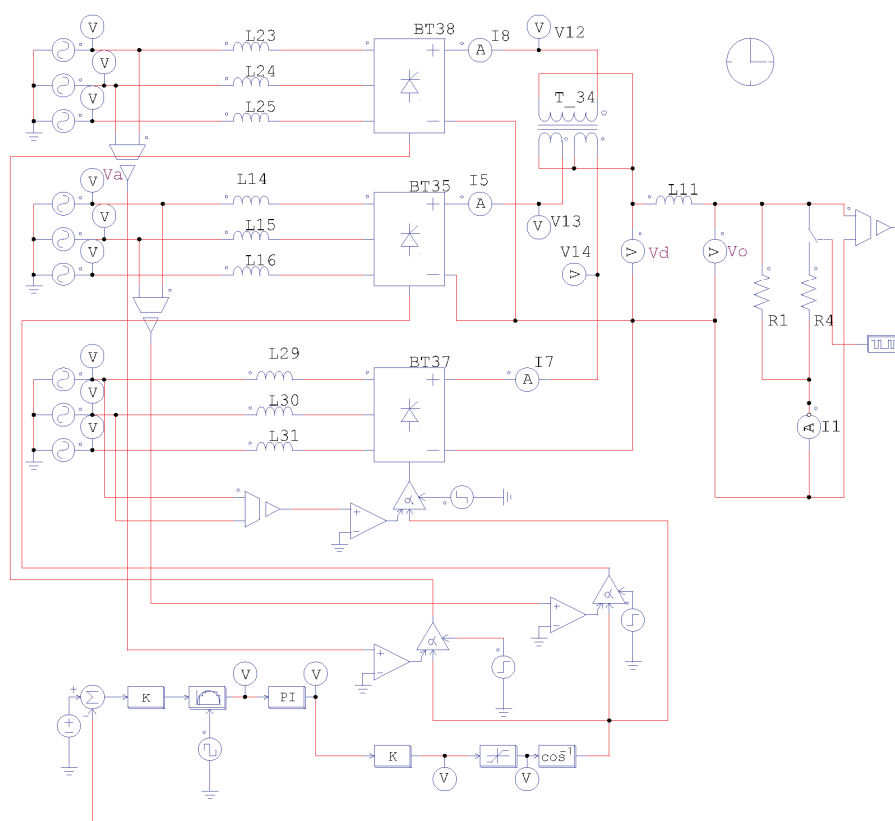
У литератури су наведени примери када су постојећи проблеми са неједнаким угловима паљења тиристора решавани применом негативне повратне спреге у систему аутоматског управљања [11] или развојем аналитичких модела за предикцију дебаланса струја појединих тиристорских мостова [10]. У последњем случају посебно је значајно што је у обзир узет и утицај комутационих индуктивности [10] на улазној страни тиристорских мостова. Комутационе пригушнице врше ограничавање струје приликом комутација у тиристорском мосту [1], односно смањују пропаде наизменичног напона (*енг. "notches"*) приликом преузимања струје између тиристора [6].

Узимајући у обзир, са једне стране, потребе за претварачима великих једносмерних струја (нуклеарна и медицинска техника [2], плазматронска постројења [8],[9],[14], електромоторни погони [15], системи непрекидног напајања [16], хемијска индустрија [12], металуршка постројења [8],[9]), и, са друге стране, све строже прописе везане за квалитет електричне енергије [1], све више се употребљавају вишеимпулсни исправљачи (најчешће дванаестоимпулсни [1],[6],[13],[14]). Ипак, као посебно интересантно решење за примену у наведеним постројењима истиче се осамнаестоимпулсни тиристорски исправљач. Поменути исправљач се, по правилу, састоји од три паралелно прикључена пуноуправљива тиристорска моста, трофазног трансформатора са три секундара (међусобно померених за по  $20^\circ$ ) и интерфазног тронамотајног трансформатора са идентичним бројем навојака на примару, секундару и терцијару [6]. Описани осамнаестоимпулсни исправљач у себи обједињује поуздану и добро познату технологију тиристорских исправљачких мостова, са једне стране, и изузетно низак степен изобличења улазне струје, са друге стране.

Да би се у потпуности сагледале све предности и недостаци описаног решења, спроведена је анализа могућности примене осамнаестоимпулсних топологија исправљача са постојећим дигиталним регулаторима исправљача серије "ДРИ 07" [4],[5]. Развијен је симулациони модел исправљача ДРИ 110-1500 у коме је проучен утицај комутационих пригушница, као и улазних и излазних интерфазних трансформатора на карактеристике осамнаестоимпулсног тиристорског исправљача.

### 3. Симулациони модели мрежом комутованих осамнаестоимпульсних исправљача са паралелним тиристорским мостовима

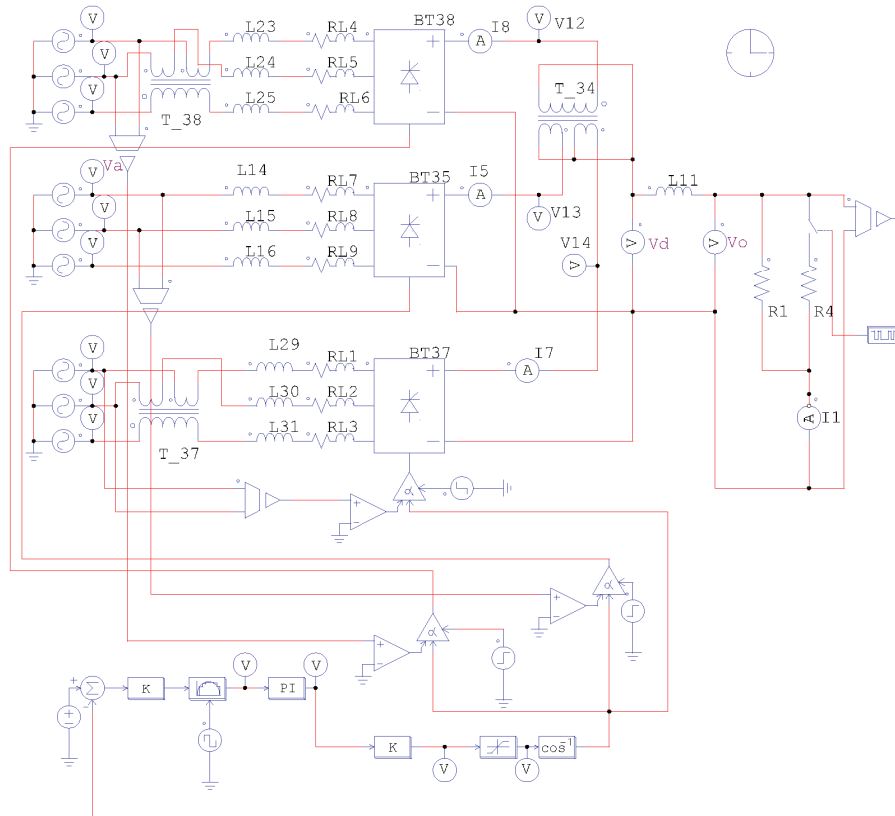
На сликама 1 и 2 приказани су симулациони модели који су коришћени за анализу рада осамнаестоимпульсних тиристорских исправљача.



Слика 1. Симулациони модел осамнаестоимпульсног тиристорског исправљача ДРИ 110-1500 са једним излазним (T\_34) интерфазним трансформатором (номинални излазни параметри исправљача су 122,6 V и 1500 A) и симетричним улазним параметрима

Анализирани су модели осамнаестоимпульсног тиристорског исправљача са различитим везама интерфазних трансформатора (ИФТ), у варијантама са симетричним и несиметричним улазним параметрима. Основни модел има само излазни интерфазни трансформатор (слика 1), док следећи модел има, поред излазног, и два улазна ИФТ (слика 2), који служе за уједначавање струја два фазно померена тиристорска моста.

Наведена два модела засновани су на електричним шемама наведеним у литератури [6].



Слика 2. Симулациони модел осамнаестоимпулсног тиристорског исправљача ДРИ 110-1500 са два улазна ( $T_{37}$  и  $T_{38}$ ) и једним излазним ( $T_{34}$ ) интерфазним трансформатором (номинални излазни параметри исправљача су 122,6 V и 1500 A), са несиметричним улазним параметрима

На слици 1 приказан је једноставнији модел, без несиметричних напона напајања, додатних улазних RL чланова (симулација постојања реалних прикључних каблова), као и са истим падовима напона на тиристорским мостовима. Линијски наизменични напони и падови напона на тиристорским мостовима се задају директно у одговарајућим симулационим елементима, док се додатни резистивно-индуктивни чланови (RL1-RL9; слика 2) посебно уносе на симулационој шеми. Према томе, за симулацију рада осамнаестоимпулсног исправљача са симетричним улазним параметрима (резултати у табелама 2 и 4) коришћен је модел са слике 1, као и поједностављени модел са слике 2 (без елемената RL1-RL9). Са друге стране, за симулацију рада осамнаестоимпулсног исправљача са несиметричним улазним

параметрима (резултати у табелама 3 и 5) коришћен је проширени модел са слике 1 (са додатним члановима RL1-RL9), као и модел са слике 2.

У основној верзији (слика 1), осамнаестоимпулсни исправљач има три паралелна тиристорска моста, напојена са три извора трофазног наизменичног напона, фазно померених у односу на напон мреже за  $-20^\circ$ ,  $0^\circ$  и  $+20^\circ$ . Да би се обезбедило фазно померање напона тиристорских мостова, треба применити трофазни трансформатор са три секундара, који су фазно померени за по  $20^\circ$  (специјална спрега троугао-полигон-троугао-полигон - Dpdp [6]). Будући да симулациони модел оваквог трансформатора не може да се изабере у програму PSIM<sup>®</sup> [7], коришћена су три независна трофазна напонска извора 120 V, 50 Hz, са одговарајућим временским померајима свих фаза (имитација три секундара трофазног мрежног трансформатора). Сваки тиристорски мост се напаја преко три комутационе пригушнице. На излазу осамнаестоимпулсног претварача, пре резистивног оптерећења, налази се пригушница  $L_{11}$ , индуктивности 10  $\mu\text{H}$ .

Унапређена верзија осамнаестоимпулсног исправљача (слика 2), поред основне топологије, садржи и два улазна ИФТ за уједначавање струја тиристорских мостова. Улазни ИФТ, исто као и у случају излазног ИФТ, представљају монофазне тронамотајне трансформаторе, а пропорција броја њихових намотаја је 1:1:1.

Будући да су трофазни извори за напајања тиристорских мостова фазно померени за по  $20^\circ$ , сваки тиристорски мост има независан генератор упаљачких импулса, са синхронизационим напоном доведеним са одговарајућег трофазног извора. На улазу јединствене регулационе структуре (улазни и излазни степени за прилагођавање сигнала и регулатор) налази се "sample-and-hold" коло, са периодом одабирања  $\Delta t = 0,556 \text{ ms}$  (односно  $f_s = 1800 \text{ Hz}$ ; према Шеноновој теореме одабирања [17] - двоструко је већа фреквенција одабирања од карактеристичне фреквенције сигнала (900 Hz за фазно померени осамнаестоимпулсни исправљач)). Слабљењем сигнала напона резистивног потрошача са 153,5 V на 5 V извршено је превођење укупног опсега мерења напона на опсег напона коришћеног A/D конвертора. Следи ПИ регулатор напона са следећим параметрима:  $K_p = 0,125$ ,  $T_i = 37,5 \text{ ms}$ . На излазу регулационе структуре према тиристорским мостовима налази се блок функције arccos, којим се симулира деловање постојеће табеле arccos на линеаризацију објекта управљања. Фазно померени импулси се са блока arccos одводе на три генератора импулса, који управљају радом сваког појединачног пуноуправљивог тиристорског моста.

Да би било могуће испитивање рада исправљача и у стационарном стању, и у прелазним режимима, направљена је временска функција са променљивим резистивним оптерећењем. Основни временски интервал рачунарске симулације је подешен на 3  $\mu\text{s}$ , а укупно трајање симулације

на 3,8 s. Временски променљиво резистивно оптерећење подешено је тако да је један отпорник стално прикључен на излаз осамнаестоимпулсног исправљача, док се други, паралелни отпорник, укључује након 2 s од почетка симулације, да би поново био искључен након 3,5 s. Овако су симулиране промене номиналног оптерећења у широком опсегу, између 10 % и 100 % номиналне струје. Коришћене су следеће вредности излазних отпорника:  $R_1 = 0,8173 \Omega$ ,  $R_4 = 0,091 \Omega$ .

Наведена регулациона структура преузета је са исправљача ДРИ 110-500 (инсталисане привидне снаге 90 kVA, номиналног излазног напона 110 V и струје 500 A) [3],[5]. Четири оваква уређаја су произведена у Електротехничком институту “Никола Тесла” и испоручена термоелектрани “Никола Тесла А” у Обреновцу [5]. На оригиналним исправљачима ДРИ 110-500 су коришћени пуноуправљиви тиристорски мостови са форсираним ваздушним хлађењем (тип “Semikron” B6C 250/335-550F; номинална излазна једносмерна струја је 550 A), са тиристорима “Semikron” SKT 250 (номинална струја 250 A [18]).

Основна идеја представљеног рада је анализа могућности примене постојећих техничких решења тиристорских исправљача, али за експлоатацију са знатно већим струјама и нестандартним потрошачима. У наведеном случају, паралелисањем три тиристорска моста за номиналну струју од 500 A, лако би остварили рад са укупном струјом од 1500 A. Наравно, узимајући у обзир данашње стање технике, лако је пронаћи тиристоре који би у само једном пуноуправљивом мосту давали укупну струју од 1500 A, па није неопходно ослањати се на поменуте статичке прекидаче “Semikron” SKT 250. Међутим, према подацима произвођача “Semikron”, тиристори серије SKT се не праве за номиналне струје веће од 2400 A [18]. То може да буде веома значајно због могућности коришћења већ развијене управљачке електронике (типа “ДРИ 07” [3]-[5] за исправљаче ДРИ 110-500), будући да би главна препрека за коришћење снажнијих тиристора били упаљачи тиристора, пројектовани за рад са слабијим импулсима (струје гејта у опсегу 200 – 700 mA [18]) и минималним импулсним трансформаторима (значајна предност “Semikron”-ове серије SKT је да истим импулсима, амплитуде од само неколико стотина милиампера, могу поуздано да се укључују тиристори чије су номиналне струје од неколико десетина ампера па све до 2400 A [18]). Према томе, већ би рад исправљача са једносмерним струјама већим од 2500 - 3000 A представљао случај када је неопходно паралелисање већег броја тиристорских мостова.

### **3.1. Симулација несиметричног оптерећења осамнаестоимпулсног исправљача**

Несиметрија улазних параметара је симулирана додавањем RL чланова којима су моделоване улазне кабловске везе различите дужине



(у симулационом моделу су унете вредности од 10 до 24 метра). Моделоване су кабловске везе пресека  $2.95 \text{ mm}^2$  (укупно  $190 \text{ mm}^2$ ; постојеће везе од секундара трофазног изолационог трансформатора ка тиристорском мосту на поменутих исправљачима ДРИ 110-500), различитих дужина на свим фазама мрежног напајања и на свим тиристорским мостовима. Дужине моделованих кабловских веза осамнаестоимпулсног исправљача приказаног на слици 2, као и њихове укупне индуктивности и отпорности, приказане се у табели 1. Моделован је реалан случај, када се све дужине кабловских веза истог пресека разликују, и имају релативно мале варијације на истом мосту (један до два метра), а знатно веће између различитих мостова (пет до шест метара). Усвојене су вредности подужне отпорности од  $r' = 91 \mu\Omega/\text{m}$  и  $l' = 0,255 \mu\text{H}/\text{m}$ , за фреквенцију струје од 50 Hz [19]. Вредности отпорности и индуктивности каблова су рачунате са стандардним вредностима за једножилне PVC каблове од бакра, типа PP00, пресека  $185 \text{ mm}^2$  (приближно исто као  $2.95 \text{ mm}^2$ ).

Табела 1. Карактеристике прикључних каблова симулационог модела осамнаестоимпулсног исправљача

Ознака кабловске везе	Ознака тиристорског моста	Дужина кабловске везе [m]	Отпорност кабловске везе [mΩ]	Индуктивност кабловске везе [μH]
RL1	BT37	15	4,05	3,75
RL2	BT37	16,5	4,5	4,2
RL3	BT37	18	4,95	4,5
RL4	BT38	20	5,4	5
RL5	BT38	22	6	5,6
RL6	BT38	24	6,6	6
RL7	BT35	10	2,7	2,5
RL8	BT35	11	3	2,8
RL9	BT35	12	3,3	3

Рад исправљача са несиметричним напоном мреже (одступања  $\pm 5\%$ ) симулиран је посебним задавањем одговарајућих линијских напона код сваке групе извора константног наизменичног напона (по фазама: 114 V, 120 V и 126 V).

На крају, за симулацију реалног несиметричног оптерећења коришћене су и различите вредности падова напона на тиристорима појединих мостова. Задавана су одступања у опсегу од  $\pm 5\%$  номиналне вредности напона прага провођења тиристора:  $\Delta V_{38} = 1,05 \text{ V}$  (тиристорски мост BT38),  $\Delta V_{35} = 1 \text{ V}$  (BT35) и  $\Delta V_{37} = 0,95 \text{ V}$  (BT37).

Наведене несавршености нису мале, али могу да се појаве у реалним погонским условима енергетских претварача велике снаге.

#### 4. Резултати симулација и дискусија

У симулационом програму PSIM® [7] испитиване су статичке и динамичке карактеристике осамнаестоимпулсног тиристорског исправљача са различитим конфигурацијама енергетског кола. Испитиване су две топологије енергетског кола исправљача, са једним ИФТ на излазу (слика 1), односно са два улазна ИФТ за уједначавање струја и једним излазним трансформатором (слика 2). Симулирани су таласни облици наведених струја осамнаестоимпулсног исправљача приликом промене струје резистивног оптерећења са 150 А на 1500 А (односно са 10% на 100% номиналног оптерећења претварача). У табелама 2 - 5 наведени су подаци о ефективним ( $I_{rms}$ ) и средњим ( $I_{avg}$ ) вредностима струја комплетног осамнаестоимпулсног исправљача ( $I_1$ ), као и струје на излазима појединих пуноуправљивих тиристорских мостова ( $I_5$ ,  $I_7$  и  $I_8$ ). Ефективне и средње вредности струја су записиване у периоду од око 1,4 секунде након почетка прелазне појаве (односно 3,4 секунде након почетка симулације, приликом смиривања прелазне појаве након промене струје исправљача са 150 А на 1500 А – видети слике 3 и 4).

Ако се претпостави да се цео осамнаестоимпулсни исправљач напаја са једног трофазног трансформатора са три секундара, преносног односа  $3 \times 400 / 3 \times 120$  V/V и укупне привидне снаге 270 kVA (што би представљало практичну реализацију симулираног исправљача), вредност базне импедансе (са примарне стране) била би  $Z_b' = 0,592 \Omega$ , односно (сведено на секундарну страну)  $Z_b'' = 0,0536 \Omega$ . Ако се усвоји реална претпоставка да расипне реактансе интерфазног трансформатора треба да имају вредности у опсегу 5 – 6 % базне импедансе, добија се оптимална вредност расипне индуктивности инетрфазног трансформатора  $L_\sigma = 10 \mu\text{H}$  (5,9 %  $Z_b''$ ). Реактанса магнећења треба да има вредност око 5000 – 10000 %  $Z_b''$ , односно да струја магнећења буде између 1 % и 2 % номиналне струје трансформатора. Према томе, као оптимална вредност индуктивности магнећења може да се усвоји вредност  $L_\mu = 10 \text{ mH}$  (5900 %  $Z_b''$ ).

Да би установили утицај самих ИФТ на дељење струја мостова, а не параметара самих трансформатора (првенствено расипне индуктивности и индуктивности магнећења), сви ИФТ (и улазни, и излазни) имали су једнаке индуктивности и отпорности намотаја, као и исте индуктивности ( $L_\sigma' = L_\sigma'' = L_\sigma''' = 10 \mu\text{H}$  (расипне индуктивности намотаја),  $L_\mu = 10 \text{ mH}$  (индуктивност магнећења),  $R_\square = R_\square = R_\square = 1 \text{ m}\Omega$  (отпорности намотаја)). Наведене индуктивности расипања ИФТ дају реактансе расипања од око 5,9 % базне импедансе, а реактансе магнећења од око

5900 %  $Z_b$ , што је на нивоу параметара стандардних енергетских трансформатора. Приликом свих спроведених симулација задати су и следећи параметри излазног интерфазног трансформатора (T\_34):  $m = 160/160/160$  V/V/V (преносни однос трансформатора),  $I' = I'' = I''' = 500$  A (номиналне струје намотаја).

Табела 2. Резултати симулације на основном моделу осамнаестоимпулсног исправљача (слика 1) без несиметричних улазних параметара ( $I_{rms}$  - ефективна вредност струје,  $I_{avg}$  - средња вредност струје)

Осамнаестоимпулсни исправљач са једним излазним ИФТ, са девет комутационих пригушница (слика 1)								
Индуктивност комутационих пригушница	Укупна струја исправљача		Струја тиристорског моста					
	$I_1$ [A]	$I_5$ [A]	$I_7$ [A]	$I_8$ [A]				
$L_{14} - L_{31}$ [ $\mu$ H]	$I_{1rms}$	$I_{1avg}$	$I_{5rms}$	$I_{5avg}$	$I_{7rms}$	$I_{7avg}$	$I_{8rms}$	$I_{8avg}$
6	1493,8	1493,8	314,2	179,7	735,9	441,6	1085,8	872,5
30	1494,7	1494,7	242,8	184,2	771,6	562,3	937,3	748,3
68	1479	1479	418,5	383,9	696,9	593,3	623,5	501,8
82	1467,9	1467,9	430,7	402,1	681,4	602,1	560,6	463,6

Табела 3. Резултати симулације на основном моделу осамнаестоимпулсног исправљача (слика 2, али без ИФТ T\_37 и T\_38) са несиметричним улазним параметрима ( $I_{rms}$  - ефективна вредност струје,  $I_{avg}$  - средња вредност струје)

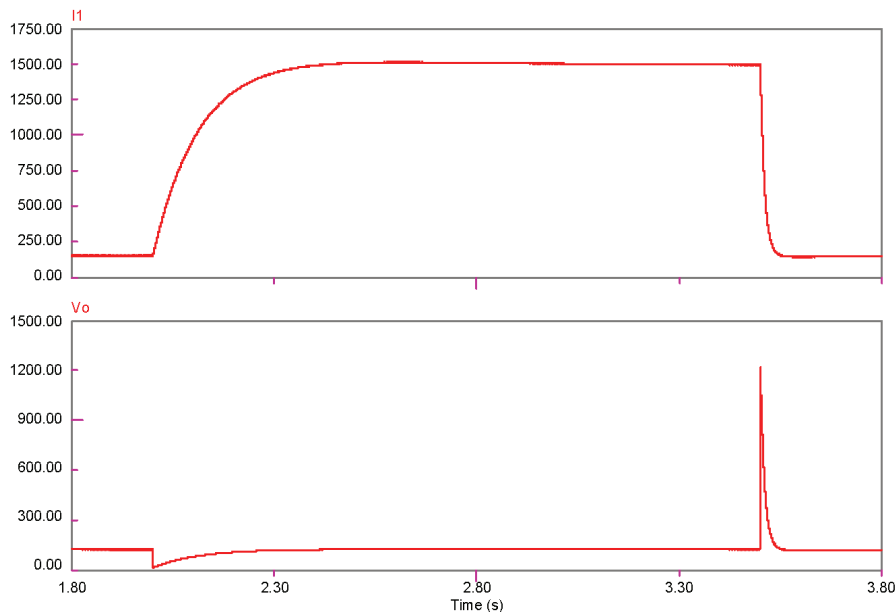
Осамнаестоимпулсни исправљач са једним излазним ИФТ, са девет комутационих пригушница (слика 2, али без ИФТ T_37 и T_38)								
Индуктивност комутационих пригушница	Укупна струја исправљача		Струја тиристорског моста					
	$I_1$ [A]	$I_5$ [A]	$I_7$ [A]	$I_8$ [A]				
$L_{14} - L_{31}$ [ $\mu$ H]	$I_{1rms}$	$I_{1avg}$	$I_{5rms}$	$I_{5avg}$	$I_{7rms}$	$I_{7avg}$	$I_{8rms}$	$I_{8avg}$
6	1495,8	1495,8	358,9	242,1	694	416	1026,7	837,6
30	1487	1487	371	315,4	705,8	525,2	804,7	646,3
68	1469,3	1469,3	449,5	418,6	690,4	596,4	561,4	455,6
82	1464,5	1464,5	473,9	452,9	666,2	594	505,6	417,6

Индуктивности комутационих пригушница ( $L_{14} - L_{16}$ ,  $L_{23} - L_{25}$ ,  $L_{29} - L_{31}$ ) мењане су у опсегу од минималне вредности ( $L_S = 6$   $\mu$ H), па до екстремно велике индуктивности од 82  $\mu$ H. Минимална вредност од 6  $\mu$ H прорачуната је на основу препоруке за комутациону реактансу осамнаестоимпулсног исправљача од 3,5 % базне реактансе, са стране

напајања номиналних параметара 3x120 V, 50 Hz [6]. Ова индуктивност се разликује од минималне вредности од 5 %, дефинисане за трофазне пуноуправљиве тиристорске исправљаче [20]). Комутациона индуктивност ( $L_s$ ) израчуната је за максималну струју пригушнице ( $I_a$ ) од 433 A и линијски напон напајања ( $V_{LL}$ ) од 120 V, 50 Hz [6],[20]:

$$\omega L_s I_a \geq \frac{0,035 \cdot V_{LL}}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

Резултати симулације су показали да, и у случају рада са идеалним улазним параметрима, и у случају рада са несиметричним улазним параметрима (одступања појединих фаза мрежног напона од номиналне вредности у опсегу  $\pm 5$  %, неједнаки напојни каблови, различити падови напона на тиристорима појединих мостова), препоручене минималне вредности комутационих реактанси нису биле довољне за уравнотежен рад мостова осамнаестоимпулсног исправљача у основној конфигурацији (слика 1), без улазних ИФТ (видети табелу 2, као и слике 5 - 8).

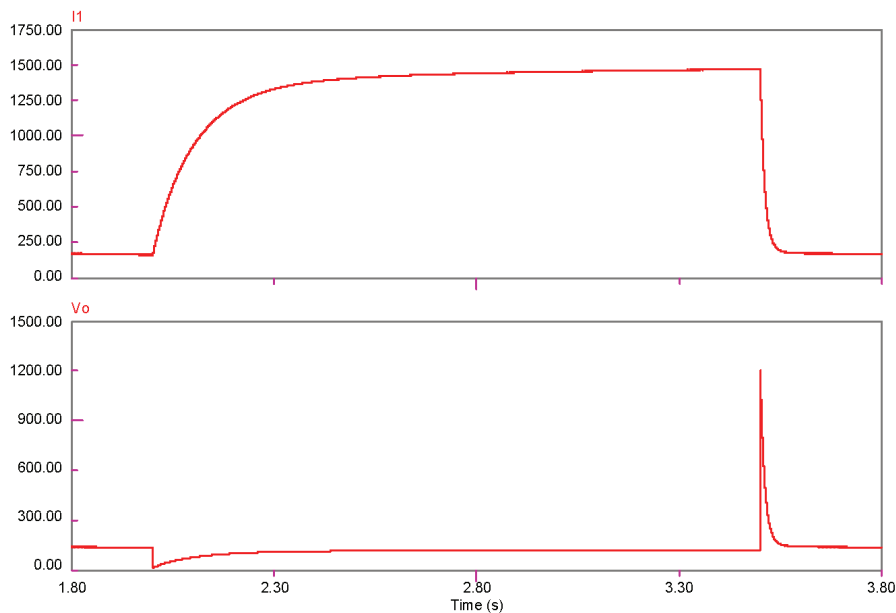


Слика 3. Таласни облици укупне струје осамнаестоимпулсног исправљача  $I_1$  (горе) и напона на излазу исправљача (доле) приликом симулације промене струје потрошача са 10 %  $I_{nom}$  на 100 %  $I_{nom}$  и обрнуто ( $L_{14} - L_{31} = 30 \mu\text{H}$ ;  $L_{11} = 10 \mu\text{H}$ ; без улазних ИФТ)

Чак и у случају када су биле задате вредности комутационих пригушница  $L_{14} - L_{31}$  од 30  $\mu\text{H}$ , добијане су неприхватљиво велике струје појединих мостова ( $I_7$  и  $I_8$ ), које би неминовно довеле до

преоптерећивања мостова VT37 и VT38 приликом рада основне топологије осамнаестоимпулсног исправљача (слика 1) са номиналном струјом од 1500 A (табеле 2 и 3). Тек приликом рада са изузетно великом комутационим индуктивностима од 68  $\mu\text{H}$  остварено је прихватљиво дељење струја појединих мостова, које не би довело до отказа неког тиристорског моста.

Процена оптерећености појединих тиристорских мостова не може да се изведе једноставно, само на основу наведених ефективних или средњих вредности струје на излазу мостова у појединим режимима рада. На први поглед, посматрајући податке у трећем реду табеле 2, чини се да је у случају рада основне топологије осамнаестоимпулсног исправљача (слика 1), са комутационим пригушницама од 68  $\mu\text{H}$  и са номиналним оптерећењем од око 1500 A, тиристорски мост VT37 преоптерећен (симулацијом су добијене ефективна вредност струје  $I_{rms} = 696,9$  A и средња вредност струје  $I_{avg} = 593,3$  A). Међутим, иако је мост VT37 декларисан за излазну једносмерну струју од 550 A, закључак о преоптерећености моста био би погрешан. У даљем тексту следи прорачун оптерећења тиристора.



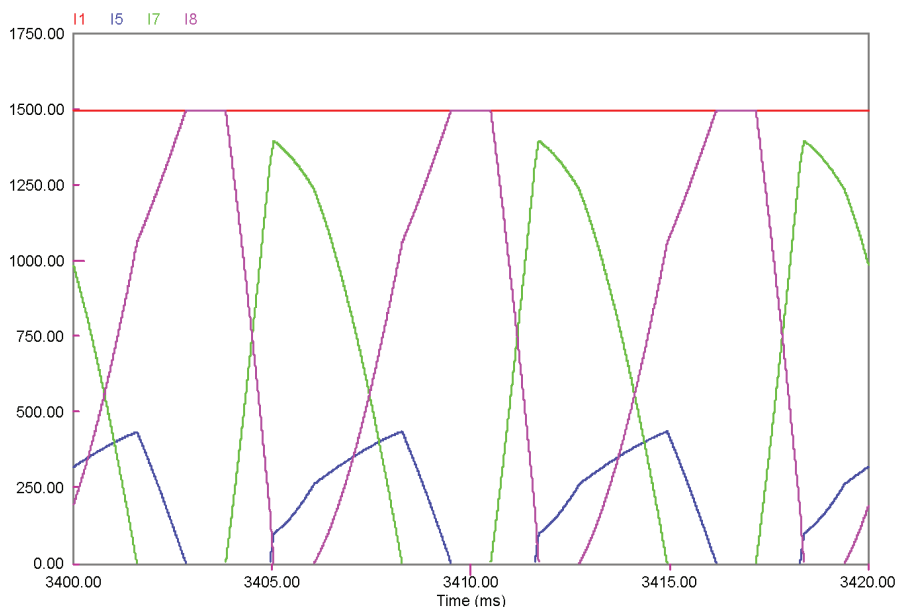
Слика 4. Таласни облици укупне струје осамнаестоимпулсног исправљача  $I_1$  (горе) и напона на излазу исправљача (доле) приликом симулације промене струје потрошача са 10 %  $I_{ном}$  на 100 %  $I_{ном}$  и обрнуто ( $L_{14} - L_{31} = 82 \mu\text{H}$ ;  $L_{11} = 10 \mu\text{H}$ ; без улазних ИФТ)

Приликом прорачуна оптерећења тиристорског моста, из симулационог модела морају да се узму подаци о најоптерећенијем

тиристору, па се на основу њих изводи закључак о стању целог тиристорског моста. У прорачуну морају да се користе и ефективна ( $I_{rms}$ ), и средња ( $I_{avg}$ ) вредност струје најоптерећенијег тиристора. Дисипација на хладњаку тиристора се рачуна према формули [18]:

$$P_{yth} = r_T \cdot I_{rms}^2 + V_{T0} \cdot I_{avg} \quad (2)$$

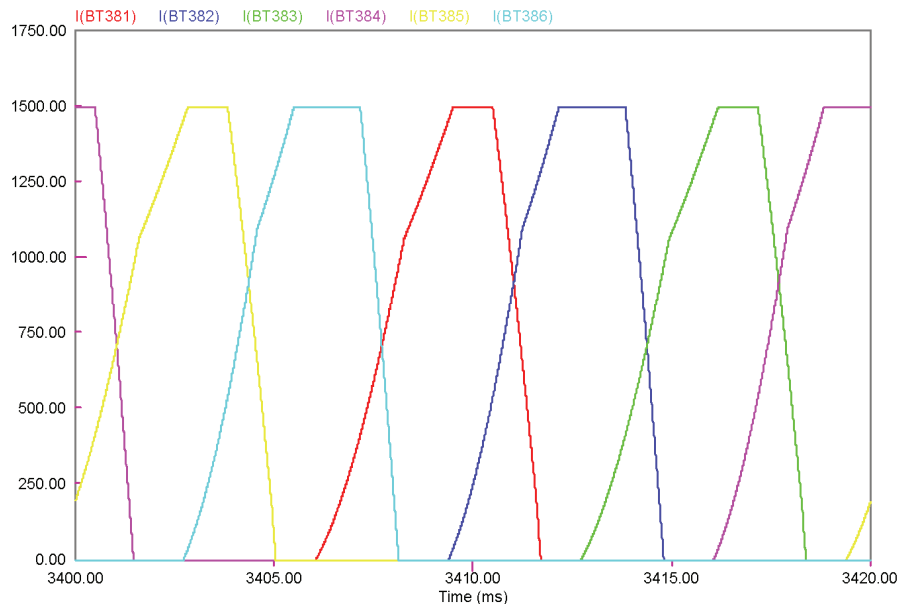
где ознаке имају следеће значење:  $P_{yth}$  – средња вредност максимално дозвољене трајне дисипације снаге тиристора,  $r_T$  – динамичка отпорност вођења тиристора у режиму директне поларизације,  $V_{T0}$  – напон прага вођења тиристора. Вредности  $r_T$  и  $V_{T0}$  произвођач даје у свом каталогу за сваки тиристор (за модел “Semikron” SKT 250, за температуру споја полупроводника од  $130^\circ\text{C}$ , вредности су:  $r_T = 0,7 \text{ m}\Omega$  и  $V_{T0} = 1 \text{ V}$  [18]).



Слика 5. Таласни облици укупне струје осамнаестоимпулсног исправљача  $I_1$  (црвено) и струја појединачних мостова ( $I_5$  (плаво - тиристорски мост ВТ35),  $I_7$  (зелено - ВТ37) и  $I_8$  (љубичасто - ВТ38)) приликом рада претварача са номиналном струјом потрошача и симетричним улазним параметрима ( $L_{14} - L_{31} = 30 \mu\text{H}$ ;  $L_{11} = 10 \mu\text{H}$ ; без улазних ИФТ)

Добијена вредност дисипације се, на крају, упоређује са максималном дозвољеном дисипацијом за одређени тип хладњака. На тиристорским мостовима “Semikron” В6С 250/335-550F коришћен је хладњак типа Р3/150, са форсираним ваздушним хлађењем, чија је термичка отпорност спој – амбијент једнака  $R_{th(j-a)} = 0,2 \text{ K/W}$ . За максималну дозвољену температуру амбијента исправљача од  $\Theta_a = 50^\circ\text{C}$ , са дијаграма се очитава максимална дозвољена вредност дисипације тиристора SKT 250 од  $400 \text{ W}$  [18].

Забележене су ефективна и средња вредност најоптерећенијих тиристора у најоптерећенијем мосту осамнаестоимпулсног исправљача. У случају рада са комутационим пригушницама од  $30 \mu\text{H}$ , најоптерећенији је био мост ВТ38 (табела 2, 2. ред), а струје тиристора  $T_2$ ,  $T_4$  и  $T_6$  су у овом мосту биле једнаке:  $I_{T384rms} = 575,6 \text{ A}$  и  $I_{T384avg} = 264,6 \text{ A}$ . За наведене вредности струја, из формуле (2) се добија дисипација тиристора  $T_4$  једнака  $P_{yth384} = 496,3 \text{ W}$ . Ова вредност далеко превазилази дозвољених  $400 \text{ W}$ , па закључујемо да би рад основне топологије осамнаестоимпулсног исправљача са комутационим пригушницама једнаким или мањим од  $30 \mu\text{H}$  била немогућа са тиристорским мостом "Semikron" В6С 250/335-550F, односно тиристором SKT 250.



Слика 6. Таласни облици струје појединих тиристора моста ВТ38 – уз резултате са слике 5 ( $I(BT381)$  (црвено – струја тиристора  $T_1$  у мосту ВТ38),  $I(BT382)$  (тамноплаво – струја тиристора  $T_2$ ),  $I(BT383)$  (зелено – струја тиристора  $T_3$ ,  $I(BT384)$  (љубичасто – струја тиристора  $T_4$ ),  $I(BT385)$  (жуто – струја тиристора  $T_5$ ) и  $I(BT386)$  (светлоплаво – струја тиристора  $T_6$  у мосту ВТ38)) приликом рада претварача са номиналном струјом потрошача и симетр. улазним параметрима ( $L_{14} - L_{31} = 30 \mu\text{H}$ ;  $L_{11} = 10 \mu\text{H}$ ; без улаз. ИФТ)

У случају рада са комутационим пригушницама од  $68 \mu\text{H}$  (табела 2, 3. ред), најоптерећенији је био мост ВТ37. Струје тиристора  $T_2$ ,  $T_4$  и  $T_6$  су у овом мосту биле:  $I_{T374rms} = 405,7 \text{ A}$  и  $I_{T374avg} = 195,3 \text{ A}$ . За наведене вредности струја, из формуле (2) се добија дисипација тиристора  $T_4$  једнака  $P_{yth384} = 310,5 \text{ W}$ . Према томе, дисипација најоптерећенијег тиристора у најоптерећенијем мосту је далеко испод дозвољених  $400 \text{ W}$ ,

па закључујемо да са комутационим пригушницама од 68  $\mu\text{H}$  осамнаестоимпулсни исправљач без проблема може да ради при температурама амбијента до  $\Theta_a = 50^\circ\text{C}$ .

Одговарајући прорачун оптерећења је извршен за све симулиране случајеве рада осамнаестоимпулсних исправљача. У складу са добијеним резултатима, ако добијени резултати указују на преоптерећење, сва поља у табелама су, за одговарајуће режиме рада, обојена црвеном бојом. Ако је боја редова у табелама зелена, то значи да у описаним режимима рада сви паралелни тиристорски мостови раде без преоптерећења.

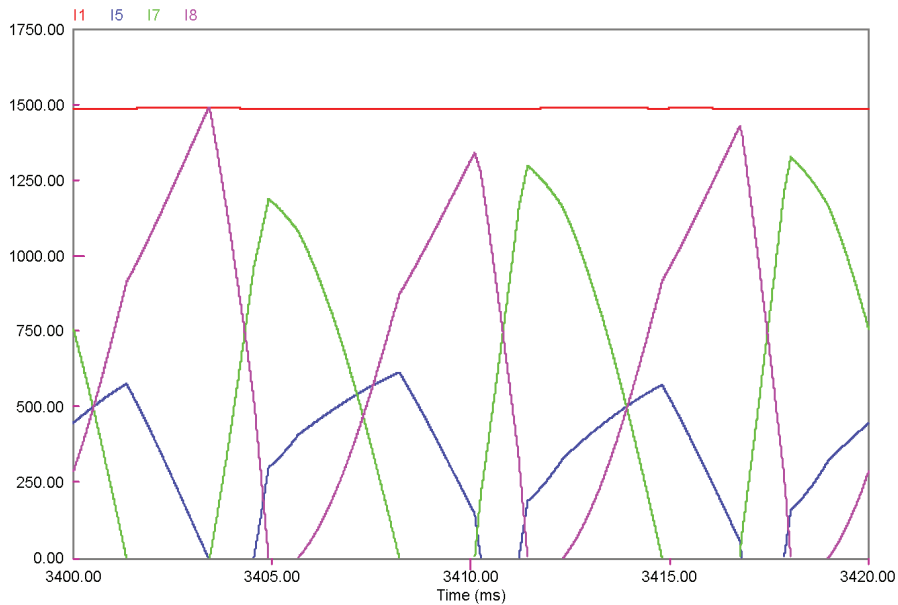
Иначе, у свим наведеним случајевима (комутационе индуктивности од 6  $\mu\text{H}$ , 30  $\mu\text{H}$  и 68  $\mu\text{H}$ ), све наведене струје појединих мостова ( $I_5$ ,  $I_7$  и  $I_8$ ) основног 18-пулсног исправљача (слика 1) биле су прекидне (без обзира на симетрију или несиметрију улазних параметара), док је укупна излазна струја ( $I_1$ ) увек била непрекидна и веома добро филтрирана! Одавде се извлачи веома важан закључак да у случају рада осамнаестоимпулсног исправљача са излазним интерфазним трансформатором, чак и за минималне вредности комутационих пригушница, излазна пригушница  $L_{11}$  није имала велики значај за филтрирање укупне струје исправљача, већ је филтрирање струје у највећој мери вршио излазни интерфазни трансформатор Т\_34!

Да би био могућ рад исправљача са непрекидним струјама на излазу свих тиристорских мостова, и то у случају рада са номиналним оптерећењем осамнаестоимпулсног исправљача од 1500 А, у симулационом моделу су морале да буду задате изузетно велике вредности комутационих пригушница  $L_{14} - L_{31}$  од чак 82  $\mu\text{H}$  (48 %  $Z_b$ )! У табелама 2 и 3 јасно се уочава ефекат повећања индуктивности комутационих пригушница на побољшање дељења струја између појединих тиристорских мостова. Ипак, повећавање индуктивности комутационих пригушница (или, у реалном случају, збира индуктивности комутационих пригушница и расипних индуктивности секундарна трофазног четворонамотајног трансформатора) не представља решење које може да се примењује неограничено.

Како се види из вредности струја  $I_1$  у табелама 2 и 3, ако комутационе индуктивности постану превелике, пад напона на њима може толико да порасте да претварач не може више ни да омогући рад потрошача са номиналном струјом. Такође, претерано повећање комутационих индуктивности негативно утиче и на укупан степен корисног дејства претварача, чиме се губи предност примене тиристорског уређаја над стандардним транзисторским прекидачким напајањима. Повећавањем индуктивности знатно се повећавају запремина, маса и цена комутационих пригушница, а обара се и динамика регулатора напона исправљача (слике 3 и 4).



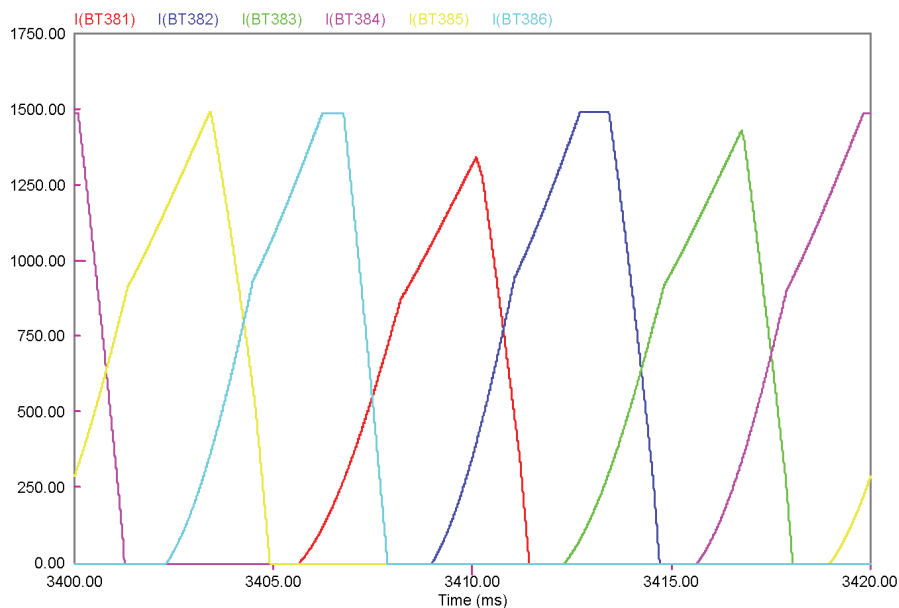
Велики подбачаји и пребачаји напона, који се уочавају на сликама 3 и 4 приликом великих промена оптерећења исправљача, представљају последицу рада исправљача без излазног филтерског кондензатора. Будући да осамнаестоимпулсни исправљачи из симулационих модела раде са великим излазним индуктивним елементима, приликом нагле промене резистивног оптерећења није могуће прихватање акумулиране енергије из индуктивности у другим реактивним елементима, па долази до појаве великих амплитуда напона. Уколико би, нпр, исправљач ДРИ 110-1500 радио са тиристором типа "Semikron" SKT 250/08 (максимални напон компоненте је 800 V), нагли скок напона до 1200 V би свакако оштетио тиристоре моста. Ипак, симулација је намерно рађена без уношења филтерских кондензатора да би се лакше уочили одзиви исправљача у различитим режимима рада. Код серијског уређаја би свакако постојала бар комплексна пренапонска заштита на сваком тиристорском мосту, а за поједине намене (нпр. у системима непрекидног напајања) и велики филтерски кондензатори на излазу исправљача.



Слика 7. Таласни облици укупне струје осамнаестоимпулног исправљача  $I_1$  (црвено) и струја појединачних мостова ( $I_5$  (плаво - тиристорски мост VT35),  $I_7$  (зелено - VT37) и  $I_8$  (љубичасто - VT38)) приликом рада претварача са номиналном струјом потрошача и несиметричним улазним параметрима ( $L_{14} - L_{31} = 30 \mu\text{H}$ ;  $L_{11} = 10 \mu\text{H}$ ; без улазних ИФТ)

Интересантан је податак да је приликом рада основне конфигурације осамнаестоимпулног исправљача постигнуто боље

дељење струја тиристорских мостова приликом рада са несиметричним улазним параметрима (несиметрични линијски напони, различите улазне импедансе прикључних проводника, различити падови напона на тиристорима појединих мостова) него у случају рада са идеалним улазним параметрима (табеле 2 и 3; слике 5 и 7). Првенствени разлог је велика неуједначеност струја појединих тиристора у тиристорском мосту приликом рада са значајном несиметријом улазних параметара.



Слика 8. Таласни облици струје појединих тиристора моста ВТ38 – уз резултате са слике 7 ( $I(ВТ381)$ ) (црвено – струја тиристора  $T_1$  у мосту ВТ38),  $I(ВТ382)$  (тамноплаво – струја тиристора  $T_2$ ),  $I(ВТ383)$  (зелено – струја тиристора  $T_3$ ,  $I(ВТ384)$  (љубичасто – струја тиристора  $T_4$ ),  $I(ВТ385)$  (жuto – струја тиристора  $T_5$ ) и  $I(ВТ386)$  (светлоплаво – струја тиристора  $T_6$  у мосту ВТ38)) приликом рада претварача са номиналном струјом потрошача и несиметр. улазним параметрима ( $L_{14} - L_{31} = 30 \mu\text{H}$ ;  $L_{11} = 10 \mu\text{H}$ ; без улаз. ИФТ)

У случају рада основне топологије осамнаестоимпулсног исправљача са несиметричним улазним параметрима, са комутационим пригушницама од  $30 \mu\text{H}$  (табела 3, 2. ред; слика 7) све струје најоптерећенијег тиристорског моста ВТ38 су различите (слика 8), а разлика између најмање и највеће (ефективне вредности) струје тиристора је 20 % (код истог електричног кола, али са симетричним улазним параметрима, одступање струја је око 6 %, а струје по три тиристора су потпуно једнаке (слика 6)). Тако је код несиметрично напајане основне конфигурације осамнаестоимпулсног исправљача дошло до благог уједначавања струја тиристорских мостова, али до значајно повећаног дебаланса између струја појединих тиристора моста.

У табелама 4 и 5 приказане су вредности укупне струје осамнаестоимпулсног исправљача са два улазна интерфазна трансформатора за уједначавање струја фазно померених мостова (секундари у спреси полигон, односно фазно померени у односу на мрежни напон за  $-20^\circ$  и  $+20^\circ$ ). Такође, приказане су и ефективне и средње вредности струја појединих тиристорских мостова.

Уочава се много боље дељење струја између мостова у односу на основну конфигурацију 18-импулсног исправљача (слика 9), као и боље потискивање утицаја несиметричних улазних параметара (слика 10). Најважнији резултат симулације је, свакако, чињеница да у топологији са два улазна ИФТ за балансирање струја 18-импулсни исправљач може успешно да ради и са минималним вредностима комутационих пригушница (на довољну резерву снаге свих тиристорских мостова указује зелена боја свих поља у табелама 4 и 5).

Табела 4. Резултати симулације на проширеном моделу осамнаестоимпулсног исправљача са симетричним улазним параметрима (слика 1, али са ИФТ Т\_37 и Т\_38) ( $I_{rms}$  - ефективна вредност струје,  $I_{avg}$  - средња вредност струје)

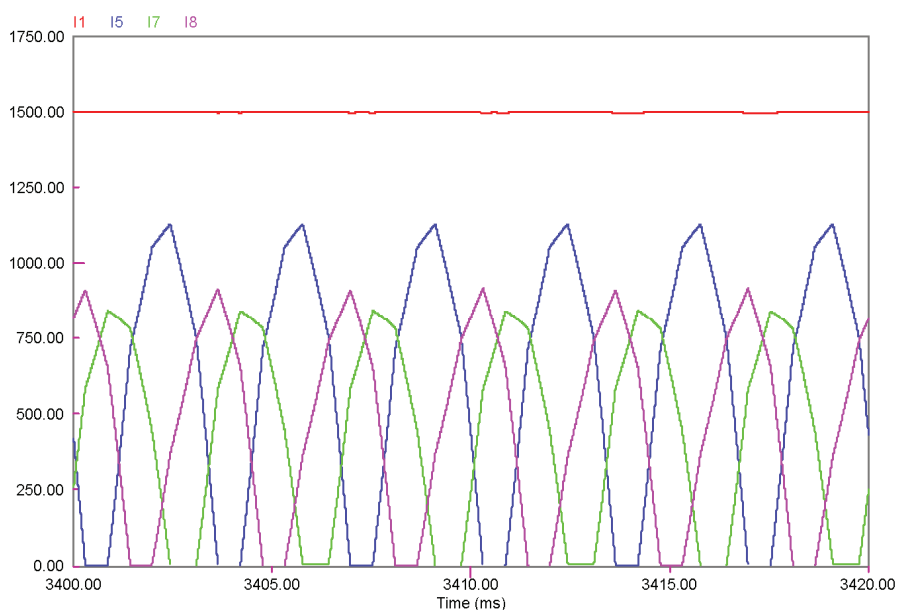
Осамнаестоимпулсни исправљач са два улазна и једним излазним ИФТ, са девет комутационих пригушница (слика 1, са ИФТ Т_37 и Т_38)								
Индуктивност комутационих пригушница	Укупна струја исправљача		Струја тиристорског моста					
	$I_1$ [A]		$I_5$ [A]		$I_7$ [A]		$I_8$ [A]	
$L_{14} - L_{31}$ [ $\mu\text{H}$ ]	$I_{1rms}$	$I_{1avg}$	$I_{5rms}$	$I_{5avg}$	$I_{7rms}$	$I_{7avg}$	$I_{8rms}$	$I_{8avg}$
6	1496,5	1496,5	726,3	600,6	538,1	437,8	557,5	458,2
30	1492,5	1492,5	625,8	599,3	480,9	452,7	468,2	440,6
68	1493,2	1493,2	566,4	560,9	476,1	470,1	468	462,2
82	1491,7	1491,7	559,2	555,8	474,5	470,8	468,6	465,1

Код основне конфигурације, која нема улазне ИФТ за балансирање струја, исправљачи ДРИ 110-1500 не би могли исправно да раде чак ни са комутационим пригушницама од по 30  $\mu\text{H}$  (табеле 2 и 3). Као што је већ наведено, осамнаестоимпулсни исправљач треба исправно да ради већ са комутационом реактансом од 3,5 %  $Z_b$  (у симулационом моделу је услов испуњен за  $L_S = 6 \mu\text{H}$ ). Уградња девет пригушница од по 30  $\mu\text{H}$  или чак 68  $\mu\text{H}$  (за струје од 433 А) заиста би била нерационална.

Уградњом два улазна ИФТ елиминише се проблем лошег дељења струја између појединих мостова, као и потреба за уградњом великих комутационих пригушница. Будући да су усвојене вредности индуктивности расипања интерфазних трансформатора од по  $L_{\sigma}^{IFT} = 10 \mu\text{H}$ , намеће се закључак да ИФТ могу истовремено да врше и улогу комутационих пригушница осамнаестоимпулсног исправљача.

Табела 5. Резултати симулације на проширеном моделу осамнаестоимпулсног исправљача (слика 2) са несиметричним улазним параметрима ( $I_{rms}$  - ефективна вредност струје,  $I_{avg}$  - средња вредност струје)

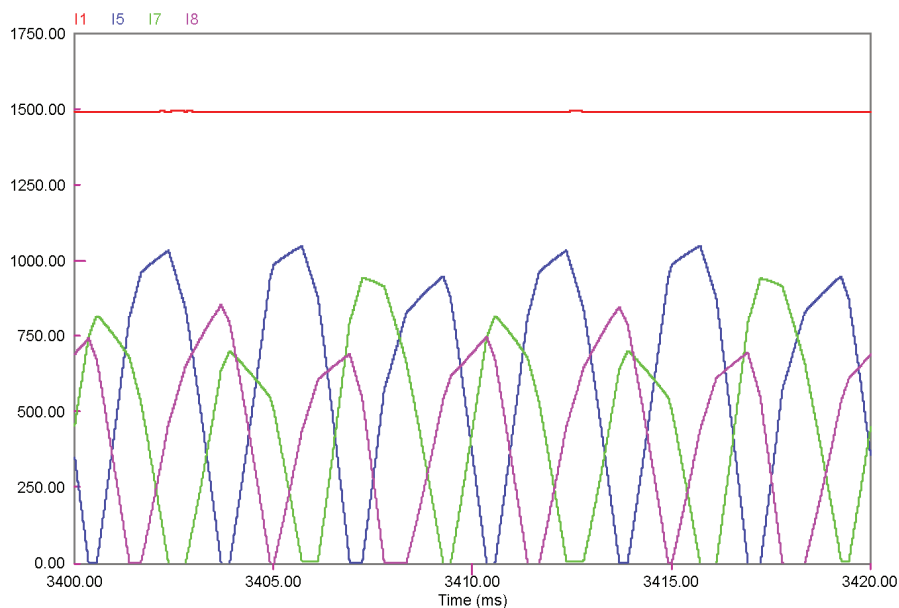
Индуктивност комутационих пригушница	Укупна струја исправљача		Струја тиристорског моста					
	$I_1$ [A]		$I_5$ [A]		$I_7$ [A]		$I_8$ [A]	
	$I_{1rms}$	$I_{1avg}$	$I_{5rms}$	$I_{5avg}$	$I_{7rms}$	$I_{7avg}$	$I_{8rms}$	$I_{8avg}$
$L_{14} - L_{31}$ [ $\mu\text{H}$ ]								
6	1490,3	1490,3	696,7	602,8	547,7	461,5	500,9	426
30	1490,4	1490,4	649,6	631	486,8	461,1	424,3	398,4
68	1489	1489	595,6	591,7	474,8	468,1	435,6	429,3
82	1486,8	1486,8	583,5	581,2	475,2	470,9	439	434,8



Слика 9. Таласни облици укупне струје осамнаестоимпулсног исправљача  $I_1$  (црвено) и струја појединачних мостова ( $I_5$  (плаво - тиристорски мост VT35),  $I_7$  (зелено - VT37) и  $I_8$  (љубичасто - VT38)) приликом рада претварача са номиналном струјом потрошача и симетричним улазним параметрима ( $L_{14} - L_{31} = 6 \mu\text{H}$ ;  $L_{11} = 10 \mu\text{H}$ ; два улазна ИФТ)

Из резултата наведених у табелама 3 и 5 уочава се утицај несиметрија мрежних напона и импеданси напојних каблова на дељење

струје тиристорских мостова (слике 9 и 10). Ипак, као што је и наведено у табели 5, без обзира на постојање несиметрије, ниједан тиристорски мост исправљача није био ни близу рада са преоптерећењем, чак и са минималним вредностима комутационих пригушница. Постављањем два улазна ИФТ извршено је довољно уједначавање струја осамнаестоимпулсног исправљача, тако да, што се тиче осамнаестоимпулсног исправљача ДРИ 110-1500 приказаног на слици 2, није било практичне потребе за повећавањем комутационих индуктивности само ради постизања бољег дељења струја тиристорских мостова.



Слика 10. Таласни облици укупне струје осамнаестоимпулсног исправљача  $I_1$  (црвено) и струја појединачних мостова ( $I_5$  (плаво - тиристорски мост ВТ35),  $I_7$  (зелено - ВТ37) и  $I_8$  (љубичасто - ВТ38)) приликом рада претварача са номиналном струјом потрошача и несиметричним улазним параметрима ( $L_{14} - L_{31} = 6 \mu\text{H}$ ;  $L_{11} = 10 \mu\text{H}$ ; два улазна ИФТ)

На сликама 9 и 10 уочава се да је највише оптерећен мост увек био ВТ35, односно тиристорски мост који није напајан преко улазних ИФТ. Разлог за овакав рад 18-импулсног исправљача је везан за укупне комутационе индуктивности у колима наизменичне струје тиристорских мостова. Наиме, у гранама са ИФТ (тиристорски мостови ВТ37 и ВТ38) постоји збир индуктивности комутационих пригушница ( $6 \mu\text{H}$ ) и расипних индуктивности ИФТ ( $10 \mu\text{H}$ ; због изузетно велике вредности, индуктивност магнетног ИФТ у овом прорачуну нема значајну улогу). Због тога, у колима напајања трофазном наизменичном струјом мостова

BT37 и BT38 (слика 2), комутационе индуктивности нису више једнаке 6  $\mu\text{H}$ , већ око 16  $\mu\text{H}$ . Са друге стране, у колу за напајање тиристорског моста BT35 остале су комутационе индуктивности од 6  $\mu\text{H}$ . Ова несиметрија у колу напајања тиристорског моста BT35 довела је до његовог рада са 20-30 % већим ефективним вредностима струја (слика 9) у односу на два фазно померена тиристорска моста (BT37 и BT38).

Због тога су извршене додатне симулације, са модификацијама које би отклониле уочену несиметрију у грани тиристорског моста BT35. Симулациони модели приказани на сликама 1 и 2 су модификовани тако да су избачене све комутационе пригушнице из кола за напајање мостова BT37 и BT38 (комутационе пригушнице  $L_{23}$ ,  $L_{24}$ ,  $L_{25}$ ,  $L_{29}$ ,  $L_{30}$  и  $L_{31}$ ), док су индуктивности комутационих пригушница преко којих се напаја мост BT35 ( $L_{14}$ ,  $L_{15}$  и  $L_{16}$ ) повећане са 6  $\mu\text{H}$  на 10  $\mu\text{H}$ . Добијени резултати приказани су у табелама 6 и 7, а оптимални модел осамнаестоимпулсног исправљача са два улазна ИФТ приказан је на слици 11. Таласни облици струја тиристорских мостова, добијени помоћу симулационог модела са слике 11, приказани су на сликама 12 (са симетричним улазним параметрима) и 13 (са несиметричним улазним параметрима).

Табела 6. Резултати симулације на оптималном моделу осамнаестоимпулсног исправљача са симетричним улазним параметрима (слика 11, али без елемената RL1 – RL9) ( $I_{rms}$  - ефективна вредност струје,  $I_{avg}$  - средња вредност струје)

Осамнаестоимпулсни исправљач са два улазна и једним излазним ИФТ, са три комутационе пригушнице (слика 11, без елемената RL1 - RL9)

Индуктивност комутационих пригушница $L_{14}$ , $L_{15}$ и $L_{16}$ [ $\mu\text{H}$ ]	Укупна струја исправљача		Струја тиристорског моста					
	$I_1$ [A]		$I_5$ [A]		$I_7$ [A]		$I_8$ [A]	
	$I_{1rms}$	$I_{1avg}$	$I_{5rms}$	$I_{5avg}$	$I_{7rms}$	$I_{7avg}$	$I_{8rms}$	$I_{8avg}$
10	1496,7	1496,7	632,2	513,8	622,6	501,6	596,3	481,3

Табела 7. Резултати симулације на оптималном моделу осамнаестоимпулсног исправљача (слика 11) са несиметричним улазним параметрима ( $I_{rms}$  - ефективна вредност струје,  $I_{avg}$  - средња вредност струје)

Осамнаестоимпулсни исправљач са два улазна и једним излазним ИФТ, са три комутационе пригушнице (слика 11)

Индуктивност комутационих пригушница $L_{14}$ , $L_{15}$ и $L_{16}$ [ $\mu\text{H}$ ]	Укупна струја исправљача		Струја тиристорског моста					
	$I_1$ [A]		$I_5$ [A]		$I_7$ [A]		$I_8$ [A]	
	$I_{1rms}$	$I_{1avg}$	$I_{5rms}$	$I_{5avg}$	$I_{7rms}$	$I_{7avg}$	$I_{8rms}$	$I_{8avg}$
10	1491,5	1491,5	638,3	546,6	605,4	502,7	525,6	442,2

Како се види из приказаних резултата, добијено је знатно боље дељење струја тиристорских мостова, иако је шест комутационих пригушница потпуно избачено из симулационог модела. Индуктивности три пригушнице су повећане за око 70 %, да би биле уједначене са индуктивностима расипања улазних ИФТ. Међусобним упоређивањем резултата и за симетричне улазне параметре (табеле 4 и 6, 1. ред), као и за рад са несиметричним напајањима мостова (табеле 5 и 7, 1. ред), јасно се види постигнуто побољшање, уз смањивање броја улазних реактанси са 15 на 9. Посебно је значајно смањивање ефективне вредности струје најоптерећенијег тиристорског моста (BT35) за око 60 А, постигнуто приликом рада са несиметричним улазним параметрима. Такође, у случају несиметричног рада смањено је одступање средњих вредности струја тиристорских мостова са преко 20 % на мање од 10 %. Добијени резултат није значајан само са становишта оптерећења тиристора, већ и са становишта хармонијског изобличења улазне струје исправљача – што су струје мостова уједначеније, то је и хармонијско изобличење линијске струје мање [6].

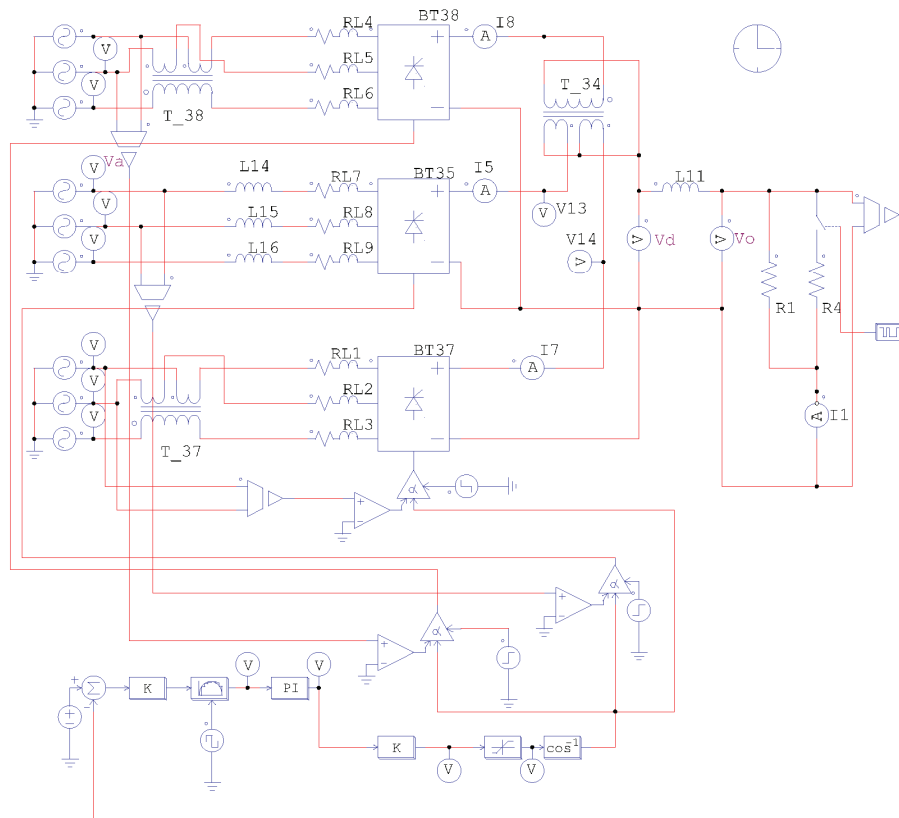
Предложени поступак оптимизације улазних индуктивности осамнаестоимпулсног исправљача је показао своју предност у значајној уштеди која може да се оствари на комутационим пригушницама у случајевима када се искористе интерфазни трансформатори за раздвајање комутација у тиристорском мосту. Међутим, недостатак овог приступа може да се испољи пракси, ако се значајно разликују вредности индуктивности комутационих пригушница и индуктивности расипања интерфазних трансформатора. До ове ситуације лако може да дође ако се пригушнице и трансформатори наруче од два независна произвођача или, чак, ако буду направљени у различитим серијама истог произвођача. У таквим случајевима треба инсистирати на добијању задатих реактанси у процесу пројектовања и производње ових индуктивних елемената.

Важно је и да се изврши процена оптерећења тиристора најоптерећенијег моста приликом рада са оптималним симулационим моделом осамнаестоимпулсног исправљача (слика 11) у односу на проширени модел са два ИФТ (слика 2). Наравно, анализу треба урадити за случај са несиметричним улазним параметрима исправљача.

Приликом рада оптималног симулационог модела (слика 11; три комутационе пригушнице од по 10  $\mu\text{H}$ ) са несиметричним улазним параметрима, најоптерећенији тиристорски мост је BT35 (табела 7). У овом мосту, највеће су струје тиристора  $T_6$ :  $I_{T356rms} = 380,5 \text{ A}$  и  $I_{T356avg} = 187,3 \text{ A}$ . Применом формуле (2), добија се дисипација снаге на тиристор у  $T_6$  од  $P_{yth356} = 288,7 \text{ W}$  (подсећамо, лимит дисипације је 400 W, на температури амбијента  $\Theta_a = 50^\circ\text{C}$ ).

У случају рада проширеног модела (слика 2; девет комутационих пригушница од по 6  $\mu\text{H}$ ) са несиметричним улазним параметрима, најоптерећенији тиристорски мост је такође BT35 (табела 5), и опет су

највеће струје тиристора  $T_6$ :  $I_{T356rms} = 413,6 \text{ A}$  и  $I_{T356avg} = 205,4 \text{ A}$ . Дисипација снаге на тиристорју  $T_6$  (за модел са слике 2) је  $P_{yth356} = 325,2 \text{ W}$ .

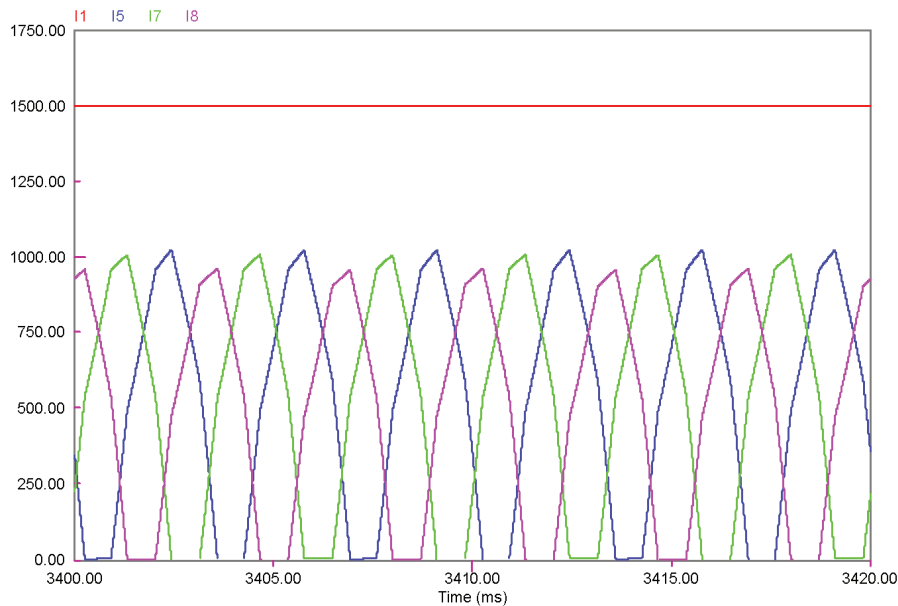


Слика 11. Оптимални симулациони модел осамнаестоимпулсног тиристорског исправљача ДРИ 110-1500 са два улазна ИФТ ( $T_{37}$  и  $T_{38}$ ), једним излазним ИФТ ( $T_{34}$ ) и три комутационе пригушнице (номинални излазни параметри исправљача су  $122,6 \text{ V}$  и  $1500 \text{ A}$ ), са несиметричним улазним параметрима

Према томе, дисипација на најоптерећенијем тиристорју оптималног осамнаестоимпулсног исправљача (слика 11) мања је за  $36,5 \text{ W}$ , односно за око  $11,2 \%$ , у односу на на стандардну топологију осамнаестоимпулсног исправљача са два улазна интерфазна трансформатора. Ова разлика би могла да обезбеди рад номинално оптерећеног исправљача ДРИ 110-1500 на максималној температури амбијента од  $\Theta_{a11} = 72^\circ\text{C}$  (топологија са слике 11), за разлику од максималних  $\Theta_{a2} = 63^\circ\text{C}$  у случају топологије са слике 2 (подаци о максималним температурама амбијента, за израчунате дисипације од  $288,7 \text{ W}$  и  $325,2 \text{ W}$ , добијени су из каталога произвођача тиристора SKT 250 [18]).



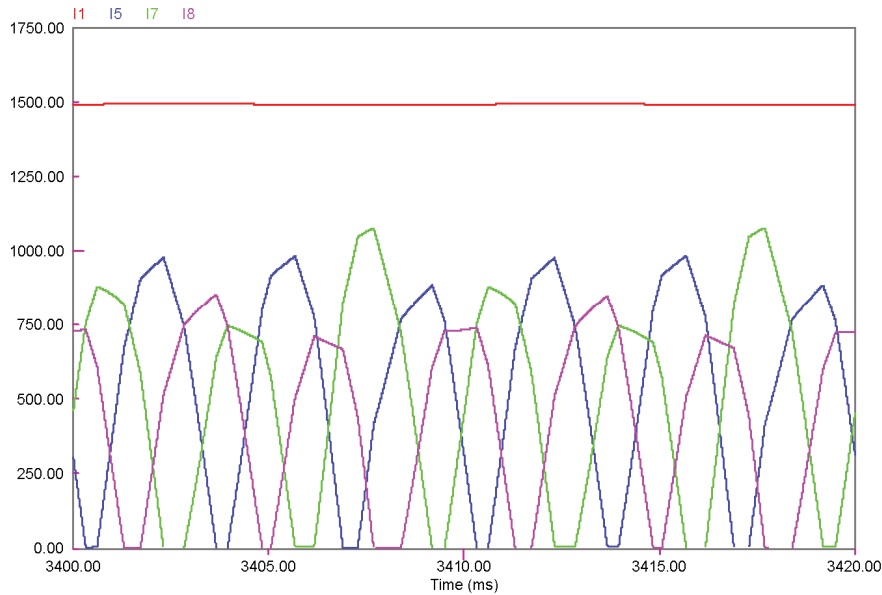
Као што је већ наведено, током симулација са различитим моделима осамнаестоимпулсних исправљача забележене су релативно мале вредности рипла напона и струје. Рипл струје је значајно растао у случајевима када је симулиран рад осамнаестоимпулсних исправљача са несиметричним улазним параметрима, али су релативне вредности (у односу на укупан излазни сигнал) остајале изузетно ниске.



Слика 12. Таласни облици укупне струје осамнаестоимпулсног исправљача  $I_1$  (црвено) и струја појединачних мостова ( $I_5$  (плаво - тиристорски мост ВТ35),  $I_7$  (зелено - ВТ37) и  $I_8$  (љубичасто - ВТ38)) приликом рада претварача са номиналном струјом потрошача и симетричним улазним параметрима ( $L_{14} = L_{15} = L_{16} = 10 \mu\text{H}$ ;  $L_{11} = 10 \mu\text{H}$ ; два улазна ИФТ)

Као илустрација могу да послуже вредности забележене приликом симулације на оптималном моделу исправљача (слика 11). Приликом рада са симетричним улазним параметрима, са номиналним оптерећењем исправљача ДРИ 110-1500, забележена је веома мала ефективна вредност рипла укупне струје исправљача ( $I_1$ ) од само  $I_{\text{rip}1}^{\text{rms}} = 100 \text{ mA}$  (на фреквенцији 900 Hz), док је ефективна вредност рипла напона била око 9 mV (око 0,07 ‰ укупног излазног сигнала; за таласни облик струје исправљача ( $I_1$ ) на слици 12). Током рада са несиметричним улазним параметрима и номиналним оптерећењем (таласни облик струје  $I_1$  на слици 13), рипл струје је био знатно већи (измерена је ефективна вредност  $I_{\text{rip}1}^{\text{rms}} = 1,1 \text{ A}$ ; фреквенција рипла је била 900 Hz, са суперпонираном осцилацијом фреквенције 100 Hz). Ефективна вредност таласности сигнала напона била је око 100 mV. Таласност сигнала (струје или напона) приликом рада са несиметричним параметрима

напајања износила је око 0,75 % укупног излазног сигнала. То су изузетно ниске вредности рипла за тиристорске претвараче, што је потврда оправданости примене оптималне топологије осамнаестоимпулсног исправљача за напајање веома осетљивих потрошача једносмерне струје.



Слика 13. Таласни облици укупне струје осамнаестоимпулсног исправљача  $I_1$  (црвено) и струја појединачних мостова ( $I_5$  (плаво - тиристорски мост VT35),  $I_7$  (зелено - VT37) и  $I_8$  (љубичасто - VT38)) приликом рада претварача са номиналном струјом потрошача и несиметричним улазним параметрима ( $L_{14} = L_{15} = L_{16} = 10 \mu\text{H}$ ;  $L_{11} = 10 \mu\text{H}$ ; два улазна ИФТ)

У овом раду нису разматране могућности засићења интерфазних трансформатора. Такође, није разматран ни утицај одступања њиховог преносног односа од пропорције 1:1:1. У наредним истраживањима планирано је додатно проучавање утицаја поменутих нелинеарности на карактеристике реалног осамнаестоимпулсног исправљача.

На крају, треба поновити да наведене симулације и примењена анализа важе само за исправљаче са три паралелна пуноуправљива тиристорска моста, излазним интерфазним трансформатором и, што је најважније, мрежним трансформатором са три секундара, који су фазно померени у односу на напон мреже за  $-20^\circ$ ,  $0^\circ$  и  $+20^\circ$ .

## 5. Закључак

У раду је представљена анализа могућности рада постојећих дигиталних регулатора пуноуправљивих исправљача са осамнаестоимпулсним тиристорским исправљачима. Приказани су симулациони модели за две конфигурације осамнаестоимпулсних исправљача са паралелним тиристорским мостовима и излазним интерфазним трансформатором. Добијени резултати указују на велике недостатке практичне примене основне топологије осамнаестоимпулсног исправљача, која садржи само један излазни, али не и улазне интерфазне трансформаторе. Са друге стране, уградња два улазна интерфазна трансформатора, између извора трофазног наизменичног напона и два фазно померена тиристорска моста, демонстрирала је добре карактеристике и приликом рада са симетричним мрежним напајањем, али и у случају постојања бројних несиметрија у електричном колу осамнаестоимпулсног тиристорског исправљача.

У случају рада основне конфигурације осамнаестоимпулсног исправљача, без улазних интерфазних трансформатора, једини начин за побољшање дељења струја тиристорских мостова било је вишеструко повећавање индуктивности комутационих реактанси (са основних 3,5 % базне импедансе па све до 48 %  $Z_b$ ). Ипак, резултати симулације су показали да је овакав поступак нерационалан и потпуно неоправдан.

Са друге стране, додавањем два интерфазна трансформатора на улазе фазно померених тиристорских мостова, омогућен је успешан рад исправљача и са елементарним комутационим реактансама од 3,5 %  $Z_b$ . Штавише, будући да су индуктивности расипања симулираних интерфазних трансформатора имале вредност од 5,9 %  $Z_b$ , размотрено је потпуно избацивање посебних комутационих пригушница из два кола исправљача у којима се налазе улазни интерфазни трансформатори, у којима би индуктивности расипања интерфазних трансформатора преузеле улогу комутационих пригушница. Због тога је предложен оптимални модел осамнаестоимпулсног исправљача, са два улазна интерфазна трансформатора и само три комутационе пригушнице. Комутационе пригушнице су постављене само на улазима тиристорског моста код кога није вршено фазно померање трофазног мрежног напона.

Код предложеног оптималног модела несиметрично напајаног и номинално оптерећеног осамнаестоимпулсног исправљача, остварено је смањење дисипиране снаге најоптерећенијег тиристора за око 11 % у односу на стандардну топологију осамнаестоимпулсног исправљача са два улазна интерфазна трансформатора.

Приликом симулације рада номинално оптерећеног исправљача у свим случајевима измерена је ефективна вредност рипла излазног сигнала мања од једног промила вредности излазног напона и струје.

## Захвалница

Рад је настао током активности на потпројекту „Развој система непрекидног напајања једносмерном струјом”. Потпројекат представља део 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.

Аутор жели да се захвали др Жарку Јанди на веома корисним саветима везаним за специјалне енергетске претвараче и трансформаторе.

## Литература

- [1] В. Катић, *Квалитет електричне енергије – виши хармоници*, Нови Сад: Факултет техничких наука, 2002.
- [2] F. Bordry, V. Montabonnet, H. Thiesen, G. Kniegl, R. Pauls, and B. Wolfes “Soft switching (ZVZCS) high current, low voltage modular power converter (13 kA, 16 V)”, на конф. *9th European Conference on Power Electronics and Applications* (Грац, Аустрија, 27. – 29. август 2001), стр. 1-9.
- [3] 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.
- [4] В. Ђ. Вукић, “Мрежом комутовани фазно регулисани исправљачи са адаптивним дигиталним регулаторима”, *Зборник радова, Електротехнички институт „Никола Тесла”*, Књига 23, стр. 1-18, 2013.
- [5] В. Вукић, “Тиристорски исправљачи са дигиталним регулаторима заснованим на микроконтролеру 80С196 за системе непрекидног напајања”, *Зборник радова, Електротехнички институт „Никола Тесла”*, Књига 21, стр. 139-155, 2011.
- [6] D. A. Paice, *Power Electronic Converter Harmonics – Multipulse Methods for Clean Power*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1996.
- [7] “PSIM Version 6.0”, *Симулациони програм*, Powersim Inc., 2003.
- [8] J. R. Rodriguez, J. Pontt, C. Silva, E. P. Wiechmann, P. W. Hammond, F. W. Santucci, R. Alvarez, R. Musalem, S. Kouro, and P. Lezana, “Large current rectifiers: state of the art and future trends”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 3, pp. 738-746, 2005.

- [9] P. Ladoux, G. Postiglione, H. Foch, and J. Nuns, "A comparative study of AC/DC converters for high-power DC arc furnace", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 3, pp. 747-757, 2005.
- [10] D. J. Perreault and J. G. Kassakian, "Effects of firing angle imbalance on 12-pulse rectifiers with interphase transformers", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 10, no. 3, pp. 257-262, 1995.
- [11] T. Tanaka, S. Ogasawara, Y. Akagi, and A. Nabae, "Current balance of phase-controlled thyristor converter with interphase reactors", *Electrical Engineering in Japan*, vol. 110, no. 4, pp. 83-91, 1990.
- [12] J. L. Schanen, J. M. Guichon, J. Roudet, and C. Domenech, "Impact of physical layout of high-current rectifiers on current division and magnetic field using PEEC method", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 2, pp. 892-900, 2010.
- [13] S. F. Pinto and J. F. A. Silva, "Constant frequency sliding mode and PI linear controllers for power rectifiers: a comparison", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 1, pp. 39-51, 1999.
- [14] В. Вукић, М. Јанковић и Р. Проле, "Микропроцесорско управљање дванаестопулсним редним тиристорским мостом", *Зборник радова, Електротехнички институт „Никола Тесла“*, Књига 16, стр. 61-67, 2004.
- [15] "Allen-Bradley PowerFlex® Medium Voltage AC Drives", *Каталог произвођача*, Rockwell Automation Inc., 2015.
- [16] "MGE® Galaxy® 9000 - Three phase UPS – 800/900 kVA", *Каталог произвођача*, Schneider Electric Co., 2012.
- [17] K. J. Åström and B. Wittenmark, *Computer-Controlled Systems - Theory and Design*, 3<sup>rd</sup> ed. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- [18] "Power Electronics – Discrete Diode/ Thyristor Chips", *Каталог произвођача*, Semikron International GmbH, 2005.
- [19] "Напојни каблови/ Power cables", *Каталог произвођача*, Електрометал плус, 2015.
- [20] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics – Converters, Applications, and Design*, 2<sup>nd</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.

**Abstract:** In this paper, computer simulation models of two different topologies of 18-pulse rectifiers are presented. Each rectifier topology consists of three parallel, three-phase six-pulse full-bridge thyristor converters connected via interphase transformers. The influence of the interphase transformer's layout and AC line reactances variations on the particular thyristor converter current sharing is analysed. Various

configurations of 18-pulse rectifiers are examined by simulating operation with symmetric input voltage supply, as well as in the cases of different levels of voltage supply asymmetry, at unequal input conductors impedance, and at different thyristor voltage drops. According to computer simulation results, an optimal 18-pulse rectifier circuit topology is recommended. The optimal topology has three AC line reactances with two input current-balancing interphase transformers. These added AC reactances are also involved with the current commutation process between thyristors. Application of the recommended optimal topology of an 18-pulse rectifier could enable the reduction of the AC line reactances number from nine to three, while the dissipated power of the AC/DC converter's most loaded thyristor could be reduced by approximately 11 %. During the simulation of the nominally loaded 18-pulse rectifier, in all considered cases the effective value of the output signal ripple below one promil of total current and voltage values has been achieved.

**Keywords:** 18-pulse rectifier, parallel thyristor bridges, interphase transformer, AC line reactance, current sharing, computer simulation

## **Influence of Interphase Transformers and AC Line Reactances on the Thyristor Bridges' Current Sharing in 18-Pulse Rectifiers**

Рад примљен у уредништво 30.9.2015. године  
Рад прихваћен 6.10.2015. године