

УДК: 621.311.1:621.318.43  
621.316.542:621.3.015.3Урош Н. Његован<sup>1,2</sup>, Зоран Н. Стојановић<sup>1</sup>, Александар Д. Марјановић<sup>1,3</sup>

## Ограничење склопних транзијената применом технике контролисаног укључења прекидача (Point-on-Wave)

<sup>1</sup> Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, Београд, Србија\*<sup>2</sup> Siemens Energy д. о. о. Београд – Београд, Србија<sup>3</sup> Siemens д. о. о. Београд – Београд, Србија<https://doi.org/10.18485/epij.2026.4.2.5>

Оригинални научно-истраживачки рад

### Кључне поруке

- Представљени ефекти склопних транзијената услед прикључења различитих врста оптерећења
- Описана техника контролисаног укључења прекидача
- Ефекти примене технике тестирани на симулатору у реалном времену
- Извршено поређење са конвенционалним укључењем прекидача компензационе пригушнице

### Кратак садржај

Подоптерећена преносна мрежа, односно водови оптерећени испод своје природне снаге, значајан су извор реактивне снаге са последицом локалног повећања напона. Као средство регулације напонских прилика операторима преносног система широм света наметнула се употреба паралелно прикључене пригушнице (енгл. Shunt Reactor) у комбинацији са конвенционалним високонапонским прекидачем. Имплементација оваквог решења доводи до значајног пораста броја склопних транзијената. Применом технике контролисаних операција прекидача (Point-on-Wave), кроз појединачно укључење/искључење сваког пола прекидача у најповољнијем тренутку, у великој мери се могу ограничити вредности ударне струје укључења пригушнице и повратног напона при искључењу. У раду су представљени негативни ефекти неконтролисаног прикључења паралелних пригушница на преносни систем. Описана је техника контроле тренутка укључења прекидача као мера ограничавања негативних утицаја склопних транзијената. Функција контроле прекидача и потенцијални ефекти примене у преносној мрежи су тестирани у лабораторијским условима. Лабораторијска поставка се састоји од микропроцесорског уређаја за заштиту и управљање као контролера и симулатора у реалном времену (HIL – Hardware-in-the-Loop) на коме је реализован модел 400 kV паралелне пригушнице и прекидача. Уређаји комуницирају коришћењем IEC 61850 Sampled Values и GOOSE протокола. Добијени резултати потврђују скоро потпуну елиминацију ударног периода приликом укључења компензационе пригушнице.

### Кључне речи

Компензациона пригушница, контролисано укључење прекидача, симулација *Hardware-in-the-Loop*, ударна струја пригушнице

Примљено: 26. децембар 2025.      Рецензирано: 19. март 2026.  
Измењено: 6. мај 2026.      Одобрено: 12. мај 2026.

\*Кореспондирајући аутор: Урош Н. Његован, +381 60/81-70-242

Имејл: [uros.njegovan@siemens-energy.com](mailto:uros.njegovan@siemens-energy.com)

#### Напомена:

Овај чланак представља проширену, унапређену и додатно рецензирану верзију рада „Примена технике контролисаног укључења прекидача (Point on Wave) на примеру компензационе пригушнице 400 kV у мрежи” (<https://doi.org/10.18485/epij.2026.4.2.5>), награђеног у Студијском комитету СТК-Б5 Заштита и аутоматизација, на 37. Саветовању CIGRE Србија, Златибор, 26-30. маја 2025.

## 1. УВОД

Склопни транзијенти представљају један од главних узрока прекомерног напрезања опреме електроенергетског система (ЕЕС). На пример, укључење компензационе пригушнице може довести до изобличења таласних облика напона и појаве ударних струја велике амплитуде, док укључење кондензаторских батерија може бити праћено прекомерним повећањем напона. Техника контролисаног укључења/искључења прекидача примењује се у циљу ограничавања и елиминације склопних транзијената који су последица укључења или искључења компензационих пригушница, енергетских трансформатора и кондензаторских батерија. Поменута техника последњих година бележи пораст примене на надземним и кабловским водовима високог напона.

Комбинација високонапонских (ВН) прекидача са стабилним оперативним карактеристикама и савремених микропроцесорских уређаја довела је до усавања алгорита контролера прекидача, поједноставила њихову интеграцију у примарним и секундарним колима и омогућила примену на различитим врстама оптерећења. Услед значајног пораста њене примене претходних година постала је препозната као поуздано средство ограничења ефеката склопних транзијената.

Контролер оптимизује тренутак операције ВН прекидача увођењем одговарајућег кашњења извршења команде у зависности од врсте оптерећења. На тај начин, тежи се ограничењу негативних утицаја склопних операција у ЕЕС-у. Основне предности примене модерних контролера су, [1]:

- повећање поузданости ЕЕС-а као резултат ограничења варијације напона и редукције виших хармоника;
- побољшање квалитета електричне енергије;
- продужетак животног века опреме;
- ограничење амплитуде пренапона и ударне струје магнетнећа.

### 1.1 Укључење прекидача компензационе пригушнице

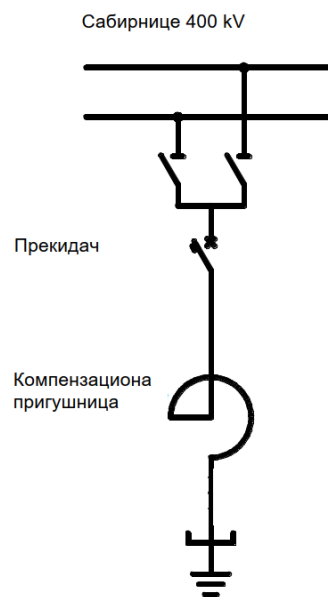
Напони потрошачких чворова, заједно са фреквенцијом и степеном хармонијских изобличења, представљају основне показатеље квалитета електричне енергије. Код подоптерећених преносних мрежа до изражаја долазе капацитивности дугачких високонапонских водова који постају значајан извор реактивне снаге са последицом локалног повећања напона изнад максимално дозвољених вредности. Подоптерећени 400 kV и 220 kV водови честа су појава како у Србији тако и у региону.

Посматрано са аспекта ЕЕС-а у целини, напонске прилике су локалног карактера, па се у великом броју случајева не могу регулисати системски, односно без употребе додатних компензационих елемената.

Тренутно постоји широк спектар доступних технологија компензације реактивне снаге, као што су синхрони компензатори, компензационе пригушнице (*Shunt Reactor*), статички VAR компензатори (SVC), статички синхрони компензатори (STATCOM), комбиновани серијско-паралелни FACTS контролери UPFC (Unified Power Flow Controller) и IPFC (Interline Power Flow Controller), као и FACTS контролери комбиновани са трансформаторима, попут TCPST (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer) и TCVR (Thyristor Controlled Voltage Regulator).

Паралелно прикључена компензациона пригушница представља једно од најзаступљенијих средстава компензације реактивне снаге које данас примењују оператори преносног система широм света. Користи се у појединим чвориштима мреже како би се одржао жељени напонски профил у ЕЕС-у. Граде се као монофазне или трофазне јединице са регулационим отцепима или без регулационих отцепа (неуправљиве). На мрежу се прикључују или директно на сабирнице ВН постројења преко конвенционалних прекидача (Слика 1) или преко терцијера мрежних трансформатора.

У периодима високих оптерећења у ЕЕС-у и повећаног преноса електричне енергије високонапонским водовима пригушнице је најчешће потребно одвојити са мреже. У зависности од варијација напона и учесталости склопних операција ВН прекидача компензационе пригушнице, може доћи до значајног пораста броја склопних транзијената на месту њеног прикључења. Овакви транзијенти представљају један од главних узрока прекомерног напрезања опреме преносног система, пре свега прекидача, док додатно имају негативан утицај на квалитет електричне енергије и могу довести до непотребних реаговања уређаја релејне заштите.

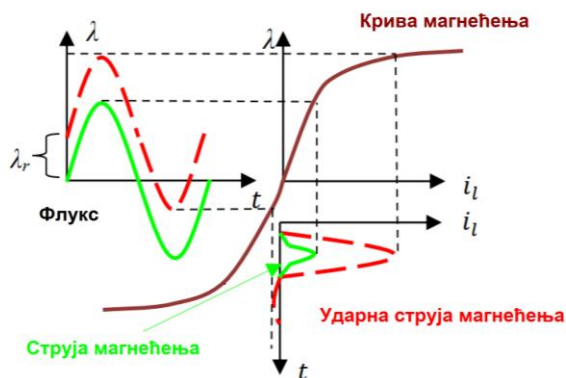


Слика 1. Директно прикључење компензационе пригушнице на сабирнице постројења ВН

## 1.2 Укључење прекидача енергетског трансформатора

Енергетски трансформатори играју једну од кључних улога у поузданом раду ЕЕС-а. Услед значајног пораста захтева за непрекидном испоруком електричне енергије претходних деценија постављени су високи критеријуми поузданости рада енергетских трансформатора (у даљем тексту трансформатор).

Ударна струја магнећења трансформатора (Слика 2), [2], појава је која настаје приликом укључења неоптерећеног трансформатора. У одређеним случајевима она може достићи вредности блиске струји квара, [3]. Њен утицај је мање изражен у поређењу са струјом квара, али учесталост њене појаве и дужина трајања могу имати негативан утицај на животни век ВН опреме. Осим велике амплитуде ударне струје, укључење трансформатора може бити праћено појавом виших хармоника, има негативан утицај на квалитет електричне енергије и може довести до непотребних реаговања уређаја релејне заштите.



Слика 2. Струја магнећења енергетског трансформатора

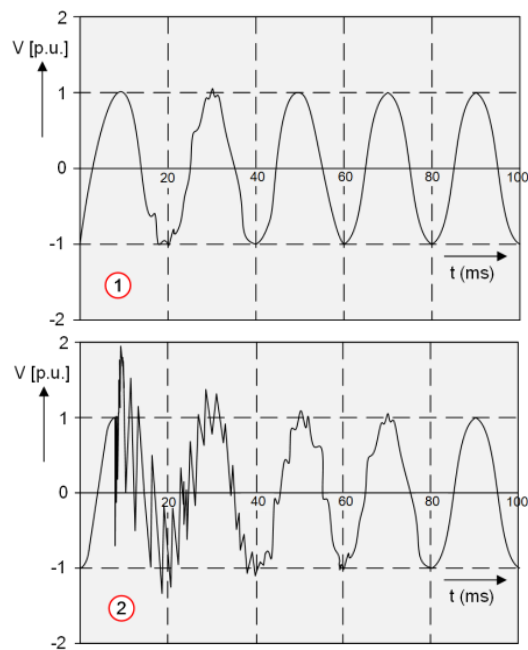
У устаљеном радном режиму трансформатора у празном ходу сав флуks се затвара у његовом магнетском језгру, стога је потребна мала струја магнећења, као што је приказано на Слици 2. Она типично износи 1-2% називне струје трансформатора. Из економских разлога, трансформатори се конструишу тако да вредност радног флуksа одговара тачки блиској колену карактеристике магнећења. Конвенционално укључење прекидача трансформатора у насумичном тренутку може довести до несиметричног магнетског флуksа и засићења језгра. Важно је напоменути да се приликом искључења трансформатора у његовом магнетском језгру задржава део флуksа, познат као реманенти, односно заостали флуks ( $\lambda_r$ ). Он може имати утицај на амплитуду ударне струје магнећења приликом наредног укључења трансформатора у зависности од вредности напона у тренутку укључења. С обзиром на то да трансформатори представљају важан елемент ЕЕС-а и да прекид њиховог рада може бити критичан у тренуцима високог оптерећења ЕЕС-а, значајан корак ка могућем продужењу животног века може се постићи контролисањем тренутка њиховог укључења.

## 1.3 Укључење прекидача кондензаторских батерија

Када се прекидач кондензаторских батерија или хармонијског филтера искључи, потребно је одређено време да се заостала енергија акумулирана у батерији испразни. Како би се избегло поновно укључење прекидача пре потпуног пражњења батерије, обично се примењује временски релеј са циљем да одређени временски период блокира механизам прекидача. Уграђени отпорници за пражњење ће осигурати да се батерија испразни пре него што истекне време блокаде прекидача. Типично подешавање временског релеја износи 10 минута од тренутка искључења прекидача до првог наредног дозвољеног укључења.

Испражњене кондензаторске батерије краткотрајно представљају кратак спој у тренутку успостављања напона на њиховим прикључцима, односно укључења прекидача. Уколико до укључења дође приликом максималне вредности напона, варијације напона и струје могу бити значајне. У зависности од конфигурације мреже, пренапони који могу настати приликом укључења кондензаторских батерија могу довести до оштећења, па чак и пробоја изолације појединих елемената електроенергетског система, као што су трансформатори, изолатори, каблови и др. Код одређене конфигурације кондензаторских батерија укључење може бити праћено струјама високе амплитуде и фреквенције. У екстремним случајевима то може угрожити механички интегритет како кондензаторске батерије тако и прекидача.

Поменути транзијенти се могу значајно ограничити контролисањем прекидача кондензаторских батерија тако да до укључења дође при нултом напону (Слика 3), [4].



Слика 3. Таласни облик напона контролисаног (горе) и неконтролисаног (доле) укључења кондензаторских батерија

## 2. ТЕХНИКА КОНТРОЛЕ ТРЕНУТКА УКЉУЧЕЊА ПРЕКИДАЧА

Једна од најзаступљенијих технологија контроле прекидача заснована је на одабиру оптималног тренутка на напонском таласу (*Point-on-Wave*). Оваквим укључењем значајно се могу редуковати нежељени ефекти склопних транзијената који могу настати у случају конвенционалног укључења у насумичном тренутку. Алгоритам који одређује најповољнији тренутак укључења сваке од фаза на основу улазних величина имплементиран је у контролеру прекидача, који је по својим карактеристикама сличан савременим микропроцесорским уређајима за релејну заштиту и управљање.

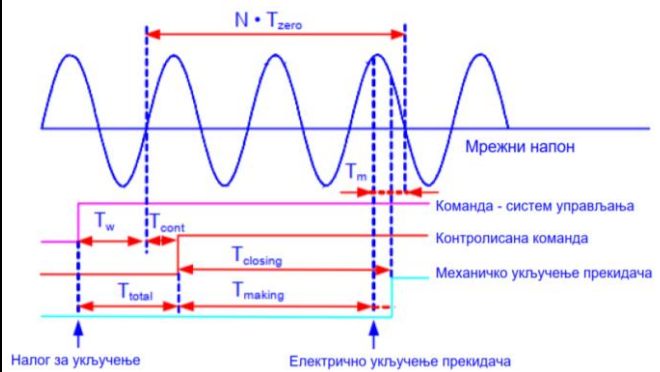
Његова улога се огледа у томе да након пријема налога за укључење прекидача процени оптималан тренутак укључења на основу мереног напонског таласа и сходно томе израчуна потребно временско кашњење извршења команде како би се сваки пол прекидача независно укључио у оптималном тренутку. Очекивана поновљивост контролера и прецизност успостављања струје у односу на оптималну тачку на напонском таласу је  $\pm 1$  ms. Алгоритам контролера проверава сва одступања у фреквенцији референтног напона детекцијом проласка сигнала напона кроз нулу (*zero crossing*) и на основу тога доноси коначну одлуку о тренутку извршења команде.

Принцип контролисаног укључења са свим кључним временским тренуцима од интереса приказан је на Слици 4, [5]. Може се уочити да, пре успостављања механичког контакта полова прекидача, односно његовог механичког укључења, долази до диелектричног пробоја изолационог медијума када се контакти прекидача довољно приближе и успоставља се електрични лук. То представља електрични контакт полова, односно електрично укључење прекидача. Време механичког укључења ( $T_{\text{CLOSING}}$ ) карактеристика је прекидача и може се измерити. Време паљења лука ( $T_m$ ) представља улазни параметар контролера на основу кога се израчунава укупно време које је потребно да прође од тренутка издавања команде до успостављања струје, односно електричног укључења прекидача ( $T_{\text{MAKING}}$ ).

Укупно временско кашњење које контролер уноси од момента детекције налога за укључење до извршења команде ( $T_{\text{total}}$ ) представља збир времена детекције проласка сигнала напона кроз нулу ( $T_w$ ) и синхроног кашњења које рачуна контролер ( $T_{\text{cont}}$ ). Синхроно временско кашњење се уводи са циљем успостављања струје у оптималном тренутку у односу на напонски талас, односно узима се у обзир рачунато време електричног укључења прекидача ( $T_{\text{MAKING}}$ ).

Стога, улога контролера је иницирање успостављања електричног а не механичког контакта полова прекидача у оптималном тренутку, које се рачуна као (1):

$$T_{\text{MAKING}} = T_{\text{CLOSING}} - T_m \quad (1)$$



Слика 4. Кључни временски тренуци контролисаног укључења прекидача

Велики утицај на ефекат контролисаног укључења имају доследност механичких перформанси прекидача и његове диелектричне карактеристике. Поред тога, значајан фактор представља и способност контролера да прецизно предвиди понашање прекидача током његовог радног века.

Потребне карактеристике прекидача за примену у шемама контролисаног укључења су:

- независно управљање половима;
- стабилно време укључења уз механичку поузданост;
- изванредне диелектричне особине, тј. стрма стопа опадања диелектричне чврстоће (RDDS).

Наиме, оперативна времена прекидача значајно варирају зависно од типа прекидача, као и радних и амбијенталних услова. Део укупне варијације времена прекидача се може предвидети. Осим предвидљивих, постоје и варијације које није могуће предвидети, јер су чисто статистичке природе. Оперативно време прекидача се може представити следећим изразом (2):

$$T_{\text{Oper}} = T_{\text{Nom}} + \Delta T_{\text{Comp}} + \Delta T_{\text{Drift}} + \Delta T_{\text{Statistic}} \quad (2)$$

где је:

- $T_{\text{Oper}}$  – оперативно време прекидача;
- $T_{\text{Nom}}$  – називно време прекидача при номиналним условима;
- $\Delta T_{\text{Comp}}$  – предвидљиво одступање које контролер може компензовати;
- $\Delta T_{\text{Drift}}$  – одступање услед експлоатације прекидача током његовог радног века;
- $\Delta T_{\text{Statistic}}$  – статистичко одступање.

Дакле, постоји варијабилни део оперативног времена прекидача који се може предвидети и уважити у самом контролеру ( $\Delta T_{\text{Comp}}$ ). Промена оперативног времена прекидача узрокована је променама вредности контролног напона и амбијенталне температуре, а у случају пнеуматских прекидача, и променом притиска. Стога се ове

варијације могу предвидети, а на основу величина измерених путем сензора и достављених контролеру могуће је компензовати њихов утицај на оперативно време прекидача.

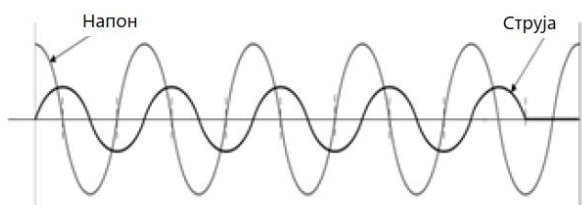
### 3. СТРАТЕГИЈА КОНТРОЛИСАНОГ УКЉУЧЕЊА У ЗАВИСНОСТИ ОД ОПТЕРЕЋЕЊА

У наредним поглављима дат је преглед стратегија контролисаног укључења прекидача за три основна типа оптерећења. У зависности од очекивања корисника и доступних функционалности контролера, могуће је конфигурирати га за неки од стандардних типова оптерећења и, уколико је потребно, за оба смера рада – укључење и искључење.

#### 3.1 Контролисано укључење прекидача компензационе пригушнице

У случају идеалне компензационе пригушнице таласни облик струје заостаје приближно  $90^\circ$  у односу на напон на њеним прикључцима, [6]. На тај начин тренутна вредност напона достиже максимум у тренутку проласка струја кроз нулу, као што је приказано на Сlici 5.

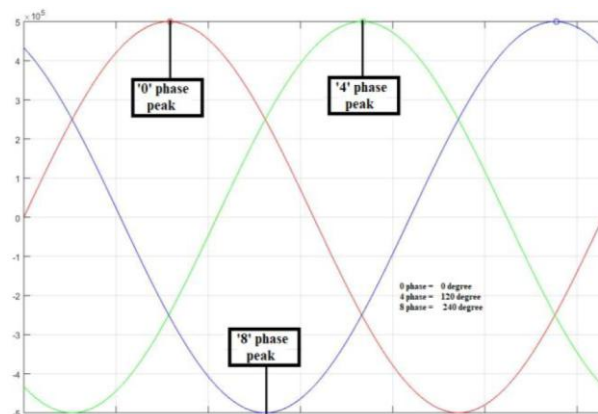
Амплитуда ударне струје пригушнице и степен изобличења напонског таласа зависе од вредности напона мреже у тренутку издавања налога за укључења и оперативног времена прекидача.



Слика 5. Таласни облик струје и напона компензационе пригушнице

Конвенционално укључење компензационе пригушнице у насумичном тренутку доводи до појаве несиметричних струја, повећања електромеханичких напрезања прекидача и намотаја пригушнице, док у екстремним случајевима може довести до zasiћења струјних трансформатора и непотребног реаговања земљоспојне заштите (50N/51N), која је заснована на мерењу струје проводника неутралне тачке пригушнице. Уколико до укључења дође у тренутку када је вредност напона у једној од фаза блиска нули, склопни транзијент ће бити најизраженији.

У случају трофазних система максимуми вредности сигнала фазних напона су увек инверзног редоследа (L1-L3-L2) у односу на фазни редослед напона мреже (L1-L2-L3) и међусобно померени за трећину периоде, односно 6,66 ms код система називне фреквенције 50 Hz (Слика 6).



Слика 6. Таласни облик три фазна напона и њихови максимуми

Оптимална стратегија укључења пригушнице се заснива на укључењу сваког пола прекидача при максималној вредности напона. Пошто је пригушница индуктиван елемент, приликом укључења прекидача при максималној вредности напона ниво магнетског флуksа је теоријски минималан, па се самим тим ограничава и вредност ударне струје. Референтни тренутак је пролазак таласног облика напона фазе L1 кроз нулу (*zero crossing*). Циљ контролера је да обезбеди укључење пола L1 са фазним померајем од  $90^\circ$  у односу на референтни тренутак, односно у моменту када вредност напона фазе L1 достигне свој максимум [7].

Свој максимум (са негативним предзнаком) следећа достиже фаза L3 за  $90^\circ + 60^\circ = 150^\circ$  односно са кашњењем од 3,33 ms у односу на фазу L1. Последњи корак је укључење фазе L2, и то са теоријском задршком од  $90^\circ + 120^\circ = 210^\circ$ , односно 6,66 ms.

Важно је напоменути, иако није предмет овог рада, да искључење прекидача пригушнице такође може представљати изазов. Узрок томе није амплитуда струје која се прекида већ енергија акумулирана у пригушници. „Одсецање” струје пре њеног проласка кроз нулу може довести до изражених високофреквентних осцилација узрокованих енергијом акумулираном у пригушници као индуктивном елементу, као и паразитних капацитивности.

Нагли пораст повратног напона на контактима прекидача може довести до поновног паљења лука. Неопходно је истаћи да су савремени SF<sub>6</sub> прекидачи конструисани тако да је вероватноћа „одсецања” струје минимална.

Улога контролера приликом искључења прекидача пригушнице огледа се у иницирању механичког одвајања контаката непосредно након проласка струје кроз нулу. Након механичког одвајања контаката прекидача, долази до развлачења лука и струја наставља да тече све док диелектрична чврстоћа не буде довољна да приликом наредног проласка струје кроз нулу угуши лук. Када се лук угаси, требало би да контакти прекидача буду довољно удаљени један од другог да диелектрична чврстоћа надјача повратни напон и не дође до поновног паљења лука.

### 3.2 Контролисано укључење прекидача енергетског трансформатора

Код трофазних трансформатора који су формирани од три монофазне јединице не постоји магнетска спрега између фаза једног намотаја, па се са аспекта стратегије укључења могу посматрати као компензационе пригушнице, односно тежи се укључењу сваке фазе при максимуму одговарајућег напона.

На нашим просторима преовладавају трофазни трансформатори са заједничким магнетским језгром и кућиштем, код којих примарни и секундарни намотај могу бити спрегнути у звезду (уземљена или изолована неутрална тачка) или троугао. У појединим случајевима трансформатори садрже и терцијерни намотај. Уколико трансформатор поседује терцијер или је конструисан као трофазна јединица са заједничким језгром, тада постоји магнетска спрега између његових фаза, што се одражава и на стратегију његовог оптималног укључења.

У Табели I дат је преглед оптималних тренутака укључења појединачних фаза прекидача трансформатора у зависности од спреге и начина уземљења неутралне тачке примарног намотаја. Жељени тренутак укључења приказан је у форми фазног става (угла) сваке од појединачних фаза у односу на референтни тренутак, односно пролазак сигнала напона фазе L1 кроз нулу. Стратегија укључења подразумева енергизацију намотаја који је први наведен у табели.

Описана техника укључења заснована је на мерењу референтног напона и не узима у обзир реманентни флуks трансформатора.

Табела I Оптималан тренутак укључења у зависности од спреге трансформатора

| Спрега трансформатора | Фаза L1 [°] | Фаза L2 [°] | Фаза L3 [°] |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
| YNd; YNyn             | 90          | 180         | 180         |
| Yd; Yy; Dd; Dyn; Dy   | 60          | 60          | 150         |

**3.2.1 Трансформатор са уземљеном неутралном тачком (YNd; YNyn).** У наставку је описана стратегија укључења трансформатора чији је намотај који се енергизује спрегнут у звезду, са уземљеном неутралном тачком. При таквој конфигурацији, прво се укључује фаза L1 и то при максималној вредности њеног напона, када је ниво флуksа најмањи. У поменутој фази се успоставља струја магнетизације која се затвара преко уземљења неутралне тачке намотаја. Струја магнетизације у фази L1 доводи до индукције симетричног флуksа у преосталим фазама (L2 и L3), чија је вредност једнака половини вредности флуksа фазе L1 и супротног је поларитета. Због тога успостављена струја магнетизације у фази L1 има 1,5 пута већу вредност од струје магнетизације у устаљеном режиму када су све три фазе укључене.

Преостале две фазе потребно је укључити истовремено са померајем од 90° у односу на прву. То је тренутак када магнетски флуks фазе L1 достиже максималну вредност, а флуks индукован у фазама L2 и L3 достиже вредности потенцијалног флуksа који би у њима проузроковао мрежни напон у датом тренутку. Иако се укључење фаза L2 и L3 не остварује при максимуму одговарајућих мрежних напона, тренутак укључења одговара максимуму магнетског флуksа који у тим фазама индукује фаза L1.

**3.2.2 Трансформатор са изолованом неутралном тачком (Yd; Yy; Dd; Dyn; Dy).** У случају трансформатора са изолованом неутралном тачком, укључењем само једне фазе не може се успоставити струја магнетизације због изоловане неутралне тачке или спреге намотаја у троугао (D). Стога се фазе L1 и L2 укључују истовремено, при максималној вредности међуфазног напона  $U_{L1-L2}$ , односно са померајем од 60° у односу на референтни тренутак (пролазак напона фазе L1 кроз нулу). У тренутку укључења амплитуда флуksа фаза L1 и L2 једнака је нули. Напон фазе L3 достиже свој максимум са кашњењем од 90° ( $60° + 90° = 150°$  у односу на референтни тренутак). Њеним укључењем у овом тренутку постиже се укључење при минималном флуksу.

### 3.3 Контролисано укључење прекидача кондензаторске батерије

Када се на испразњену кондензаторску батерију, као елемент мале импедансе, доведе напон у тренутку његове максималне вредности, долази до израженог прелазног процеса у виду пренапона и ударних струја високе амплитуде.

Да би се постигла најмања разлика потенцијала приликом контролисаног укључења, оно се треба обавити што ближе проласку напона сваке од фаза кроз нулу. У Табели II дат је приказ оптималних тренутака укључења појединачних фаза прекидача у зависности од начина уземљења неутралне тачке кондензаторских батерија.

Табела II Оптималан тренутак укључења у зависности од начина уземљења кондензаторских батерија

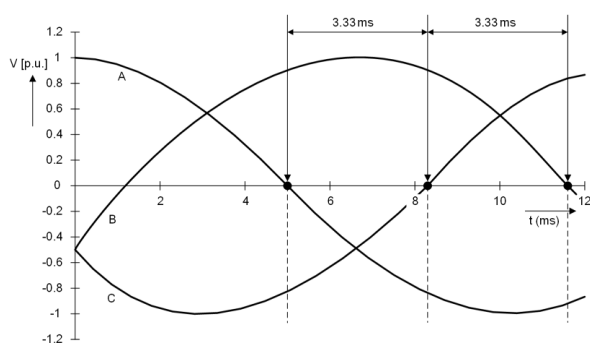
| Неутрална тачка кондензаторске батерије | Фаза L1 [°] | Фаза L2 [°] | Фаза L3 [°] |
|-----------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Уземљена                                | 0           | 120         | 60          |
| Изолована                               | 180         | 90          | 90          |

**3.3.1 Кондензаторска батерија са уземљеном неутралном тачком.** У случају кондензаторских батерија са уземљеном неутралном тачком свака фаза се укључује независно, при проласку њеног напона кроз нулу (Слика 7). Тренуци проласка таласних облика напона кроз нулу међусобно су померени за 60°.

Редослед укључења полова прекидача приказан на Слици 7 је L1-L2-L3, са временским померајем од 3,33 ms за 50 Hz, односно 2,77 ms за 60 Hz системе.

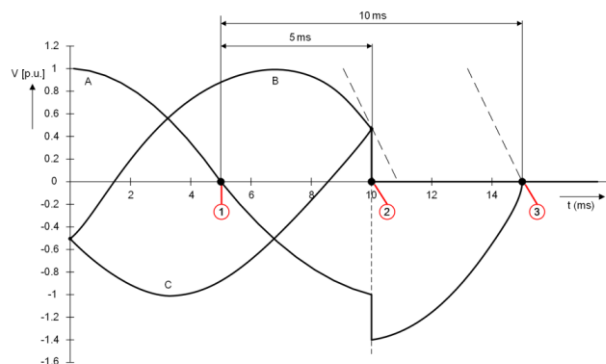
**3.3.2 Кондензаторска батерија са изолованом неутралном тачком.** У случају кондензаторских батерија са изолованом неутралном тачком укључење при проласку напона кроз нулу се другачије интерпретира у погледу редоследа извршења команди у поређењу са кондензаторским батеријама код којих је неутрална тачка уземљена.

Уместо да се свака фаза укључи независно, у тренутку проласка фазног напона кроз нулу, две фазе се укључују истовремено (Слика 8), у тренутку када су њихови напони међусобно једнаки. То је моменат када је међуфазни напон  $U_{L2-L3}$  једнак нули, што резултује укључењем фаза L2 и L3 кондензаторских батерија при нултом напону.



Слика 7. Оптималне тачке укључења кондензаторске батерије са уземљеном неутралном тачком

Затим, четвртину периоде касније, фаза L1 се укључује у тренутку проласка њеног напона кроз нулу.



Слика 8. Оптималне тачке укључења кондензаторске батерије са изолованом неутралном тачком

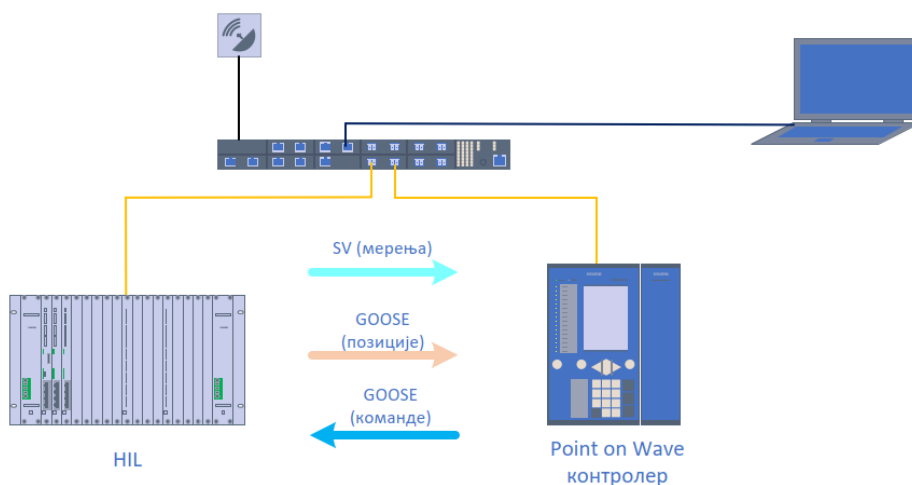
Временски тренуци од значаја, означени бројевима на Слици 8, представљају:

1. референтни тренутак контролера – пролазак напона фазе L1 кроз нулу;
2. тренутак укључења фаза L2 и L3;
3. тренутак укључења фазе L1.

#### 4. ЛАБОРАТОРИЈСКИ МОДЕЛ

Ефекти примене технике контролисаног укључења прекидача испитани су у лабораторијским условима, на примеру компензационе пригушнице 400 kV. У ту сврху формирана је лабораторијска поставка (Слика 9) коју чине: микропроцесорски уређај за релејну заштиту и управљање као контролер прекидача, мрежни комуникациони свич и Hardware-in-the-Loop (HIL) уређај, на коме је реализован модел компензационе пригушнице 400 kV, прекидача ВН и дела остатка мреже.

Процесна мрежа (према стандарду IEC 61850) на моделу је упрошћена, реализована у топологији „звезда“, са једним мрежним комуникационим свичем. Комуникациони свич има улогу и извора временске синхронизације по протоколу IEEE 1588 *Precision Time Protocol* – РТР, који је неопходан за генерисање валидних одбара мерних величина – *Sampled Values*.



Слика 9. Блок-шема лабораторијске поставке

#### 4.1 Модел компензационе пригушнице

У оквиру HIL уређаја моделовано је поље 400 kV које се састоји од компензационе пригушнице, прекидача, струјних мерних трансформатора и остале релевантне ВН опреме. Компензациона пригушница је нелинеарна, спрегнута у звезду, са директно уземљеном неутралном тачком. Њене техничке карактеристике приказане су у Табели III. Магнетско коло је са ваздушним зазором и састоји се од пет стубова.

Табела III Техничке карактеристике компензационе пригушнице

|                       |                  |
|-----------------------|------------------|
| Називни напон         | 420 kV           |
| Називна фреквенција   | 50 Hz            |
| Реактивна снага       | 250 Mvar         |
| Називна струја        | 343,66 A         |
| Спрега                | Yn               |
| Индуктивност намотаја | 2,25 H (по фази) |

Прекидач пригушнице моделован је као расклопни елемент са независно управљивим половима, техничких карактеристика датих у Табели IV.

Табела IV Техничке карактеристике прекидача

|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| Време механичког укључења прекидача  | 50 ms |
| Време механичког искључења прекидача | 30 ms |

Мрежа је моделована као Thevenin-ов еквивалент који следи из снаге кратког споја на месту прикључења пригушнице. Амплитуда и пригушење ударних струја пригушнице доминантно зависе од параметара пригушнице и тренутка укључења прекидача, док

утицај удаљености и „јачине” мреже има секундарни ефекат и углавном утиче на амплитуду пренапона, а не на ефикасност контролисаног укључења. Уважавање отпорности у колу доводи до додатног пригушења транзијента и благог фазног помераја оптималне тачке укључења, али нема суштински утицај на стратегију контролисаног укључења нити значајно повећава грешку одређивања оптималног тренутка.

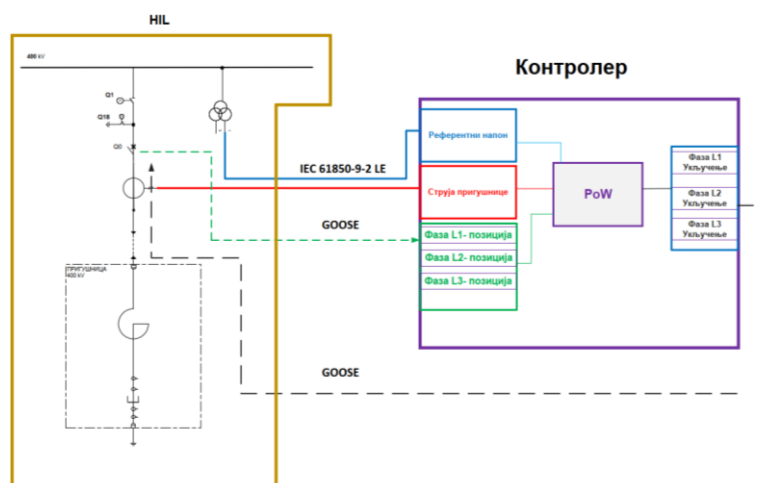
Модел примарне опреме на уређају HIL реализован је уз уважавање следећих ограничења:

- не постоје међусобне варијације у оперативним временима полова прекидача; она увек одговарају задатим вредностима у све три фазе;
- поставка уводи кашњење команде од тренутка издавања са контролера до њене регистрације од стране уређаја HIL; како се размена информација између контролера и уређаја HIL одвија порукама GOOSE, максимално кашњење је ограничено на 1 ms;
- нулта временска разлика између тренутка успостављања електричног и механичког контакта полова прекидача, што потврђује изостанак лука на осцилографским записима.

#### 4.2 Контролер прекидача

Функција контролера имплементирана је у оквиру микропроцесорског уређаја за релејну заштиту и управљање (Слика 10). На основу анализе референтног напонског таласа, узимајући у обзир подешене параметре, као што су стратегија укључења и временске карактеристике прекидача, контролер рачуна и уводи оптималну временску задршку активирања калема за укључење прекидача.

Референтни сигнал се добија са напонског трансформатора прикљученог на сабирницама 400 kV. Њега генерише уређај HIL као *SV publisher*, а контролер преузима као *SV subscriber* у оквиру формиране *Process Bus* мреже. Тренутне вредности напона се шаљу у форми пакета одбирака дефинисаних као IEC 61850-9-2 *Sampled Values* стримови.



Слика 10. Логички дијаграм размене информација уређаја HIL и контролера

Садржај пакета приказан је у Табели V. У сваком пакету мерења, поред одбирака три фазна и нултог напона, налазе се и вредности фазних струја мерених на прикључцима компензационе пригушнице, као и рачунска вредност нулте струје.

Информације о положају расклопне опреме генерише уређај HIL као поруке GOOSE, док контролер шаље пакете GOOSE HIL-у са налогом за командовање појединачним половима прекидача.

Табела V Садржај пакета одбирака мерења

| IEC 61850-9-2 Sampled Value стрим |                 |                 |                 |                   |                 |                 |                 |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Напон сабирница                   |                 |                 |                 | Струја пригушнице |                 |                 |                 |
| U <sub>L1</sub>                   | U <sub>L2</sub> | U <sub>L3</sub> | 3U <sub>0</sub> | I <sub>L1</sub>   | I <sub>L2</sub> | I <sub>L3</sub> | 3I <sub>0</sub> |
| Поз 1                             | Поз 2           | Поз 3           | Поз 4           | Поз 5             | Поз 6           | Поз 7           | Поз 8           |

У контролеру су активиране функције надзора. Након сваког укључења контролер прикупља податке, анализира их и по потреби генерише аларм на уочену неисправност. Имплементиране су следеће функције:

- бележи вредност измерене ударне струје и пореди са подешеним лимитом, што на нашем примеру одговара вредности двоструке називне струје пригушнице;
- мери механичко време укључења прекидача на основу информације о сигналним контактима прекидача, моделованих на HIL уређају, и региструје његово одступање у односу на подешену вредност;
- мери електрично време укључења прекидача на основу детекције успостављања струје и региструје његово одступање у односу на рачунату вредност.

## 5. РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА

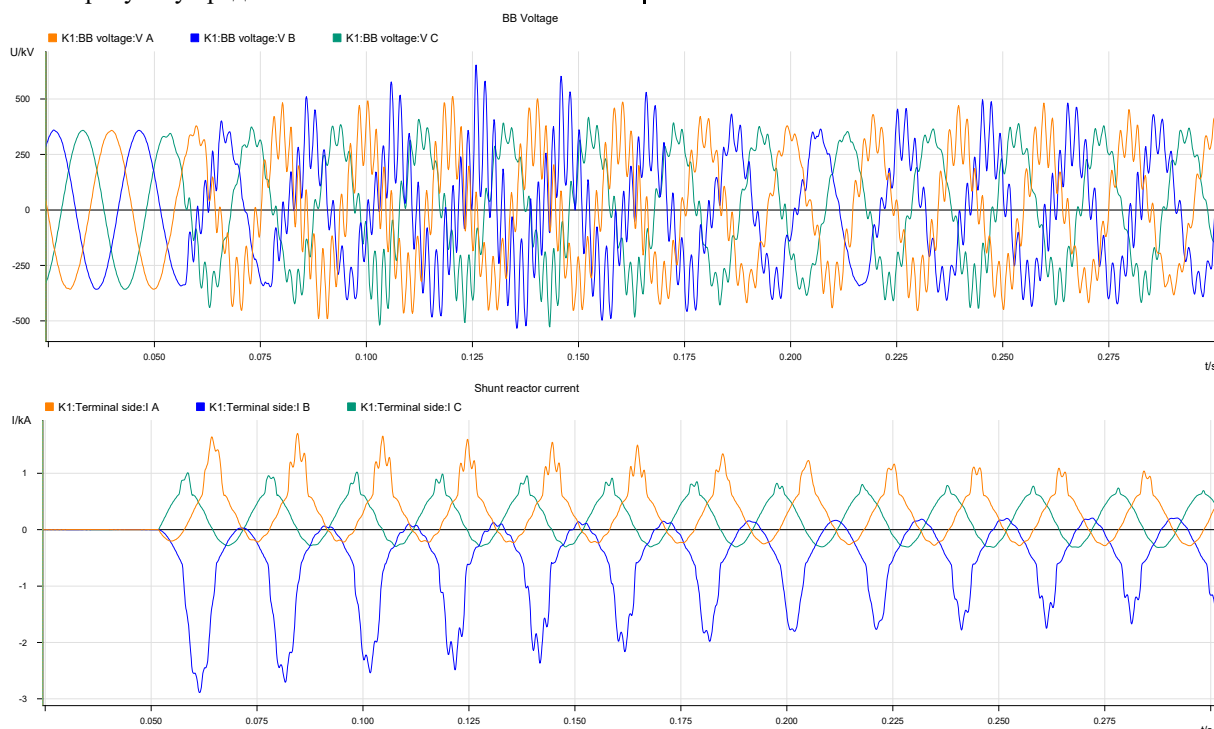
Како бисмо сагледали ефикасност примене описане технике, извршено је упоредно испитивање три различите стратегије укључења прекидача пригушнице на лабораторијском моделу, и то:

1. конвенционално – насумично истовремено укључење сва три пола прекидача;
2. контролисано укључење сваког пола прекидача у најнеповољнијем тренутку;
3. контролисано укључење сваког пола прекидача у оптималном тренутку.

Након сваког укључења, са контролера су преузети осцилографски записи и листе догађаја. На основу њих се могу очитати вредности и упоредити таласни облици напона и струја пригушнице, као и статуси помоћних контаката прекидача.

### 5.1 Конвенционално укључење прекидача

Конвенционално укључење карактерише истовремено генерисање команде укључења сва три пола прекидача. Контролер се у овом случају понаша као пасиван елемент који не уводи временску задршку на регистрован налог од система управљања. Како је тренутак издавања команде насумичан, степен несиметрије, као и амплитуда ударних струја пригушнице зависе од тренутка издавања налога, као и оперативног времена прекидача. Осцилографски запис (Слика 11) потврђује истовремено укључење сва три пола прекидача.



Слика 11. Таласни облици струје и напона при конвенционалном укључењу

На њему је уочљива зависност вредности ударне струје од тренутне вредности напона у тренутку укључења. Изражен је ударни период велике временске константе, тј. дужине трајања. Поменуто доводи до приметног изобличења таласних облика напона и струја, али и великих вредности ударних струја.

У овом случају вршне вредности су износиле  $I_{L1} = 1,63 \text{ kA}$ ,  $I_{L2} = 2,88 \text{ kA}$  и  $I_{L3} = 955 \text{ A}$ . Вредност ударне струје проводника неутралне тачке износи  $I_N = 1,86 \text{ kA}$ .

## 5.2 Контролисано укључење сваког пола прекидача у најнеповољнијем тренутку

Како је пригушница елемент индуктивне природе, контролисано укључење сваког пола прекидача у тренутку проласка напона кроз нулу у свакој од фаза представља најнеповољнији случај. Тада је изобличење таласних облика најизраженије.

Премда употреба контролера тежи да ограничи транзијент укључења, погрешним одабиром његових параметара може доћи до укључења при коме ће негативни ефекти бити најизраженији.

Таласни облици напона приказани су на Слици 15, а струја на Слици 16.

Овакво укључење праћено је изузетно високим вршним вредностима ударних струја  $I_{L1} = 3,47 \text{ kA}$ ,  $I_{L2} = 3,64 \text{ kA}$  и  $I_{L3} = 3,80 \text{ kA}$ . До изражаја долази несиметрија ударних струја, па вредност струје проводника за уземљење пригушнице достиже свој максимум од  $I_N = 3,33 \text{ kA}$  (Слика 12).

С обзиром на дужину трајања ударног периода, у зависности од временског затезања земљоспојне заштите, може доћи до њене непотребне прораде.

Такође, због односа X/R параметара, једносмерна (DC) компонента струје споро опада, што повећава

вероватноћу да дође до засићења струјних трансформатора.

## 5.3 Оптимално укључење прекидача

Оптимална стратегија укључења пригушнице се заснива на укључењу сваког пола прекидача при максималној вредности напона. Референтни тренутак је пролазак таласног облика напона фазе L1 кроз нулу (*zero crossing*). Циљ контролера је да обезбеди укључење пола L1 са фазним померајем од  $90^\circ$  у односу на референтни тренутак, односно у моменту када вредност напона фазе A достигне свој максимум.

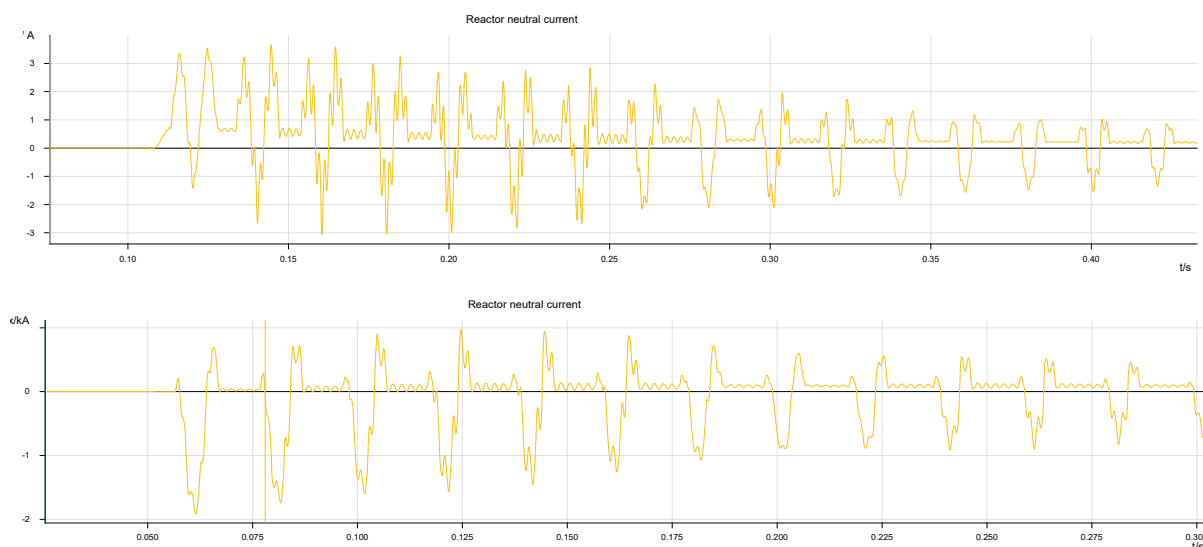
Свој максимум (са негативним предзнаком) следећа достиже фаза L3 за  $90^\circ + 60^\circ = 150^\circ$ , односно са кашњењем од  $3,33 \text{ ms}$  у односу на фазу L1.

Последњи корак је укључење фазе L2, и то са теоријском задршком од  $90^\circ + 120^\circ = 210^\circ$ , односно  $6,66 \text{ ms}$ .

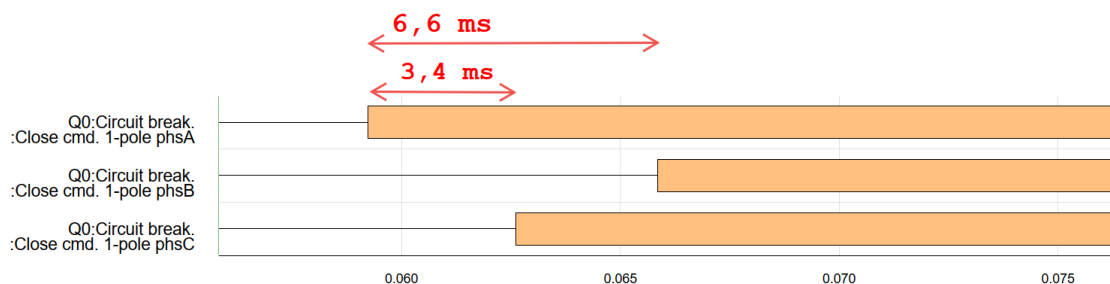
На Слици 13 приказано је секвенционално издавање команди укључења полова, док се анализом догађаја може утврдити да не постоје одступања оперативног времена контролера од теоријски идеалних вредности.

Анализом осцилографских записа уочено је правовремено укључење сваког пола. То потврђује пример фазе L1 (Слика 14), где се може видети успостављање струје при максималној вредности напона.

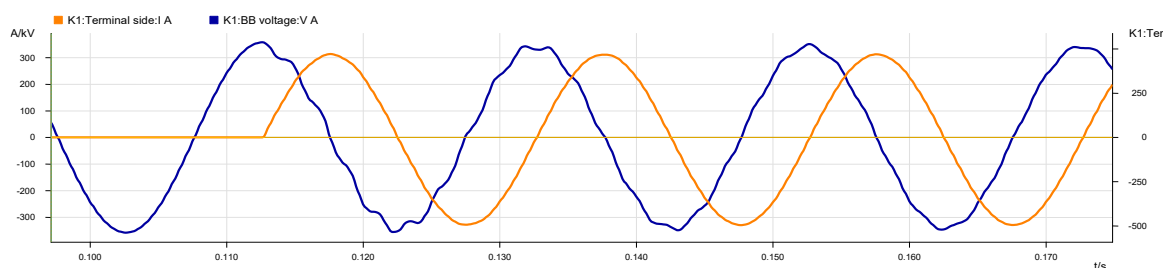
Поређењем таласних облика напона (Слика 15) и струје (Слика 16) може се закључити да се применом технике контролисаног укључења потпуно елиминише ударни период. Оптималним укључењем, изобличење таласног облика напона је готово не приметно, уз елиминацију виших хармоника.



Слика 12. Таласни облик нулте струје пригушнице најнеповољнијег (горе) и конвенционалног (доле) укључења пригушнице



Слика 13. Редослед издавања команди укључења полова прекидача



Слика 14. Тренутак успостављања струје у односу на таласни облик напона

Контролисаним укључењем прекидача пригушнице ограничавају се амплитуде ударних струја на  $I_{L1} = 469 \text{ A}$ ,  $I_{L2} = 523 \text{ A}$  и  $I_{L3} = 488 \text{ A}$ . Ефективна вредност (RMS) струје укључења у првој периоди износи приближно 340 A, што одговара називној струји пригушнице.

Контролисано укључење потврђује симетричне таласне облике струја и одсуство DC компоненте. Елиминацијом транзијентног периода ограничава се вредност ударне струје проводника за уземљење пригушнице на  $I_N = 358 \text{ A}$  (Слика 17).

Са осцилографског записа се може приметити да је импулс транзијента нулте струје трајао приближно 6 ms у случају оптималног укључења, док је на

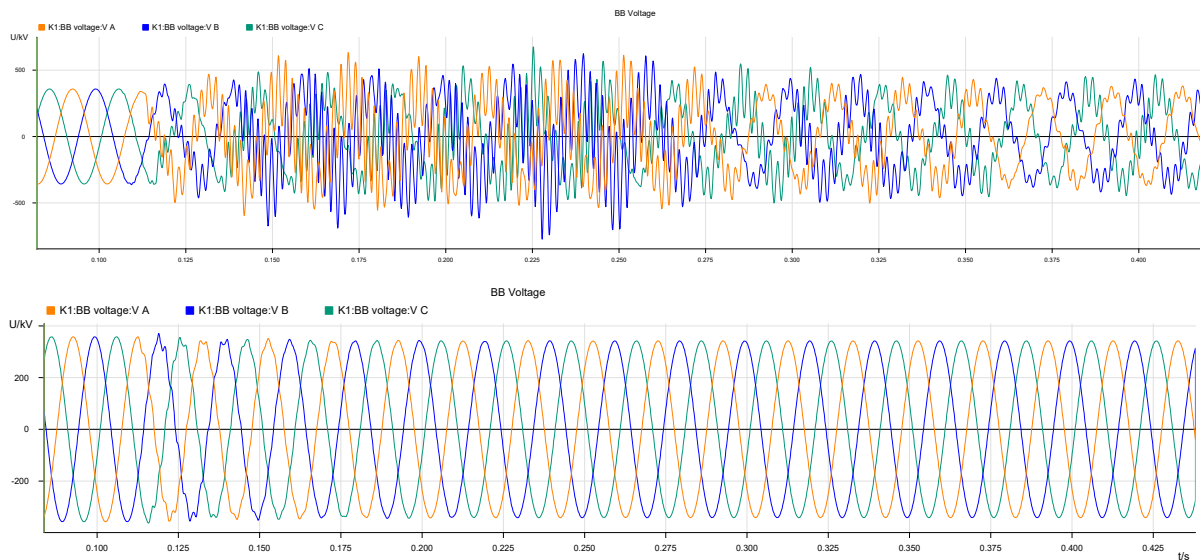
примеру најнеповољнијег трајао дужи од 500 ms. Тачно време није измерено јер је трајање записа ограничено.

Утицај примене контролисаног укључења на ограничавање вредности ударне струје пригушнице може се сагледати поређењем измерених вредности све три стратегије испитане на лабораторијском моделу (Табела VI).

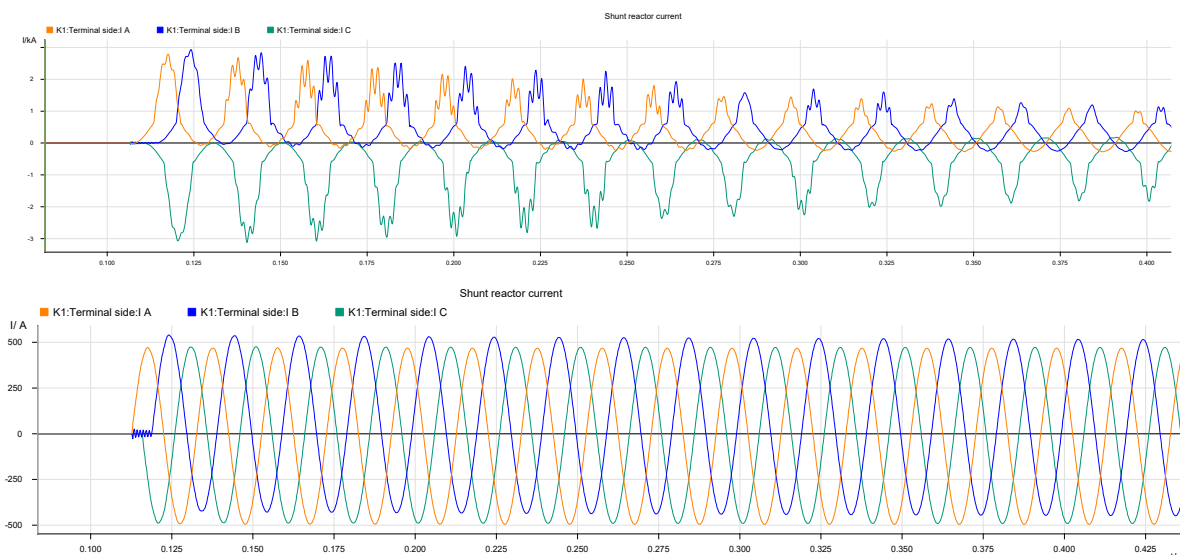
Максимална вредност ударне струје је 3,80 kA, док се контролисаним укључењем она ограничава на максимално измерена 0,52 kA. Такође, сузбијање несиметрије струја доводи до ограничавања вредности ударне струје проводника за уземљење пригушнице са  $I_N = 3,33 \text{ kA}$  на  $I_N = 0,36 \text{ kA}$ .

Табела VI Вредности ударних струја пригушнице

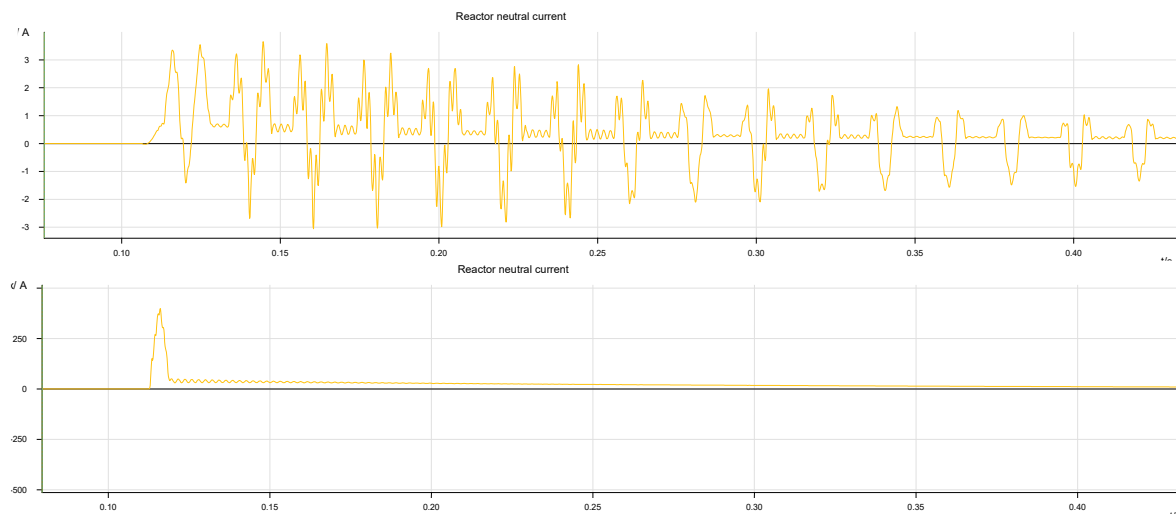
| Ударна струја пригушнице                 | Фаза L1 [kA] | Фаза L2 [kA] | Фаза L3 [kA] | $I_N$ [kA] |
|------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|------------|
| Конвенционално – неконтролисано укључење | 1,63         | 2,88         | 0,95         | 1,86       |
| Контролисано – најнеповољније укључење   | 3,47         | 3,64         | 3,80         | 3,33       |
| Контролисано – оптимално укључење        | 0,47         | 0,52         | 0,42         | 0,36       |



Слика 15. Таласни облици напона најнеповољнијег (горе) и оптималног (доле) укључења пригушнице



Слика 16. Таласни облици струје најнеповољнијег (горе) и оптималног (доле) укључења пригушнице



Слика 17. Таласни облик нулте струје пригушнице најнеповољнијег (горе) и оптималног (доле) укључења

## 6. ЗАКЉУЧАК

Конвенционално (неконтролисано) укључење прекидача је насумичне природе, односно таласни облици зависе од вредности напона у тренутку укључења. Генерално посматрано, неконтролисано укључење доводи до значајног изобличења таласних облика напона праћеног дуготрајним прелазним процесом и високим вредностима ударних струја које достижу десетоструку вредност називне струје. Уочене су вредности струја проводника неутралне тачке од 1,86 kA које услед дугачког трајања ударног периода могу довести до непотребног реаговања релејне заштите.

Од великог значаја показала су се испитивања контролисаног укључења у најнеповољнијем тренутку. Тиме су добијени доследни резултати који пружају могућност анализе утицаја примене оптималног (*Point-on-Wave*) укључења. Резултати испитивања навели су ауторе да стекну увид у кључну улогу прецизне координације параметара контролера и времена прекидача. Свака разлика подешеног и стварног времена укључења прекидача од 1 ms рефлектује се као одступање од 18° у односу на оптимални тренутак укључења. Употреба контролера са погрешно подешеним параметрима резултује израженијим склопним транзијентом у односу на насумично укључење.

Анализом осцилографских записа три различите стратегије укључења прекидача пригушнице 400 kV, односно поређењем таласних облика и вредности ударних струја, потврђена је потпуна елиминација ударног периода применом технике контролисаног укључења. Са даљим развојем технологије долази до повећања флексибилности, поузданости и једноставности примене, уз истовремено смањење укупних трошкова имплементације, што омогућава њену ширу примену у оквиру електроенергетског система.

На крају треба истаћи да искључење прекидача пригушнице такође доноси изазове као што су „одсецање” индуктивне струје, ограничавање повратног напона и поновно паљења електричног лука. Управо ће ови проблеми бити предмет истраживања аутора у наредном периоду.

## ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад је финансијски подржан од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије, бр. уговора: 451-03-137/2025-03/200103.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] European Network of Transmission System Operators for Electricity: „Controlled Switching Device: Application, Use And Maintenance Problems”, Final 16 November 2022.
- [2] Yahiou A., Mellaha H., Bayadib A., „Inrush Current Reduction by a Point-on-Wave Energization Strategy and Sequential Phase Shifting in Three-Phase Transformer”, *International Journal of Electrical Engineering*, Vol. 35 No. 12, p.p. 2321-2328, December 2022.
- [3] Dhotre D., Rajguru G., Belhekar V., Kulkarni P., „Reduction of Transient Inrush Current in Transformer Using Point-on-Wave Switching Method”, *International Journal of Scientific Development and Research*, Vol. 2 No. 5, p.p. 433 – 436, May 2017.
- [4] SIPROTEC 5 Point-On-Wave Switching Manual V9.90, document reference C53000-H5040-C082-7, edition 11. 2024.
- [5] Goldsworthy D., Roseburg T., „Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Application Examples and Benefits”, *34<sup>th</sup> Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, Washington, October 2007.
- [6] Faiz M., Chang, A. Q., Mirjat, B. A., Memon N., „The Simulation Analysis of Shunt Reactor Controlled Switching at 500 kV Network”, *International Journal of Electrical Engineering & Emerging Technology*, Vol. 05, No. 02, p.p. 31-37, December 2022.
- [7] Kumar A., Perveen R., Parikh U., „Controlled Switching of Power Transformer and Shunt Reactors for Minimization of Switching Transients: A Review”, *Journal of The Institution of Engineers (India)*, Vol. 103, p.p. 1013–1024, October 2021.

## БИОГРАФИЈЕ



**Урош Његован** је рођен у Панчеву 1990. године. У родном граду је завршио гимназију. Даље школовање наставља на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, где завршава основне и мастер академске студије. Године 2024. на истом факултету започиње

докторске студије на Одсеку за енергетику. Тренутно је запослен у компанији „Siemens Energy d. o. o. Beograd”. Области рада и интересовања су му релејна заштита и дигитализација електроенергетских постројења.

ORCID: 0009-0000-5626-0969



**Зоран Стојановић** је рођен у Пожаревцу 1979. године. Гимназију општег смера завршио је у Свилајнцу. Дипломирао је, магистрирао и докторирао на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 2003, 2009. и 2012, респективно. У звање редовног професора на истом

факултету изабран је 2022, док као гостујући професор предаје на Електротехничком факултету Универзитета у Бањалуци, Факултету техничких наука Универзитета у Новом Саду и Електронском факултету Универзитета у Нишу. Области његовог стручног и научног интересовања су релејна заштита, разводна постројења, дигитална обрада сигнала, мониторинг и дијагностика високонапонске опреме.

ORCID: 0000-0003-2432-394X



**Александар Марјановић** је рођен у Београду 1991. године. Завршио је основну школу и гимназију у Ваљеву. Студије наставља на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, где завршава основне и мастер студије. На истом факултету 2024. године започиње докторске студије на

Одсеку за енергетику. Тренутно је запослен у компанији „Siemens d. o. o. Beograd”. Области рада и интересовања су му управљање електроенергетским системом и постројењима, дигитализација електроенергетских постројења, интеграција обновљивих извора и складишта електричне енергије, као и управљање микромрежама.

ORCID: 0009-0004-3318-8967



Uroš N. Njegovan<sup>1,2</sup>, Zoran N. Stojanović<sup>1</sup>, Aleksandar D. Marjanović<sup>1,3</sup>

# Mitigation of Switching Transients Using Point-on-Wave Controlled Circuit Breaker Closing

<sup>1</sup>University of Belgrade – School of Electrical Engineering, Belgrade\*

<sup>2</sup> Siemens Energy d.o.o. Beograd – Belgrade, Serbia

<sup>3</sup> Siemens d.o.o. Beograd – Belgrade, Serbia

Original scientific research article

## Highlights

- Effects of switching transients caused by the connection of different loads are presented
- The technique of controlled circuit breaker switching is described
- The effects of applying the technique were tested on a real-time simulator
- Compared controller and conventional shunt reactor circuit breaker switching

## Abstract

*Transmission lines loaded below their surge impedance present a significant source of reactive power in the network, that can lead to local voltage increase. Transmission system operators around the world turn to shunt reactors in combination with a conventional high-voltage circuit breakers to cope with voltage issues. Implementation of such solution introduces a significant increase in the number of switching transients. Using controlled switching technology (Point-on-Wave), through individual switching of each breaker pole at optimal time, it is possible to limit reactor inrush current when shunt reactor is energized and the recovery voltage when it is de-energized. The paper presents the negative effects of uncontrolled switching of shunt reactor on transmission system. The technique of controlling the timing of circuit breaker switching is presented as a tool to mitigate the negative effects of switching transients. The algorithm for controlled switching of the circuit breaker has been tested in the laboratory. The test setup consists of a Point-on-Wave Intelligent Electronic Device (IED) and HIL (Hardware-in-the-Loop) device used to simulate 400 kV shunt reactor and circuit breaker. The devices exchange information using IEC 61850 Sampled Values and GOOSE protocol. Experimental results confirm limitation of inrush current magnitude when shunt reactor is energized by controlled switching device.*

### *Keywords*

**Controlled switching, Hardware-in-the-Loop, Point-on-Wave, Reactor inrush, Shunt reactor**

**Note:**

This article represents an expanded, improved and additionally peer-reviewed version of the paper "*Application of Controlled (Point on Wave) Switching for 400 kV Shunt Reactor*" (<https://doi.org/10.2478/cigre37-b5-08-08>), awarded by Expert Committee EC-B5 *Protection and Automation* at the 37<sup>th</sup> CIGRE Serbia Conference, Zlatibor, May 26-30, 2025

Received: December 26<sup>th</sup>, 2025      Reviewed: March 19<sup>th</sup>, 2026

Modified: May 6<sup>th</sup>, 2026

Accepted: May 12<sup>th</sup>, 2026

\*Corresponding author: Uroš N. Njegovan, +381 60/81-70-242

E - mail: [uros.njegovan@siemens-energy.com](mailto:uros.njegovan@siemens-energy.com)

