



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



Иван Тодоровић

**Управљање претварачем којим се
остварује подршка дистрибутивној мрежи
током поремећаја**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Нови Сад, 2018.



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска документација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Иван Тодоровић
Ментор, МН:	др Стеван Грабић, ванредни професор
Наслов рада, НР:	Управљање претварачем којим се остварује подршка дистрибутивној мрежи током поремећаја
Језик публикације, ЈП:	српски
Језик извода, ЈИ:	српски
Земља публикавања, ЗП:	Република Србија
Уже географско подручје, УГП:	АП Војводина
Година, ГО:	2018.
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	7/116/119/23/106/0/1
Научна област, НО:	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Енергетска електроника и електроенергетика
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Трофазни инвертор, управљачки алгоритми, дистрибуирани генератори, обновљиви извори, кварови у дистрибутивној мрежи
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука, Нови Сад
Важна напомена, ВН:	
Извод, ИЗ:	<p>Предложен контролни алгоритам за инвертор повезан на мрежу омогућава реализацију сваког профила контролисаних електричних величина који је у домену физичких могућности дистрибуираног извора. Другим речима, управљачки програм не обезбеђује остваривање дискретног спектра режима, као што је то до сада био случај са решењима предложеним у научној литератури, већ омогућава сигурну производњу произвољног профила фазних струја и напона. Показано је да предложено решење задовољава најстроже релевантне законске регулативе. У раду је анализиран већи број функционалности и испитан је њихов утицај на процес производње електричне енергије с акцентом на хаваријске режиме. Разматрана је интеракција дистрибуираних изво-ра и дистрибутивне мреже у режимима са поремећајима и приложен је већи број експерименталних резултата прикупљених употребом <i>HIL</i> окружења.</p>
Датум прихватања теме, ДП:	16.10.2017.
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: др Владимир Катић, редовни професор
	Члан: др Небојша Митровић, редовни професор
	Члан: др Думнић Борис, доцент
	Члан: др Марко Векић, доцент
	Члан, ментор: др Стеван Грабић, ванредни професор
	Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents code, CC :	PhD thesis
Author, AU :	Ivan Todorović
Mentor, MN :	Stevan Grabić, PhD, associate professor
Title, TI :	Grid-connected converter control pertinent to distribution network support during disturbances
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Autonomous Province of Vojvodina
Publication year, PY :	2018.
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	7/116/119/23/106/0/1
Scientific field, SF :	Electrical engineering
Scientific discipline, SD :	Power electronics and power systems
Subject/Key words, S/KW :	Three-phase inverter, control algorithms, distributed generation, renewable energy sources, distribution network faults
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences
Note, N :	
Abstract, AB :	<p>Proposed grid-connected inverter control algorithm enables production of any controlled variables' profile that is in the domain of converter's physical capabilities. In other words, the control program does not allow only for a narrow spectrum of different working regimes to be realized, as it was the case previously with the solutions proposed in the literature, but can result in a safe production of arbitrary meaningful phase currents and voltages profiles. It was demonstrated that the proposed solution satisfies the most stringent of the Grid Codes. Furthermore, advanced functionalities not addressed in the Grid Codes were also analysed and the influence of those functionalities' application on the process of the energy production during the grid faults was evaluated in the dissertation. Interaction between the distributed generation units and the distribution network was studied and a number of HIL experimental results are provided.</p>
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	16.10.2017.
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	President: Vladimir Katić, PhD, full professor
	Member: Nebojša Mitrović, PhD, full professor
	Member: Boris Dumnić, PhD, assistant professor
	Member: Marko Vekić, PhD, assistant professor
	Member, Mentor: Stevan Grabić, PhD, associate professor
	Mentor's sign

Садржај

1. Увод.....	1
1.1. Оправданост и циљ истраживања	3
1.2. Организација рада.....	6
2. Управљачки алгоритам инвертора повезаног на мрежу	8
2.1. Захтеви при повезивању дистрибуираних извора на електричну мрежу	10
2.2. Синтеза контролног алгоритма	16
2.2.1. Синхронизациона јединица	18
2.2.2. Регулација напона једносмерног кола	25
2.2.3. Регулација напона са наизменичне стране инвертора.....	28
2.2.4. Регулација фазних струја	30
3. Прорачун струјних референци	39
4. Примена предложених решења и потврда на експерименталној поставци	52
4.1. Топологије коришћених поставки.....	54
4.1.1. Емулациони модел дистрибуираног извора повезаног на круту мрежу.....	54
4.1.2. Емулациони модел дистрибутивне мреже са три дистрибуирана извора	57
4.2. Верификација испуњености основних захтева у току поремећаја.....	61
4.3. Анализа напредних функционалности контролног алгоритма	72
4.3.1. Приоритизација производње активне или реактивне снаге, с освртом на осцилације у снагама	74
4.3.2. Одржавање константног фактора снаге, с освртом на осцилације у снагама	81
4.3.3. Дефинисање односа позитивних и негативних компоненти струја којима се реализују референце снага.....	87
5. Закључак.....	95
6. Прилози.....	98
7. Литература.....	109

1. Увод

Утрошак енергије читаве људске цивилизације у току 1990. године је процењен на 100.000 TWh. У току 2015. године потрошено је око 150.000 TWh, док умерене прогнозе процењују да ће у 2040. години човечанство реализовати 230.000 TWh енергије [1]. У раздобљу од 1975. године до 2015. године, производња три најзначајнија енергента је драматично порасла - производња нафте увећана је са 30.000 TWh на 50.000 TWh, производња угља је порасла са 15.000 TWh на 40.000 TWh, док је производња природног гаса порасла са 10.000 TWh на 35.000 TWh [2]. Овакав тренд у промени производње енергије је последица многих технолошких, социо-економских и културолошких промена. Иако ефикасност свих система за производњу, конзервацију, транспорт и конверзију енергије расте [3], она не може ни приближно да неутралише вакуум и потребу за енергијом која се ствара у потрошачком подсистему. Умерено оптимистичне прогнозе предвиђају да ће пораст у производњи, односно потрошњи енергије расти приближно док буде раста у броју становника на земљи.

Заједно са порастом експлоатације поменути три, за сада најзначајнија, енергента расла је и производња електричне енергије. Од краја двадесетог века до данас, од укупне количине произведеног угља, око 40% се користи за производњу електричне енергије, док је у случају природног гаса тај удео 23% [4]. На пример, у периоду од 1975. године до 2015., године количина електричне енергије која је произведена коришћењем угља је порасла са 4.000 TWh на 16.000 TWh годишње. Са друге стране, у најмању руку линеаран, а најчешће експоненцијалан пораст може се уочити и у инсталисаној снази погона за производњу електричне енергије који су базирани на другим енергентима. У истом периоду, производња хидроцентрала је порасла са 1.250 TWh на 4.000 TWh, а производња нуклеарних електрана се повећала са 250 TWh на 2.500 TWh годишње. Значајна експлоатација ветра за производњу електричне енергије је започета почетком двадесет и првог века и данас износи око 800 TWh. Слично, производња електрана које користе енергију сунца је почетком двадесет и првог века била занемарљива, а данас ове електране производе око 250 TWh електричне енергије [5]. Кумулативно, процењује се да ће производња електричне енергије скочити са 20.000 TWh (2015. година) на 40.000 TWh (2040. година) [6]. Ипак, поменути трендови пораста употребе фосилних горива и производње електричне енергије, који су до сада били усаглашени, у следећих неколико деценија постаће комплементарни.

Досадашњи највећи конзументи енергије генерално су били индустријска подручја, транспортна средства и стамбена подручја. Сва три конзумента пролазе кроз убрзан процес електрификације, односно кроз процес све интензивније употребе склопова код којих је улазна енергија електрична енергија. Дакле, утрошак електричне енергије ће расти барем до краја двадесет и првог века, како по оптимистичним, тако и по песимистичним прогнозама [7]. Са друге стране, употреба фосилних горива ће расти у првој половини двадесет и првог века, али темпом који је мањи од пораста у потрошњи електричне енергије и свакако мањи од пораста у употреби фосилних горива који је забележен у току двадесетог века. У другој половини двадесет и првог века очекује се пад у употреби фосилних горива. Груба процена је да ће резерве нафте моћи рационално да се експлоатишу до 2060. године, резерве природног гаса до 2070. године, а да ће резерве угља бити истрошене 2090. године [4]. Колико нагло и када тачно ће доћи до престанка употребе фосилних горива врло је тешко прогноzirати, али еколошки фактори и истрошеност ресурса ће дефинитивно резултовати мање или више наглим падом у тренду употребе ових енергената.

Неусаглашеност у порасту потражње за електричном енергијом и ограниченост раста, или чак пада, у коришћењу фосилних горива биће разрешена коришћењем других енергетских ресурса.

Нуклеарне централе, хидроцентрале, ветропаркови и соларни паркови ће доминирати у компензацији недовољне производње електричне енергије из електрана које користе фосилна горива, мада није јасно у ком односу ће ови ресурси расподелити производњу. Главни фактор у повећању употребе одређеног ресурса који не користи фосилна горива је његов технолошки развој,

односно зрелост технологије, као и његов еколошки утицај. Рад нуклеарних електрана које електричну енергију генеришу користећи фузију још увек није комерцијално презентован. Јавно мњење је резервисано по питању изградње нових електрана које користе фузију услед катастрофалних последица до којих долази у хаваријским ситуацијама. Осим тога, напредак у технологији одлагања нуклеарног отпада је скроман. Ефикасност соларних панела је на нивоу од 20% већ дужи низ година. Техничка ограничења при експлоатацији до сада неискоришћених водених токова делују тешко решива. Када и у ком обиму ће се пронаћи решења за поменуте проблеме немогуће је предвидети, те је тешко у потпуности претпоставити структуру производних капацитета у следећих педесет и више година. Ипак, сигурно је да ће нуклеарна енергија и енергија обновљивих извора бити све више експлоатисана, упркос техничким и технолошким ограничењима. У прилог овој тврдњи иде и чињеница да је 2017. године процентуални раст у производњи електричне енергије из соларних електрана већи од процентуалног пораста у производњи електричне енергије из угља [5]. Оптимистичне анализе процењују да ће 2022. године производња електричне енергије из обновљивих извора (укључујући и енергију речних токова) бити мања само за 17% од производње електричне енергије засноване на угљу [5]. Од обновљивих извора (у ширем смислу), осим енергије речних токова, енергије ветра и сунца, користиће се и извори који се базирају на геотермалној енергији, енергији биомасе, енергији таласа и енергији плиме и осеке [6]. Врло значајна карактеристика обновљивих извора (изузимајући хидроцентралне) је та што они нису везани за изворишта фосилних енергената нити за велике водене токове. Они су често постављени близу потрошачких подручја, чиме се превазилази традиционална просторна раздвојеност између производних погона и потрошачких подручја. Управо због овакве територијалне распоређености једног дела обновљивих извора и њихове повезаности на дистрибутивну, а не преносну мрежу, они се често називају дистрибуираним изворима електричне енергије.

Поред реструктурирања, диверсификације и модернизације производних јединица енергетског, нарочито електроенергетског система, значајне промене се дешавају и у другим подсистемима. Раније је поменута промена типа потрошача - удео потрошача који користе електричну енергију убрзано расте. Узрок овој промени је првенствено висок степен корисног дејства електричних уређаја и склопова, њихова контролабилност и чистота при раду. Како би се решиле потешкоће са интермитентношћу и стохастичношћу производње обновљивих извора, неопходна су многобројна унапређења на пољу транспорта и акумулације електричне енергије. Ублажавање осцилација у производњи електричне енергије, које су неизбежне код соларних и ветроелектрана, се може реализовати коришћењем великих акумулационих система базираних на батеријама. Ови системи омогућавају брзу акумулацију велике количине енергије у периодима када је производња већа од потрошње и ослобађање акумулисане енергије када је производња енергије нижа од потражње. Овакви системи су до сада били незамисливи услед високе цене батерија, али тржишни притисак и корисност функционалности које ови системи уводе је резултовала тиме да је већи број вишемегатних погона пуштено у рад само у 2017. години [8]. Осим тога, употребом софистицираних интерконективних система додатно се остварује расплињавање проблема локалног дефицита у производњи електричне енергије услед неповољних временских прилика. Другим речима, размена електричне енергије путем разгранате мреже која повезује раније изоловане електроенергетске системе ће резултовати поузданијом испоруком електричне енергије. Нарочито значајну улогу у преносу енергије у овом контексту имаће високонапонске једносмерне мреже. Пренос електричне енергије више се не реализује искључиво путем наизменичних, већ и путем једносмерних мрежа [9]-[10].

Дакле, радикалне промене читаве енергетске инфраструктуре су неизбежне. Као резултат цивилизацијског развоја, захтеви за производњом енергије расту, при чему ограниченост ресурса фосилних горива и њихова штетност по екосистем форсирају проналажење нових извора енергије и тиме промену производне парадигме која је коришћена током двадесетог и почетком двадесет и првог века. С друге стране, све већа употреба потрошача који захтевају електричну енергију и све израженија употреба обновљивих извора електричне енергије резултује развојем и модернизацијом потрошачких подручја, али и преносног дела електроенергетског система.

1.1. Оправданост и циљ истраживања

Поменуте промене у оквиру електроенергетског система су омогућене кумулативним развојем многих технологија које су постале интегрални део електроенергетског система у ширем смислу. На пример, савремени енергетски системи су прожети рачунарским системима. Они служе за управљање, надгледање, координисање и оптимизовање рада енергетског система на свим нивоима. Електроенергетски систем више не може да функционише независно од софтверске архитектуре и стабилност рада самог система у великој мери зависи од степена развијености програма који руководе његовим радом [11]. Телекомуникациони системи и комуникациони протоколи представљају канале за размену информација које су од суштинског значаја за исправан рад система и представљају алат за аквизицију података који су значајни за анализу квалитета рада система и његову краткорочну и дугорочну оптимизацију. Дистрибуирани економски системи, који ће у извесном обиму дефинисати производне профиле електрана, такође ће експлоатисати ове комуникационе канале. Брзина протока података и робустност употребљених телекомуникационих технологија ће у најмању руку утицати на флуидност рада енергетског система [12]. Затим, услед територијалне разгранатости и разуђености електроенергетског система, као и осетљивости рачунарских склопова на малициозне интервенције, захтева се модернизација заштитних мера које осигуравају неометано циркулисање енергије. Енергетска зависност великих потрошачких подручја ће енергетске системе учинити повољном метом за разне врсте напада, те ће сваки сегмент бити појачан хардверском и софтверском заштитом [13].

Ипак, развојни импулс електроенергетског система биће остварен првенствено развојем електроенергетских подсклопова и елемената у ужем сислу. Производни системи трпе значајну трансформацију кроз имплементацију новоразвијених система за генерисање електричне енергије, а који се базирају на обновљивим изборима енергије. Истраживачи улажу значајан напор у развој соларних панела. Огромна средства су уложена у развој система који користе енергију сунца за генерисање електричне енергије [14]. У складу са тиме, истраживачи улажу много труда у повећање ефикасности процеса конверзије који се одвија у овим системима [15]-[17]. За механичке склопове ветрогенератора, првенствено елисе, развијају се нови материјали и структуре које повећавају еластичност и смањују тежину ових елемената без деградације других механичких карактеристика [18]. Сличан тренд у развоју материјала и склопова може се уочити у случају електрана које користе енергију мора и океана. Велик број истраживача ради на унапређењу технолошких процеса који се користе при екстракцији енергије из извора који су до сада били практично некоришћени - енергије геотермалних извора и енергије биомаса. Максимизација екстракције енергије из биомаса је корисна не само због саме енергетске искоришћености, већ и због чињенице да енергетски осиромашена биомаса најчешће представља еколошки повољнији отпад. Осим производних, и преносни системи ће бити драстично трансформисани и унапређени. Енергетска подмиреност свих потрошачких подручја у динамичној и агилној мрежи биће остварена кроз употребу сложених интерконективних механизма, модерне заштитне и склопне опреме и нарочито кроз употребу једносмерних мрежа и њима придружених технологија. Више високонапонских једносмерних мрежа, или прецизније водова, је имплементирано у свету [19]. Ипак, само део проблема везаних за коришћење ових система је решен. Нарочито занимљиве потешкоће које се јављају при коришћењу једносмерних мрежа су оне везане за опслуживање хаваријских ситуација и повезивање ових мрежа са постојећом наизменичном мрежом. Како су производни (доминантно) и потрошачки (половично) системи наизменични, повезивање ова два система једносмерним системима изискује употребу уређаја енергетске електронике, те дефинисање тополошких и контролних карактеристика ових склопова. Стохастичност обновљивих извора природно намеће потребу за употребу акумулационих система, тако да и ови системи захтевају иновативна решења. До сада су акумулациони системи подразумевали акумулацију у виду акумулационих језера. Брзина апсорпције и отпуштања енергије акумулационих језера је мала и њихова употреба је дефинитивно непрактична услед територијалних и теренских ограничења. Тек развојем материјала од којих се праве батерије, велики динамични акумулациони системи постаће исплативи и примењиви у пракси. И на овом месту ће се интеграција нових технологија остварити кроз употребу енергетске електронике - како су батерије једносмерни

извори, њихово повезивање на доминантно наизменичну мрежу захтева употребу инвертора. Повећање капацитета и смањење времена пуњења батерија је значајно и за потрошачки аспект система, зато што омогућује интензивну електрификацију потрошача, нарочито транспортних средстава. Поред увећаног тржишног присуства батерија, притисак на потискивање транспортних средстава која користе моторе са унутрашњим сагоревањем оствариће се и кроз законске регулативе и субвенције. Ово ће опет резултовати увећаним интересовањем за погоне који нису базирани на фосилним горивима. Осим батерија, комерцијално ће се користити и гориве ћелије, замајци, суперкондензатори.

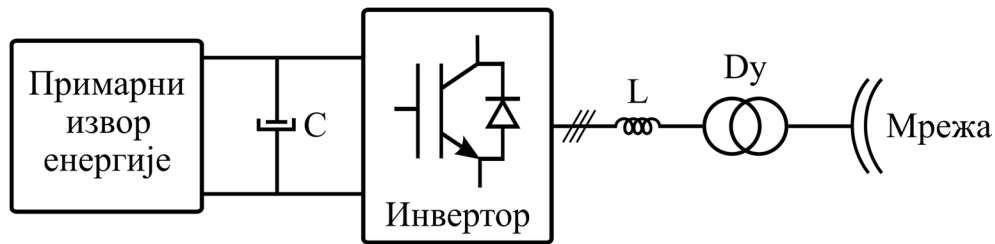
Дакле, извесно је да ће сваки од поменутих сегмената захтевати интензиван и специфичан технолошки развој како би се обезбедила подмиреност енергетских потреба друштва, при чему приказано виђење стања електроенергетског система и његовог развоја дефинитивно не пружа исцрпну листу области које ће морати да се унапреде и технологија која захтевају развој.

Ова дисертација се фокусира на један од проблема који условљавају развој електроенергетског система - на проблем повезивања дистрибуираних извора електричне енергије и наизменичне електричне мреже.

Раније је напоменуто да уређаји енергетске електронике учествују у интеграцији акумулационих система у наизменичну мрежу и у повезивању једносмерних и наизменичних преносних мрежа. Ови уређаји, поред других функција, имају улогу и у кондиционирању електричне енергије, како при потрошњи, тако и при производњи енергије, нарочито оне која је произведена од стране обновљивих извора. Оптимална радна тачка ветротурбине варира са променом брзине ветра. Услед тога, како би се генерисала максимална могућа количина електричне енергије за тренутну вредност брзине ветра, у већој или мањој мери варира и брзина обртања вратила генератора, а тиме и фреквенција произведеног напона. С обзиром да је фреквенција наизменичне мреже фиксна, јавља се проблем неусклађености фреквенције произведеног напона и фреквенције напона мреже. Једно од решења је да се мрежа и генератор распрегну и да се електрична енергија произведена од стране ветрогенератора прилагоди мрежи посредством уређаја енергетске електронике. Осим тога, директна повезаност генератора на мрежу, иако је технички могућа кроз употребу сложених механичких преносних механизма, представља опасност за генератор у хаваријским ситуацијама. У случају квара у мрежи на коју је генератор директно повезан, квар може несметано да пропагира и ка генератору и да доведе до његовог уништења или оштећења уколико заштитна опрема не одреагује благовремено. У оваквим ситуацијама уређаји енергетске електронике играју и улогу „енергетског бафера“ и спречавају пропацију квара ка самом генератору. Ова функционалност је корисна и у случају геотермалних извора, извора који користе биомасу и извора који користе енергију таласа и енергију плиме и осеке. Са друге стране, соларни панели су по природи извори једносмерног напона. Како би се енергија произведена од стране соларних електрана допремила до потрошача путем постојеће наизменичне мреже, неопходна је употреба уређаја енергетске електронике. Другим речима, употреба енергетске електронике је сврсисходна без обзира о ком се дистрибуираном извору електричне енергије ради. Једини инхерентни недостатак употребе уређаја енергетске електронике се огледа у томе што њихова употреба смањује степен корисног дејства целокупног система. Ипак, вредност степена корисног дејства ових склопова је врло висок, те остварени губици у енергији не представљају значајан недостатак [20].

Слика 1.1. даје упрошћену шему једног погона са дистрибуираним извором повезаним на електричну мрежу путем уређаја енергетске електронике. Било да се ради о соларном панелу, ветрогенератору или неком другом дистрибуираном извору енергије, спона извора са мрежом се остварује помоћу једног од најзначајнијих уређаја енергетске електронике - трофазног инвертора.

Важна је напомена да ће се у овом раду под дистрибуираним изворима подразумевати управо ови извори електричне енергије - извори који енергију инјектују у мрежу посредством уређаја енергетске електронике. Постоје и извори код којих уређаји енергетске електронике нису од круцијалног значаја (на пример, синхрони генератор ветроелектране директно повезан на мрежу), али је број ових апликација мали и има тенденцију даљег опадања, те се стога неће разматрати.



Слика 1.1. Поједностављена шема повезивања примарног извора и постојеће електричне мреже.

Трофазни инвертор је склоп који производи наизменични напон, променљиве фреквенције и амплитуде користећи улазни једносмерни напон. Узимајући у обзир да је хардверски део инвертора састављен првенствено од контролабилних полупроводничких компоненти (транзистора), постаје јасно да је за правилно генерисање поменутог напона неопходан и софтверски подсклоп. Софтверски део, односно контролни алгоритам управља радом транзистора поштујући извесне смернице. Првенствено, реализован напон треба да резултује контролисаном производњом струја које се инјектују у мрежу, односно контролисаном производњом активне и реактивне снаге. Основна функција инвертора је производња активне снаге која одговара производњи активне снаге примарног извора енергије. Овим путем се искоришћава производни потенцијал обновљивих извора енергије. Ова активна снага се након преноса кроз електричну мрежу у потрошачким подручјима користи за конверзију електричне енергије у механичку, топлотну енергију и светлосну енергију. Сами потрошачи, осим активне, троше и реактивну снагу, првенствено за магнетизацију магнетних кола трансформатора и електромеханичких претварача. Производњом реактивне снаге од стране дистрибуираних извора растеређују се преносни системи који повезују велике, централизоване, производне системе и потрошаче и тиме се ослобађају капацитети за пренос активне снаге. Осим тога, производња реактивне снаге од стране дистрибуираних извора, кондензаторских батерија и других система, има и регулаторну улогу у електричној мрежи. Адекватном инјекцијом реактивне снаге се у нехаваријским режимима регулишу напонске прилике у чворовима мреже чиме се утиче на њену стабилност и контролисано реализовање жељених токова снаге [21]-[23]. Другим речима, осим активне снаге, у разним ситуацијама се од дистрибуираних извора може захтевати и производња реактивне снаге, при чему је значајно напоменути да је производња реактивне снаге независна од производње примарног извора енергије. До сада споменуте функционалности се односе на режиме без кварова у мрежи, односно нехаваријске режиме, и у овом контексту дистрибуирани извори представљају зrelu технологију. Управљачки алгоритам који регулише рад једног дистрибуираног извора, а који у нехаваријском режиму има задатак да инјектује у мрежу активну снагу произведену од стране примарног извора или да произведе задату реактивну снагу у складу са командама диспечера како би се регулисао напонски ниво на одређеним сабирницама је једноставно решив проблем.

Дефинисање контролног алгоритма који треба да руководи радом трофазног инвертора и дистрибуираног извора у хаваријским или неноминалним режимима је нешто сложенији проблем који је постао актуелан тек са значајним повећањем инсталисане снаге дистрибуираних извора и са повећањем њиховог удела у производњи електричне енергије. Са овим порастом расла је и могућност њиховог стабилишућег или дестабилишућег утицаја на електричну мрежу. Присуство дистрибуираних извора у мрежи која је захваћена кваром или генерално у мрежи чија радна тачка није у опсегу номиналних радних тачака, може да има снажно палијативно дејство, али може и да допринесе пропагацији хаваријског режима и додатном погоршању радних услова - све у зависности како су дизајнирани поменути контролни алгоритми [24]-[26]. У складу са тиме, законске регулативе које дефинишу смернице које дистрибуирани извори морају да прате и поштују, захтевају да инвертори остану повезани на електричну мрежу, чак и у случају озбиљних кварова. Уколико би се у хаваријским режимима дозволило одспајање дистрибуираних извора од електричне мреже, ови извори не би могли да допринесу ублажавању ефеката квара. Поврх тога, одспајање инвертора од мреже би само по себи представљало поремећај који би додатно дестабилизовао рад електричне мреже. На пример, у случају кратких спојева у мрежи, пропади напона би могли да

иницирају одспајање извора који су повезани на ту електричну мрежу. У оваквом сценарију, дистрибуирани извори не би могли да допринесу побољшању напонских прилика у мрежи кроз производњу адекватног профила активне и реактивне снаге. Осим тога, одспајање извора би свакако допринело додатном паду напона, односно дошло би до убрзане пропагације квара и озбиљнијег напонског колапса у мрежи [27]-[28]. Дакле, од контролних алгоритама се очекује да обезбеде сигуран рад дистрибуираног извора у номиналним и неноминалним режимима, без одспајања од електричне мреже све док је то физички могуће, и да резултују генерисањем активне и реактивне снаге које ће имати амортизујуће дејство на ефекте кварова и других фактора који резултују деградацијом квалитета електричне енергије.

Свеобухватно, проблем који ће бити разматран и задатак ове тезе је управо дизајнирање контролног алгорита који поред основних функција, које инвертор у контексту дистрибуираних извора мора да оствари, реализује и напредне функције које руководе радом инвертора при режимима који нису номинални, а које резултују побољшањем прилика у мрежи. Студија се ослања на сценарија у којима је инвертор повезан на дистрибутивну мрежу због чињенице да је дистрибутивна мрежа подложнија појави поремећаја од преносне мреже, али и због подложности дистрибутивне мреже утицајима дистрибуираних извора услед мањег односа снаге кратког споја мреже и производних капацитета дистрибуираног извора. Мотивација за оријентисање истраживачког рада у овом правцу је пронађена у одсуству релевантних научних резултата и у значају даљег развоја електроенергетских система. Хипотеза је да дистрибуирани извори, са припадајућим управљачким алгоритмима, могу да задовоље шири опсег захтева и да постану значајан регулаторни механизам унутар електричних мрежа на које су повезани.

1.2. Организација рада

Дисертација је подељена на седам поглавља. У првом поглављу анализирана је оправданост истраживања и назначене су главне смернице и циљеви истраживања.

Друго поглавље пружа скуп премиса које служе као основа за поставку проблема и које имају улогу пропозиција на основу којих се може судити о сврсисходности понуђених решења. У овом поглављу се дефинише и полазна тачка у синтези контролног алгорита. Оно нуди апстрахован преглед законских регулатива које дефинишу исправно понашање дистрибуираних извора у номиналним и у режимима са поремећајима. Ове регулативе задају минималан скуп функционалности које дистрибуирани извор мора да реализује при повезивању на мрежу. Уколико извор не може да задовољи било који аспект ових прописа, не дозвољава се његова интеграција са постојећом електричном мрежом. Посебна пажња је посвећена документима који се примењују на европске електроенергетске системе, при чему је покушано са проналажењем оних функционалности које су заједничке за све регулативе и који имају највећи значај за електричну мрежу. Тај скуп функционалности је узет као почетна тачка за изградњу напредног контролног алгорита. У другом поглављу је дат и преглед контролне структуре, односно програма, за трофазни инвертор повезан на електричну мрежу. Анализирана је улога сваке контролне подструктуре и објашњено је како долази до њене синтезе, при чему се водило рачуна о динамичким карактеристикама подструктура и њиховој сложености. Приказана контролна структура представља алат за реализовање произвољног профила инјектованих струја, односно профила активне и реактивне снаге.

У трећем поглављу је изложено више механизма за генерисање референци снага и референци струја које треба да резултују како задовољењем поменутих законских регулатива, тако и свеобухватнијим побољшањем прилика у дистрибутивној мрежи, нарочито у току поремећаја. Поред других циљева, сви механизми имају за циљ максимизацију производње активне и реактивне снаге, узимајући у обзир тренутне прилике у мрежи. Овим се максимизира искоришћеност производних капацитета примарног извора енергије и помоћ дистрибутивној мрежи током поремећаја. Први механизам је развијен у контексту минимизације осцилација у произведеној тренутној активној или тренутној реактивној снази које могу да се јаве у току поремећаја, при чему једна од снага има предност у производњи. Други механизам резултује неизмењеним фактором

снаге пре и током поремећаја, при чему се и овде води рачуна о минимизацији осцилација једне од снага. Трећи алгоритам омогућава реализацију задате активне и реактивне снаге кроз подесив однос позитивних и негативних компоненти струја. Овај алгоритам се не осврће на осцилације у снагама, односно оне су неконтролисане, али пружа изузетну флексибилност при одабиру профила снага који ће се произвести. Предложени механизми су исцрпан скуп метода за генерисање поменутих референци и представљају главни научни допринос ове тезе.

Четврто поглавље нуди приказ *hardware-in-the-loop (HIL)* експерименталних поставки које су коришћене за испитивање стратегија развијених у трећем поглављу. Објашњене су топологије поставки и разлози за њихов одабир. Затим, ово поглавље нуди доказ о задовољењу свих пропозиција дефинисаних од стране законских регулатива које су предочене у другом поглављу. Осим тога, дискутовани и анализирани су ефекти примене предложених механизма за генерисање референци снага и струја. Користећи више тест сценарија показано је како присуство дистрибуираних извора може да утиче на унапређење извесних карактеристика радног режима мреже и у контексту који превазилази тренутно важеће норме за повезивање дистрибуираних извора на електричну мрежу.

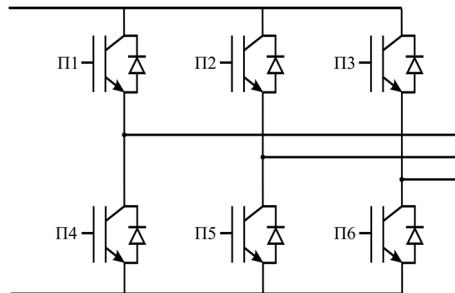
Пето поглавље садржи скуп најзначајнијих закључака до којих се дошло у току истраживања и обухвата смернице за будућа проучавања.

Шесто поглавље је резервисано за прилоге, односно информације које су од индиректног значаја за дисертацију.

Седмо поглавље нуди списак референци које су коришћене у раду и које представљају прекурсоре за ову тезу. Преглед литературе је распоређен по поглављима у складу са потребама материје која се у том поглављу обрађује. Разноликост употребљене научне грађе умањује смисленост њене анализе на једном месту. Осим тога, алоцирање коришћених референци у поглавља у којима се дубље разматрају чини разумевање и праћење текста једноставнијим.

2. Управљачки алгоритам инвертора повезаног на мрежу

У дистрибуираним изворима електричне енергије, најчешће употребљаван инвертор је трофазни, напонски, транзисторски инвертор. Први уређај овог типа је био инвертор који је производио напон са два напонска нивоа. Услед тога, коришћени су габаритни филтери како би се добиле електричне величине прихватљивог квалитета. Затим, чињеница да се напонски и струјни нивои не расподељују на велик број полупроводничких компоненти ограничавала је максималне снаге за које су ови инвертори били коришћени. Прекидачки елементи за високе и врло високе напоне и струје нису били комерцијално доступни. Са друге стране, овај инвертор је био тополошки најједноставнији и представљао је проверено технолошко решење, те је и поред његових недостатака његова употреба била заиста широка. Инвертори који производе напон са више од два нивоа се такође користе у пракси. Коришћењем ових инвертора омогућено је смањење величине филтера и обезбеђено је мање напонско и струјно напрезање компоненти и на тај начин повећање снаге читавог претварача. Ипак, са становишта контролних алгоритама, свеједно је која је топологија инвертора искоришћена. Разлике се огледају једино у сложености захтеваног модулятора, односно механизма који генерише побудне сигнале за појединачне прекидачке компоненте. Услед чињенице да је тежиште овог рада на контролном алгоритму, те услед ирелевантности топологије претварача за овај аспект дистрибуираних извора, разматраће се употреба класичног инвертора. Топологија овог инвертора је приказана на слици 2.1.



Слика 2.1. Трофазни, напонски, транзисторски инвертор са два напонска нивоа у произведеном напону.

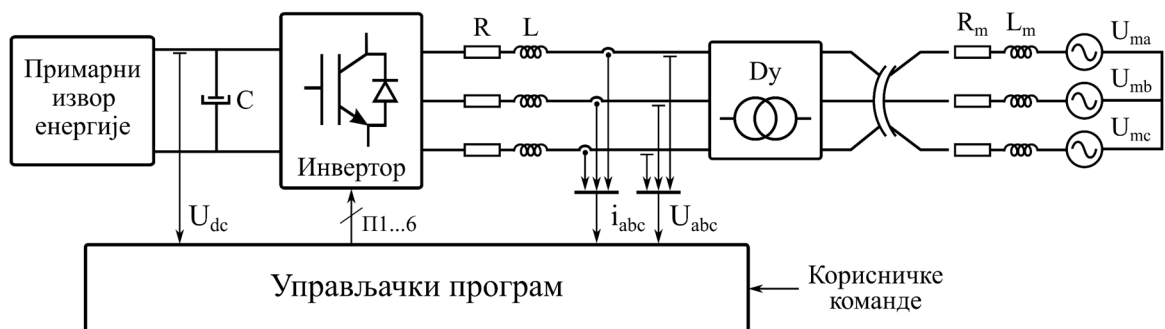
Спону између две целине - хардверског дела и управљачког програма представљају побудни сигнали за транзисторе, који су генерисани од стране управљачког програма, и измерене електричне величине које се контролишу дејством инвертора, а које су прослеђене управљачком програму од стране мерних уређаја у хардверу. На овај начин се формира класична повратна петља која за циљ има контролу извесних електричних величина. Промене у побудним сигнаlima (PI1...PI6) резултују тополошким променом инвертора, самим тим и читавог система. Ова промена резултује променама у електричним величинама од значаја за дистрибуирани извор електричне енергије. Мерни инструменти враћају информацију о контролисаним величинама у управљачки програм где се поново врши корекција побудних сигнала уколико није достигнут жељени радни режим. Уопштена шема хардвера и софтвера је дата на слици 2.2.

У случају дистрибуираних извора енергије, величине које се непосредно контролишу су инјектоване, произведене струје (i_{abc}). Другим речима, примарни циљ управљачког програма је производња фазних струја које се подударају са задатим вредностима. Услед ове улоге коју врши, разматрани инвертор се често назива струјно-контролисан напонски инвертор. Осим тога, контролни алгоритам има још један, у извесном смислу тежи задатак - дефинисање референтних вредности струја. Ове референце се дефинишу са циљем посредне реализације производње активне и реактивне снаге и контроле других електричних величина. Контролисањем производње активне снаге се врши правилна експлоатација примарног извора енергије, док производња и активне и реактивне енергије резултује изменом прилика у електричној мрежи. Дистрибуиран извор производњом извесног профила активне и реактивне снаге може да утиче на локалне напонске прилике. Осим тога, може да узме активну улогу у реализовању глобалних токова снага, користећи информације добијене од диспечера. Дакле, пројектовање утицаја дистрибуираног извора се

практично дефинише кроз успостављање механизма за одређивање струјних референци. Ипак, да би се струјне референце адекватно одредиле и како би се захтеване струје генерисале, контролни алгоритам мора да садржи и друге логичке целине и контролне структуре.

Услед пораста инсталисане снаге дистрибуираних извора и пораста њихових регулаторних капацитета порасла је потреба за строжим дефинисањем поменутих механизма који управљају њиховим радом. Дизајнерима контролних алгоритама није допуштено да по сопственом нахођењу бирају карактеристике одзива дистрибуираног извора у појединим ситуацијама. За већину великих националних електроенергетских система израђени су стандарди које дефинишу смернице за пројектовање контролних алгоритама, односно, у извесном обиму, механизма за генерисање поменутих референци струја. Дистрибуирани извори и њима припадајући контролни алгоритми морају да буду конструисани тако да њихови радни режими никада не одступају од граница дефинисаних поменутих регулативама. Ове регулативе се на енглеском зову *Grid Codes*. Како ће се реализовати поједини аспекти контролног алгоритма није значајно са становишта *Grid Code*-а, али управљачки алгоритам мора да демонстрира понашање које је у складу са ових захтевима.

У овом поглављу ће бити анализирани поједини *Grid Code*-ови, односно захтеви при повезивању дистрибуираних извора на постојећу мрежу, а који су на снази у великим електроенергетским системима. Биће издвојени најзначајнији аспекти ових стандарда, нарочито они који се односе на хаваријске ситуације услед чињенице да је у току ненормалних режима образац понашања дистрибуираних извора значајан за рад самог претварача, али и мреже на коју је претварач повезан. Заправо, поћи ће се од израде генеричког *Grid Code*-а који ће садржати инструкције које садрже готово сви анализирани *Grid Code*-ови, при чему ће се за дефинисање ових инструкција користити њихови најстрожи аналогни захтеви из постојећих регулатива. Новонастали сет инструкција ће послужити као оквир за дефинисање функционалности које контролни алгоритам *минимално* мора да поседује. Након тога ће бити анализиран контролни програм инвертора. Биће предложена структура контролног програма и биће дефинисане подструктуре које програм мора да садржи. Затим ће бити дискутовани разлози за одабир појединих, специфичних решења за те подструктуре. Резултујући управљачки програм ће представљати основни алат за остваривање циљева које задају *Grid Code*-ови и други, напреднији захтеви при регулацији рада дистрибуираних извора енергије.



Слика 2.2. Функционална повезаност хардвера и софтвера.

2.1. Захтеви при повезивању дистрибуираних извора на електричну мрежу

У овом поглављу је приложен кратак преглед актуелних *Grid Code*-ова и идентификовани су најстрожи услови за повезивање на електричну мрежу које дистрибуирани извор мора да поштује, а који се налазе у поменутим стандардима. Упркос чињеници да су принципијелно *Grid Code*-ови међусобно слични, анализа садржаја већег броја ових докумената је била неопходна услед чињенице да за извесне аспекте један *Grid Code* може да дефинише најстроже пропозиције, док за друге аспекте може да буде мање захтеван од осталих стандарда. Дакле, прегледом поменутих законских регулатива издвојени су екстремни и они су узимани у обзир приликом одређивања, у извесном смислу, генеричког *Grid Code*-а, односно стандарда чијом употребом би се задовољили захтеви сваког оператера електричне енергије, било где у свету. Неопходно је напоменути да је овај скуп функционалности, иако најстрожи са становишта постојећих регулатива, ипак минималан скуп који дистрибуирани извор мора да узме у обзир. Свакако је могуће успоставити опсежнију и сврсисходнију колекцију операција које морају да се реализују како у номиналном раду, тако и у режимима са поремећајима, али овакав скуп инструкција представља одговарајућу основу за развој контролног алгорита који не само да задовољава законске оквире, већ представља и користан алат за уочавање контролних образаца дистрибуираних извора који унапређују квалитет процеса који се одвијају између извора и електричне мреже. Осим тога, неке од смерница у *Grid Code*-овима излазе изван оквира ове дисертације и ове области електротехнике, па у складу са тиме нису разматране.

Значајан допринос развоју стандарда који дефинишу пропозиције повезивања дистрибуираних извора са преносном и дистрибутивном су дале независне институције, приватне компаније, организације и институти попут *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, *The Institution of Engineering and Technology* и *UL*. Ипак, с обзиром на опсежност посматране проблематике и узимајући у обзир област деловања оваквих ентитета, постаје јасно да је њихов утицај на трендове развоја законских регулатива ограничен. Заправо, они најчешће узимају саветодавну улогу и прилажу резултате својих испитивања, али последњу реч о проблематици интерконеције дају државни органи и велики оператери, било да су у друштвеном или приватном власништву.

Територија	Оператер	Назив стандарда	Време објаве
Немачка	Tennet	Grid Code for High and Extra High Voltage	2015.
Данска	Energynet.dk	Technical regulation 3.2.5 for wind power plants with a power output greater than 11 kW	2016.
Шпанија	Red Eléctrica de España	Installations connected to a power transmission system and generating equipment	2011.
Енглеска	National Grid plc (NGET)	The Grid Code	2016.
Ирска	Eirgrid	EirGrid Grid Code	2015.
Скандинавија	Nordel	Nordic Grid Code	2007.
Европска унија	ENTSO-E	Network Code : Requirements for grid connection applicable to all generators	2015.
САД	NERC/FERC	Interconnection for Wind Energy	2016.
Кина	State Electricity Regulatory Commission	Technical rule for connecting wind farm to power system	2012.

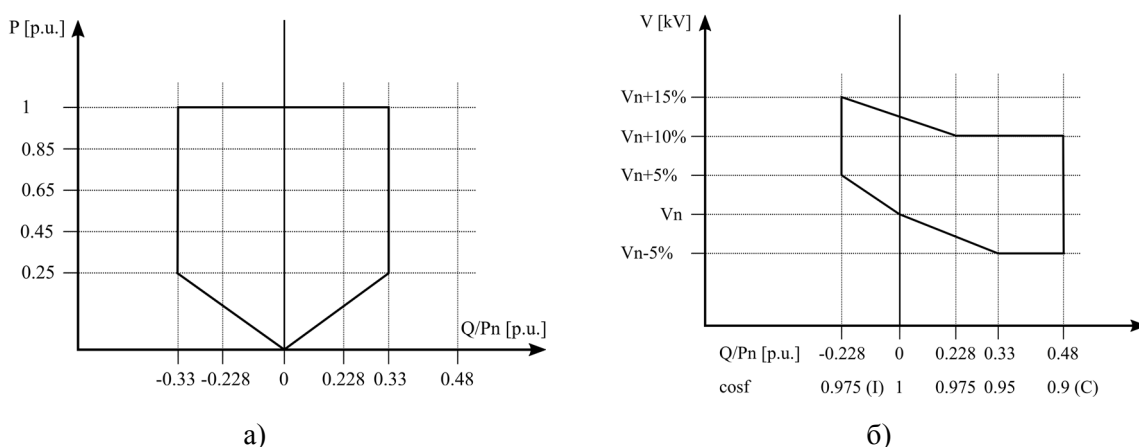
Табела 2.1. Списак разматраних законских регулатива.

Другим речима, најзначајнију улогу у дефинисању *Grid Code*-ова тренутно имају националне агенције и највећи оператери и то у земљама у којима је пенетрација обновљивих извора велика. У складу са тиме, на овом месту ће бити разматрани стандарди, односно регулативе које су развијене за електроенергетске системе у Немачкој [29]-[32], Данској [33]-[35], Шпанији [36], Енглеској [37], Ирској [38], Скандинавији [39], Европској унији [40], САД-у [41] и Кини [42], док су други слични документи занемарени. Већина коришћених стандарда су наведени у табели 2.1.

Прописи дефинисани у разматраним стандардима се могу поделити на оне који дефинишу нормалне режиме рада и исправно функционисање извора у тим режимима и на оне који дефинишу режиме са поремећајима и њима адекватно понашање извора. Осим тога, стандарди дефинишу и временски период у току ког извор сме да буде у поменутом режимима. Тако извор у одређеном режиму сме да буде трајно, краткотрајно или не сме да буде уопште (моментално искључење са мреже).

Сви стандарди одређују колико производних капацитета мора да буде издвојено за производњу реактивне снаге у зависности од произведене активне снаге у току режима без поремећаја. Слика 2.3. а) приказује ову зависност. Углавном се захтева да се обезбеди максимална производња реактивне снаге у износу од 33% инсталисане активне снаге. Ово одговара фактору снаге од отприлике 0.95 (капацитивно и индуктивно). Реактивна снага се у овим режимима користи за подмиривање локалне потрошње реактивне снаге и за напонску регулацију у појединим чвориштима [36]. Овај захтев заправо имплицира струјно димензионисање претварача и његових прекидачких компоненти. Може се закључити да би струјни капацитети требало да буду минимално 33% већи од базне струје. Другим речима, за разлику од асинхроних и синхроних генератора чија је струјна преоптеретивост износи шест до осам базних вредности струја, максимална струја која се дозвољава код дистрибуираних извора чији рад се заснива на инвертору у случајевима кратких спојева је само за 33% већа од базне [32]. Сам претварач увек може да генерише и нешто већу вредност, али се тај вишак оставља за краткорочне пребачаје у таласном облику струје.

Осим овако дефинисаног опсега за производњу реактивне снаге, за режиме када напон не одступа драстично од номиналног, дефинише се и опсег зависности V - Q , односно V - $\cos\phi$ (слика 2.3. б)). Поново се не захтева широк опсег промене реактивне снаге, мада ће се у овом раду захтевати шири опсег (од -0.8 до 0.8), па ће и овај захтев бити релативно једноставно испунити. У току поремећаја, тачније одступања напона мреже од номиналног, изван број стандарда дефинише колика производња реактивне снаге мора да буде омогућена кроз дефинисање фактора снаге за ове режиме. Најшири опсег у овом контексту даје [38]. Ова зависност је приказана на слици 2.4. а). Може се уочити да опсег захтеваног фактора снаге може да се креће у опсегу $[-0.7, 0.4]$ за напонске нивое испод 30% од номиналних вредности.

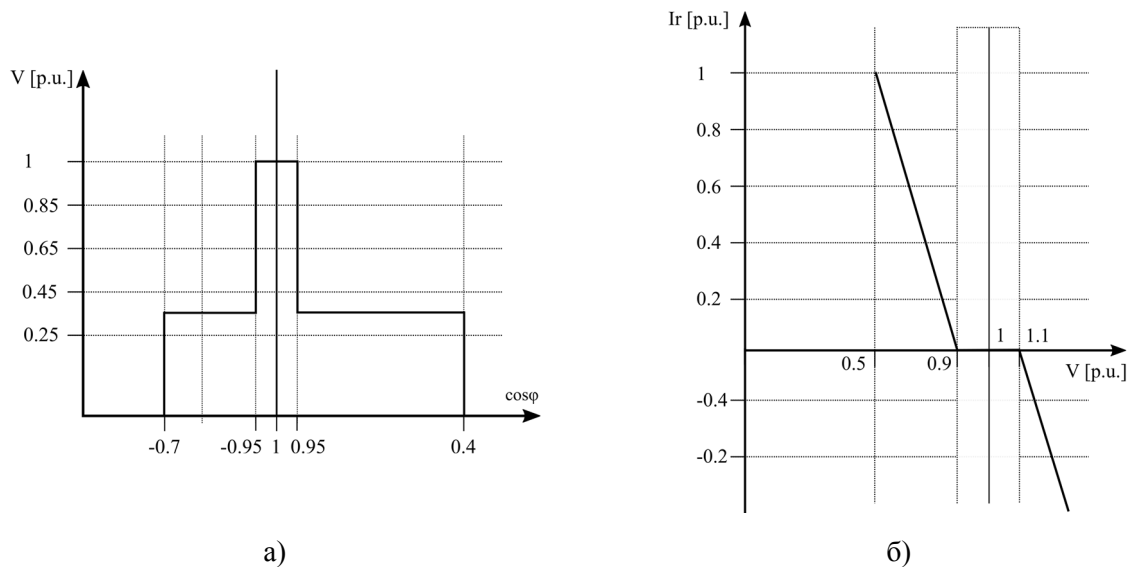


Слика 2.3. Дефинисање нивоа производње активне и реактивне снаге.

У овом раду овај опсег је додатно проширен и сада је од -0.4 до 0.4 . Нешто транспарентнији начин дефинисања колико реактивне снаге је потребно произвести за изванредан профил напона је дат на слици 2.4. б). Са графика се може прочитати колика реактивна компонента струје треба да се инјектује у мрежу у зависности од тога колико мрежни напон одступа од номиналног. Пооштрење овог захтева ће се реализовати кроз повећање нагиба криве. У раду ће бити демонстрирано да 1 р.ј. реактивне струје може да се реализује већ при 0.6 р.ј. мрежног напона у току нагле промене мрежног напона. Овим путем се захтева динамичнији одзив производног система, услед тога што је потребно брже достићи максималну вредност реактивне струје.

Изванредан број стандарда захтева од контролног алгорита дистрибуираног извора да буде у могућности да прими референцу за производњу реактивне снаге у виду експлицитно задате референце (у V_{Ar}), у виду фактора снаге или да се референца за реактивну снагу интерно израчуна на основу одступања мрежног напона од задате вредности, односно на основу тога колико је мрежни напон изван опсега у којем се сматра да нема поремећаја у ефективност вредности напона [29]-[34], [40]. У складу са овим, пред контролни алгоритам који ће бити развијен у наставку текста биће стављен и овај захтев.

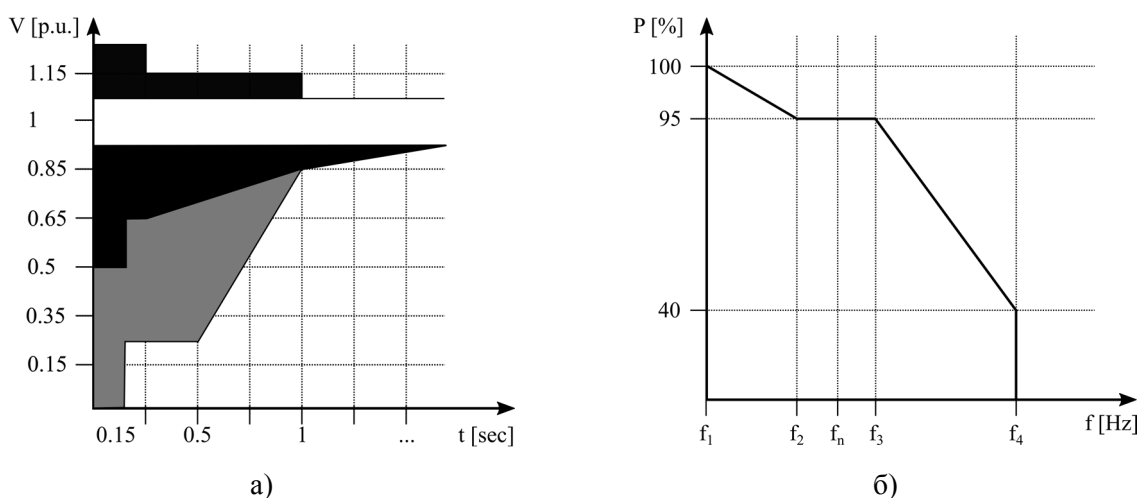
Поред захтева да се у току пропада напона инјектује реактивна снага, сви стандарди од дистрибуираних извора захтевају да остану повезани са мрежом у случајевима пропада - многи чак и када дође до потпуног колапса напона [29], [33], [36]-[40]. Пропад напона се најчешће дефинише као нагло смањење напона мреже са номиналне вредности на вредност која је у опсегу од 90% до 1% од номиналне вредности у периоду од 1 до 6000 милисекунди [36]. Овај захтев је изузетно значајан и уведен је управо због тежње (и могућности) да дистрибуирани извори постану регулаторни фактор у мрежи, односно како би се кроз захтев о одложеном одспајању од мреже обезбедила могућност генерисања (доминантно реактивне) енергије, допринело магнетичној реактивних елемената у мрежи и подизању нивоа мрежног напона. Овим се олакшава враћање напонског профила на номинални након престанка поремећаја и дејства квара. Са друге стране, одложено одспајање, чак и јединица које би са становишта самог квара биле неутралне, је корисно зато што се тиме избегава ланчана дисконекција већег броја јединица. Одспајање производне јединице са електричне мреже у сваком режиму представља поремећај који мора бити пригушен дејством других производних јединица. Уколико би се при пропадима напона дозволило слободно одспајање инвертора од мреже која је у режиму са кваром, то одспајање би резултовало губитком производних капацитета и неизбежним умањењем производње и активне и реактивне снаге.



Слика 2.4. Различити приступи у дефинисању потребне производње реактивне снаге.

Овај пад производње би изазвао додатно погоршање у профилу напона мреже. Сада би остале јединице биле изложене погоршаним приликама у мрежи и могле би бити приморане да се одспоје од мреже. Овакав процес би се наставио све док заштитна опрема и диспечер не изолују део мреже која је у колапсу. Уобичајен дијаграм којим се дефинишу границе радног режима и границе изнад којих претварач не сме да се одспоји од мреже је дат на слици 2.5. а). Велик број стандарда одређује да се дистрибуирани извор не сме одспојити од мреже у периоду од 150 милисекунди приликом потпуног нестанка мрежног напона [29]-[40]. Овај временски интервал се може видети у већини регулатива услед чињенице да је индустријски стандард да време реакције заштитне опреме, која има за задатак да изолује квар, управо 150 милисекунди. Скандинавске земље су продужиле овај период на 250 милисекунди. Са друге стране, у [41] и [42] се не захтева да извор остане повезан при потпуном пропаду напона, али се захтева да при пропаду на 15%, односно 20%, номинале вредности мрежног напона претварач остане повезан у периоду од 625 милисекунди. Дакле, захтева се повезаност при нешто блажим пропадима, али у дужем временском интервалу. Контролни алгоритам који ће бити развијен у наставку текста ће морати да обезбеди повезаност у периоду од поменутих 625 милисекунди, али при потпуном пропаду напона.

Нестабилност у мрежи која може да настане услед престанка производње реактивне снаге и генерално губитком напонских регулаторних мера, има пандан у нестабилности која настаје услед недовољне производње првенствено активне снаге, а која се манифестује као одступање фреквенције мрежног напона од номиналне вредности. Производна јединица мора да надзире вредност фреквенције мрежног напона и да реагује у складу са њеном променом. Уколико фреквенција мрежног напона порасте изнад извесне границе, потребно је умањити производњу активне снаге. Са друге стране, уколико фреквенција опадне испод дефинисане границе, неопходно је да дистрибуирани извори увећају производњу активне снаге. Ово увећање може имати мање или више изражен ефекат. За разлику од производње реактивне снаге која у сваком моменту може да се промени са максималне апсорпције на максималну производњу, производња активне снаге зависи од енергије која је произведена од стране примарног извора. Другим речима, колико ће дистрибуирани извор моћи да утиче на процес промене фреквенције дефинитивно зависи од тренутне производње примарног извора, односно превасходно од тренутних атмосферских прилика код соларних и ветроелектрана. Ипак, од извора се очекује да у сваком тренутку изврши део производних капацитета, колики год да су они у том тренутку, резервише за непредвиђено одступање фреквенције. Углавном се захтева резерва у активној снази у износу од 5% од тренутно доступне. Ова резерва се реализује тиме што електрана заправо не ради у тачки максималне производње, већ се форсира нешто мања производња кроз неоптималну закривљеност елисе ветрогенератора, или тиме што се зада софтверска команда да се из соларних панела екстрактује мање енергије него што је заиста доступно и томе слично [33].



Слика 2.5. LVRT област и захтеван ниво производње активне снаге у зависности од девијације фреквенције.

На слици 2.5. б) се може видети уобичајена зависност производње активне снаге од фреквенције. Стандарди дефинишу другачије опсеге и вредности фреквенција при којима треба да се реализује извесна акција, али генерално се разматрају радне тачке у опсегу од 47 до 52 херца [38], или у ужем опсегу. Са друге стране, у *Grid Code*-овима се ретко разматра какав је потребно да буде динамички одзив, односно таласни облик, контролисаних величина у транзијентима. Генерално се не разматрају временски оквири испод сто милисекунди. У овом контексту најстрожи захтев је онај којим се од дистрибуираног извора тражи да буде у могућности да промени производњу активне снаге са нуле на максималну вредност и обрнуто у периоду од пола секунде. Ова два захтева ће бити обухваћена тиме што ће се у наставку текста од контролног алгорита тражити да обезбеди промену у активној снази са нулте на максималну вредност и обрнуто у периоду од 20 милисекунди, без обзира коју вредност узима фреквенција мрежног напона у опсегу од 45 до 55 херца. Овај захтев је нарочито значајан у периодима након што престане дејство поремећаја или квара, када је потребно успоставити производњу енергије која је једнака оној пре него што се поремећај десио [37], [40]. Сличан одзив је дефинисан и за реактивну снагу [30], као што је већ напоменуто раније у тексту.

Са становишта промене снага значајан је корак у којем снага може да се мења, односно резолуција промене ових величина. У [29] се захтева да се омогући промена снага у кораку од једног процента. Ова вредност ће и овде бити примењена.

Врло важан захтев, који се додуше експлицитно налази само у једном стандарду [40], је онај који се тиче производње несиметричних струја у току несиметричних пропада напона. У поменутом стандарду се оставља простор за диспечера да експлицитно дефинише какав профил струја треба да се произведе у току несиметричних пропада. Битно је напоменути да се не нуде било какве назнаке какав би то профил требао да буде, већ се само захтева да коришћени контролни алгоритам буде способан да произведе и фазне струје чије амплитуде нису идентичне.

Осим овога, исти *Grid Code* захтева да се диспечеру омогући приоритизација производње активне или реактивне снаге. На пример, у извесним сценаријима диспечер може да захтева да се у току поремећаја предност у производњи да активној снази, а не реактивној и дистрибуирани извор мора да испуни тај захтев у реалном времену. Ова два аспекта ће се такође узети у обзир приликом развоја контролног алгорита.

Остале пропозиције дефинисане у стандардима неће бити разматране услед чињенице да се могу тривијално задовољити, због непрецизности у објашњењима, или услед тога што нису од интереса за тему дисертације. На пример, у [38] се опширно разматра јурисдикција оператера у доношењу одлука у извесним кризним ситуацијама. Прописи попут овог немају везе за развојем контролног алгорита трофазног извора.

Табела 2.2. садржи захтеве који су резултат анализе садржаја поменутих *Grid Code*-ова и узимања најстрожих оквира који се у њима могу пронаћи, а које ће резултујући управљачки алгоритам морати да поштује.

Ипак, стриктно поштовање стандарда и лимитирање пропозиција контролног алгорита само на оно што је дефинисано у важећим законским регулативама не доприноси напретку у области управљачких програма дистрибуираних извора енергије. Чињеница да стандарди праве разлику између специфичних хаваријских сценарија само у смислу снаге дистрибуираног извора и напонског нивоа мреже на коју је извор повезан имплицира, мање или више проблематично, занемаривање многих аспеката значајних за динамичке процесе који се одигравају у овим режимима. На пример, коришћење истог дијаграма зависности пропада мрежног напона од реактивне струје за све сценарије који се манифестују као изванредан пропад напона сугерише ригидност која не може резултовати адекватним понашањем дистрибуираног извора у сваком режиму.

Захтев	Усвојене границе и пропозиције
Производни капацитети издвојени за производњу реактивне снаге (режими без поремећаја)	$\pm 33\%P_n$ или $\cos\varphi = [-0.8, 0.8]$
Опсег фактора снаге који извор мора да генерише (у току поремећаја)	$[0.4, -0.4]$
Износ реактивне снаге која мора да се генерише за извесну дубину пропада	$(V, Q) = [(V_n, 0), (0.6 \cdot V_n, Q_{\max})]$
Подржан начин задавања референце реактивне снаге	$Q^{\text{ref}}, \cos\varphi^{\text{ref}}$, контрола напона на сабирницама
Дубина и дужина пропада напона у току којег претварач не сме да се одспоји од мреже	Потпун пропад, 623 милесекунди
Опсег фреквенције мрежног напона у току ког претварач не сме да се одспоји	$[45, 55]$
Брзина промене активне (и реактивне снаге)	Максимална промена за 20 милесекунди
Резолуција промене снага	1%
Профил произведених снага	Симетричан и асиметричан
Приоритизација производње снага	Активна или реактивна

Табела 2.2. Скуп функционалности које контролни алгоритам инвертора повезаног на мрежу мора да демонстрира.

У овом контексту, *Grid Code*-ови заправо представљају предлог обрасца понашања дистрибуираног извора који генерално доприноси побољшању прилика у мрежи, при чему се њима не гарантује најбоље могуће руковођење сваким поремећајем, већ само да ће се допринети поправци радног стања система у неком обиму. Занемаривање топологије мреже, потрошње и производње активне и реактивне снаге пре поремећаја, карактеристика елемената мреже извесно неће обезбедити свеобухватно решење, али јесте неопходно како би се могла израдити општеважећа законска регулатива. Дакле, биће показано да је могуће управљати радом дистрибуираног извора на начин који је делотворнији од управљања које би било базирано искључиво на *Grid Code*-у и минималном скупу захтева који су дефинисани овим стандардима [29], [40]. Са друге стране, тешко је замислити контролни алгоритам једног дистрибуираног извора који би проналазио идеалну радну тачку за било који режим. Ово је последица неизбежне стохастичности потрошње и производње електричне енергије. Динамика производње и потрошње имплицира динамичност реализације токова снага у мрежи. Да би дистрибуирани извор произвео профил струја, односно снага, који би резултовао максималним побољшањем радног режима у било ком контексту (било да је режим са или без поремећаја), дистрибуирани извор би морао да има на располагању огромну количину информација - све оне информације које су потребне за реконструисање радног режима читаве мреже. Чак и ако би контролном алгоритму једне јединице биле доступне све ове информације, што је у овом тренутку технолошки немогуће реализовати, остао би нерешен проблем правремености и могућности обраде те количине информација од стране ограничених рачунских капацитета једне јединице. У складу са наведеним, циљ дисертације је да се развију смернице које ће резултовати унапређеним перформансама дистрибуираних извора у односу на перформансе које извори морају да демонстрирају поштујући тренутно важеће прописе, при чему ће се водити рачуна о капацитетима комерцијално доступних контролера на којима се извршавају управљачки програми, о зрелости комуникационих технологија које се користе у електроенергетици и о могућој брзини обраде извесне количине информација у реалном времену.

Битно је напоменути којим поремећајима у електричној мрежи ће бити дато више пажње, а који ће бити слабије разматрани и зашто. Промене напонских нивоа у току поремећаја имају претежно

локални карактер, док је промена фреквенције са становишта електроенергетског система свепрожимајућа појава. Осим тога, разлика постоји и у динамичности промена ове две величине. Промена напонских прилика може да буде готово тренутна, док се промене у фреквенцији дешавају са променом производње и потрошње у свим чвориштима мреже. Затим, док локалну корекцију напонских прилика може да реализује једна или неколико производних јединица, одржавање стабилне фреквенције може да буде задатак свих производних јединица у мрежи. Такође, брзина промене профила напона изискује готово моменталну реакцију производних јединица који на ову промену могу да дејствују. Насупрот ове промене, брзина промене фреквенције дозвољава значајно спорију реакцију одговарајућих система. Резултат ове разлике у територијалној распрострањености, броју јединица које учествују у процесима и динамике промене једне и друге величине је разлика у опсежности и типу регулаторних мера које се предузимају како би се неутралисао узрок настанка поремећаја, или барем његови ефекти. Генерално, регулаторну улогу у мрежи имају диспечер, управљачки програми који управљају глобалним приликама у мрежи и управљачки алгоритми који дефинишу понашање дистрибуираних извора, при чему се оставља могућност да диспечер коригује рад и првих и других софтверских система. Иако се сфере утицаја сва три регулаторна фактора у извесном обиму преклапају, у складу са горе наведеним, може се закључити да је за дистрибуиране изворе најзначајнији задатак регулација локалних напонских прилика, првенствено у току поремећаја, генерисање потребне реактивне снаге и максимизација производње доступне количине енергије примарног извора. На овом месту је потребно нагласити да је задатак подешавања напонских прилика у читавој мрежи у режимима без изражених поремећаја и реализација токова снага заједнички задатак сва три регулаторна фактора. Са друге стране, регулација фреквенције и кориговање производње активне снаге је за управљачки алгоритам дистрибуираног извора мање интересантан проблем, првенствено због спорих промена фреквенције на које чак и рудиментални контролни алгоритми могу правовремено и адекватно да реагују. Додатно, динамиком промене фреквенције традиционално руководе диспечер и хијерархијски више постављени програми, који по потреби могу у реалном времену да задају нове радне тачке дистрибуираног извора и тиме на себе преузимају главну регулаторну улогу у овом контексту. Као последица констатације да је за дистрибуиране изворе подешавање динамике промене напона адекватан задатак, у раду ће акценат бити стављен на дистрибутивну мрежу, односно производне јединице које су повезане на дистрибутивну мрежу, услед чињенице да је управо овај део електроенергетског система најподложнији променама напона [43].

2.2. Синтеза контролног алгоритма

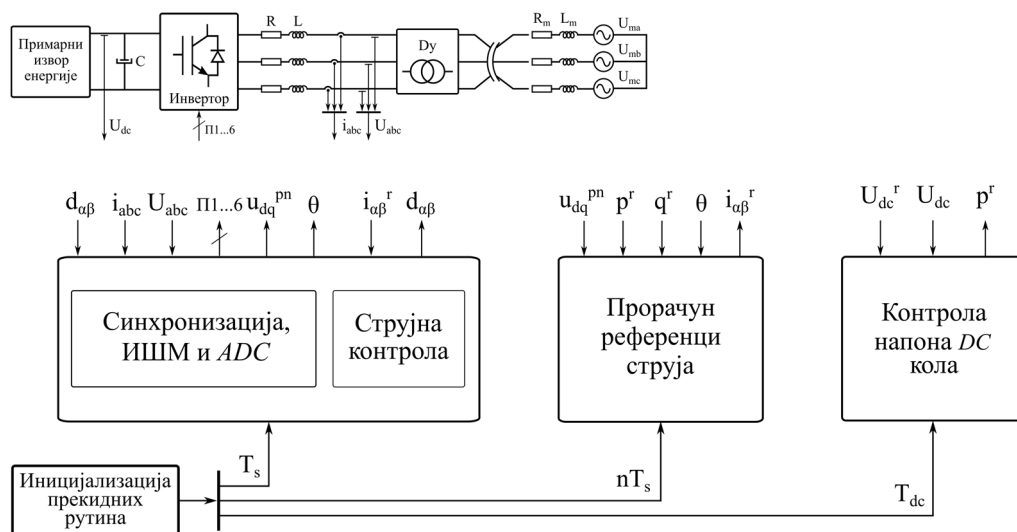
Претходно поглавље је успоставило почетне, основне смернице које контролни алгоритам управљања дистрибуираним изворима енергије мора да прати. У овом поглављу ће бити предложен алат којим разматрани циљеви треба да се реализују, односно изградиће се управљачки програм који ће представљати оквир за остваривање циљева контроле.

Основна функционалност коју управљачки алгоритам инвертора повезаног на мрежу мора да демонстрира је контролисана производња струја које се у мрежу инјектују. Другим речима, подструктура која је задужена за реализацију произвољног, али смисленог, профила струја је обавезан део било ког програма који управља радом инвертора. Да би се генерисање струје одиграло на контролисан начин, поред адекватно успостављене петље која контролише струју (такозване струјне петље), неопходно је и надзирање напонских прилика у мрежи. Инвертор као напонски извор генерише контролисане струје производњом напона који је у извесној релацији са мрежним напонима и ово сугерише да су програму потребне информације о карактеристикама напона мреже. Јединица која је задужена за анализу тренутних напонских прилика се најчешће назива синхронизациона јединица. Неопходно је напоменути да модерне синхронизационе јединице, осим основне функције синхронизације, имплицитно заправо имају и функцију рашчлањивања вектора мрежног напона на компоненте на основу којих се рачунају струјне референце. Другим речима, синхронизациона јединица има двојаку функцију. Затим, како инвертор има задатак да максимизира експлоатацију производних капацитета примарних извора енергије, неопходна је и контролна

структура која реализује ову функцију. Најчешће се спровођење произведене енергије одиграва имплицитно кроз регулацију напона једносмерног међукола. Другим речима, неопходна је и структура која управља напонам једносмерног кола инвертора. На крају, потребна је и регулација напона наизменичних прикључака инвертора. Дакле, потребна је још једна повратна петља која ће регулисати напонске нивое на сабирницама којима се дистрибуирани извор повезује са мрежом. Слика 2.6. ближе предочава структуру контролног алгоритма и принцип размене сигнала и контролираних величина.

Контролни програм има три прекидне рутине. У првој прекидној рутини ће се извршавати операције везане за рад синхронизационе јединице и извршаваће се струјна петља. Осим тога, у овој рутини ће се спроводити аналогно-дигитална конверзија сигнала који долазе са мерних уређаја и реализоваће се функције које су везане за импулсно-ширинску модулацију (ИШМ) - одређивање потребних фактора испуне и генерисање побудних сигнала за транзисторе инвертора. Циљ ће бити да се ова петља извршава у оквиру сваког периода импулсно-ширинске модулације. Овај захтев ће изискивати оптимизовање синхронизационе и струјне петље, односно проналажење решења која су довољно једноставна да могу да се реализују на поменутом периоду, али да то не иде на уштрб функционалности које се од њих захтевају. Прорачун референци струја ће се одиграти у другој рутини која ће се извршавати три пута спорије од претходне, односно у сваком трећем периоду носећег сигнала. Ове функције нису критичне са становишта одзива инвертора, те се могу извршавати нешто ређе од претходне петље. Инструкције које ће се налазити у овом блоку ће се често мењати. Са променом стратегије управљања, односно циљева који треба да се реализују од стране дистрибуираног извора мењаће се и сет наредби од којих зависи какве референце струја ће се генерисати. Контрола наизменичног напона се неће реализовати експлицитно, већ ће се кроз дефинисање адекватних референци струја кориговати напони на сабирницама. Дакле, и ова функција ће се извршавати у другој рутини. Трећа рутина је задужена за контролу напона једносмерног међукола. Она ће се извршавати знатно спорије од претходне две услед чињенице да је брзина промене напона једносмерног међукола у адекватно пројектованом погону упоредиво мала.

Улаз у први потпрограм су мерени напони (U_{abc}) на секундару трансформатора којим се извор повезује на сабирнице, односно електричну мрежу, мерене струје (i_{abc}) и референтне вредности струја ($i_{\alpha\beta}^r$). Излаз из ове рутине су побудни сигнали за транзисторе, генерисани од стране струјне петље и ИШМ-а и естимиране компоненте мрежног напона (u_{dq}^{pn}). Излаз ове рутине принципијелно је и естимиран фазни став вектора мрежног напона (θ). Ипак, ова величина се неће у том облику прослеђивати остатку алгоритма, већ у виду већ израчунатих синусних и косинусних функција.



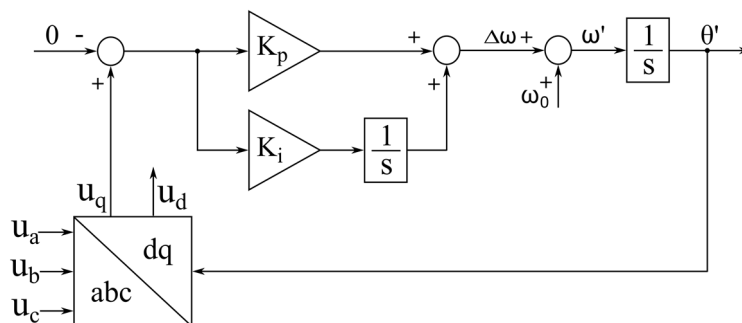
Слика 2.6. Структура контролног програма и прекидне рутине од којих је програм сачињен.

Прорачун референци струја захтева информације везане за карактеристике мрежног напона и референце за активну и реактивну снагу. Излаз потпрограма су референце за струје. Регулација напона једносмерног међукола, као и свака друга регулациона петља, захтева информацију о жељеном напону и његовој тренутној, измереној вредности. Излаз петље је референца за активну снагу. Потребно је напоменути да се референце за реактивну снагу и напон једносмерног међукола задају или могу задавати споља, кроз корисничке команде као што је сугерисано на слици 2.6., при чему се напон једносмерног међукола не може мењати у широком опсегу и номинална вредност му је дефинисана конструкцијом претварача. Слично, корисник, односно оператер, може да утиче на механизам прорачуна референци струја, да форсира референцу за активну снагу (премошћава регулацију U_{dc} , при чему се тада задатак регулације напона једносмерног међукола додељује примарном извору енергије) и да мења друге аспекте контролног алгоритма, али овај уплив корисничких команди није приказан на слици 2.6.

Следећа четири потпоглавља ће детаљније анализирати рад поменутих контролних структура. Циљ је да се дефинишу јединице које могу да реализују све захтеве које се пред њих ставе, при чему њихова сложеност не сме да спречи имплементацију на комерцијално доступним контролерима. Другим речима, циљ је дефинисање контролног програма који може да реализује све захтеве које дефинишу *Grid Code*-ови, али и оне који су изван граница дефинисаних овим регулативама.

2.2.1. Синхронизациона јединица

Основни предуслови за контролисано инјектовање струје у мрежу је поседовање информације о положају вектора мрежног напона и генерисање адекватног вектора напона од стране инвертора. Уколико је познат напонски профил у прикључним сабирницама, односно уколико су познати потенцијали тачака између спрежне импедансе и остатка мреже (U_{abc} на слици 2.6.), релативно је једноставно остварити струју произвољног фазног става и амплитуде кроз генерисање адекватног потенцијала са друге стране поменуте импедансе. Најшире коришћени механизми за одређивање положаја и фреквенције мрежног напона су фазно-закључана петља (*Phase-locked loop - PLL*) и њени деривати [44].



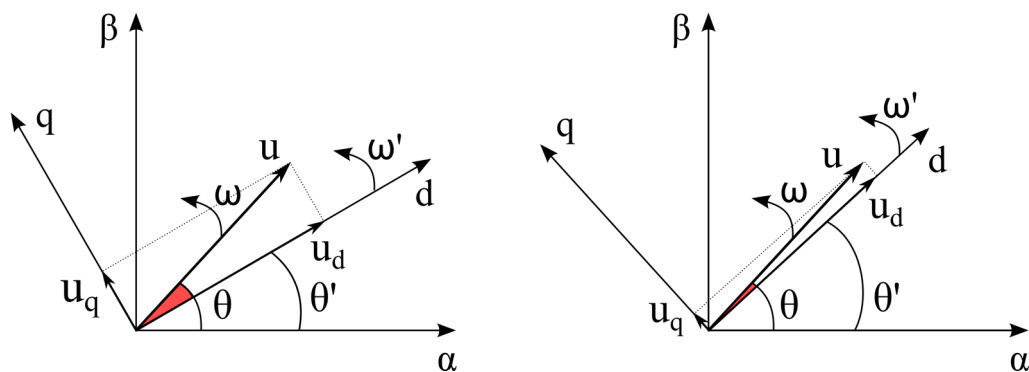
Слика 2.7. Синхронизациона јединица базирана на синхроноротирајућем координатном систему.

Услед чињенице да се наизменичне величине у координатном систему који ротира заједно са референтном наизменичном величином понашају као једносмерне, којима је једноставно руковати, такозвани синхроноротирајући координатни систем је био домен у коме се разматрао проблем контроле величина од интереса за велик број претварача и апликација. Тако се и *PLL* алгоритам заснива управо на овом координатном систему. Структура базичног, *synchronous reference frame (SRF) PLL*-а је дата на слици 2.7. Пре саме структуре синхронизационе јединице неопходно је извршити Кларкину и Паркову трансформацију. Уколико су напони мреже синусоидални, без присуства виших хармоника, и уколико су симетрични, попречна компонента напона (u_q) ће бити једносмерна величина константне вредности. Приказана структура има за циљ довођење ове компоненте напона на нулу. Ова тенденција је подударна са поравнавањем вектора мрежног напона са d -осом синхроноротирајућег координатног система. Уколико постоји попречна компонента напона детектоваће се грешка која улази у пропорционално-интегрални регулатор. Регулатор ће у

складу са својим подешавањима генерисати инкремент у процењеној брзини обртања вектора напона и обртања синхроноротирајућег система (ω'). Другим речима, убрзаће се или ће се успорити ротирање координатног система. Резултујућа естимирана брзина обртања се интегрални у времену и добија се нови естимиран угао. На крају синхронизационог процеса, када се вектор мрежног напона поклопи са d -осом синхроноротирајућег координатног система, попречна компонента напона је нула и остаје „закључана“ на овој вредности дејством поменутог регулатора. У том тренутку се може рећи да су карактеристике вектора мрежног напона познате. Слика 2.8. демонстрира дејство синхронизационе структуре. На слици ω је угаона брзина вектора мрежног напона, док је ω' процењена вредност. Слично, θ је фазни став вектора мрежног напона, док је θ' естимирана вредност.

Ипак, синхронизациона јединица приказана на слици 2.7. је делотворна само у ситуацијама када су фазни напони мреже идеални, односно када су симетрични и имају недеформисан синусоидалан облик. Појава било каквог поремећаја ће изазвати деградирано понашање синхронизационе јединице. Додатан проблем је то што појава различитих поремећаја у мрежном напону изискује употребу другачијих мера. Најизраженији и најзначајнији феномени у контексту одступања напона од идеалних су појава несиметрије напона, присуство виших хармоника, напонски фликер и промене амплитуде и фреквенције мрежног напона у опсегу умерено фреквентних промена. Да би класичан *PLL* одстранио осцилације на двострукој мрежној учестаности које се јављају у *dq*-компонентама напона услед несиметрије напона, неопходно је драстично смањити пропусни опсег регулатора у оквиру *PLL*-а. Ово резултује прецизним, али спорим синхронизационим процесом. Појава виших хармоника и фликер такође захтевају смањење пропусног опсега, мада умереније. Са друге стране, процес ресинхронизације захтева кратак прелазни период и брз одзив синхронизационе јединице. Након што се дистрибуирани извор одспојио од мреже, услед извесне хаваријске ситуације, често се захтева његово поновно спајање са мрежом. Спор синхронизациони процес је у овим режимима недопустив. Јасно је да су потребна унапређења базичног *PLL*-а.

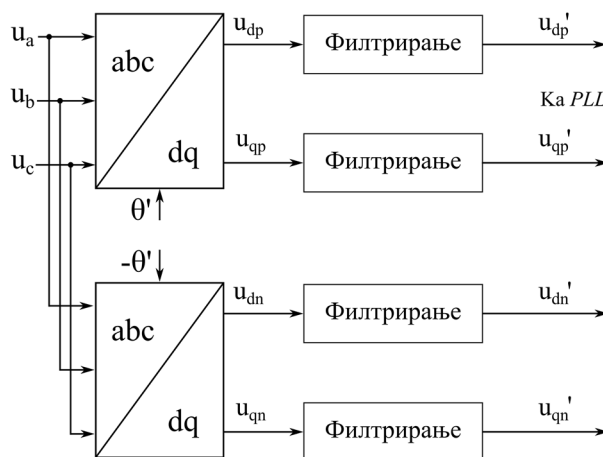
Појава која мора бити разматрана, не само како би се добила прецизно естимирана угаона учестаност и фазни став мрежног напона, већ и због неутралисања одступања амплитуда напона од номиналних, је поменута несиметрија. Да би несиметрија у напонима била ублажена или неутралисана, неопходно је остатку контролног програма, првенствено струјној петљи, обезбедити информацију о фазном ставу и фреквенцији мрежног напона, али и информације о томе колике су амплитуде директних и попречних компоненти које чине мрежни напон. Појава несиметрије заправо подразумева појаву негативних компоненти напона. Другим речима, када се коришћењем домена симетричних компоненти тројка фазних напона рашчлани, осим позитивних компоненти јављају се и негативне компоненте. Сада морају да се разматрају четири компоненте напона у синхроноротирајућем координатном систему - позитивна директна и попречна и негативна директна и попречна компонента. Проблем је што се једноставним извршавањем две Паркове трансформације коришћењем позитивне и негативне вредности фазног става за добијање позитивних и негативних компоненти не елиминише међусобни утицај ових компоненти.



Слика 2.8. Принцип функционисања *PLL* структура.

У позитивно-ротирајућем координатном систему нека величина заправо представља суперпонирану позитивну компоненту те величине која у устаљеном стању у овом координатном систему има константну вредност, и негативну компоненту која осцилује на фреквенцији која је дупло већа од фреквенције мрежног напона. Амплитуда осцилација је једнака модулу средњих вредности компоненти у негативно-ротирајућем координатном систему. Важи и обрнуто - нека величина у негативно-ротирајућем координатном систему је заправо збир негативне компоненте која сада има константну вредност и позитивне компоненте која у овом случају осцилује на дупло већој фреквенцији од фреквенције мрежног напона. Величина негативних компоненти, а самим тим и осцилација, зависи од тога колико је несиметрија изражена. Како би контролни алгоритам располагао константним компонентама, а у сврху делотворног управљања инјектованим струјама, неопходно је применити неки вид филтрације којом би се уклониле осцилације узроковане спрегом величина из позитивног и негативног координатног система.

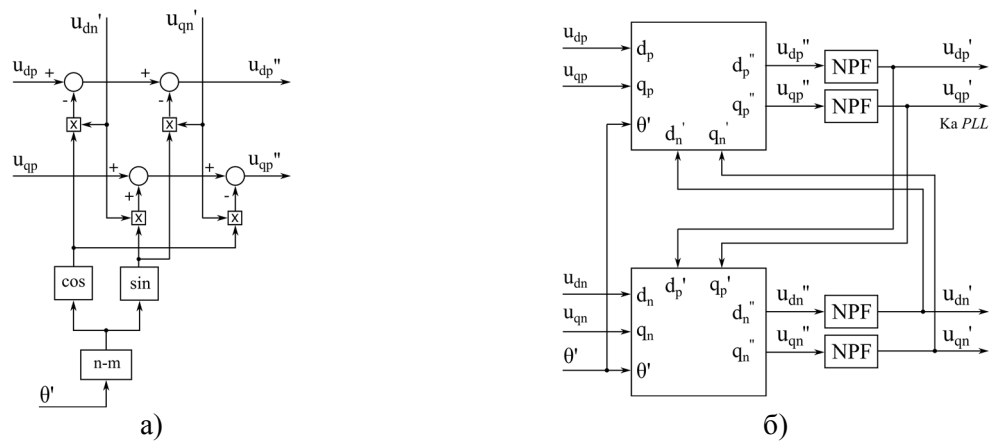
Више метода за решавање овог проблема је понуђено у литератури. Први приступ који се намеће као могуће решење је употреба нископропусних или *notch* филтара, као што је сугерисано сликом 2.9. Употреба нископропусних филтара би поново имала деградирајући утицај на брзину одзива, те би употреба *notch* филтара била смисленија. Алтернатива *notch* филтрирања је употреба *delayed-signal cancellation (DSC)* методе за филтрирање компоненти напона [45]-[46]. Овај приступ подразумева сабирање оригиналног, нефилтрираног, сигнала са истим сигналом закашњеним за пола периоде осцилација (четвртина периоде мрежног напона) и затим дељење са два. Овим се оригиналним осцилацијама суперпонирају осцилације исте амплитуде, али обрнуте фазе и резултат је њихово потирање. Употреба антирезонантних филтара има предност услед тога што *DSC* метода користи одабирке који су очитани једну четвртину периоде мрежног напона после извесног догађаја - чињеница нарочито значајна у транзијентним процесима. Другим речима, код *DSC* методе осцилације се елиминишу након четвртине периоде мрежног напона, а сами транзијенти често трају краће од тога. Са друге стране, *DSC* метод захтева значајно мање рачунских капацитета контролера. Након што се реализује филтрирање, позитивне компоненте (u_{dp}' и u_{qp}') се користе у стандардном *PLL*-у за одређивање фазног става мрежног напона (θ'), а и позитивне и негативне компоненте (u_{dp}' , u_{qp}' , u_{dn}' и u_{qn}') се користе за прорачун референци струја. Недостатак коришћења било којег од поменутих метода за филтрирање напона је у томе што се њиховом употребом не унапређује одзив у случајевима када се појаве виши хармоници, офсет или други поремећај у мрежном напону. Дакле, било би потребно даље унапређивати ова решења како би синхронизациона структура давала задовољавајуће одзиве и за друге поремећаје. Ово би резултовало рогобатним решењима, те се у литератури могу пронаћи приступи који одступају од оног које се заснива на структури приказаној на слици 2.9.



Слика 2.9. Употреба филтара за издвајање неосцилаторних компоненти напона.

Међусобна спрега позитивних и негативних компоненти наводи на закључак да се поништавање овог утицаја може једноставно реализовати. Уколико се претпостави да су доступне филтриране компоненте напона (средње вредности), односно компоненте у којима нема утицаја компоненти из наспрамног координатног система, при појави несиметрије, осцилације могу да се уклоне тако што се принцип по којем се осцилације јављају реверсира. На пример, негативне компоненте се могу уклонити из позитивних компоненти тако што се средње вредности негативних компоненти помноже синусним и косинусним функцијама, чији аргумент је двострука вредност процењеног фазног става мрежног напона и одузму од кумулативних позитивних компоненти.

Резултат овог одузимања ће бити константне позитивне компоненте. Овај приступ, назван *dual decoupled synchronous reference frame (DDSRF)*, је приказан на слици 2.10. а) на којој су ознаке без апострофа нефилтриране, са једним апострофом, хипотетичке, средње, а са два апострофа излазне вредности структуре. Приказана структура је резултат поштовања Ојлеровог обрасца и тенденције да се осцилације пониште, а не да се евентуално дуплирају. Ипак, поменута претпоставка да су филтриране компоненте доступне била би неоснована. Оно што јесте иницијално доступно су нефилтриране компоненте, али чак и ове компоненте би коришћењем мреже приказане на слици 2.10. а) имале пригушујући ефекат на осцилације.

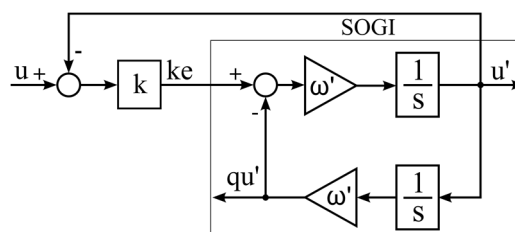


Слика 2.10. *DDSRF* синхронизациона јединица.

Како би се пригушење убрзало и како би се делимично ослабили евентуални виши хармоници у измереном мрежном напону, излази структуре се додатно филтрирају са једноставним нископропусним филтрима. Позитивна попречна компонента (u_{qp}') се затим прослеђује *PLL*-у. Резултујућа јединица је приказана на слици 2.10. б). Додатна разматрања везана за приказан принцип издвајања компоненти напона се могу наћи у [47]-[49].

Следећи приступ који се издваја по перформансама базира се на генерализованом интегратору другог реда (*second order generalized integrator - SOGI*) и користи компоненте напона изражене у стационарном координатном систему. Ова јединица је уоквирена на слици 2.11., а њена преносна функција је дата изразом (2.1).

$$G_{SOGI}(s) = \frac{u(s)}{ke(s)} = \frac{\omega' s}{s^2 + \omega'^2} \tag{2.1}$$



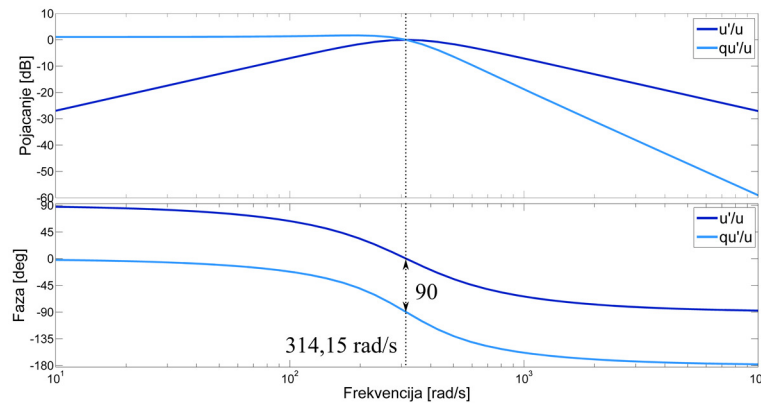
Слика 2.11. Генерализовани интегратор другог реда.

Заправо, *SOGI* и остатак петље приказане на слици 2.11. су иницијално служили за генерисање попречних компоненти величина. Генерисање попречне компоненте је посебно значајно за монофазне системе. Услед тога се цела структура у литератури најчешће назива *quadrature signal generation - SOGI (QSG - SOGI)* [50]-[52]. Структура је посебно занимљива услед чињенице да је генерисање попречне компоненте праћено филтрирањем како ње саме, тако и директне компоненте, у складу са изразима (2.2) и (2.3).

$$G_{u'/u}(s) = \frac{k\omega's}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (2.2)$$

$$G_{qu'/u}(s) = \frac{k\omega'^2}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (2.3)$$

Може се закључити да је директна компонента ефективно резултат дејства филтра пропусника опсега, док је попречна компонента оригиналан сигнал филтриран нископропусним филтром, при чему је попречна компонента још и фазно закашњена за 90° . Параметром k се дефинишу пропусни опсеги филтара. Оптимум између селективности у филтрирању и резултујућег пребачаја у естимираним величинама се налази када k узима вредност $\sqrt{2}$. На слици 2.12. се могу видети Бодјеви дијаграми за преносне функције дате изразима (2.2) и (2.3). Могу се видети зависност амплитуда преносних функција од фреквенције и зависност фазе преносне функције од фреквенције - зависности карактеристичне за нископропусни филтар и филтар пропусник опсега. Како би *QSG - SOGI* адекватно генерисао и филтрирао компоненте напона, неопходно је структури проследити информацију о резонантној учестаности (ω'), односно фреквенцији основног хармоника компоненте напона која се анализира. Дакле, приказана јединица је фреквентно-адаптивна.



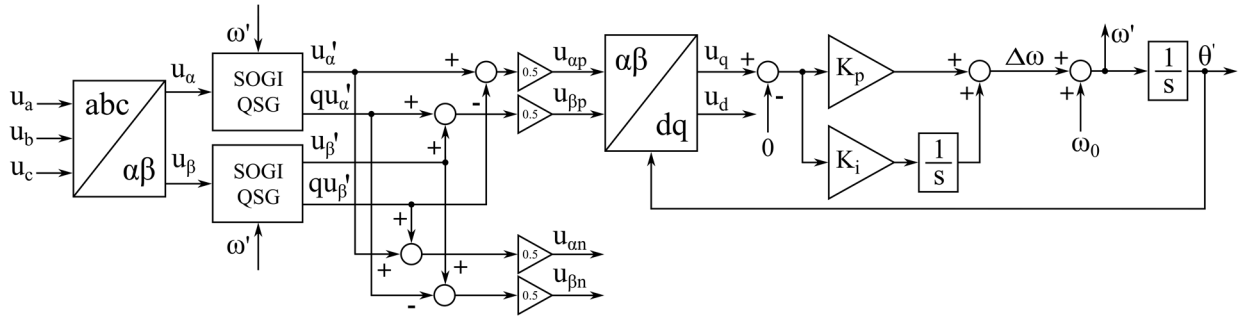
Слика 2.12. Бодјеви дијаграми за *SOGI* јединицу.

С циљем проналажења позитивних и негативних компоненти мрежног напона може се користити јединица приказана на слици 2.13. Коришћењем две *QSG - SOGI (dual SOGI - DSOGI)* структуре и приказаним укрштањем директних и попречних алфа и бета компоненти, које се базира на изразима (2.4) - (2.8), добијају се позитивне и негативне алфа и бета компоненте.

Изразима (2.4) и (2.5) се могу израчунати позитивне и негативне компоненте у *abc* домену.

$$u_{abc}^p = [u_a^p \quad u_b^p \quad u_c^p]^T = [T_p] \cdot u_{abc} \quad u_{abc}^n = [u_a^n \quad u_b^n \quad u_c^n]^T = [T_n] \cdot u_{abc} \quad (2.4)$$

$$[T_p] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \quad [T_n] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ a & 1 & a^2 \\ a^2 & a & 1 \end{bmatrix} \quad a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (2.5)$$


 Слика 2.13. Синхронизациона јединица базирана на *DSOGI* структури.

Затим је потребно узети у обзир општи израз за Кларкину трансформацију, односно трансформацију којом се долази до величина у $\alpha\beta$ стационарном координатном систему - израз (2.6).

$$u_{\alpha\beta} = [u_\alpha \quad u_\beta]^T = [T_{\alpha\beta}] \cdot u_{abc} \quad [T_{\alpha\beta}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Комбиновањем ових израза може да се изведе израз којим се долази до позитивних и негативних компоненти напона у стационарном координатном систему, а на основу укупних алфа и бета компоненти напона мреже - изрази (2.7) и (2.8).

$$u_{\alpha\beta}^p = [T_{\alpha\beta}] \cdot u_{abc}^p = [T_{\alpha\beta}][T_p][T_{\alpha\beta}]^T \cdot u_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} \cdot u_{\alpha\beta} \quad (2.7)$$

$$u_{\alpha\beta}^n = [T_{\alpha\beta}] \cdot u_{abc}^n = [T_{\alpha\beta}][T_n][T_{\alpha\beta}]^T \cdot u_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{bmatrix} \cdot u_{\alpha\beta} \quad q = e^{-j\frac{\pi}{2}} \quad (2.8)$$

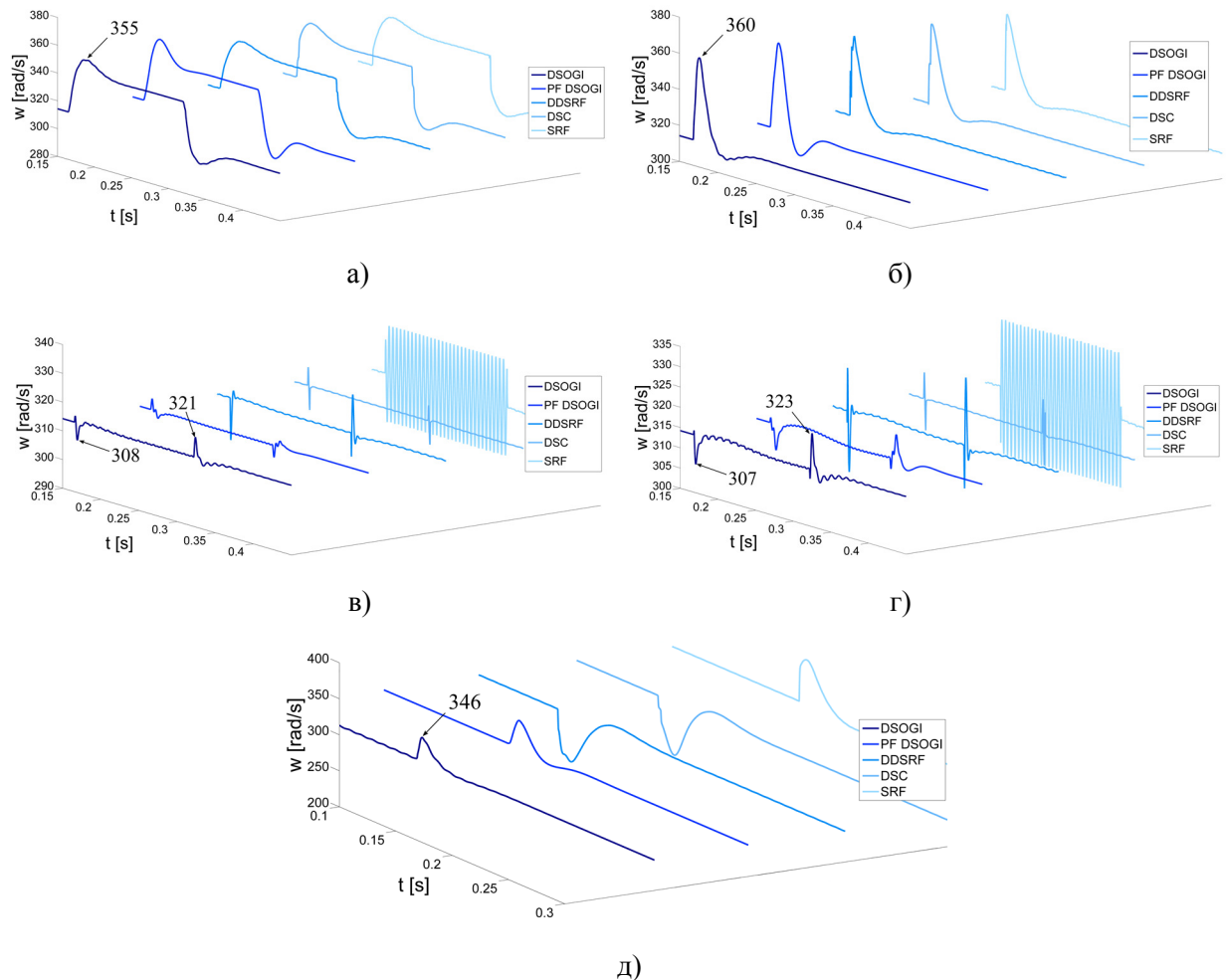
Позитивне компоненте се након Кларкине трансформације шаљу ка *PLL*-у из којег се добија естимирана угаона брзина.

С циљем одабира синхронизационе јединице која ће бити коришћена у наставку, извршена је серија експеримената. Тестиране су јединице *SRF*, *DSC*, *DDSRF*, *DSOGI* и *PFDSOGI*. *PFDSOGI* (*Prefiltering DSOGI*) јединица је слична *DSOGI* јединици, с том разликом што су у овом случају искоришћени још два двострука интегратора другог реда, а са циљем предфилтрације, односно додатног филтрирања доступних компоненти напона, пре него што се реализује само издвајање позитивних и негативних алфа и бета компоненти [53]-[54]. Свака од поменутих структура подразумева употребу *SRF* јединице за естимирање угаоне фреквенције и угла, те је било неопходно подесити вредност пропорционалног и интегралног дејства у регулатору ове јединице. Параметри самосталне *SRF* јединице се могу одредити коришћењем израза (2.9), а водећи рачуна о (2.10). Параметар ζ је пригушење и постављен је на вредност 0.707, ω_{bw} је пропусни опсег петље *PLL*-а, а ω_n је природна учестаност. Како би се могла спровести компарација поменутих структура, иницијална вредност параметара, добијених помоћу (2.9), је коригована тако да се добијају слични одзиви процењене угаоне учестаности на одскочну промену фреквенције мреже за све јединице. У литератури се најчешће овај транзијент узима као индикатор оптимизованости структуре и уколико су ови транзијенти кратки са малим пребачајем условно се може рећи да су параметри структура оптимално подешени. Наравно, параметри сваке од структура могу бити другачије подешени како би се ефикасније елиминисале друге промене и други поремећаји којима се петља излаже, али одскочна промена угаоне брзине је узета као референтна величина [55].

$$K_i = \omega_n^2, \quad K_p = 2 \cdot \zeta \cdot \sqrt{K_i} \quad (2.9)$$

$$\omega_n = \frac{\omega_{bw}}{\sqrt{|2\zeta^2 - 1| + \sqrt{|\zeta^4 - 4\zeta^2 + 2|}}} \quad (2.10)$$

Слика 2.14. а) приказује одзиве синхронизационих јединица на одскачну промену фреквенције са 50 Hz на 55 Hz и обрнуто. Слика 2.14. б) приказује одзиве за скок у фази мрежних напона у износу од 60°. Следеће две слике, 2.14. в) и 2.14. г), приказују естимирану брзину за кратак спој једне фазе са земљом (земљоспој), односно за кратак спој две фазе, по реду. Слика 2.14. д) даје таласне облике естимиране угаоне брзине који су очитани након што је дата команда да се започне синхронизација. Иницијална вредност естимиране брзине је задата да буде 314,15 радијана у секунди. Са приказаних графика се може закључити да приказане јединице имају приближно сличне одзиве у свим случајевима, осим у случају појаве пропада напона. Приликом кратких спојева употреба *SRF* јединице резултује израженим осцилацијама у естимираној брзини. Употребом *DSC* се елиминишу осцилације у устаљеном стању, али су очигледни прескоци у транзијентима.



Слика 2.14. Поређење одзива естимиране угаоне брзине на различите поремећаје.

Даље, структуре су тестиране на присуство виших хармоника и офсета у очитаном напону. Прво је, поред основног, у напону задата појава петог (0.3 р.ј.), седмог (0.2 р.ј.), једанаестог (0.14 р.ј.) и седамнаестог (0.1 р.ј.) хармоника. Затим је задат офсет од 9 волти и други (0.2 р.ј.) и четврти (0.2 р.ј.) хармоник. Табела 2.3. даје амплитуду осцилација у естимираној угаоној фреквенцији у радијанима у секунди. Битно је напоменути да свака од јединица може додатно бити подешавана тако да даје боље одзиве у току посматраних поремећаја и свакако се могу користити адаптивне методе које коригују параметре регулатора *PLL*-а, али ово би изискивало додатно усложњавање процеса којим се долази до тражених карактеристика које синхронизациона јединица треба да демонстрира.

Структура	<i>SRF</i>	<i>DSC</i>	<i>DDSRF</i>	<i>PFDSOGI</i>	<i>DSOGI</i>
$\Delta\omega$ при непарним хармоницима	64	8.5	47	1.2	5.3
$\Delta\omega$ при парним хармоницима и офсету	21	14	20	2.1	3.9

Табела 2.3. Амплитуде осцилација естимиране угаоне брзине када су у мереним напонима присутни хармоници и офсет.

Одређена је и брзина извршавања сваке јединице. Синхронизациона јединица је смештена у прекидну рутину која се извршава на ИШМ фреквенцији. Времена извршавања за поједине структуре су дата у табели 2.4.

Структура	<i>SRF</i>	<i>DSC</i>	<i>DDSRF</i>	<i>PFDSOGI</i>	<i>DSOGI</i>
Време извршавања	18 μ s	18.5 μ s	22 μ s	20.5 μ s	19.5 μ s

Табела 2.4. Утрошак процесорског времена за поједине синхронизационе јединице.

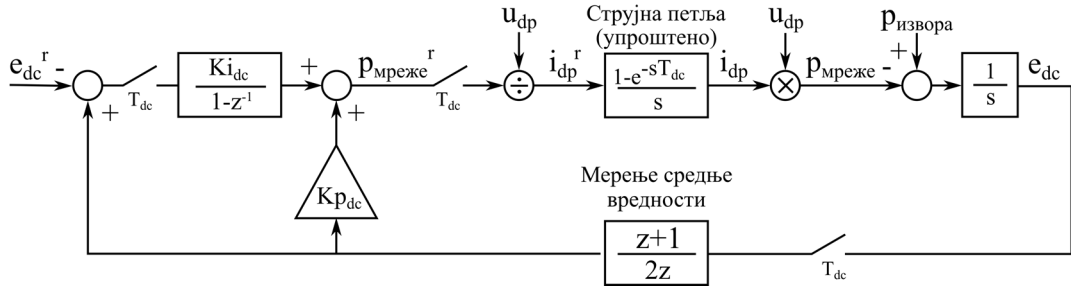
Узимајући у обзир приказане резултате експеримената, јединице које су демонстрирале најбоље перформансе за све посматране поремећаје су *PFDSOGI* и *DSOGI*. Иако *PFDSOGI* реализује нешто бољу процену угаоне брзине мрежног напона од *DSOGI*, предност ће се дати *DSOGI* јединици због бржег извршавања и због чињенице да се осетна разлика у естимацији види тек за нереално лоше таласне облике напона мреже.

2.2.2. Регулација напона једносмерног кола

Спону између примарног извора енергије и инвертора, који произведену енергију инјектује у мрежу, представља једносмерно међуколо. У једносмерном међуколу се увек налази индуктивно-капацитивни, или барем капацитивни филтар. Функција филтра је умањење таласности напона једносмерног међукола и умањење хармонијске дисторзије струје која се са наизменичне стране инјектује у међуколо. Осим тога, присуство кондензатора, или генерално филтра, и дејство инертности ове пасивне компоненте резултује својеврсним распрежућим ефектом између процеса који су асоцирани са примарним извором енергије и процеса везаних за инвертор који је повезан са електричном мрежом. Динамичност процеса који се одвијају десно од једносмерног међукола, иза инвертора, у ограниченом обиму утиче на процесе који се одвијају у оквиру ветрогенератора или низа соларних панела.

Једносмерно међуколо је значајно и у контексту контролног алгорита. Напон који се читава на кондензатору у једносмерном међуколу (U_{dc} на слици 2.6.) се користи као индикатор за то колико енергије је инјектовано у коло од стране примарног извора и колико енергије треба да се пренесе од стране инвертора који је повезан на електричну мрежу. Инјектовање енергије у једносмерно међуколо резултује повећањем напона, а контрола инвертора повезаног на мрежу треба да има супротно дејство и да прослеђивањем енергије у мрежу врати напон на пређашњу вредност.

Другим речима, контролни алгоритам подразумева и структуру која треба да одржава напон једносмерног међукола константним и да тиме реализује баланс снага. Упрошћена представа регулационе петље напона U_{dc} која треба буде реализована како би се напон једносмерног међукола контролисао је приказана на слици 2.15.



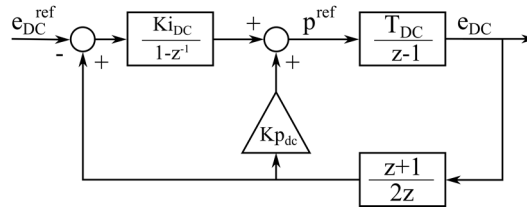
Слика 2.15. Упрощена петља за регулацију напона једносмерног међукола.

Усвојено је да је позитиван референтни смер енергије смер из једносмерног међукола ка мрежи. Струјна петља је апроксимирана колом задршке нултог реда. Ова апроксимација је оправдана када је подређена петља око десет пута бржа од надређене, а то може бити реализовано адекватним пројектовањем како петље која контролише напон једносмерног међукола, кроз задавање периоде одабирања T_{dc} , тако и струјне петље. На слици се види да се заправо задаје и контролише квадратирана вредност напона једносмерног међукола, односно енергија која улази у међуколо, при чему важи израз:

$$e_{dc} = 1/2 \cdot c_{dc} \cdot u_{dc}^2, \text{ где је } c_{dc} = C_{dc} \cdot Z_B \text{ и } Z_B = U_B/I_B. \quad (2.11)$$

Овај приступ је одабран како би се избегла нелинеарност у петљи која би се појавила уколико би се регулисао директно напон U_{dc} [56].

Након дискретизовања петље приказане на слици 2.15. добија се петља приказана на слици 2.16. Преносна функција ове петље је дата изразом (2.12).



Слика 2.16. Дискретизована петља за регулацију U_{dc} .

$$G_{dc}(z) = \frac{e_{dc}(z)}{e_{dc}^{ref}(z)} = \frac{K_{idc} T_{dc} z^2}{z^3 + z^2 \left(\frac{K_{pdc} T_{dc}}{2} + \frac{K_{idc} T_{dc}}{2} - 2 \right) + z \left(\frac{K_{idc} T_{dc}}{2} + 1 \right) - \frac{K_{pdc} T_{dc}}{2}} \quad (2.12)$$

$$e_{dc}^{ref}(z) = 1/2 \cdot c_{dc} \cdot u_{dc}^{ref2}$$

Уколико би нуле карактеристичне једначине у претходном изразу биле једнаке и реалне, одзив система би био максимално брз и апериодичан. Да би се остварио овакав одзив, неопходно је упоредити коефицијенте карактеристичне једначине са коефицијентима из општег изрази за једначину трећег реда, у којем фигуришу корени ове једначине [56]-[57].

$$z^3 + z^2(-z_1 - z_2 - z_3) + z(z_1 z_2 + z_1 z_3 + z_2 z_3) - z_1 z_2 z_3 = 0 \quad (2.13)$$

Сабирањем разматраних коефицијената и уважавањем чињенице да корени једначине треба да буду једнаки, добија се израз (2.14).

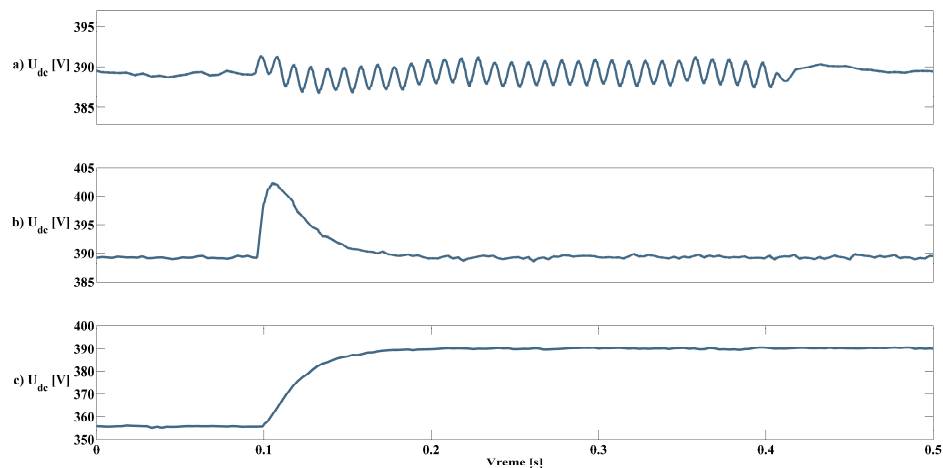
$$z_p^3 + 3z_p^2 + 3z_p - 3 = 0 \quad (2.14)$$

Долази се до израза за потребно пропорционално и интегрално дејство регулатора напона једносмерног међукола:

$$K_{pdc} = \frac{z_p^3}{T_{dc}/2}, \quad K_{idc} = \frac{3z_p^2 - 1}{T_{dc}/2}. \quad (2.15)$$

Период одабирања ове петље (T_{dc}) се поставља да буде за ред величине већи од периода извршавања подређене струјне петље [58].

Оваква поставка и оптимизација петље резултује робустним понашањем управљачког склопа, брзим одзивом на одскочну побуду и поремећаје у току режима без поремећаја у мрежи. Слика 2.17. даје одзиве U_{dc} за поремећаје у мрежи (несиметрија напона, (а)), на скоковиту промену у производњи примарног извора енергије (б)) и на скоковиту промену референце напона једносмерног међукола (ц)). Извесна унапређења могу бити реализована за режиме са поремећајима. У наставку ће бити показано да се услед појаве несиметричних напона, осим осцилација на двострукој учестаности у естимираним компонентама напона, појављују и осцилације у активној или реактивној снази, у зависности који механизам за прорачун референци је примењен. Уколико су у ињектованој активној снази присутне осцилације, оне ће се појавити и у напону једносмерног међукола. Амплитуда осцилација U_{dc} доминантно зависи од капацитивности кондензатора у једносмерном међуколу и снаге која се размењује са мрежом - што је капацитивност мања, а размењена енергија већа, осцилације ће бити израженије. У екстремним ситуацијама може да се активира пренапонска или поднапонска заштита у једносмерном међуколу. У овом контексту, одзив петље се потенцијално може унапредити тиме што би се у разматраној референци активне снаге умањиле осцилације употребом *notch* филтра, слично као код синхронизационе јединице. Референца за активну снагу би се прво филтрирала, из ње би се уклониле осцилације и тек онда би се прослеђивала струјној петљи. На овај начин би се умањило други значајан проблем до којег долази услед осцилација U_{dc} . Осцилације које се појаве у референци активне снаге доводи до појаве изражених виших хармоника струје мреже, те би умањење осцилација референце активне снаге умањило амплитуде виших хармоника. Ипак, овај филтар би се налазио у директној грани, те би деградирао квалитет транзијентних процеса читавог управљачког алгоритма и отежао би одређивање адекватних параметара регулатора [59]. Стога ће овај проблем у овом контексту остати нерешен. Ипак, у трећем поглављу биће показано да сложенијим механизмом за прорачун референци осцилације у U_{dc} могу да се елиминишу без употребе филтара у петљи која регулише напон једносмерног међукола.



Слика 2.17. Одзиви петље за регулацију U_{dc} на различите поремећаје.

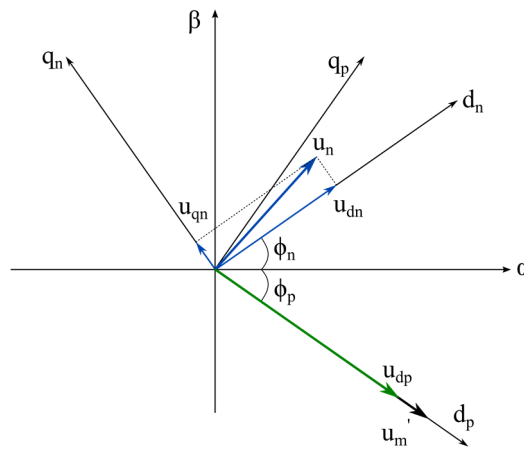
Потребно је напоменути да се активна снага у режимима са несиметричним напонима неће реализовати искључиво кроз директне позитивне компоненте напона (u_{dp}) и струје (i_{dp}), као што је сугерисано на слици 2.15., већ и кроз остале компоненте напона и струје. Ипак, ово неће утицати на динамичност промене напона, те ће вредности параметара регулатора остати исте. Осим тога, важна је напомена да регулација напона једносмерног међукола од стране инвертора повезаног на мрежу за извесне режиме са поремећајима неће бити могућа. Тада ће регулацију напона једносмерног

међукола преузимати претварач асоциран са примарним извором енергије - подизач напона код соларних електрана и исправљач и механизам за окретање крилаца елисе код ветроелектрана. Другим речима, подизач напона и аналогни механизми неће радити у тачки максималне снаге, већ у тачки у којој се поклапају производне могућности инвертора на мрежи и производња соларне електране. У супротном би напон једносмерног међукола неконтролисано растао услед умањене инјекције активне снаге у мрежу и неизмењене производње примарног извора.

2.2.3. Регулација напона са наизменичне стране инвертора

Регулација напонских нивоа је у преносној мрежи традиционално била реализована регулисањем токова снага, првенствено кроз измене топологије мреже, односно кроз измене рута којим енергија долази до потрошача путем активирања или деактивирања преносних линија које спајају иначе дисјунктне делове мреже и кориговањем производње електричне енергије у централизованим погонима великих снага [60]. У дистрибутивној мрежи напонски профили су били регулисани употребом регулационих трансформатора и кондензаторских батерија. Са развојем енергетске електронике и претварача који се повезују на постојећу електричну мрежу, регулаторну улогу узимају и ови елементи електричне мреже. Уређаји енергетске електронике који се користе искључиво за сврху кориговања, претежно локалних прилика у мрежи, називају се *FACTS (Flexible AC Transmission)* уређаји [61]. Два најзначајнија представника су *STATCOM (Static Compensator)* [62] и *DVR (Dynamic Voltage Restorer)* [63]-[64]. *STATCOM* се повезује оточно на мрежу и коригује напонске прилике инјектовањем потребног профила струја, док се *DVR* повезује серијски и генерисаним напонам доприноси регенерацији номиналног режима. Ипак, чињеница да се производни капацитети ових, најчешће мегаватних, постројења експлоатишу повремено, у току неправилности у мрежи, имплицира некономичну употребу ресурса. Додатно, све функционалности које су оствариве *FACTS* уређајима се могу реализовати претварачима енергетске електронике који су интегрални део обновљивих извора. Стога се *FACTS* уређаји инсталирају на локацијама где је неопходно кориговати режиме рада електричне мреже и где други регулациони механизми напонских прилика нису ефективни, а где нема производних потенцијала, односно где претварачи повезани на мрежу неће бити смештени и за потребе експлоатације примарних извора енергије. Узимајући да је број оваквих локација мали, *FACTS* уређаји су изостављени из разматрања о савременим методама за регулисање напонских нивоа у електричној мрежи. Акцент ће бити стављен на претвараче енергетске електронике који кондиционирају енергију с циљем како производње електричне енергије, тако и регулисања електричних величина у мрежи.

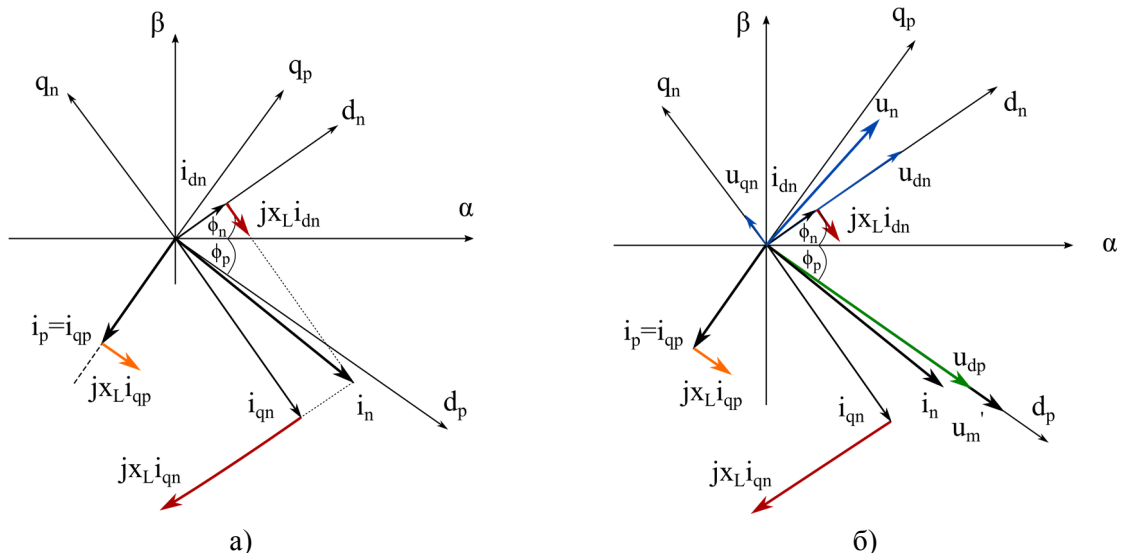
Одступање напонских нивоа од номиналних је појава везана за више типова поремећаја у мрежи. Најизраженије промене у напону су последица кратких спојева. Трополни кратки спојеви резултују појавом симетричних пропада, док остали кратки спојеви генерално резултују појавом несиметричних пропада [65]-[66]. Несиметрија фазних напона сугерише да еквивалентан приказ ових напона у домену симетричних компоненти не садржи само позитивне компоненте, већ и негативне [60], [43]. Генерално, и нулте компоненте се могу јавити у извесним чвориштима, али узимајући у обзир спреге трансформатора који се користе у дистрибуираним изворима, на секундарним странама се нулте компоненте не могу манифестовати [67]-[69]. Најчешће коришћена спрега трансформатора је троугао/звезда, где се спрега звезда примењује на секундарној страни. Спрега троугао увек резултује нултим збиром фазних напона, што је еквивалентно са тврдњом да у разматраној тројци напона нулте компоненте нису присутне. Уколико се тројке позитивних и негативних компоненти напона прикажу у синхроноротирајућим координатним системима, добија се слика 2.18.



Слика 2.18. Позитивне и негативне компоненте несиметричне тројке напона у синхроноротирајућем координатном систему.

Битно је напоменути да се синхронизациона јединица везује за позитивне компоненте и да се поравнавањем вектора позитивних компоненти са d -осом позитивно-ротирајућег координатног система губи попречна компонента ($u_{qp}=0$). Ово не важи за негативне компоненте - угао негативно-ротирајућег координатног система се узима да је исте вредности као и угао позитивно-ротирајућег координатног система, са измењеним предзнаком, што генерално резултује појавом и директне и попречне негативне компоненте мрежног напона. Негативна попречна компонента мрежног напона би се могла елиминисати употребом још једне синхронизационе јединице која би оријентисала негативно-ротирајући координатни систем спрам вектора негативних компоненти напона. Ипак, овим се ништа суштински не би променило, а контролни алгоритам би био додатно сложенији услед употребе две синхронизационе јединице.

Уколико се има за циљ враћање фазних напона на номиналне вредности, неопходно је неутралисати негативне компоненте, што резултује појавом балансираних напона, и потребно је вратити позитивну директну компоненту на вредност пре поремећаја (u_m), што ће за резултат имати увећање ефективних вредности напона. Овај ефекат је демонстриран сликом 2.19.



Слика 2.19. Потребне струјне компоненте и њихово деловање на компоненте напона.

У литератури се могу пронаћи два приступа за регенерацију напона и њихово враћање у опсег дозвољених вредности. Први се базира на директној регулацији мрежних напона. Овај приступ се може реализовати кроз употребу регулатора уколико вредност импедансе није добро позната [70]-[73], или кроз индиректну контролу појединих компоненти напона задавањем одговарајућих референци струја [74]-[78]. Потребно је дефинисати падове напона на спрежној индуктивности спрам израза (2.16).

$$\begin{aligned} \Delta u_p &= i_p \cdot jx_s, & \Delta u_n &= i_n \cdot jx_s, & x_s &= \frac{\omega_b L}{z_b} \\ \Delta u_p &= 1 - u_{dp}, & \Delta u_n &= u_{dn} + ju_{qn}, \end{aligned} \quad (2.16)$$

Вектори струја се дефинишу на стандардан начин изразима у (2.17).

$$i_p = i_{dp}^r + ji_{qp}^r, \quad i_n = i_{dn}^r + ji_{qn}^r \quad (2.17)$$

Уколико се захтева да позитиван вектор напона поврати вредност коју је имао пре поремећаја и да се вектор негативних компоненти у потпуности неутралише, комбиновањем претходна два израза, долази се до израза (2.18). Потребно је узети у обзир и чињенице да је попречна компонента позитивног вектора услед дејства синхронизационе јединице једнака нули и да се тежи вектору напона који има амплитуду која је једнака 1 р.ј.

$$i_{qp}^r = -\frac{1-u_{dp}}{x_s}, \quad i_{dn}^r = \frac{u_{qn}}{x_s}, \quad i_{qn}^r = -\frac{u_{dn}}{x_s}. \quad (2.18)$$

Задавањем овако дефинисаних референци струја, напони на локалним сабирницама би у потпуности повратили вредности које су имали пре поремећаја. Ипак, непрактичност овог приступа се огледа у чињеници да се при израженим пропадима захтева инјектовање врло великих струја услед мале вредности спрежне импедансе. Ово је нарочито битно за решења са регулаторима мрежних напона услед тога што би при дубљим пропадима напона њихови излази били у сатурацији. Стога се овај приступ користи за благо несиметричне напоне, односно напонске профиле код којих су фазни напони унутар опсега $\pm 10\%$ номиналних вредности. Осим тога, овакав начин задавања референци струја оријентише контролни алгоритам само ка једном циљу - измени напонског профила, док се други контролни циљеви онемогућавају.

Код другог приступа се као медијум за регулисање напонских прилика користе референце снаге, које су генерисане надређеним контролним структурама. Другим речима, локална напонска регулација се реализује индиректно. С обзиром да су контролни алгоритми базирани на домену релативних јединица, реализовање извесних контролних циљева кроз дефинисање референци снага ће резултовати умеренијим референцама струја. Затим, придруживање овде разматраних циљева остатку контролног алгоритма је једноставније. Стога ће утицај на локалне напонске прилике у наставку бити остварен кроз задавање профила снага који требају да се произведу, а на основу ових референци рачунаће се референце струја. У складу са овим, динамика промене напона на сабирницама ће зависити од оптимизованости струјне петље. Процес задавања профила активне и реактивне снаге, али и процес одабира референци струја биће детаљно разматран у наставку.

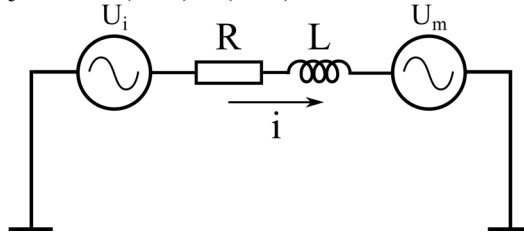
2.2.4. Регулација фазних струја

Принципи контролисања струја инјектованих у мрежу од стране трофазног инвертора су познати дужи низ година и преузети су из алгоритама за контролисање статорских струја у апликацијама у којима инвертор напаја трофазне моторе. Са друге стране, контролни алгоритми наизменичних машина посуђивали су управљачке парадигме из погона са једносмерним машинама. Како би било могуће употребити до тада развијене теорије система аутоматског управљања, иницијално примењене на једносмерне погоне, било је неопходно изменити оквир у којем се разматра контролисање величина код наизменичних машина. Како постоји линеарна веза између напона арматуре и брзине обртања вратила и између арматурне струје и развијеног механичког момента код једносмерне машине, основна замисао била је усмерена на проналажење сличних релација између фазних напона, брзине обртања, фазних струја и механичког момента. Решење се крило у трансформацији разматраних, по природи наизменичних, величина из трофазног abc домена у ротирајући координатни систем. Уколико координатни систем ротира истом угаоном брзином којом се мењају наизменични напони и струје, у овом координатном систему ове величине добијају једносмерне вредности. На овако приказаним величинама било је могуће применити стандардне регулационе механизме који су били примењивани на једносмерним погонима [79]. Управо ови

принципи су касније били употребљавани и у управљачким алгоритмима за прве апликације инвертора повезаног на мрежу.

Улогу електромоторне силе индуковане у намотају преузима напон мреже (U_m), док је спрежна импеданса и еквивалентна импеданса мреже (R и L) еквивалент отпорности и индуктивности намотаја машине.

Једначина напонске равнотеже за коло приказано на слици 2.20., након примењене Кларкине и Паркове трансформације, добија облик (2.19) и (2.20).



Слика 2.20. Принцип генерисања струје од стране инвертора повезаног на мрежу.

$$U_{id} = RI_d + L \frac{dI_d}{dt} - \omega_m LI_q + U_{md} \quad (2.19)$$

$$U_{iq} = RI_q + L \frac{dI_q}{dt} + \omega_m LI_d + U_{mq} \quad (2.20)$$

Након нормализације претходна два израза добијају се изрази (2.21) и (2.22)

$$u_{id} = r i_d + l \frac{d i_d}{dt} - x_s \omega i_q + u_{md} \quad (2.21)$$

$$u_{iq} = r i_q + l \frac{d i_q}{dt} + x_s \omega i_d + u_{mq}, \quad (2.22)$$

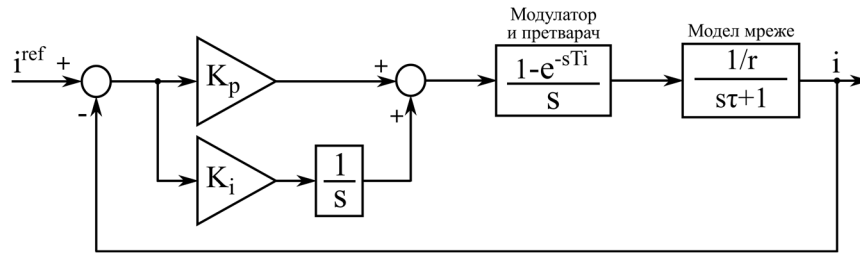
при чему важи да је:

$$Z_b = \frac{U_b}{I_b}, l = \frac{L}{Z_b}, r = \frac{R}{Z_b}, \tau = \frac{l}{r}, x_s = \frac{\omega_b L}{Z_b}, \omega = \frac{\omega_m}{\omega_b}, i_{dq} = \frac{I_{dq}}{I_b}, u_{dq} = \frac{U_{dq}}{U_b}. \quad (2.23)$$

$$U_b = U_n, I_b = \sqrt{3} \cdot I_n, \omega_b = \omega_m = 2 \cdot \pi \cdot 50. \quad (2.24)$$

Изрази (2.21) и (2.22) су готово индентични као њихови пандани код наизменичних машина [80]. У складу са тиме, блок дијаграм са слике 2.21. служи за прорачун параметара регулатора. На слици 2.21. i^{ref} је нормализована референтна вредност попречне или директне компоненте инјектованих струја добијена Кларкином и Парковом трансформацијом фазних abc струја. У устаљеном стању ове величине су константне и за њихову регулацију може се користити класичан пропорционално-интегрални (ПИ) регулатор [81]. На основу одступања стварне вредности струје од референтне (тј. грешке), регулатор генерише фактор испуне (d). Фактор испуне се прослеђује у ИШМ који генерише побудне сигнале за транзисторе у инвертору (слика 2.6.).

Последица примене прекидачких функција на полупроводничке компоненте је генерисање вектора напона инвертора. Управо овај напон, у корелацији са мрежним напоном, треба да резултује инјектовањем жељених струја у мрежу кроз спрежну импедансу.



Слика 2.21. Поједностављена струјна петља инвертора повезаног на мрежу.

У литератури се може пронаћи више механизма за синтезу регулатора коришћењем петље приказане на слици 2.21. Најчешће коришћене методе за експлицитно добијање потребних вредности за пропорционално и интегрално дејство регулатора при жељеном одзиву су модулни оптимум, симетрични оптимум и Далинов алгоритам [56], [79], [82]. Прва два резултују кратким временом успона, али и појавом прескока у регулисаној величини, док Далинов алгоритам резултује апериодичним одзивом са дужим временом успона [56], [79]. Изрази за прорачун поменутих параметара се могу наћи у табели 2.5. Потребно је узети у обзир изразе у (2.23) и чињенице да је $k=1/r$, $1/\lambda$ време за које контролисана величина треба да достигне 62% референтне вредности изражено у милисекундама и T_i период на ком се извршава струјна петља.

Приступ за прорачун	Модулни оптимум	Симетрични оптимум	Далинов алгоритам
Пропорционално дејство K_p	$\frac{l}{2 \cdot T_i}$	$\frac{r \cdot (T_i^2 + \tau^2)}{2 \cdot T_i \cdot \tau}$	$\frac{1}{k} \cdot \frac{1 - e^{\lambda T_i}}{e^{T_i/\tau} - 1}$
Интегрално дејство K_i	$\frac{r}{2}$	$\frac{(T_i + \tau)^3}{8 \cdot T_i^2 \cdot \tau^2}$	$\frac{1}{k} \cdot (1 - e^{\lambda T_i})$

Табела 2.5. Изрази за прорачун параметара пропорционално-интегралног регулатора.

Вредност квадратурне компоненте напона мреже је нула услед поравнавања вектора мреже са d -осом синхроноротирајућег координатног система, о чему је било речи у поглављу о синхронизационој јединици. Уколико се размотре изрази (2.25) и (2.26) којима се одређује произведена активна и реактивна снага, може се закључити да се контролисањем директне компоненте струје заправо контролише производња активне снаге, док се попречном компонентом регулише производња реактивне снаге.

$$p = u_{md}i_d + u_{mq}i_q = u_{md}i_d \tag{2.25}$$

$$q = u_{md}i_q - u_{mq}i_d = u_{md}i_q \tag{2.26}$$

Другим речима, уколико се зна колика треба да буде производња активне или реактивне снаге, једноставно се може доћи до потребних струјних референци. На пример, управљачка структура која регулише напон једносмерног међукола на основу одступања напона одређује колико активне снаге треба да се инјектује у мрежу. На основу ове вредности рачуна се референца директне компоненте струје.

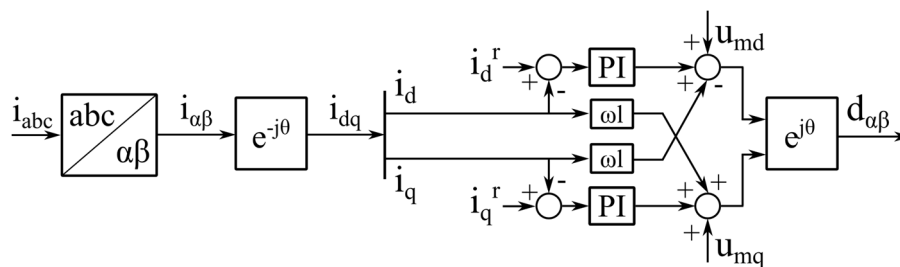
Излази самих регулатора се сабирају са декуплујућим ($-oli_q$ и oli_d) и *feed-forward* (u_{md} и u_{mq}) елементима (видети изразе (2.21) и (2.22)). На крају се добијају фактори испуне који се инверзном Парковом трансформацијом изражавају у стационарном $\alpha\beta$ домену и затим прослеђују модулатору. Комплетна структура задужена за контролисање струја се налази на слици 2.22.

Приказана структура је, иако врло једноставна, у контексту до сада разматраних контролних задатака, ефикасна. Алтернатива контролној структури која је заснована на пропорционално-интегралним регулаторима могу да буду структуре базиране на хистерезисним регулаторима [81]-[83], *deadbeat* регулаторима [81]-[84], предиктивној контроли [85], *fuzzy* контролерима [86]-[87],

неуралним мрежама и тако даље. Инхерентна променљива фреквенција прекидања чини хистерезисне регулаторе мање погодним за контролу рада инвертора повезаног на мрежу, првенствено због опасности од настанка резонанције услед променљивог хармонијског спектра инјектованих струја. У вези са поменути, као и код других апликација у којима се користе хистерезисни регулатори, врло је тешко решити проблем филтрирања контролисаних варијабли. У поређењу са ПИ регулаторима, *fuzzy* контролери и неуралне мреже су неодговарајућа решења за контролу струја услед вишеструког увећања утрошка процесорског времена, при чему су крајње перформансе, са становишта одзива контролисаних варијабли, упоредиве. *Deadbeat* регулатори обезбеђују изузетно брзо достизање референтних вредности, али по цену високих прескока у контролисаног величини. Ови прескоци су недопустиви код апликација попут претварача на мрежи, услед мале дозвољене струјне преоптеретивости. Дакле, једноставност и врло добре карактеристике одзива контролисаних варијабли су разлози због којих су се ПИ регулатори интензивно користили, не само у контроли претварача повезаног на мрежу, већ и у другим апликацијама које подразумевају употребу трофазног инвертора.

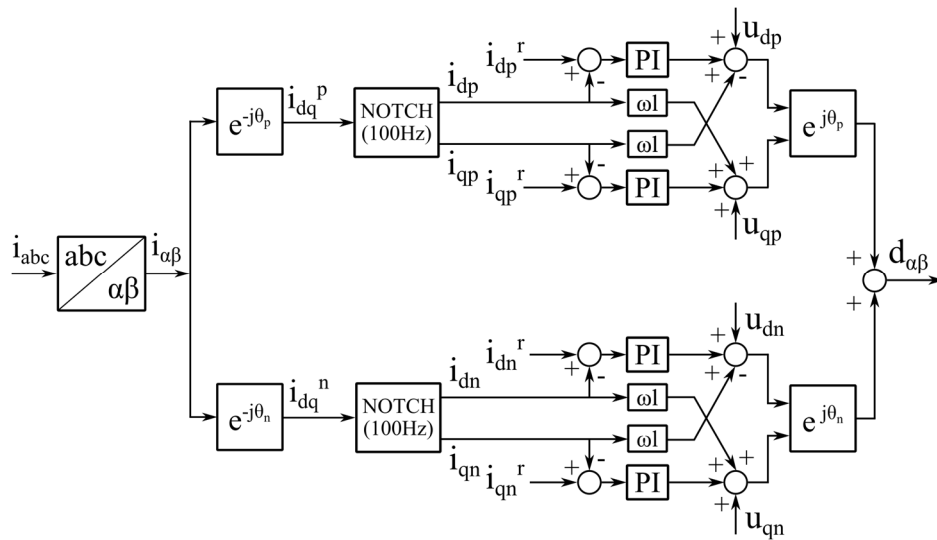
Ипак, регулисање директне и попречне компоненте у традиционалном смислу, на начин приказан на слици 2.22., одговарајућ је само уколико су прилике у мрежи номиналне, односно уколико нема поремећаја, првенствено несиметрије. Раније је напоменуто да несиметрија у мрежним напонима имплицира постојање и позитивних и негативних компоненти напона. У складу са овим, има смисла разматрати и симетричне компоненте струја - и позитивне и негативне компоненте генерисаних струја. Уколико се при појави несиметрије напона настави са разматрањем само позитивних компоненти, као што је то у суштини урађено на слици 2.22., струје постају несинусоидалне и јављају се осцилације и у активној и у реактивној снази. Појава несинусоидалности струја, иако у литератури слабо разматрана појава у несиметричним режимима, свакако није пожељна услед погоршања хармонијске дисторзије и појаве последица везаних за повећање ове величине. Таласности снага такође имају деградирајући утицај на квалитет рада и одзива инвертора. Таласност произведене активне снаге се пресликава у таласност напона једносмерног међукола. При израженим пропадима, великој производњи активне снаге и скромно одабраног кондензатора у једносмерном међуколу, таласност активне снаге може да изазове реаговање пренапонске или поднапонске заштите [88]-[89].

Овај проблем је први пут темељно разматран у [90]. У овом раду се предлаже потпуна контрола и позитивних и негативних компоненти струја. Реализована је контрола позитивне директне и попречне, i_{dp} и i_{qp} , компоненте струје и контрола негативне директне и попречне компоненте струје, i_{dn} и i_{qn} .



Слика 2.22. Структура задужена за регулацију директне и попречне компоненте генерисаних струја.

Слика 2.23. приказује две дупле струјне петље - једна задужена за контролу i_{dp} и i_{qp} , док је друга задужена за контролу i_{dn} и i_{qn} . У складу са оваквим приступом, овај алгоритам је добио назив *dual vector current control (DVCC)*. Недостатак овог решења се огледа у употреби *notch* филтара у директној грани. Слично као и код позитивних и негативних компоненти напона разматраних у поглављу о синхронизационој јединици, постоји узајамно дејство између позитивних и негативних компоненти струја. Осцилације на двострукој мрежној учестаности које се јављају у све четири компоненте струје се морају уклонити како би ПИ регулатори могли да прате задате вредности [85].

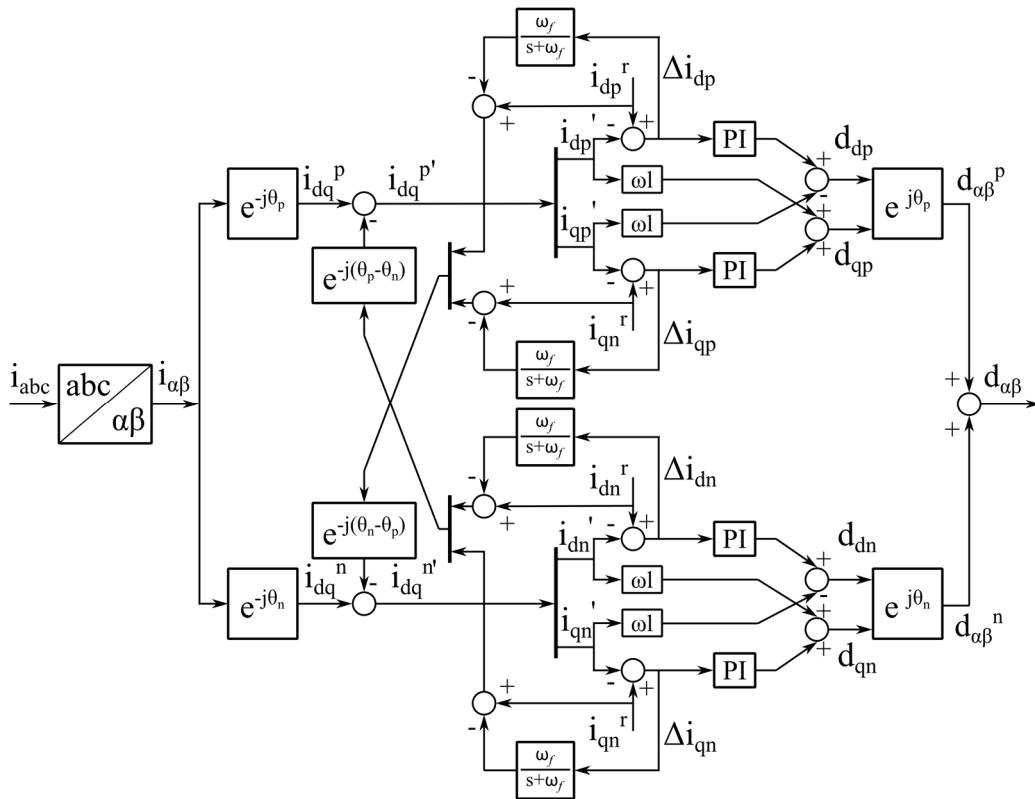


Слика 2.23. Прва предложена контролна структура која регулише и позитивне и негативне струјне компоненте.

Присуство релативно сложене преносне функције *notch* филтара у директној грани драстично отежава синтезу регулатора те је приказан принцип регулације струја прихваћен од стране истраживача, али су тражена решења која елиминирају употребу филтара у директној грани.

У [91] и [92] се предлаже свеобухватно и темељно моделовање система трофазног инвертора преко филтра првог реда повезаног на електричну мрежу. Осим тога, нуди се исцрпан алгоритам који објашњава синтезу ПИ регулатора и напонске (за контролу напона једносмерног међукола) и струјне петље. Допринос овог рада се огледа и у томе што нуди регулацију струја у синхронотирајућем координатном систему, али без употребе филтара за екстрактовање компоненти струја. На овај начин је пропусни опсег струјне петље знатно побољшан у односу на случај када се користи приступ из [90]. Ово је омогућено употребом резонантних чланова, паралелно постављених са пропорционално-интегралним (ПИ) регулаторима. Резонантни чланови су задужени за регулисање наизменичних компоненти струја, док ПИ регулатори имају функцију коју имају и када нема поремећаја - да регулишу једносмерне компоненте струје. Дакле, уместо да се користе филтри којима се издваја једносмерна компонента струја које се онда прослеђују у регулациону петљу, дозвољава се целокупној мереној струји да улази у регулациону петљу, без раздвајања једносмерне и наизменичне компоненте, те се затим употребом резонантних чланова решава проблем немогућности ПИ регулатора да регулишу наизменичне компоненте. Исправно функционисање предложеног решења имплицира пројектовање поменутих резонантних чланова. Осим тога, њихово присуство у петљи изискује и сложенији прорачун за параметре регулатора од оног који је разматран за номиналан режим.

Наизглед сложенија регулациона петља, али једноставнија за оптимизацију предложена је у [93]. У овом раду такође је реализована петља без филтара струја у директној грани. Додатно, не користе се ни резонантни филтри као што је то урађено у [91] и [92]. Овај алгоритам је приказан на слици 2.24. Овај предлог се заправо заснива на сличном принципу на којем се заснива *dual decoupled synchronous reference frame* синхронизациона јединица. Наиме, уколико се узме у обзир да референтне вредности немају осцилације, да у идеалном случају стварне вредности треба да се изједначе са овим референтним вредностима, да постоји веза између средњих вредности компоненти у једном координатном систему и осцилација у наспрамном координатном систему, може се доћи до закључка да референтне вредности могу да се искористе на начин који ће резултовати пригушујућим ефектом на осцилације у регулационој петљи. Дакле, осцилације у мереним струјама се не уклањају филтрирањем струја, нити резонантним члановима. Уклањају се одузимањем заротираних референтних вредности струја из наспрамног координатног система од мерених вредности. Нископропусни филтри приказани на слици 2.24., са преносном функцијом $\omega_f/(s+\omega_f)$, а у које улази разлика стварне и референтне вредности, додаје се само ради убрзавања декуплујућег дејства и петља принципијелно може да ради и без њих.



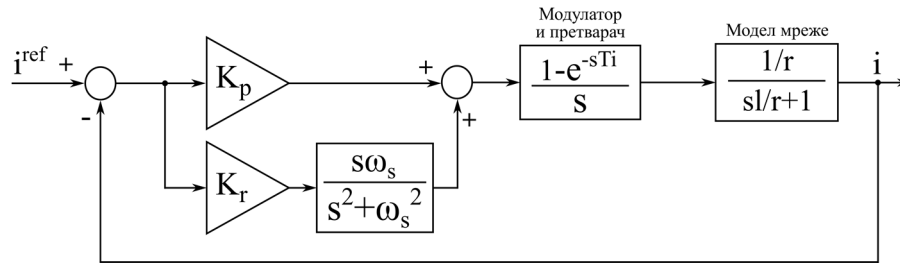
Слика 2.24. Струјна петља која не користи филтрирање струјних компоненти у директној грани.

Битно је напоменути да су филтри изван директне гране, те не деградирају квалитет одзива и могу се користити параметри дати у табели 2.5. Другим речима, оптимизовање петље је врло једноставно. Наравно, сама декуплујућа акција захтева извесно време, те прелазни процеси нису квалитетни као код једноструке петље и без поремећаја.

У [94] и [95] се предлаже алгоритам који у потпуности елиминира употребу филтара и резонантних чланова у струјној регулационој петљи. Међутим, струје које се инјектују у мрежу имају изразито несинусоидалан облик.

У [96], [97] и [98] аутори су предложили употребу другачијих регулатора за регулисање струја у апликацијама инвертора повезаног на мрежу. Уместо употребе класичних пропорционално-интегралних регулатора, размотрена је употреба пропорционално-резонантних регулатора (ПР). Разлика између ова два типа регулатора огледа се у томе што први користе стандардни интегратор док други користе генерализовани интегратор. Генерализовани интегратор помера бесконачно појачање са нулте фреквенције на жељену фреквенцију. Другим речима, ПР регулатори неутралишу грешку у устаљеном стању у величинама које осцилују на дефинисаној фреквенцији, а не само нултој фреквенцији.

Овим путем отворена је могућност регулисања алфа и бета компоненти струја - компоненти струје у стационарном $\alpha\beta$ координатном систему, односно струја које су наизменичне и осцилују на учестаности мрежног напона. У складу са овим предложена је нова упрошћена струјна петља која је приказана на слици 2.25. На приказаној слици референтна вредност није директна или попречна компонента струје, већ референтна алфа или бета компонента.



Слика 2.25. Поједностављена струјна петља која користи ПР регулаторе.

На основу ове петље могуће је израчунати потребне параметре ПР регулатора. Уколико се узме да је континуална преносна функција модулятора, претварача и мреже дата са:

$$G(s) = \frac{1 - e^{-sT_i}}{s} \cdot \frac{1/R}{L/R \cdot s + 1} \quad (2.27)$$

долази се до њене дискретизоване варијанте:

$$G(z) = \frac{1}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{R}{L}T_i}}{z - e^{-\frac{R}{L}T_i}} = \frac{a}{z - b}, \text{ где су } a = \frac{1}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L}T_i}\right) \text{ и } b = e^{-\frac{R}{L}T_i}. \quad (2.28)$$

Израз (2.28) је дискретизован употребом десне Ојлерове апроксимације. Овај метод за дискретизацију коришћен је и у наставку. Осим тога, резонантни члан ПР регулатора се изражава са:

$$R(s) = \frac{s\omega}{s^2 + \omega^2}. \quad (2.29)$$

Након дискретизације долази се до израза:

$$R(z) = \frac{(z-1) \cdot z \cdot T_i \cdot \omega}{(z-1)^2 + \omega^2 \cdot z^2 \cdot T_i^2}. \quad (2.30)$$

Уколико се узме у обзир да је $\omega^2 \cdot T_i^2 \ll 1$, што важи када је $T_i < 1.4 \text{ ms}$ и $\omega = 2 \cdot \pi \cdot 50$, апроксимативна дискретна функција резонантног члана је $R(z) \approx \frac{\omega \cdot T_i \cdot z}{z-1}$. Дакле, дискретна преносна функција читавог ПР регулатора је:

$$PR(z) = K_p + K_r \cdot \frac{\omega \cdot T_i \cdot z}{z-1} = KP \frac{z-\alpha}{z-1}, \quad (2.31)$$

при чему се узима да је однос параметара регулатора и приказаних коефицијента:

$$KP = K_p + K_r \cdot \omega \cdot T_i, \alpha = \frac{K_p}{K_p + K_r \cdot \omega \cdot T_i}, K_p = \alpha \cdot KP, K_r = \frac{KP - K_p}{\omega \cdot T_i}. \quad (2.32)$$

Долази се до преносне функције у директној грани:

$$DG(z) = PR(z) \cdot G(z) = KP \frac{z-\alpha}{z-1} \cdot \frac{a}{z-b}. \quad (2.33)$$

Након затварања негативне повратне спреге, добија се израз (2.34) који представља функцију спрегнутог дискретног преноса струјне петље.

$$ZP(z) = \frac{KP(z-\alpha) \cdot a}{z^2 - (1+b-KP \cdot a)z + b - KP \cdot \alpha \cdot a} \quad (2.34)$$

Уколико се карактеристична једначина струјне петље упореди са општим изразом за карактеристичну једначину другог реда:

$$(z - \rho \cdot e^{j\theta})(z - \rho \cdot e^{-j\theta}) = z^2 - 2z \cdot \rho \cdot \cos\theta + \rho^2 \quad (2.35)$$

може се уочити веза између коефицијената у две једначине:

$$1 + b - KP \cdot a = 2\rho \cdot \cos\theta, b - KP \cdot \alpha \cdot a = \rho^2. \quad (2.36)$$

Добија се да раније поменути коефицијенти треба да се рачунају коришћењем израза (2.37).

$$KP = \frac{1+b-2\rho\cos\theta}{a}, \alpha = \frac{b-\rho^2}{KP\cdot a}. \quad (2.37)$$

Након што се дефинише жељено време смираја τ_s и фактор пригушења ζ , могу да се израчунају сви потребни коефицијенти [50]. Величина ω_n је сопствена непригушена учестаност система.

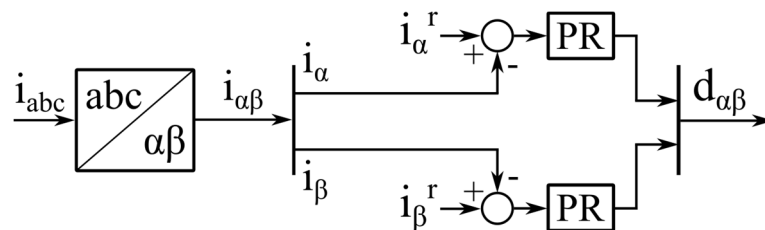
$$\omega_n = \frac{4}{\zeta\tau_s}, \rho = e^{-\zeta\omega_n T_i}, \theta = \omega_n \cdot T_i \sqrt{1 - \zeta^2}. \quad (2.38)$$

За регулисање произведених струја, као што је раније имплицирано, потребна су два ПР регулатора - један за алфа компоненту, а други за бета компоненту. Долази се до приказа подструктуре струјне петље контролног алгоритма, која се базира на ПР регулаторима.

У литератури је више пута показано да је преносна функција струјне петље у стационарном координатном систему, која користи два ПР регулатора, потпуно еквивалентна преносној функцији струјне петље у синхронотирајућем координатном систему, која користи четири ПИ регулатора и пратеће Паркове трансформације на улазу и излазу из петље [98]-[99]. Важно је напоменути да поменута еквиваленција важи уколико се изузму филтри или резонантни чланови потребни за решавање проблема несиметрије напона, односно екстракцију компоненти напона у току поремећаја у мрежи.

Ипак, са становишта реализације контролних циљева постоје извесне врло значајне разлике између два приступа. Услед присуства несиметрије напона, те услед тенденције да се рукује и позитивним и негативним компонентама струјама, контролни алгоритам базиран на ПИ регулаторима изискује употребу неке врсте филтрације у струјној петљи. Са друге стране, појава несиметричности у фазним струјама резултује простом разликом у амплитудама алфа и бета компоненти струја, након што се фазне струје Кларкином трансформацијом пребаце у стационарни координатни систем. Дакле, не долази до појаве било каквих виших хармоника или таласних облика које ПР регулатори не могу да опслужују - ПР регулаторима свакако није битно колике су амплитуде референтне и стварне струје, све док су у опсегу од око 1 p.u. Из тога следи да није потребна употреба било каквих механизма за раздвајање или уклањање струјних компоненти. Структура приказана на слици 2.26. може неизмењена да се користи како за номиналне, тако и за режиме са поремећајима.

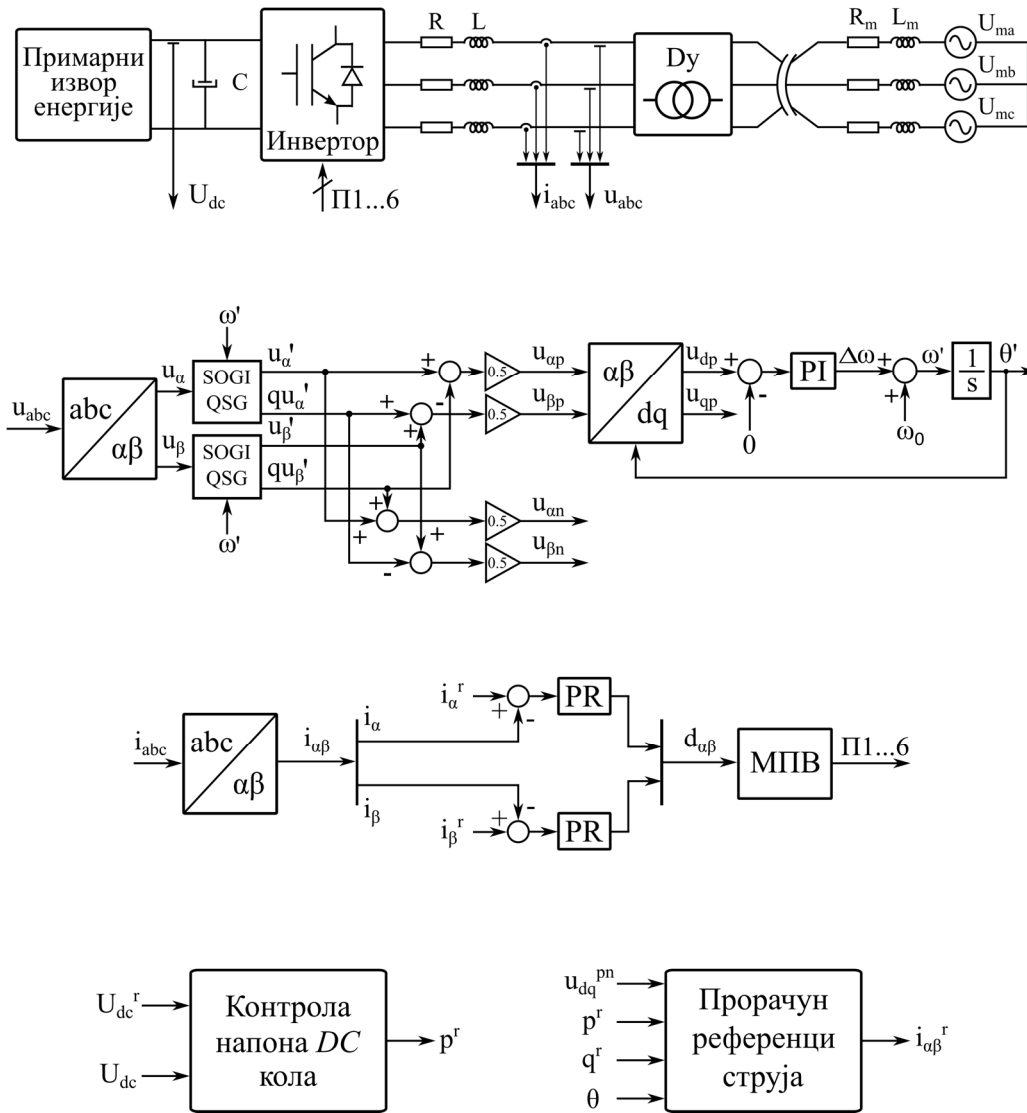
Осим тога, чињеница да се користе два регулатора, а не четири, да се извршава само скаларна Кларкина трансформација, а не и Паркова трансформација и да нема било каквих филтара или додатних трансформација, сугерише заиста значајну уштеду у утрошку процесорског времена.



Слика 2.26. Структура задужена за регулацију алфа и бета компоненте генерисаних струја.

Заправо, време извршавања струјне подрутине у случају једноструке петље са ПИ регулаторима траје 72 μs , у случају алгоритма са слике 2.24. 65 μs , док струјна петља заснована на ПР регулаторима захтева 50 μs , мерено на експерименталној поставци описаној у наредном поглављу. При томе треба имати у виду да се са петљом која користи ПР регулаторе остварују сви контролни циљеви који се остварују и алгоритмом са слике 2.24., при чему су транзијентни одзиви значајно бољи услед елиминисања потребе за декуплујућим механизмом.

Слика 2.27. приказује целокупну поставку контролног алгоритма који ће се користити у наставку рада.



Слика 2.27. Структура целокупног контролног алгоритма.

У следећем поглављу биће разматрана последња значајна подструктура контролног алгоритма - прорачун референци струја. Ради транспарентности рада ове структуре, референце ће се ипак задавати у синхронотирајућем координатном систему. Једноставније је оценити рад јединице за прорачун референци струја када су оне једносмерне компоненте него када се ради о наизменичним компонентама, какве референце струје постану уколико се задају у стационарном референтном систему. Овим се донекле увећава утрошак процесорског времена, али се олакшава процес тестирања. Након што се референце израчунају, коришћењем израза (2.39), (2.40) и (2.41) биће пребачене у стационарни координатни систем и прилагођене ПР регулаторима. У изразу (2.39) примењена је инверзна Паркова трансформација на израчунатим позитивним и негативним компонентама струја (i_{dp} , i_{qp} , i_{dn} и i_{qn}). Битно је напоменути да се за негативне компоненте користи негативна вредност естимиране позиције вектора мрежног напона услед чињенице да негативно ротирајући координатни систем ротира у супротну страну од позитивног координатног система, за који се везује естимација позиције.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^r \\ i_{\beta}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dp}^r \\ i_{qp}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & -\sin(-\theta) \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dn}^r \\ i_{qn}^r \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

У развијеном облику, алфа и бета компоненте референци струја се рачунају путем:

$$i_{\alpha}^r = (i_{dp}^r + i_{dn}^r) \cdot \cos \theta - (i_{qp}^r - i_{qn}^r) \cdot \sin \theta \quad (2.40)$$

$$i_{\beta}^r = (i_{dp}^r - i_{dn}^r) \cdot \sin \theta + (i_{qp}^r + i_{qn}^r) \cdot \cos \theta. \quad (2.41)$$

3. Прорачун струјних референци

У претходном поглављу су дати основни алати за остваривање контролних циљева рада инвертора повезаног на мрежу. У овом поглављу дефинисаће се оквири за прорачун референци струја, које ће остваривати поменуте циљеве. Биће приказани механизми којима се обезбеђује производња свих профила струја и снага који су могући, а који имају практичног значаја. Другим речима, у наставку овог поглавља су дати механизми за израчунавање струјних референци које имају за циљ остваривање било ког контролног циља који се може ставити пред један дистрибуирани извор електричне енергије.

Разматрање проблема задавања референци се може започети са изразом за комплексну снагу, у којем фигуришу активна и реактивна снага:

$$\hat{S} = P + iQ = (e^{i\omega t} u_{dq}^p + e^{-i\omega t} u_{dq}^n) \cdot (e^{-i\omega t} i_{dq}^{p*} + e^{i\omega t} i_{dq}^{n*}). \quad (3.1)$$

У литератури су предлагане и коришћене и друге дефиниције за снаге, првенствено реактивну снагу [91], [92], [100]. Ипак, њихова употреба није у довољној мери образложена и оправдана.

Развојем израза (3.1) долази се до израза за појединачне компоненте снаге:

$$P^r = i_{dp}^r \cdot u_{dp} + i_{qp}^r \cdot u_{qp} + i_{dn}^r \cdot u_{dn} + i_{qn}^r \cdot u_{qn} \quad (3.2)$$

$$Q^r = i_{dp}^r \cdot u_{qp} - i_{qp}^r \cdot u_{dp} + i_{dn}^r \cdot u_{qn} + i_{qn}^r \cdot u_{dn} \quad (3.3)$$

$$\Delta P_1 = i_{qn}^r \cdot u_{qn} - i_{qp}^r \cdot u_{dn} - i_{dn}^r \cdot u_{qp} + i_{qn}^r \cdot u_{dp} \quad (3.4)$$

$$\Delta P_2 = i_{dp}^r \cdot u_{dn} + i_{qp}^r \cdot u_{qn} + i_{dn}^r \cdot u_{dp} + i_{qn}^r \cdot u_{qp} \quad (3.5)$$

$$\Delta Q_1 = i_{dp}^r \cdot u_{qn} - i_{qp}^r \cdot u_{dn} + i_{dn}^r \cdot u_{qp} - i_{qn}^r \cdot u_{dp} \quad (3.6)$$

$$\Delta Q_2 = -i_{dp}^r \cdot u_{dn} - i_{qp}^r \cdot u_{qn} + i_{dn}^r \cdot u_{dp} + i_{qn}^r \cdot u_{qp} \quad (3.7)$$

где су u_{dp} , u_{qp} , u_{dn} , и u_{qn} естимиране компоненте мрежног напона, P^r референца за активну снагу, Q^r референца за реактивну снагу, ΔP_1 и ΔP_2 осцилаторне компоненте активне снаге, ΔQ_1 и ΔQ_2 осцилаторне компоненте реактивне снаге, а i_{dp}^r , i_{qp}^r , i_{dn}^r , и i_{qn}^r тражене струјне референце.

Дакле, прва два израза дефинишу колике ће бити средње вредности активне и реактивне снаге уколико се инјектују назначене референце струје при текућим напонским приликама. Преостала четири израза одређују колике ће бити амплитуде осцилација у активној и реактивној снази на двострукој мрежној учестаности - (3.4) и (3.6) су синусоидалне компоненте, док су (3.5) и (3.7) косинусоидалне компоненте.

Узимајући у обзир да се у трофазном систему дистрибуираног извора без неутралног вода могу разматрати четири струје [67]-[69], позитивне и негативне, директне и попречне, односно постоје четири променљиве, постаје јасно да је потребно издвојити четири израза из (3.2) - (3.7). У наставку ће бити разматрано неколико система једначина издвојених из (3.2) - (3.7). Сваки од система резултује различитим профилима произведених снага, односно струја и напона. Над сваким од њих ће бити извршене извесне модификације како би се обезбедила сигурна и непрекидна производња енергије.

Прво ће се детаљно размотрити два система једначина - она који обезбеђују потпуну елиминацију осцилација или из активне ($\Delta P_1=0$ и $\Delta P_2=0$) или из реактивне снаге ($\Delta Q_1=0$ и $\Delta Q_2=0$). Систем једначина чијом употребом се елиминишу осцилације из активне снаге чине изрази (3.2) - (3.5).

Решавањем овог система, при чему су (3.4) и (3.5) изједначени са нулом, долази се до израза за потребне референце струја којим се остварује тражени профил снага ($\Delta P=0$, ΔQ неконтролисано):

$$i_{dp}^r = \frac{P^r \cdot u_{dp}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2} + \frac{Q^r \cdot u_{qp}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2} \quad (3.8)$$

$$i_{qp}^r = \frac{P^r \cdot u_{qp}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2} - \frac{Q^r \cdot u_{dp}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2} \quad (3.9)$$

$$i_{dn}^r = -\frac{P^r \cdot u_{dn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2} + \frac{Q^r \cdot u_{qn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2} \quad (3.10)$$

$$i_{qn}^r = -\frac{P^r \cdot u_{qn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2} - \frac{Q^r \cdot u_{dn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2} \quad (3.11)$$

Систем једначина чијом употребом се елиминишу осцилације из реактивне снаге, дакле ΔP је неконтролисано и $\Delta Q=0$, чине изрази (3.1), (3.2), (3.6) и (3.7). Поново се изрази за осцилаторне елементе ΔQ_1 и ΔQ_2 изједначавају са нулом. Решавањем овог система долази се до потребних референци струја (3.12) - (3.15).

$$i_{dp}^r = \frac{P^r \cdot u_{dp}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2} + \frac{Q^r \cdot u_{qp}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2} \quad (3.12)$$

$$i_{qp}^r = \frac{P^r \cdot u_{qp}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2} - \frac{Q^r \cdot u_{dp}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2} \quad (3.13)$$

$$i_{dn}^r = \frac{P^r \cdot u_{dn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2} - \frac{Q^r \cdot u_{qn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2} \quad (3.14)$$

$$i_{qn}^r = \frac{P^r \cdot u_{qn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2} + \frac{Q^r \cdot u_{dn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2} \quad (3.15)$$

Могуће је из (3.2) - (3.7) издвојити и друге системе једначина, али претходна два имају практичан значај. Преостали би резултовали умањеним, али не и елиминисаним осцилацијама у активной и реактивној снази. Стога ће њихово разматрање бити изостављено у наставку.

Раније је разматрано да је императив да инвертор остане повезан са мрежом што дуже при погоршаним условима рада. На овај начин се омогућава коришћење производних капацитета дистрибуираних извора у критичним ситуацијама. У супротном, одспајање извора свакако не би помогло ублажавању ефеката поремећаја.

Један од механизма који мора бити размотрен, како би се спречило присилно одспајање извора од мреже је механизам за лимитирање произведених струја. Уколико се задрже неизмењене референтне вредности за активне и реактивне снаге, из израза (3.8) - (3.15) се види да ће при умањеним компонентама напона референтне вредности струја бити увећане. Овај проблем је нарочито изражен при великој производњи снага пре пропада и при израженим несиметријама напона. У оваквим режимима референтне, а уколико је струјна петља добро пројектована, и стварне вредности струја могу да превазиђу дозвољене вредности дефинисане струјним могућностима полупроводничких компоненти. Један од недостатака транзисторских мосних инвертора је мала струјна преоптеретивост. Док код претварача базираних на тиристорима краткорочна струјна преоптеретивост иде и до неколико номиналних вредности, широко комерцијално доступни транзистори подnose струје које су између 20% и 50% веће од номиналних. Услед тога, струјни лимити претварача се брже достигну, те је функционалност лимитирања струја код ових претварача нарочито значајна.

У литератури се предлаже неколико механизма за прорачун референци струја у току несиметрија напона. Решења предложена у [94], [101]-[103] обезбеђују производњу струја чије амплитуде су ограничене, али се разматра само производња активне снаге. До скоро *Grid code*-ови нису захтевали од дистрибуираног извора производњу реактивне снаге у току поремећаја, уколико је примарни извор енергије била фотонапонска електрана. Ипак, у новим стандардима се и од ових

извора захтева производња реактивне снаге, те су разматрана решења застарела [104]. Са друге стране, разматрање искључиво реактивне снаге је такође у извесном обиму било оправдано, нарочито уколико су се развијали алгоритми за *STATCOM* погоне. Стога су биле предложене и стратегије којима се реализовала сигурна производња реактивне снаге у току поремећаја [105], [106], [107]. Приступи разматрани у [108] и [109] такође омогућавају ограниченост струјних референци приликом производње реактивне снаге. Разматрана је и веза између произведене снаге и осцилација напона једносмерног међукола. Осим овога, нуди се и функционалност компензације неуравнотежености локалног потрошачког подручја. Ипак, поменути приступи су једностранни и, или више не задовољавају стандарде, или представљају решења примењива само на узак број апликација. Стога се у литератури нуде и извесна решења којима се обезбеђује производња и активне и реактивне снаге у току пропада, мада са извесним ограничењима и недостацима. Сигурна производња активне и реактивне снаге у току поремећаја је обезбеђена у [110], али се разматра производња само позитивних компоненти струја. Овакав приступ резултује несинусоидалним струјама које се инјектују у мрежу. Осим тога, не контролишу се осцилације у активној и реактивној снази, које су последица несиметричних напона мреже. Лимитирање референци у стационарном координатном систему је понуђено у [111]. Ово решење омогућава производњу широког спектра профила активне и реактивне снаге, али не и оног у којем су осцилације у активној или реактивној снази неутралисане. Затим, сви приказани сценарији захтевају неки вид детекције умањења фазних напона. Осим тога, у раду се подразумева да увек има довољно струјних капацитета за производњу и активне и реактивне снаге, што не мора да буде случај. Уколико је пропад изражен, може да се деси да преостали струјни капацитети дозвољавају само делимичну производњу једне снаге и захтевају потпуну обуставу производње друге снаге. Приказан механизам не може да израчуна референце у овом случају. Слична замерка може да се да и решењима из [82] и [112]. Принцип за прорачун референци предложен у [113] резултује несинусоидалним струјама. Додатно, струје су мање од референтних, што сугерише да капацитети инвертора нису искоришћени.

Услед чињенице да разматрени приступи имају недостатака, у наставку је предложен нов механизам за сигурну и максимизовану производњу активне и реактивне снаге.

Амплитуде струја ће бити ограничене на једну релативну јединицу, при чему је по условима нормализације струја од једне релативне јединице за $\sqrt{3}$ пута већа од ефективне вредности номиналне фазне струје. Дакле, амплитуда фазне струје која ће бити дозвољена је за $\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} - 1$, односно 22% већа од номиналне амплитуде фазне струје.

Важна је напомена да је приликом ограничавања струја императив задржавање истог профила снага као и када ограничења не би било.

Како би процес лимитирања био успешан, прво је неопходно одредити која од фазних струја би имала највећу вредност уколико се лимитирање не би реализовало. За потребе два до сада разматрана приступа за рачунање референци, највећа фазна струја може да се пронађе применом инверзне Паркове трансформације (2.39), односно изразима (3.16) и (3.17). У наставку индекс x означава фазу која тренутно се разматра, односно замена је за a, b или c .

$$i_{ax} = i_{ap}^r \cdot \cos(\varphi_x) - i_{qp}^r \cdot \sin(\varphi_x) + i_{an}^r \cdot \cos(-\varphi_x) - i_{qn}^r \cdot \sin(-\varphi_x) \quad (3.16)$$

$$i_{bx} = i_{ap}^r \cdot \sin(\varphi_x) + i_{qp}^r \cdot \cos(\varphi_x) + i_{an}^r \cdot \sin(-\varphi_x) + i_{qn}^r \cdot \cos(-\varphi_x) \cdot \quad (3.17)$$

Фазни став фазних струја се одређује изразом:

$$\begin{aligned} \varphi_a &= \text{atan}(Q^r/P^r) \\ \varphi_b &= \varphi_a - 2 \cdot \pi/3 \\ \varphi_c &= \varphi_a + 2 \cdot \pi/3. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Фазне струје достижу свој максимум у овим фазним ставовима услед тога што фазни напон a има максимум за нулти фазни став, фазни напон b достиже максимум у $-2 \cdot \pi/3$, фазни напон c $2 \cdot \pi/3$, а коресподентне струје су померене у односу на фазне напоне за $\arctan(Q^r/P^r)$. Даље је потребно применити инверзну Кларкину трансформацију (3.19).

$$\begin{bmatrix} i_{amax} \\ i_{bmax} \\ i_{cmax} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha x} \\ i_{\beta x} \end{bmatrix}, \quad (3.19)$$

У развијеном облику, максималне вредности фазних струја се добијају изразима (3.20) - (3.22).

$$i_{amax} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot i_{\alpha a} \quad (3.20)$$

$$i_{bmax} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot i_{\alpha b} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{\beta b} \right) \quad (3.21)$$

$$i_{cmax} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot i_{\alpha c} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{\beta c} \right) \quad (3.22)$$

Када се одреде максималне вредности струја по фази, утврђује се која од њих је највећа и на основу ове информације се одређује колико је потребно умањити референтне вредности. Заправо, потребно је одредити колико је неопходно умањити текуће референце за снаге, P^r и Q^r како би се референце у струји одржале у оквиру дозвољених вредности.

Поменуто умањење референци снага се може реализовати на више начина и са више циљева. За почетак ће се захтевати приоритизација производње једне од снага. Односно, са појавом несиметрије напона иницијално ће се умањивати производња неприоритизоване снаге. Тек уколико ни потпун прекид производње неприоритизоване снаге не спречи појаву прекомерних струја, смањиваће се и референца за приоритизовану снагу.

Дакле, поново се посматрају системи једначина (3.2) - (3.5) и (3.1), (3.2), (3.6) и (3.7), али се сада узима да су осим референци струја непознате и референце снага. Ово увећава број непознатих при чему је број једначина остао исти. Стога се у систем мора уврстити додатни израз. Израз који се може додати је онај којим би се у обзир узела максимално дозвољена струја. Дакле, могао би се уврстити израз сличан (3.20) - (3.22), при чему би се уместо опште ознаке за фазну струју (i_{amax} , i_{bmax} или i_{cmax}) ставила максимално дозвољена вредност (I_{max}). Ипак, овај приступ не би резултовао решивим системом зато што су непознате четири струјне референце и две референце за снаге, а доступно би било пет једначина. Осим тога, нелинеарности које уносе тригонометријске функције присутне у изразима (3.16) и (3.17) онемогућавају решавање система у реалном времену. Решење се налази у примени принципа суперпозиције.

У наставку су дата три приступа за прорачун референци и њихово ограничење. Првим приступом се омогућава приоритизација производње активне или реактивне снаге, док се производња реактивне, односно активне, реализује само уколико преостане струјних капацитета. Могућа је и елиминација осцилација у активној или реактивној снази. Другим приступ је сличан првом, али се овде одржава однос произведене активне и реактивне снаге пре и у току поремећаја. Заправо, задаје се фактор снаге и он остаје исти у свим радним режимима. Трећи алгоритам омогућава флексибилну производњу активне и реактивне снаге кроз дефинисање односа позитивних и негативних компоненти струја којима се реализују задате референце снага.

Приоритизација производње активне или реактивне снаге, с освртом на осцилације у снагама

Прво се разматра систем једначина у којем се задржава референца за приоритизовану снагу, док се привремено узима да је референца за другу снагу нула. Након овога ће се разматрати систем у којем фигурише ненулта референца за неприоритизовану снагу, док је друга референца нула. Ово драстично поједностављује прорачун. На пример, уколико се захтева приоритизација активне снаге, привремено се узима да је потребно прекинути производњу реактивне снаге. У том случају $\varphi_a = 0$ и све тригонометријске једначине нестају (3.20) - (3.22) и додатни изрази којима се узима у обзир максимално дозвољена фазна струја постају:

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot (i_{dp} + i_{dn}) = I_{max} \quad (\text{уколико је } i_{amax} \text{ највећа}) \quad (3.23)$$

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 0.5 \cdot (2 \cdot i_{dp} - i_{dn} - \sqrt{3} \cdot i_{qn}) = I_{max} \quad (\text{уколико је } i_{bmax} \text{ највећа}) \quad (3.24)$$

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 0.5 \cdot (2 \cdot i_{dp} - i_{dn} + \sqrt{3} \cdot i_{qn}) = I_{max} \quad (\text{уколико је } i_{cmax} \text{ највећа}) \quad (3.25)$$

Када се један од израза (3.23) - (3.25) дода раније разматраним системима једначина добијају се нове референце за активну снагу. Изрази (3.26) - (3.28) се користе уколико се захтева уклањање осцилација из активне снаге.

$$P_n^r = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max} \cdot \frac{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2}{u_{dp} - u_{dn}} \quad (\text{уколико је } i_{amax} \text{ највећа}) \quad (3.26)$$

$$P_n^r = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max} \cdot \frac{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2}{2 \cdot u_{dp} + u_{dn} + \sqrt{3} \cdot u_{qn}} \quad (\text{уколико је } i_{bmax} \text{ највећа}) \quad (3.27)$$

$$P_n^r = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max} \cdot \frac{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2}{2 \cdot u_{dp} + u_{dn} - \sqrt{3} \cdot u_{qn}} \quad (\text{уколико је } i_{cmax} \text{ највећа}) \quad (3.28)$$

Изрази (3.29) - (3.31) се користе уколико се захтева уклањање осцилација из реактивне снаге.

$$P_n^r = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max} \cdot \frac{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2}{u_{dp} + u_{dn}} \quad (\text{уколико је } i_{amax} \text{ највећа}) \quad (3.29)$$

$$P_n^r = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max} \cdot \frac{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2}{2 \cdot u_{dp} - u_{dn} + \sqrt{3} \cdot u_{qn}} \quad (\text{уколико је } i_{bmax} \text{ највећа}) \quad (3.30)$$

$$P_n^r = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max} \cdot \frac{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2}{2 \cdot u_{dp} - u_{dn} - \sqrt{3} \cdot u_{qn}} \quad (\text{уколико је } i_{cmax} \text{ највећа}) \quad (3.31)$$

Са друге стране, могуће је приоритизовати производњу реактивне снаге. У том случају се фазни став поставља на $\varphi_a = \pi/2$. Изрази које је потребно искористити како би се узео у обзир струјни лимит постају:

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot (-i_{qp} + i_{qn}) = I_{max} \quad (\text{уколико је } i_{amax} \text{ највећа}) \quad (3.32)$$

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 0.5 \cdot (-2 \cdot i_{qp} + \sqrt{3} \cdot i_{dn} - i_{qn}) = I_{max} \quad (\text{уколико је } i_{bmax} \text{ највећа}) \quad (3.33)$$

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 0.5 \cdot (-2 \cdot i_{qp} - \sqrt{3} \cdot i_{dn} - i_{qn}) = I_{max} \quad (\text{уколико је } i_{cmax} \text{ највећа}) \quad (3.34)$$

Нове референце за реактивну снагу (3.35) - (3.37) се користе уколико се захтева уклањање осцилација из активне снаге.

$$Q_n^r = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max} \cdot \frac{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2}{u_{dp} - u_{dn}} \quad (\text{уколико је } i_{amax} \text{ највећа}) \quad (3.35)$$

$$Q_n^r = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max} \cdot \frac{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2}{2 \cdot u_{dp} + u_{dn} + \sqrt{3} \cdot u_{qn}} \quad (\text{уколико је } i_{bmax} \text{ највећа}) \quad (3.36)$$

$$Q_n^r = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max} \cdot \frac{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2}{2 \cdot u_{dp} + u_{dn} - \sqrt{3} \cdot u_{qn}} \quad (\text{уколико је } i_{cmax} \text{ највећа}) \quad (3.37)$$

Уколико се захтева уклањање осцилација из реактивне снаге, нове референце за реактивну снагу постају:

$$Q_n^r = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max} \cdot \frac{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2}{u_{dp} + u_{dn}} \quad (\text{уколико је } i_{amax} \text{ највећа}) \quad (3.38)$$

$$Q_n^r = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max} \cdot \frac{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2}{2 \cdot u_{dp} - u_{dn} - \sqrt{3} \cdot u_{qn}} \quad (\text{уколико је } i_{bmax} \text{ највећа}) \quad (3.39)$$

$$Q_n^r = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max} \cdot \frac{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2}{2 \cdot u_{dp} - u_{dn} + \sqrt{3} \cdot u_{qn}} \quad (\text{уколико је } i_{cmax} \text{ највећа}) \quad (3.40)$$

Услед узимања да је само референца неприоритизоване снаге нула, може да се деси да референца приоритизоване снаге постане већа у току пропада него што је била пре њега. Ово се може десити при умереним пропадима, када је производњу неприоритизоване снаге потребно само смањити, али не и потпуно обуставити. Заправо, уколико се деси да је нова референца приоритизоване снаге већа од старе, задржава се стара референца за приоритизовану снагу и рачуна се референца за неприоритизовану снагу. Изрази за ову референцу су исти као до сада разматрани - (3.26) - (3.31) или (3.35) - (3.40), с том разликом што се у изразима не користи максимална дозвољена струја (I_{max}), већ вредност која назначавача колико струјних капацитета је преостало за инјектовање неприоритизоване снаге. Са друге стране, за потребе овог прорачуна потребно је одредити који део струјних капацитета ће бити утрошен за приоритизовану снагу. На пример, уколико се предност даје активној снази, струја фазе a је највећа, захтева се да активна снага нема осцилација и пропад напона није дубок, део струјних капацитета који ће се утрошити за производњу активне снаге се рачуна помоћу (3.41).

$$i_{ap} = \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1}{P^r} \cdot \frac{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2}{u_{dp} - u_{dn}} \right)^{-1} \quad (3.41)$$

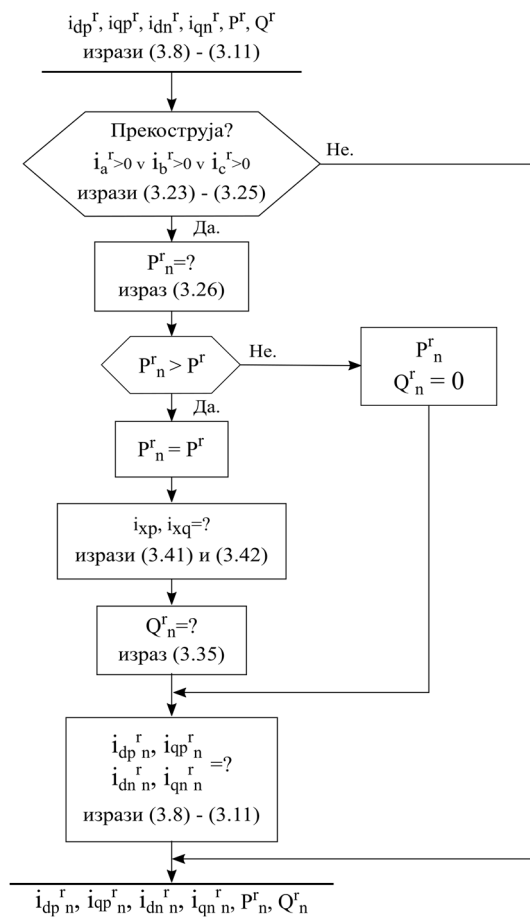
Овај израз је добијен тако што је у израз (3.26) уместо I_{max} уврштена општа ознака за максималну струју фазе a и узета текућа референца за активну снагу P^r . За производњу реактивне снаге могу се издвојити струјни капацитети израчунати са:

$$i_{aq} = \sqrt{I_{max}^2 - i_{ap}^2} \quad (3.42)$$

Вредност i_{aq} добијена са (3.42) се користи за проналажење дозвољене вредности за референцу реактивне снаге уврштавањем те вредности у израз (3.35). На крају, нове референце снаге се користе у оригиналним изразима (3.8) - (3.15).

Процедура за овај пример је сумирана сликом 3.1. Након што су израчунате референце за активну и реактивну снагу, а на основу њих и струјне референце, проверава се да ли би нека од фазних струја била већа од дефинисаног лимита. Уколико фазне струје не би биле веће од лимита, тренутне референце се прослеђују струјној петљи. Уколико се процени да би нека од фазних струја била већа од лимита, приступа се процесу новог прорачуна референци који треба да резултује ограничењем највише фазне струје на дефинисан лимит. За разматрани пример, где је производња активне снаге приоритизована, на основу тренутних напонских прилика се рачуна максимална активна снага која може да се произведе. Ова нова референца за активну снагу се пореди са старом.

Уколико је нова референца мања од старе, усваја се нова референца за активну снагу, а референца за реактивну снагу се поставља на нулу. Супротно, уколико је нова референца за активну снагу већа од старе, задржава се стара референца, док се референца за реактивну снагу рачуна изнова. Референца за реактивну снагу се рачуна на основу референце за активну снагу и на основу тренутних напонских прилика. Израчунава се који део струјних капацитета одлази на производњу активне снаге, а затим се израчуна који део струјних капацитета може да се издвоји за производњу реактивне снаге. Након што се добију нове референце за снаге, оне се користе за проналажење нових струјних референци - референци које ће резултовати у максимизацији експлоатације производних капацитета, без да се активира прекострујна заштита. Остали сценарији су слични разматраном. Када се приоритизује производња активне снаге, алгоритам је потпуно исти, разлика је једино у изразима који се користе (у зависности од тога да ли се анулирају осцилације активне или реактивне снаге). Уколико се захтева приоритизација производње реактивне снаге, на слици 3.1. је потребно заменити места P^r и Q^r [114].



Слика 3.1. Алгоритам којим се приоритизује производња једне снаге (ΔP или ΔQ анулирано).

Одржавање константног фактора снаге, с освртом на осцилације у снагама

Осим приступа приоритизације производње једне снаге, могуће је дефинисати механизам којим се производња снага паралелно умањује. Могуће је одржавати константан фактор снаге, односно производити исти однос активне и реактивне снаге пре пропада и за време поремећаја. Процес прорачуна референци за овај захтев је сличан претходном. Разлика је у томе што се сада узима у обзир и израз којим се дефинише однос референци активне и реактивне снаге, спрам задатог фактора снаге. Дакле, поред већ разматраног изрази (3.42), односно (3.43), потребно је узети у обзир и (3.44).

$$I_{max} = \sqrt{i_{xp}^2 + i_{xq}^2} \quad (3.43)$$

$$\frac{Q_n^r}{P_n^r} = \tan(\arccos(\cos(\varphi))) \quad (3.44)$$

У израз (3.43) се уврштавају изрази попут (3.41), у зависности од посматраног сценарија. Фактор снаге је унапред дефинисан параметар. Када се реши систем једначина (3.43) и (3.44), долази се до израза за нове референце за активну снагу. Уколико се захтева уклањање осцилација из активне снаге користи се (3.45) уколико је струја фазе *a* највећа, (3.46) се користи уколико је струја фазе *b* највећа, а (3.47) се користи уколико је струја фазе *c* највећа. Нова референца за реактивну снагу се рачуна на основу (3.44).

$$P_n^r = \frac{I_{max}}{\sqrt{\left(\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{u_{dp} - u_{dn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{u_{dp} - u_{dn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2} \cdot \tan(\arccos(\cos(\varphi)))\right)^2}} \quad (3.45)$$

$$P_n^r = \frac{I_{max}}{\sqrt{\left(\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{2 \cdot u_{dp} + u_{dn} + \sqrt{3} \cdot u_{qn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{2 \cdot u_{dp} + u_{dn} + \sqrt{3} \cdot u_{qn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2} \cdot \tan(\arccos(\cos(\varphi)))\right)^2}} \quad (3.46)$$

$$P_n^r = \frac{I_{max}}{\sqrt{\left(\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{2 \cdot u_{dp} + u_{dn} - \sqrt{3} \cdot u_{qn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{2 \cdot u_{dp} + u_{dn} - \sqrt{3} \cdot u_{qn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2} \cdot \tan(\arccos(\cos(\varphi)))\right)^2}} \quad (3.47)$$

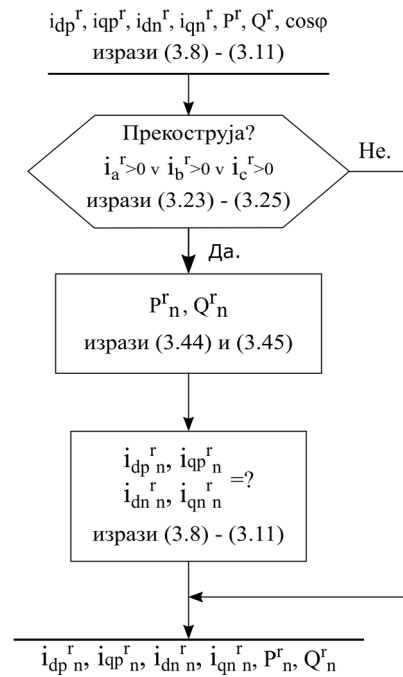
Са друге стране, уколико се захтева уклањање осцилација из реактивне снаге користи се (3.48) уколико је струја фазе *a* највећа, (3.49) се користи уколико је струја фазе *b* највећа, а (3.50) се користи уколико је струја фазе *c* највећа. Нова референца за реактивну снагу се рачуна на основу (3.44).

$$P_n^r = \frac{I_{max}}{\sqrt{\left(\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{u_{dp} + u_{dn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{u_{dp} + u_{dn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2} \cdot \tan(\arccos(\cos(\varphi)))\right)^2}} \quad (3.48)$$

$$P_n^r = \frac{I_{max}}{\sqrt{\left(\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{2 \cdot u_{dp} - u_{dn} + \sqrt{3} \cdot u_{qn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{2 \cdot u_{dp} - u_{dn} + \sqrt{3} \cdot u_{qn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2} \cdot \tan(\arccos(\cos(\varphi)))\right)^2}} \quad (3.49)$$

$$P_n^r = \frac{I_{max}}{\sqrt{\left(\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{2 \cdot u_{dp} - u_{dn} - \sqrt{3} \cdot u_{qn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 + u_{dn}^2 + u_{qn}^2}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{2 \cdot u_{dp} - u_{dn} - \sqrt{3} \cdot u_{qn}}{u_{dp}^2 + u_{qp}^2 - u_{dn}^2 - u_{qn}^2} \cdot \tan(\arccos(\cos(\varphi)))\right)^2}} \quad (3.50)$$

На пример, уколико се захтева анулирање осцилација у активној снази и уколико би струја фазе *a* била највиша требало би искористити алгоритам приказан на слици 3.2. Коришћењем израза (3.45) се проналази нова референца за активну снагу, а затим и нова референца за реактивну снагу, коришћењем израза (3.44). На основу нових референци за снаге се рачунају нове референце за струје. Уколико се утврди да фазне струје не би биле више од дефинисаног лимита, не реализује се лимитирање и задржавају се старе струјне референце. За остале сценарије би се могао искористити исти алгоритам - једино би се уместо израза (3.45) користио одговарајући израз из групе (3.46) - (3.50).



Слика 3.2. Алгоритам којим се реализује константан фактор снаге (AP или AQ анулирано).

Важна је напомена да се могу разматрати и друге четворке једначина са почетка поглавља - процес извођења потребних израза за референце би био потпуно исти. Ипак, они су изостављени из текста услед малог практичног значаја. Још важнија је напомена да оператер може у реалном времену да захтева производњу извесне количине активне или реактивне снаге, а да алгоритам даље закључи да ли је та производња могућа и уколико јесте, колико производних капацитета је остало за евентуалну производњу друге снаге. Дакле, могуће је да се као почетне вредности за снаге не користе оне које су важиле пре поремећаја, већ да се користе нове које је оператер задао у складу са текућим режимом. Осим тога, у стандардима се дефинише како треба да се мења однос активне и реактивне снаге у току пропада. Готово сви стандарди задају криву зависности реактивне снаге од дубине пропада. Дакле, референца за снагу се мора мењати са променом радног режима и ова потреба чини разматране механизме за прорачун референци неизоставним делом контролног алгоритма [114].

Дефинисање односа позитивних и негативних компоненти струја којима се реализују референце снага

Трећи оквир за разматрање задавања референци струја се заснива само на изразима (3.2) и (3.3), са почетка поглавља, при чему се свака од снага посматра као збир позитивне и негативне компоненте снаге, у којима фигуришу само позитивне, односно негативне компоненте напона и струја [111].

$$P = P^+ + P^- = u_{dp} \cdot i_{dp}^r + u_{qp} \cdot i_{qp}^r + u_{dn} \cdot i_{dn}^r + u_{qn} \cdot i_{qn}^r \quad (3.51)$$

$$Q = Q^+ + Q^- = -u_{dp} \cdot i_{qp}^r + u_{qp} \cdot i_{dp}^r - u_{dn} \cdot i_{qn}^r + u_{qn} \cdot i_{dn}^r \quad (3.52)$$

Узимајући у обзир само ове две једначине, јасно је да се не разматра могућност елиминације осцилација из активне или реактивне снаге. Ово занемарење осцилација се уводи зарад извесне флексибилности. Изрази (3.51) и (3.52) се могу написати у облику:

$$P^+ = k_{p+} \cdot P = u_{dp} \cdot i_{dp}^r + u_{qp} \cdot i_{qp}^r \quad (3.53)$$

$$P^- = k_{p-} \cdot P = u_{dn} \cdot i_{dn}^r + u_{qn} \cdot i_{qn}^r \quad (3.54)$$

$$Q^+ = k_{q+} \cdot Q = -u_{dp} \cdot i_{qp}^r + u_{qp} \cdot i_{dp}^r \quad (3.55)$$

$$Q^- = k_{q-} \cdot Q = -u_{dn} \cdot i_{qn}^r + u_{qn} \cdot i_{dn}^r \quad (3.56)$$

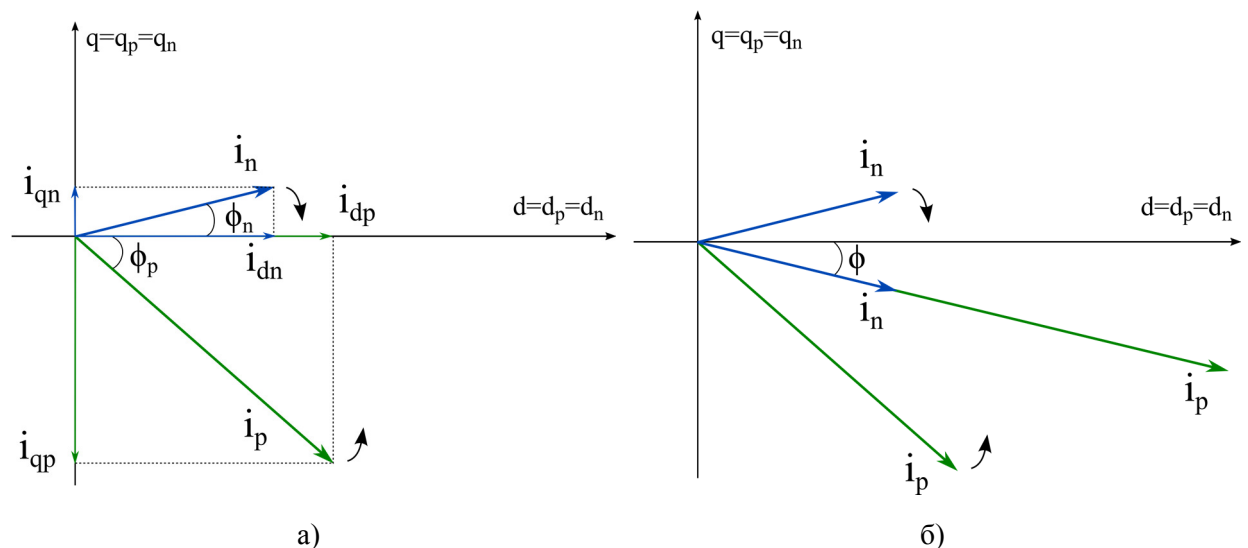
при чему важи да је $k_{p+} + k_{p-} = 1$ и $k_{q+} + k_{q-} = 1$. Поново се долази до четири једначине којима се могу израчунати струјне референце ($i_{dp}^r, i_{qp}^r, i_{dn}^r$ и i_{qn}^r). Ипак, у претходним изразима фигуришу и четири снаге. Подешавањем параметара $k_{p+}, k_{p-}, k_{q+}, k_{q-}$ дефинише се кроз које компоненте се инјектује задата укупна активна и реактивна снага. На пример, уколико се зада да је $k_{p+} = 1$, а $k_{p-} = 0$, сва активна снага ће бити произведена генерисањем искључиво позитивних компоненти струја (i_{dp} и i_{qp}). Уколико се зада да је $k_{q+} = k_{q-} = 0.5$ половина реактивне снаге ће бити произведена кроз позитивне компоненте струја (i_{dp} и i_{qp}), а друга половина кроз негативне компоненте струја (i_{dn} и i_{qn}). Остављање могућности да се снаге генеришу кроз позитивне и негативне компоненте струја, у произвољном односу, резултује бројним профилима снага и струја од којих ће сваки имати другачије ефекте гледано са становишта мреже на коју је инвертор повезан.

Горепоменути систем је такође потребно кориговати уколико су тренутне референце снага исувише велике са становишта струјних капацитета претварача. Поново је потребно прво одредити која од фазних струја ће бити највећа. Проблем који се јавља у овом концепту задавања референци, у којем се не адресирају таласности снага, је тај да се више не може користити једноставна промена домена из синхроноротирајућег у abc домен (инверзном Кларкином и Парковом трансформацијом) услед тога што се променом параметара $k_{p+}, k_{p-}, k_{q+}, k_{q-}$ мења фазни став струја. Другим речима, мењањем односа позитивних и негативних снага (P^+, P^-, Q^+ и Q^-) долази до одступања од поравнања фазног напона и фазне струје који је постојао код претходна два приступа за задавање референци. Дакле, неопходан је други механизам који може да узме у обзир флуидност задавања параметара $k_{p+}, k_{p-}, k_{q+}, k_{q-}$. Овај механизам се заснива на изразима (3.57) и (3.58) и слици 3.3.

$$i_p = \sqrt{i_{qp}^2 + i_{dp}^2}, \quad i_n = \sqrt{i_{qn}^2 + i_{dn}^2} \tag{3.57}$$

$$\varphi_p = \arctg \frac{i_{qp}^r}{i_{dp}^r}, \varphi_n = \arctg \frac{i_{qn}^r}{i_{dn}^r}, \varphi = \frac{\varphi_p + \varphi_n}{2} \tag{3.58}$$

где су i_p и i_q амплитуде вектора струје у позитивно, односно негативно, ротирајућем координатном систему.



Слика 3.3. Принцип одређивања максималне вредности кумулативног вектора струје (велика полуоса елипсе).

На слици 3.3. се ради прегледности разматра моменат када се d -осе позитивног и негативног синхроноротирајућег координатног система поклапају, при чему ово не умањује свеопшност анализе. Након што се одреде величине вектора позитивне и негативне компоненте струје и њихови фазни ставови у односу на одговарајуће координатне системе, последњим изразом из (3.58) може се одредити фазни став у којем укупни вектор струја има највећу вредност, при чему је та вредност једнака простом збиру амплитуда позитивног и негативног вектора. У моменту када струје имају фазни став φ , два вектора се сусрећу и ту је кумулативан вектор струје највећи, односно врх велике

полуосе елипсе коју описује кумулативни вектор се налази на позицији φ . Дакле, релативно једноставно може да се оцени колика ће бити максимална вредност вектора струја. На основу ове информације долази се до максималних вредности фазних струја. Уколико се искористи следећи псеудокод:

```
if (( $\varphi > -\pi$ )  $\wedge$  ( $\varphi < -\pi/2$ )  $\vee$  (( $\varphi > \pi/2$ )  $\wedge$  ( $\varphi < \pi$ ))
```

```
     $\varphi = \varphi + \pi$ ; // Померање вектора струје у десну полураван због једноставности
```

долази се до израза којима се одређује колика је амплитуда највеће фазне струје (I_{amp}). Уколико је максимална кумулативна вредност вектора струја у опсегу од $\pm 30^\circ$, максимална је фазна струја a . Уколико се вектор налази изван овог опсега, а у оквиру од $\pm 90^\circ$, максимална ће бити струја фазе b , односно c .

```
if ( $\varphi > -\pi/6$   $\wedge$   $\varphi < \pi/6$ )
```

```
     $I_{amp} = \text{sqrt}(2/3) \cdot (i_p + i_n) \cdot \cos\varphi$ ; //  $I_a$  је највећа
```

```
elseif ( $\varphi > -\pi/2$   $\wedge$   $\varphi < -\pi/6$ )
```

```
     $I_{amp} = \text{sqrt}(2/3) \cdot (i_p + i_n) \cdot \cos(-\pi/3 - \varphi)$ ; //  $I_b$  је највећа
```

```
elseif ( $\varphi > \pi/6$   $\wedge$   $\varphi < \pi/2$ )
```

```
     $I_{amp} = \text{sqrt}(2/3) \cdot (i_p + i_n) \cdot \cos(\pi/3 - \varphi)$ ; //  $I_c$  је највећа
```

```
end
```

Остатак алгоритма за ограничавање струја је сличан оном који је коришћен раније. Претпостави се да се једна снага неће производити и систему једначина се додели још једна једначина којом се највећа фазна струја ограничава на максималну дозвољену вредност. Користећи изразе (3.20) - (3.22) се долази до потребног додатног израза. Ипак, у случају овог приступа, није могуће за фазни став уврстити само $\varphi=0$ (за производњу активне снаге) или $\varphi=\pi/2$ (за производњу реактивне снаге). Услед слободног задавања параметара k_{p+} , k_{p-} , k_{q+} и k_{q-} поново мора да се искористи другачији приступ за одређивање фазног става (слично случају када се одређује највећа фазна струја). На пример, уколико се разматра производња активне снаге и постави да је $k_{p+} = 1$ и $k_{p-} = 0$, сва активна снага ће се произвести кроз позитивне компоненте. У складу са тим, кумулативни вектор струје је заправо једнак позитивном вектору струје и тиме се долази до закључка да ће амплитуда кумулативног вектора бити у позицији $\varphi=0$. Са друге стране, уколико је $k_{p+} = 0$ и $k_{p-} = 1$, производиће се само негативне компоненте струја и кумулативни вектор ће бити једнак вектору негативних компоненти струја. Фазни став у којем вектор негативних компоненти струја узима максималну вредност не мора бити једнак нули и зависи од напонских прилика. Дакле, мора се поћи од фазних ставова у којима позитивни (φ_+) и негативни вектори (φ_-) струја имају максималне вредности. Они су дати изразом (3.59). Угао φ_+ је нула услед тога што се разматра активна снага и тога што се синхронизациона јединица везује за позитиван вектор напона.

$$\varphi_+ = 0, \quad \varphi_- = \arctg \frac{u_{qn}}{u_{dn}} \quad (3.59)$$

Уколико k_{p+} и k_{p-} одступају од екстрема, фазни став је потребно подесити да буде између φ_+ и φ_- , а у зависности од k_{p+} и k_{p-} . Изрази за рачунање одговарајућих фазних ставова за случајеве када је струја фазе a , b односно c највећа су дати у (3.60).

$$\begin{aligned} \varphi_{pa} &= k_{p+} \cdot 0 + k_{p-} \cdot \varphi_- \\ \varphi_{pb} &= k_{p+} \cdot \frac{2\pi}{3} + k_{p-} \cdot \left(\varphi_- - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \varphi_{pc} &= k_{p+} \cdot \left(-\frac{2\pi}{3} \right) + k_{p-} \cdot \left(\varphi_- + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (3.60)$$

Слично резонување може да се примени и за случај када се разматра производња реактивне снаге, с том разликом што је у том случају референтни угао $\pi/2$. Фазни ставови које је потребно уврстити у изразе (3.16) и (3.17) су дати са (3.61).

$$\begin{aligned}
\varphi_{qa} &= k_{q+} \cdot \frac{\pi}{2} + k_{q-} \cdot \left(\varphi_- - \frac{\pi}{2}\right) \\
\varphi_{qb} &= k_{q+} \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3}\right) + k_{q-} \cdot \left(\varphi_- - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) \\
\varphi_{qc} &= k_{q+} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) + k_{q-} \cdot \left(\varphi_- - \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3}\right)
\end{aligned} \tag{3.61}$$

Коначно, нов систем једначина се састоји из (3.53) - (3.56) и одговарајуће једначине из (3.20) - (3.22) у које су уврштени фазни ставови из (3.60). Решењем овог система добијају се нове референце за активну снагу. Израз (3.62) је потребно употребити када је фазна струја a највећа, (3.63) када је струја фазе b највећа и (3.64) када је фазна струја c највећа.

$$P_n^r = \frac{V_p \cdot V_n \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max}}{(-u_{qp} \cdot V_n \cdot k_{p+} + u_{qn} \cdot V_p \cdot k_{p-}) \cdot \sin \varphi + (u_{dp} \cdot V_n \cdot k_p + u_{dn} \cdot V_p \cdot k_{p-}) \cdot \cos \varphi} \tag{3.62}$$

$$P_n^r = \frac{2 \cdot V_p \cdot V_n \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max}}{\left((\sqrt{3}u_{dp} + u_{qp}) \cdot V_n \cdot k_{p+} + (-\sqrt{3}u_{dn} - u_{qn}) \cdot V_p \cdot k_{p-}\right) \cdot \sin \varphi + \left((-u_{dp} + \sqrt{3}u_{qp}) \cdot V_n \cdot k_{p+} + (-u_{dn} - \sqrt{3}u_{qn}) \cdot V_p \cdot k_{p-}\right) \cdot \cos \varphi} \tag{3.63}$$

$$P_n^r = \frac{2 \cdot V_p \cdot V_n \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max}}{\left((- \sqrt{3}u_{dp} + u_{qp}) \cdot V_n \cdot k_{p+} + (\sqrt{3}u_{dn} - u_{qn}) \cdot V_p \cdot k_{p-}\right) \cdot \sin \varphi + \left((-u_{dp} - \sqrt{3}u_{qp}) \cdot V_n \cdot k_{p+} + (-u_{dn} - \sqrt{3}u_{qn}) \cdot V_p \cdot k_{p-}\right) \cdot \cos \varphi} \tag{3.64}$$

Слично, нова референца за реактивну снагу се добија коришћењем система једначина који се састоји из (3.53) - (3.56) и одговарајуће једначине из (3.20) - (3.22) у које су уврштени фазни ставови из (3.61). Референце за реактивну снагу су дате са (3.65) - (3.67).

$$Q_n^r = \frac{V_p \cdot V_n \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max}}{(u_{dp} V_n \cdot k_{q+} - u_{dn} V_p \cdot k_{q-}) \cdot \sin \varphi + (u_{qp} V_n \cdot k_{q+} + u_{qn} V_p \cdot k_{q-}) \cdot \cos \varphi} \tag{3.65}$$

$$Q_n^r = \frac{-2 \cdot V_p \cdot V_n \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max}}{\left((u_{dp} - \sqrt{3}u_{qp}) \cdot V_n \cdot k_{q+} + (-u_{dn} + \sqrt{3}u_{qn}) \cdot V_p \cdot k_{q-}\right) \cdot \sin \varphi + \left((\sqrt{3}u_{dp} + u_{qp}) \cdot V_n \cdot k_{q+} + (\sqrt{3}u_{dn} + u_{qn}) \cdot V_p \cdot k_{q-}\right) \cdot \cos \varphi} \tag{3.66}$$

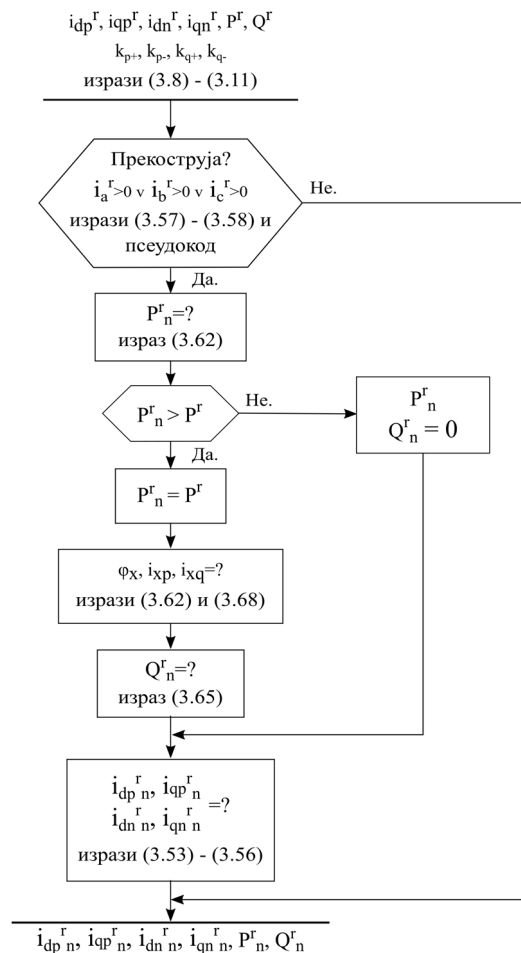
$$Q_n^r = \frac{-2 \cdot V_p \cdot V_n \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{max}}{\left((u_{dp} + \sqrt{3}u_{qp}) \cdot V_n \cdot k_{q+} + (-u_{dn} - \sqrt{3}u_{qn}) \cdot V_p \cdot k_{q-}\right) \cdot \sin \varphi + \left((- \sqrt{3}u_{dp} + u_{qp}) \cdot V_n \cdot k_{q+} + (- \sqrt{3}u_{dn} + u_{qn}) \cdot V_p \cdot k_{q-}\right) \cdot \cos \varphi} \tag{3.67}$$

Како би се обезбедила симултана производња активне и реактивне снаге, потребно је проверити колики део производних капацитета је доступан за производњу активне и реактивне снаге за текуће напонске прилике, али и за текуће параметре k_{p+} , k_{p-} , k_{q+} , k_{q-} . Прво је неопходно проверити да ли је могућа производња целокупне референце приоритизоване снаге. На пример, уколико се захтева приоритизација активне снаге и уколико би струја фазе a била највећа, колико активне снаге може да се произведе за дати режим се рачуна коришћењем израза (3.62). Ову вредност је потребно упоредити са референцом која долази из надређених контролних структура. Уколико је нова референца мања од оне која је прослеђена потпрограму за рачунање референци струја, закључује се да није могуће произвести иницијално захтевану количину активне снаге за текући режим и усваја се нова референца за активну снагу. Истовремено, у овом сценарију није могуће издвојити капацитете за производњу реактивне снаге и референца за реактивну снагу се поставља на нулу. Са друге стране, уколико је нова референца за активну снагу већа од старе, закључује се да се може реализовати целокупна стара референца за активну снагу и да се изврстан део производних капацитета може издвојити за производњу реактивне снаге. За овај механизам прорачуна референци

није могуће користити приступ за одређивање нове референце реактивне снаге који је коришћен у претходна два случаја. Другим речима, нова референца за реактивну снагу се не може рачунати на бази израза (3.42) и (3.43). Разлог се крије у чињеници да фазна разлика између струје која резултује у производњи активне снаге (i_{xp}) и струје која резултује у производњи реактивне снаге (i_{xq}) не мора да буде $\pi/2$. У овом случају је потребно користити израз (3.68). Изрази (3.42) и (3.43) су заправо специјалани случајеви израза (3.68) када важи да је фазни померај између i_{xp} и i_{xq} једнак $\pi/2$.

$$i_{xq1/2} = \frac{-2 \cdot i_{xp} \cos \varphi_x \pm \sqrt{(2 \cdot i_{xp} \cos \varphi_x)^2 - 4 \cdot i_{xp}^2 + 4 \cdot I_{max}}}{2} \quad (3.68)$$

У претходном изразу важи да је $\varphi_x = \varphi_{xp} - \varphi_{xq}$. За посматрани случај, на основу (3.62) би се израчунала вредност i_{ap} . Затим би се ова вредност уврстила у (3.68) и добила би се амплитуда фазне струје која може бити издвојена за производњу реактивне снаге (i_{aq}). На основу ове вредности и израза (3.65) би се израчунала нова референца за реактивну снагу. Слика 3.4. сумира овај приступ за прорачун референци струја и снага [115].



Слика 3.4. Алгоритам којим се реализује производња P и Q кроз променљив однос позитивних и негативних компоненти струја.

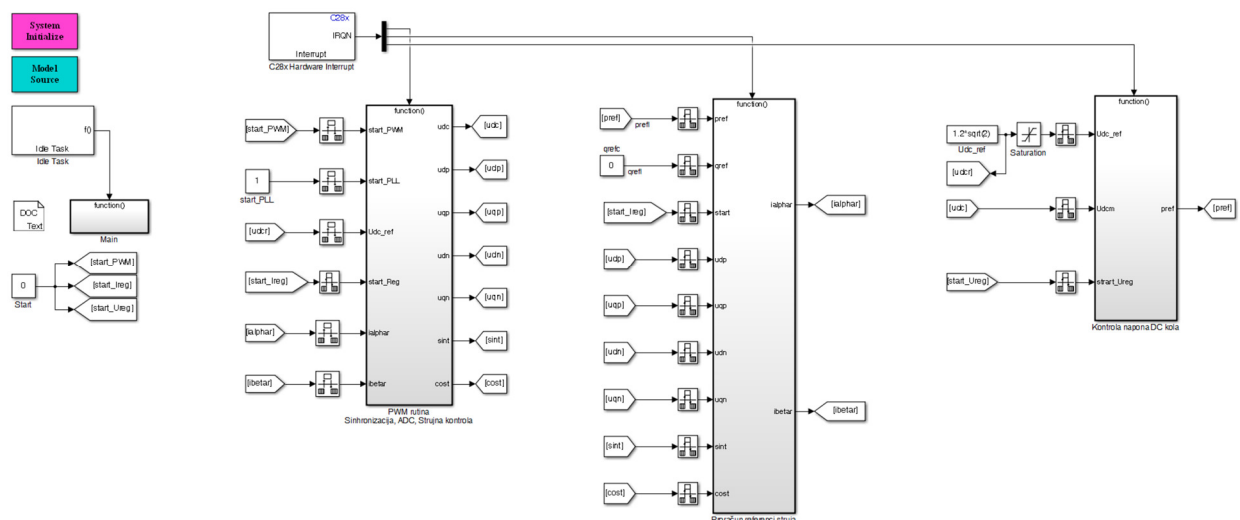
4. Примена предложених решења и потврда на експерименталној поставци

За потребе експерименталне верификације разматраних контролних структура било је неопходно развити управљачки програм, односно софтверски подсистем експерименталне поставке, и објекат управљања са пратећим елементима, односно хардверски део експерименталне поставке.

Основне и напредне функције управљачког програма предложеног у претходна два поглавља су имплементирани на микроконтролеру Texas Instruments TMS320F28335 [116]. Овај микроконтролер омогућава употребу *floating-point* аритметике. Управљачки програм је развијен употребом алата за аутоматску генерацију кода. Конкретно, коришћен је *Matlab/Simulink code-generation toolbox* који омогућава графички развој контролног кода и његово касније аутоматско компајлирање и превођење у *C* програмски језик [117]. Пример једног *Matlab/Simulink* модела коришћеног за контролу рада инвертора на мрежи је приказан на слика 4.1.

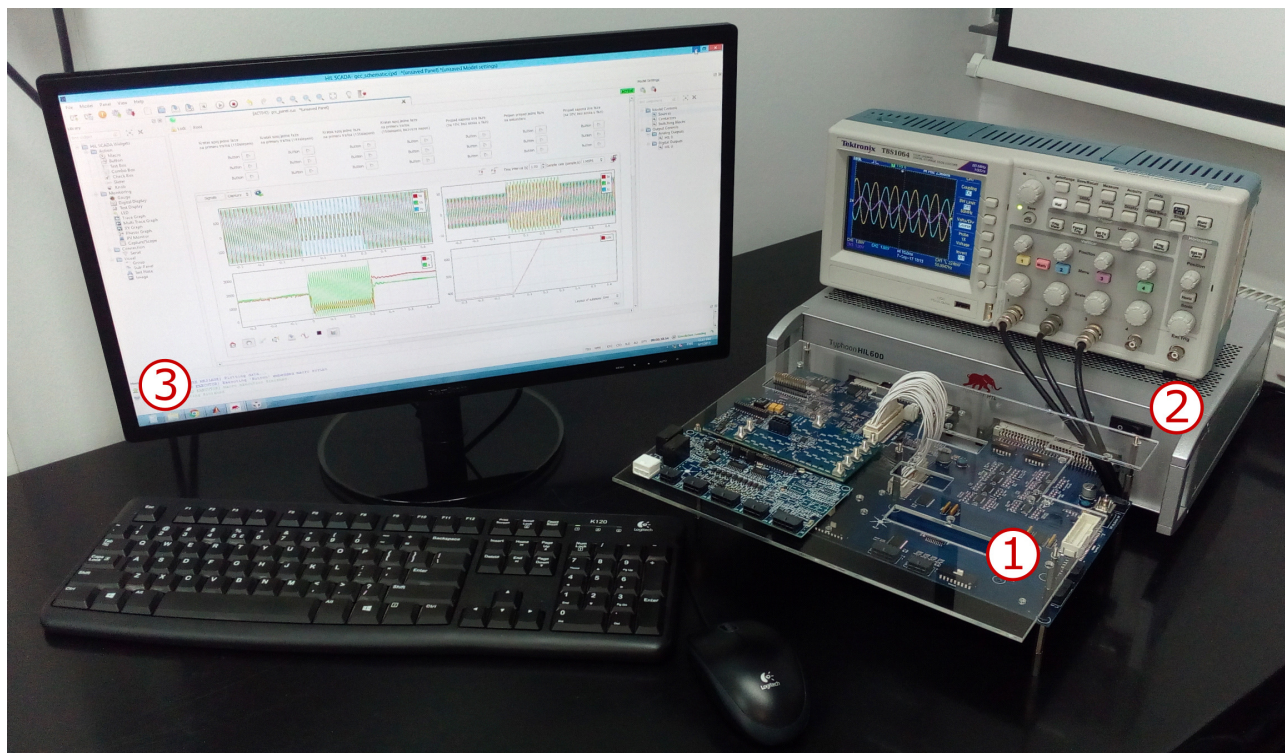
Може се уочити да је овај модел аналоган слици 2.6. Постоје три прекидне рутине. Прва је *PWM* прекидна рутина. Она се извршава на највећој фреквенцији (10 kHz) и у њој се налазе наредбе везане за аналогно-дигиталну конверзију, потпрограм за синхронизациону јединицу, струјни регулатори и модулатор просторног вектора. Сигнал за иницијализацију ове рутине задаје *PWM* периферија микроконтролера. Друга рутина се извршава три пута спорије и иницијализована је софтверски генерисаним сигналом. У овој рутини се врши израчунавање струјних референци које треба да резултују производњом жељеног профила снага. Трећа рутина се извршава педесет пута спорије од прве и у њој се налази регулатор напона једносмерног међукола.

Хардверска страна експерименталне поставке је развијена у *Typhoon-HIL* емулационом окружењу које се користи за успостављање модела за симулаторе у реалном времену (емулаторе) [118]. Емулационо окружење се састоји од емулаторске јединице *Typhoon-HIL 600* и програмског окружења *Typhoon-HIL Control Center*. У зависности од сложености модела који представља хардверски део поставке, коришћен је или само један или четири емулатора. Експериментални склоп приказан на слици 4.2. је коришћен за проверу основних функционалности алгоритама. Поставка приказана на слици 4.3. је коришћена за пуну проверу рада предложених управљачких механизма услед тога што представља окружење у којем постоји узајамна интеракција електричне мреже, претварача и управљачког алгоритама.



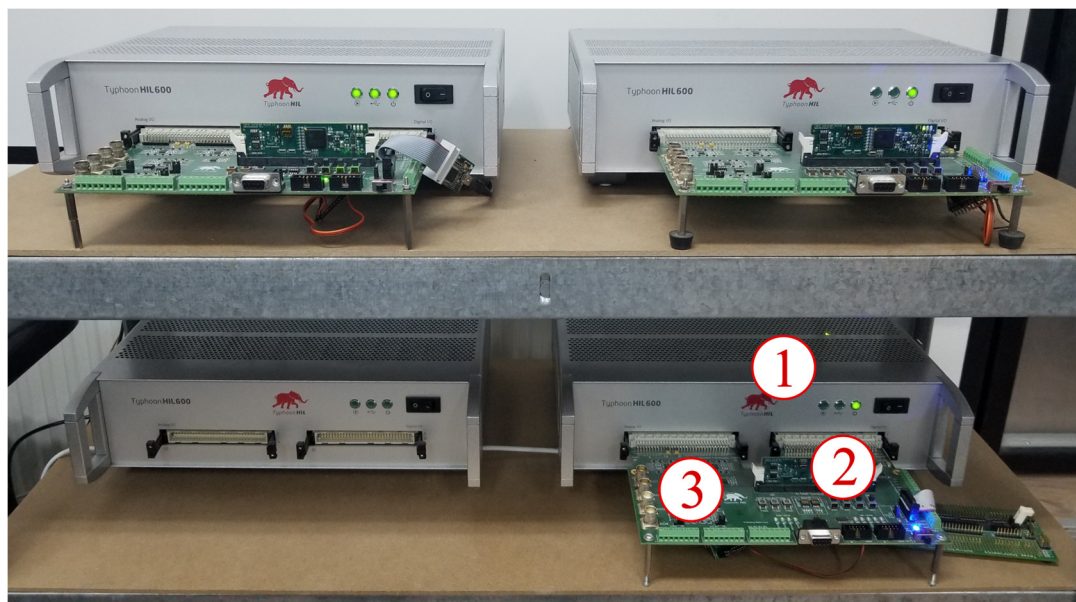
Слика 4.1. Модел развијен у *Simulink* окружењу подесан за *code-generation* процес.

На слици 4.2. је приказана структура хардверског дела експерименталне поставке. Могу се видети микроконтролер са прилагодном картицом (1), емулаторска јединица (2) и рачунар (3). На рачунару су инсталирани сви поменути софтверски алати - *Matlab/Simulink*, *Typhoon-HIL Control Center* и *Code Composer Studio*.



Слика 4.2. Експериментална поставка са једном емулаторском јединицом.

На слици 4.3. је приказана поставка са четири емулаторске јединице.



Слика 4.3. Експериментална поставка са четири емулаторске јединице.

Свеобухватно, експериментална поставка функционише на следећи начин.

1) Упис програмског кода у контролер.

Коришћењем *Matlab/Simulink* програмског окружења се долази до модела који је могуће превести у *C* програмски код који је погодан за имплементацију на *Texas Instruments* микроконтролерима. Након тога се генерише код који је еквивалентан развијеном моделу и имплементира се на микроконтролеру посредством *Code Composer Studio* окружења и *J-TAG* конекције између рачунара и микроконтролера.

2) Постављање емулационог модела у емулатор.

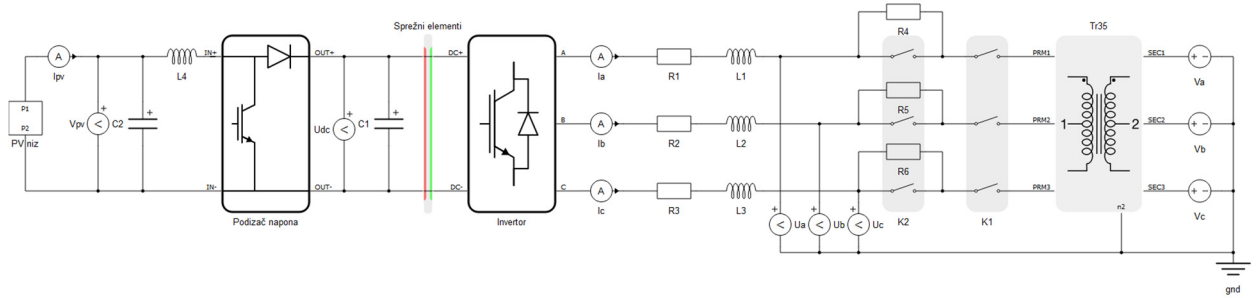
Затим се модел развијен за емулатор компајлира и путем *USB* везе имплементира на емулаторима. Након старта рада софтверског дела на микроконтролеру (контролног алгоритма) и рада хардверског дела на емулатору (енергетског дела поставке) се започиње тестирање. На основу дигиталних речи којима располаже микроконтролер, добијених аналогно-дигиталном конверзијом, контролни алгоритам дефинише потребне импулсно-ширински модулисаних сигнале за транзисторе у инвертору, а са циљем регулисања електричних величина у колу. Ови сигнали се путем прилагодне картице прослеђују емулатору. Емулатор на основу ових дигиталних сигнала закључује који транзистори у мосту треба да се побуде. Свако паљење и гашење транзистора резултује променом топологије енергетског дела, а тиме и променом у електричним величинама. Затим емулатор генерише аналогне сигнале који су пропорционални са мереним електричним и ове сигнале поставља на магистрале прилагодне картице. На крају, ови аналогни сигнали улазе у аналогне канале микроконтролера, преводе се у дигиталне речи и тиме се повратна петља, карактеристична за системе аутоматског управљања, затвара. У прилогу се могу пронаћи детаљи везани за параметре управљачког алгоритма.

4.1. Топологије коришћених поставки

У овом поглављу ће бити приказане експерименталне поставке, односно шеме, коришћене за афирмацију различитих аспеката контролних парадигми развијених у претходним поглављима. Различити тестови су изискивали различите експерименталне поставке, али се сви тестови заснивају или на једноставној шеми која садржи једну производну јединицу, односно њеној варијацији, или на сложеној шеми која садржи више производних јединица и сложенију мрежу потрошачких подручја.

4.1.1. Емулациони модел дистрибуираног извора повезаног на круту електричну мрежу

На слици 4.4. приказан је модел којим се емулира рад једног производног система који је преко спрежне индуктивности и дистрибутивног трансформатора повезан на мрежу бесконачне снаге. Као извор енергије искоришћен је низ фотонапонских панела који је преко подизача напона повезан на једносмерно међуколо. Између подизача напона и инвертора налази се кондензатор. Приказан трофазни инвертор је уобичајени трофазни напонски инвертор са два нивоа напона. Спрежна импеданса се састоји од редно повезане отпорности и индуктивности. Након овог филтра су постављена два контактора. Затварањем контактора *K1* се реализује пуњење кондензатора у *DC* колу преко антипаралелних диода инвертора. Ово пуњење је успорено присуством снажних отпорника (*R4*, *R5*, *R6*). Након што је детектован довољано висок напон у *DC* колу, затвара се контактор *K2* који преспаја ове отпорнике и инвертор постаје спреман за рад и производњу енергије. Након контактора је постављен дистрибутивни трансформатор. За све поставке је коришћен трофазни трансформатор спреге троугао-звезда (троугао са високонапонске стране, звезда са нисконапонске стране). Звездиште је уземљено. Сама мрежа је емулирана са три напонска извора. Даље, на слици 4.4. се види да је за функционисање модела потребно користити такозване спрежне елементе.

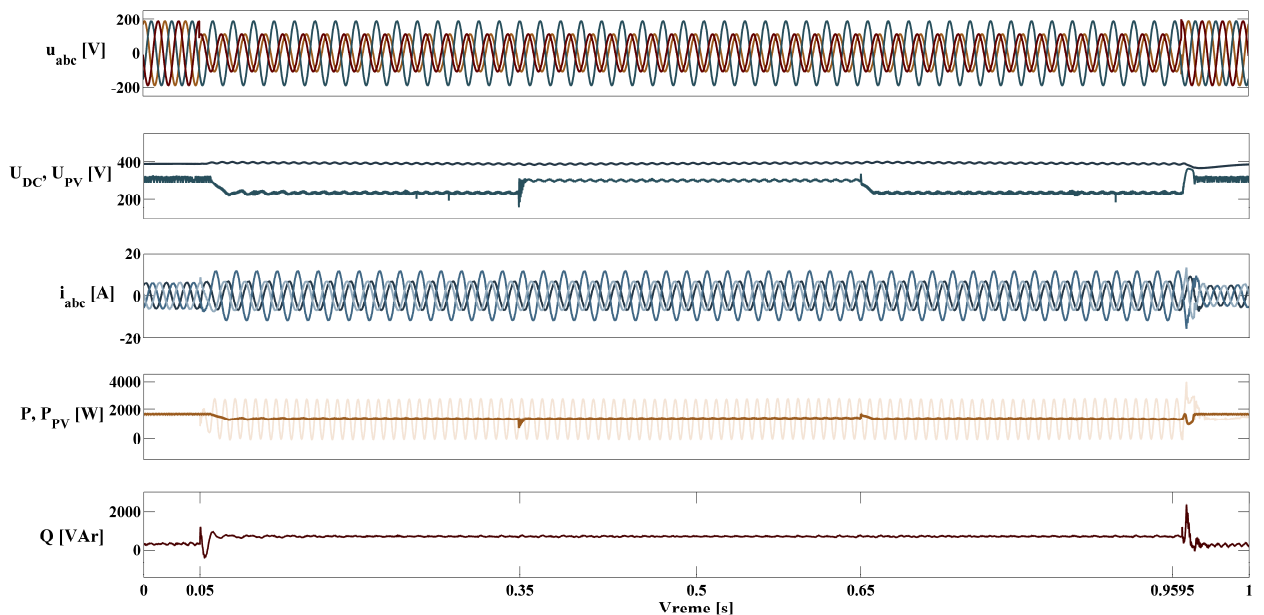


Слика 4.4. Емулациони модел дистрибуираног извора и мреже бесконачне снаге.

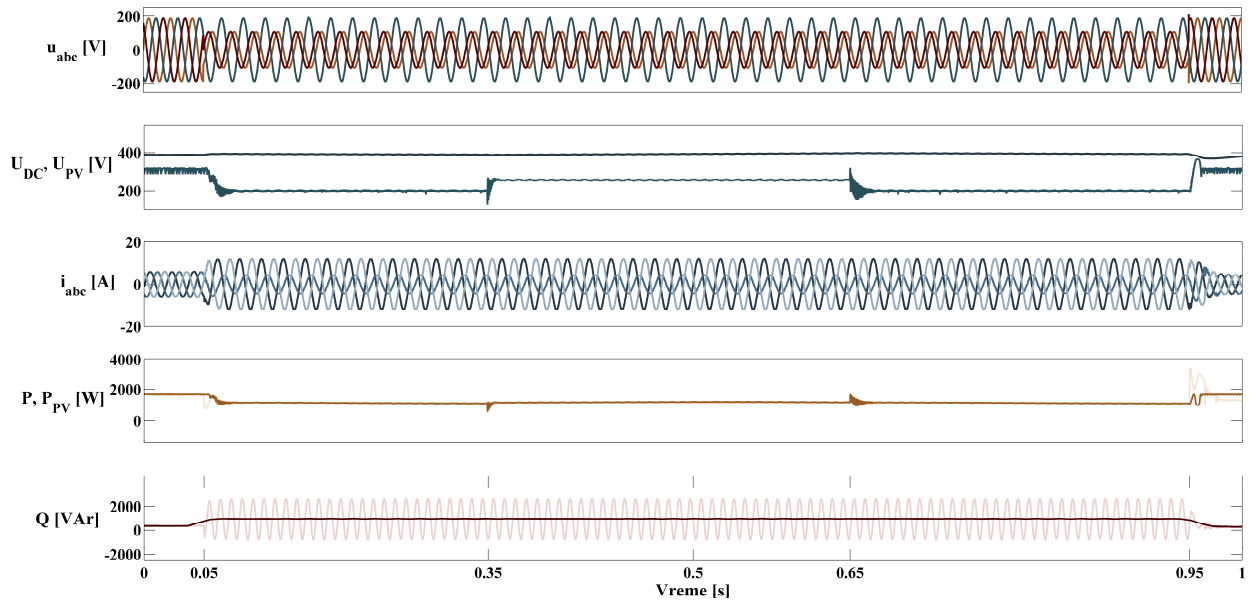
Ови елементи не утичу на успостављање електричних величина у колу, већ служе за раздвајање електричних кола на делове од којих се сваки део реализује на једном од четири језгра емулятора. Дакле, овај модел је исувише сложен за једно језгро емулятора, па су морала бити употребљена два.

Слике 4.5. и 4.6. приказују два режима реализована приказаним моделом. Посебну пажњу је потребно посветити таласном облику напона једносмерног међукола U_{dc} и напона соларних панела U_{pv} . У оба теста је емулиран спој фазе са земљом. Осим тога, у оба теста је имплементиран алгоритам којим се приоритизује производња реактивне снаге. У првом тесту су дозвољене осцилације у активној снази, док се у другом тесту дозвољавају осцилације у реактивној снази. Параметри кола и детаљи везани за контролни алгоритам су дати у прилогу.

У току режима без поремећаја контролу над напонем једносмерног међукола има инвертор. Одржавањем напона U_{dc} константним се реализује спровођење енергије произведене од стране соларних панела у мрежу. Са друге стране, подизач напона ради у тачки максималне производње (*maximum power point - MPP*) како би се извукла максимална количина доступне енергије сунца. У току поремећаја, када производни капацитети инвертора опадну услед смањеног напона мреже, контролу над U_{dc} преузима подизач напона и он престаје да ради у *MPP*. Подизач заправо у режимима са пропадима напона производи ону количину енергије коју инвертор може да проследи у мрежу и овим путем се поново успоставља равнотежа између енергије произведене од стране примарног извора и енергије која се спроводи у мрежу [119]. У складу са овим, на сликама може да се уочи да U_{dc} не одступа од задате вредности ни у току пропада и да се његова вредност генерално не мења.



Слика 4.5. Таласни облици величина од интереса за режим са поремећајем ($\Delta Q=0$).



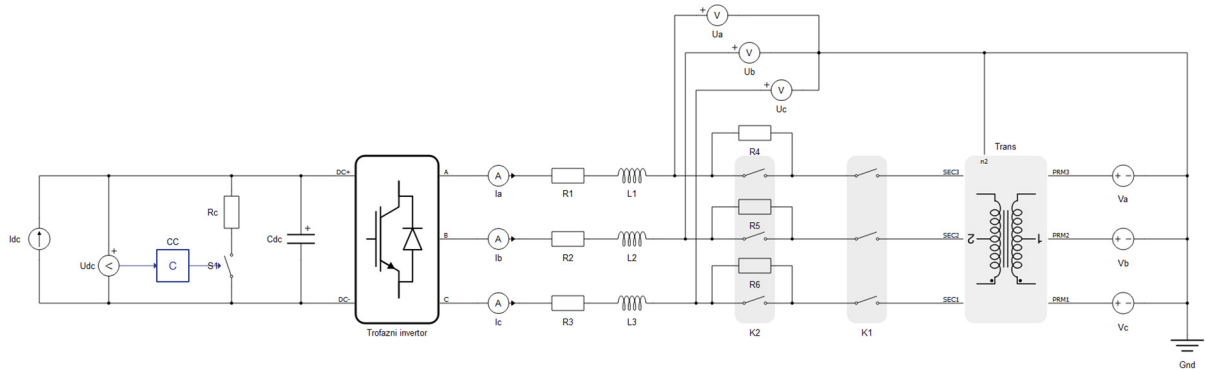
Слика 4.6. Таласни облици величина од интереса за режим са поремећајем ($\Delta P=0$).

Напон низа фотонапонских панела мења своју вредност у тренуцима промене мрежног напона како би се радна тачка померила из *MPP* у тачку у којој се реализује поменути енергетски баланс. Уколико се не би реализовао механизам за пребацивање контроле U_{dc} са инвертора на подизач напона у периодима пропада напона када производни капацитети инвертора могу да буду умањени, а примарни извор енергије производи неизмењену количину енергије, долазило би до недопустиво великог пораста у U_{dc} и морао би да се употреби кочиони чопер. Потребно је обратити пажњу и на моменте у којима је задата промена осветљаја соларних панела (0.35 и 0.65 секунди). Услед промене осветљаја, а како би панели производили исту количину енергије, долази до поновне промене напона панела под дејством подизача напона. Поново се може уочити да се U_{dc} не мења значајно и да процес промене осветљаја не утиче на напон једносмерног међукола.

Услед чињенице да је показано да је могуће реализовати константан напон U_{dc} у свим режимима и да је до сада разматран модел релативно сложен, долази се до закључка да је могуће користити поједностављен модел за тестирање. Овај модел је приказан на слици 4.7.

Слика 4.7. приказује струјни извор (I_{dc}) који инјектовањем дефинисаног профила струје опонаша производњу активне снаге примарног извора енергије (низа фотонапонских панела, ветрогенератора итд.). Дакле, соларни панели и ветрогенератори су замењени струјним извором ради поменуте уштеде са становишта капацитета емулатора и ради елиминисања потребе за управљањем рада претвараача асоцираних са овим изворима (подизач напона или исправљач), дакле, ради уштеде процесорског времена контролера. Осим тога, процес конверзије енергије са стране извора није од интереса за разматране проблеме услед присуства релативно великог кондензатора у једносмерном међуколу (C_{dc}) који у довољној мери распреже процесе који се одигравају лево и десно од једносмерног међукола. У једносмерном међуколу се налази још и кочиони чопер који је задужен за дисипацију вишка енергије који се може јавити, односно за спречавање неконтролисаног раста напона *DC* кола у режимима када инвертор не може да инјектује сву произведену активну снагу у мрежу. Важно је напоменути да се кочиони чопер увек поставља у *DC* коло, али као последњи вид заштите од напонског уништавања кондензатора и полупроводничких компоненти, а не као основни алат за одржавање усклађености нивоа енергије коју производи примарни извор и енергије која се спроводи у мрежу.

Поставка приказана на слика 4.7. је коришћена за изванредан број тестова у неизмењеном облику, али и као градивна јединица за друге, сложеније, поставке.



Слика 4.7. Поједностављен емулациони модел дистрибуираног извора и мреже бесконачне снаге.

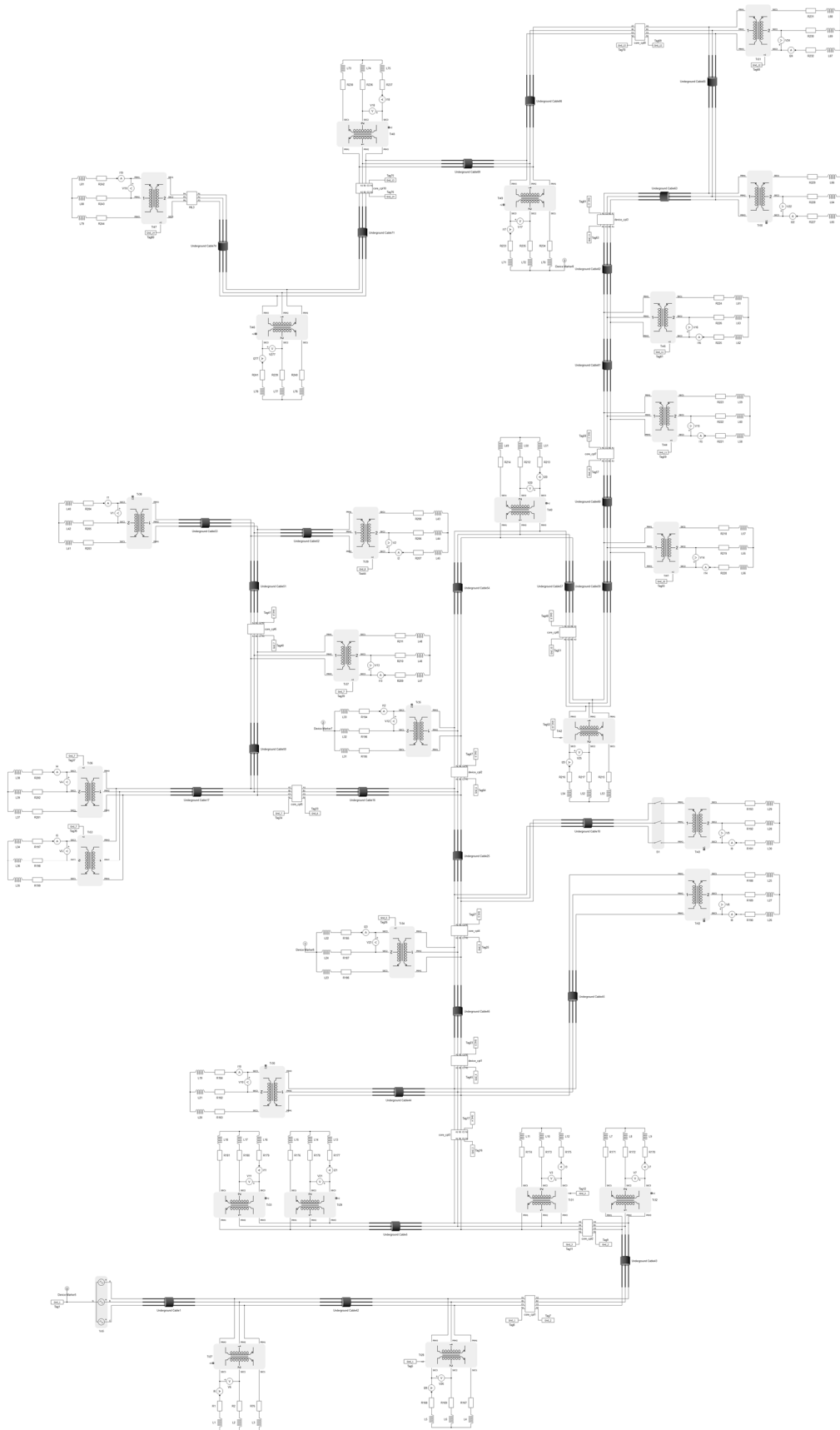
У прилогу се налазе вредности елемената кола приказаног на слици 4.7.

4.1.2. Емулациони модел дистрибутивне мреже са три дистрибуирана извора

Како би се могао разматрати утицај претварача на мрежу, односно како би било могуће пронаћи адекватан профил снага који инвертор треба да произведе у току кварова, било је неопходно развити знатно сложенији модел од оног приказаног на слици 4.7. - модел којим могу да се посматрају процеси који су ближи онима који се одигравају у стварној електричној мрежи. Овакав модел се мора заснивати на више производних јединица и мора да има више потрошачких чворова. Основу за овакву експерименталну поставку представља шема приказана на слици 4.8.

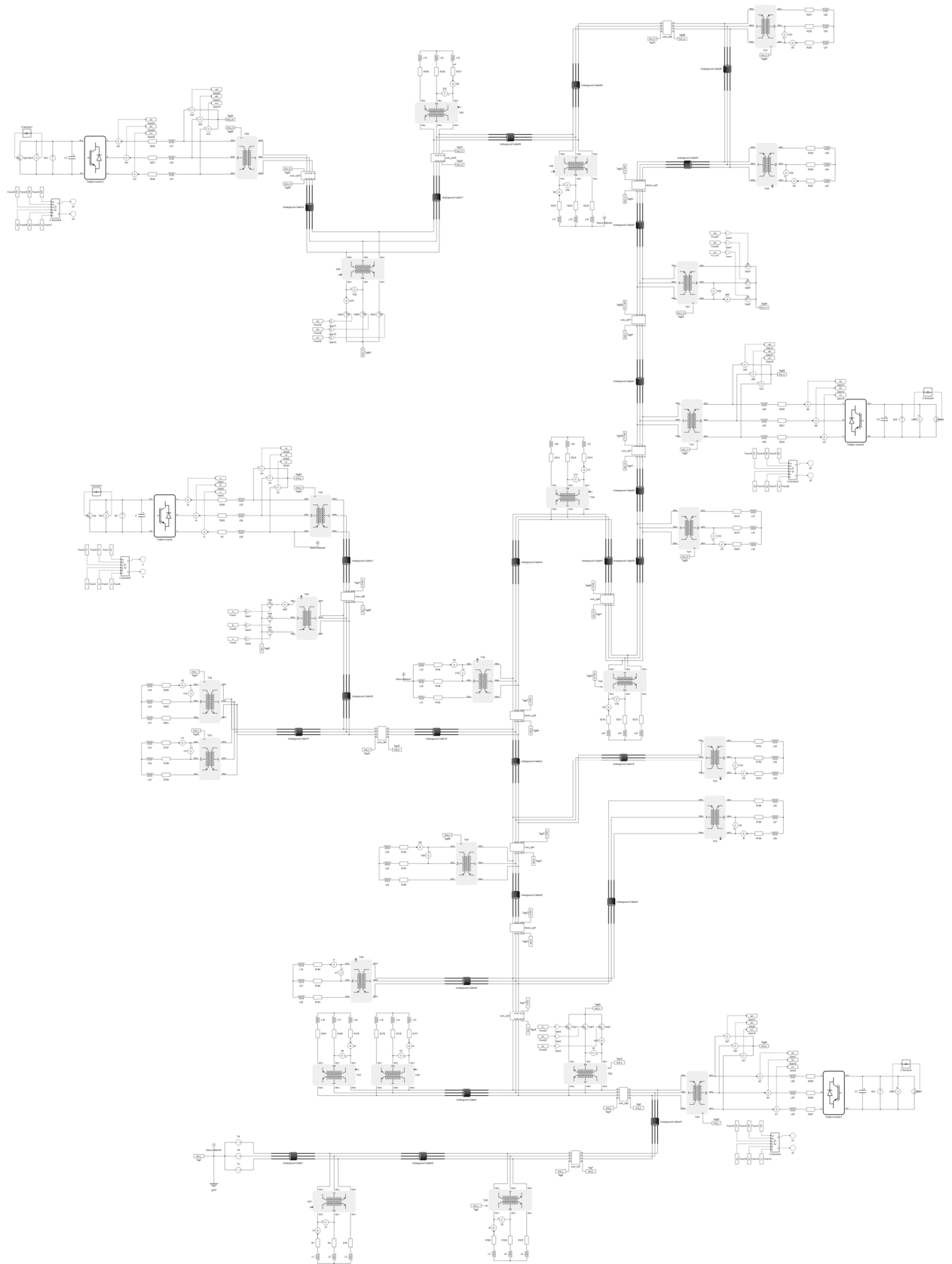
У овој шеми се налази двадесет и шест подстанција, односно двадесет и шест потрошачких подручја. Све подстанции су подземним кабловима повезане са преносним трансформатором који је овде представљен као извор бесконачне снаге. Врло је значајно рећи да је приказана мрежа заснована на стварној дистрибутивној мрежи и модел је у потпуности верификован тиме што су вредности измерене у моделу упоређене са вредностима напона и струја и свим чворовима стварне мреже. Величине из модела се поклапају са вредностима које су измерене на терену са грешком која је мања од 3%. Другим речима, развијен је модел који се у номиналном режиму понаша исто као и реална мрежа.

У прилогу су могу пронаћи сва мерења са терена на основу којих је развијен поменут емулациони модел дистрибутивне мреже. Осим тога, приложене су и две табеле у којима се налазе подаци за један од типова трансформатора и један од типова каблова који се користе у стварној мрежи.



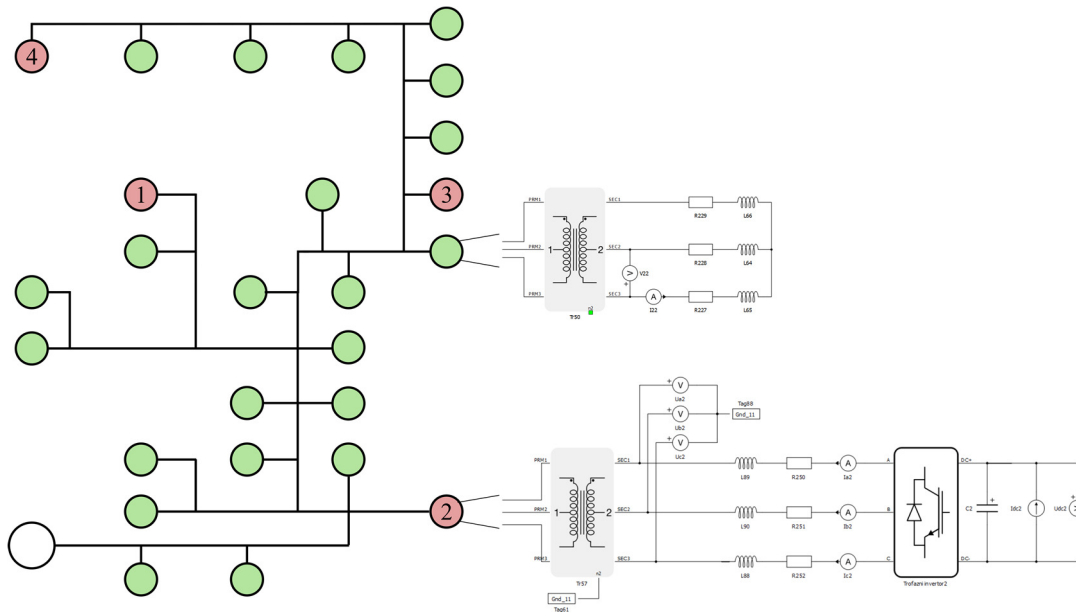
Слика 4.8. Емулациони модел дистрибутивне мреже заснован на делу дистрибутивне мреже Новог Сада.

Након што је претходни модел верификован, модел је надограђен уврштавањем четири производне јединице, на места четири потрошачка подручја. У модел приказан на слици 4.8. су заправо додате четири јединице еквивалентне моделу приказаном на слици 4.7. и резултујући емуляциони модел је приказан на 4.9. Инвертори су распоређени тако да је један на почетку мреже, близу преносног трансформатора, последњи је на крају мреже, најдаље од преносног трансформатора, а преостала два су између. Циљ је био да се производне јединице поставе приближно еквидистантно по мрежи. Ипак, у току експеримента коришћена су три од четири инвертора услед доступности само три микроконтролерске јединице. Све четири производне јединице ће се користити у будућим експерименталним тестовима.



Слика 4.9. Емулациони модел дистрибутивне мреже са прикљученим дистрибуираним изворима.

Ради једноставније оријентације и транспарентности расподеле подстананица и инвертора, потребно је осврнути се на слику 4.10. Зеленом бојом су означене потрошачке подстананице, док су црвеном означене подстананице у којима су лоцирани дистрибуирани извори, односно у којима се налазе мерни инструменти. На локацији „4“ инвертор није био активиран и користе се само мерни инструменти. Осим тога, на слици се може видети нумерација дистрибуираних извора.

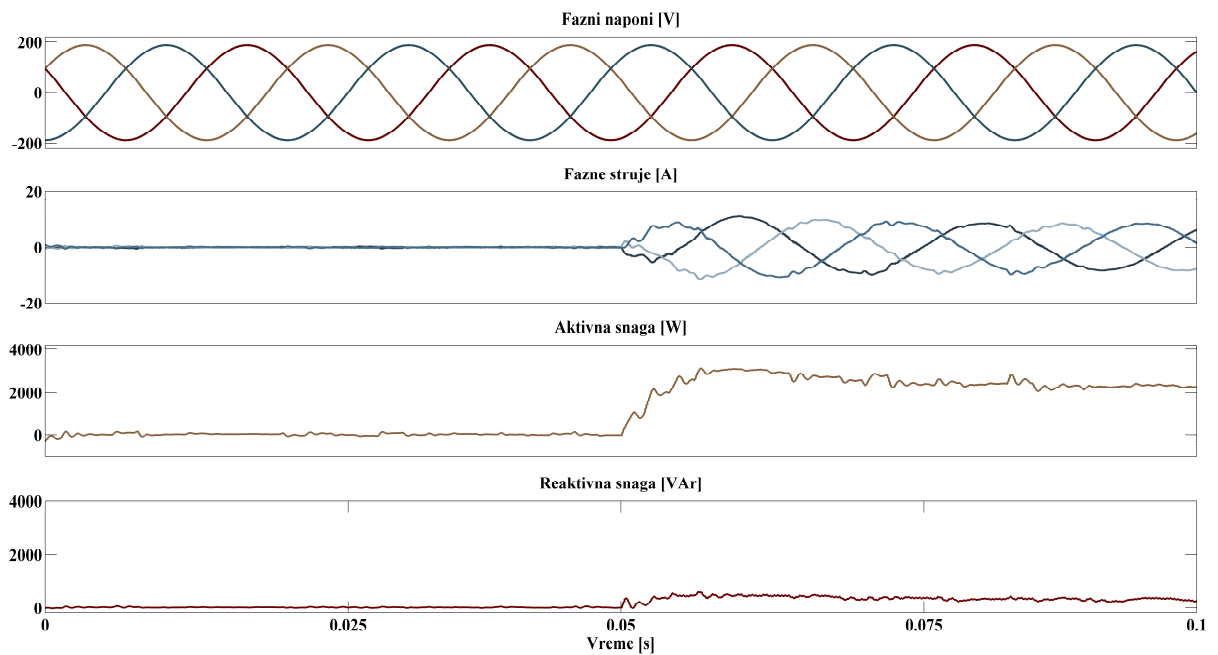


Слика 4.10. Расподела подстананица у емулационом моделу дистрибутивне мреже.

4.2. Верификација испуњености основних захтева у току поремећаја

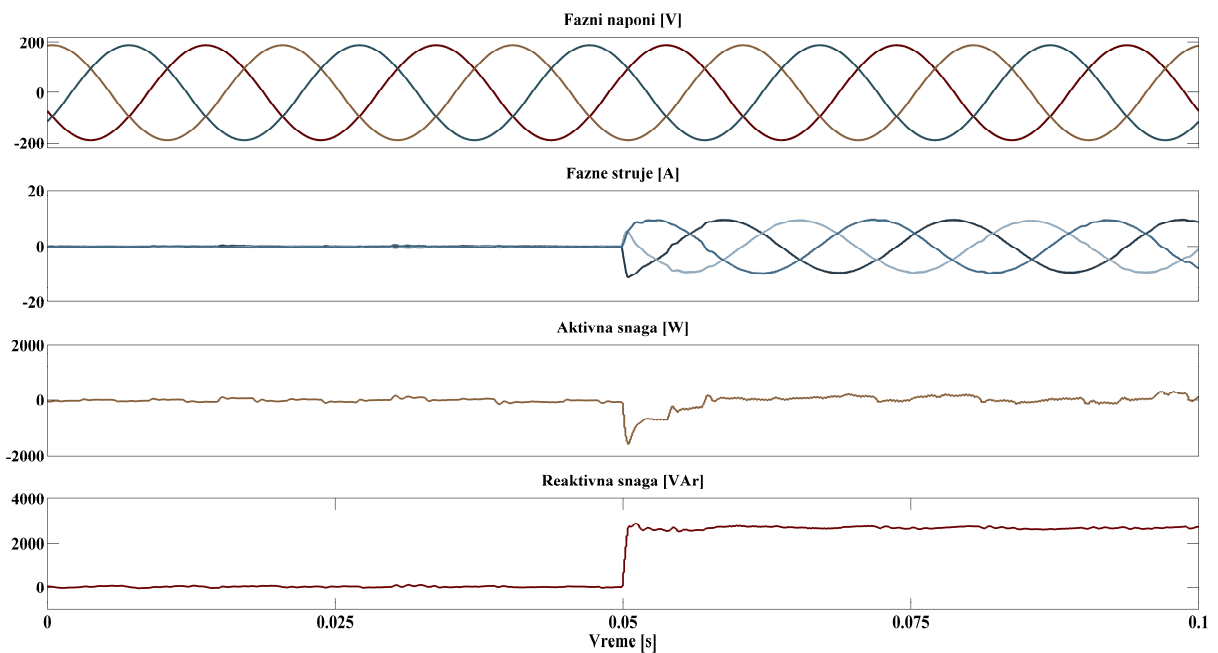
Потврда задовољења захтева дефинисаних *Grid Code*-овима је остварена употребом једноставнијег модела приказаног на слици 4.7. Инвертор је преко спрежне индуктивности и трансформатора повезан на мрежу бесконачне снаге. Даље, инвертор је мале снаге - номинална снага је 2.5 kW, а повезан је са мрежом преко дистрибутивног трансформатора велике снаге - номиналне снаге 1 MW. У складу са наведеним, извор није у могућности да мења напонске прилике нити да на други начин мења стање у мрежи на коју је повезан. Циљ је био да се изолују појаве које доказују или негирају испуњеност захтева од феномена који су изван опсега који разматрају ове законске регулативе.

Најстрожи сет захтева који дефинишу стандарди је дат у табели 2.2. Слика 4.11. приказује пораст производње активне снаге при одскочној промени производње. Струјни извор постављен у једносмерном међуколу на слици 4.7. је променио производњу струје са нулте вредности на вредност од 7 A. Ова вредност резултује у производњи номиналне снаге и производњи 1 p.j. струје са наизменичне стране претварача. Као последица вишка енергије у *DC* колу, односно кондензатору, јавио се пораст у напону *DC* кола. Ова промена је детектована од стране регулатора напона *DC* кола који је затим увећао референцу за активну снагу која се прослеђује струјној петљи. Може се уочити да је активна снага достигла коначну вредност за око 20 милисекунди.



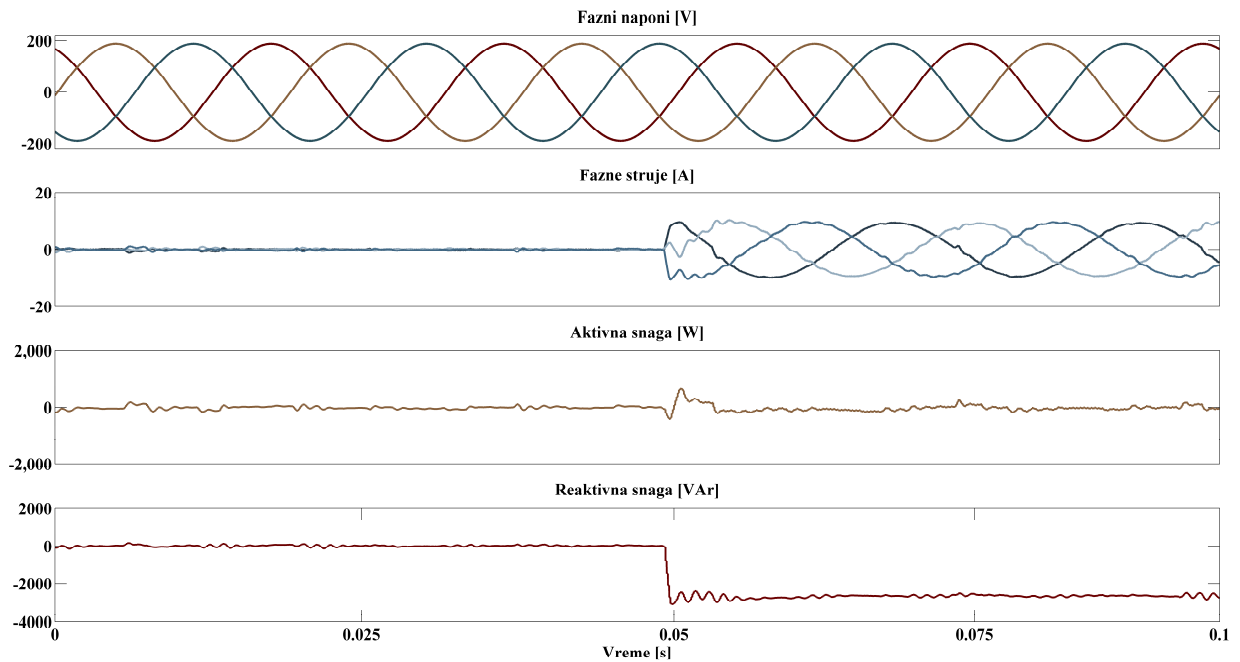
Слика 4.11. Потврда задовољења захтева о брзини промене производње активне снаге.

Слике 4.12. и 4.13. приказују промену реактивне снаге са нулте на номиналну вредност, капацитивно и индуктивно, по реду. Услед чињенице да је референца за реактивну снагу задавана директно, а не посредством извесне спољашње петље, као што је то био случај код активне снаге, одзив реактивне снаге је дефинисан искључиво одзивом струјне петље. Може се уочити да се референца достиже врло брзо, у периоду краћем од 5 ms.



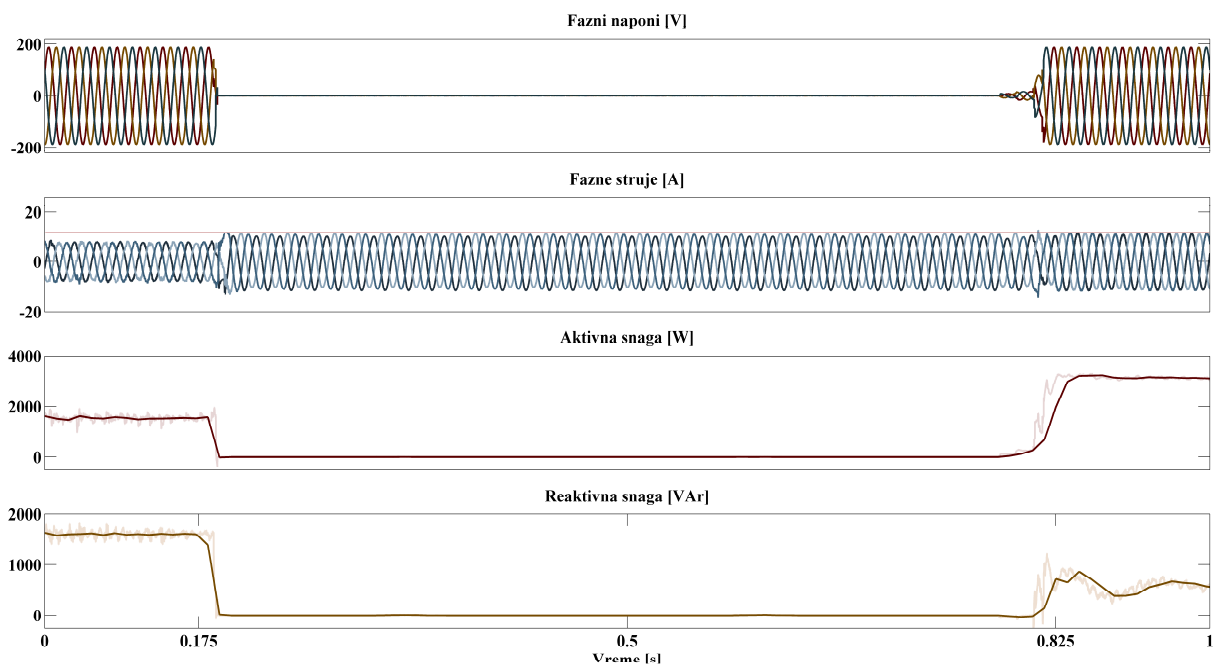
Слика 4.12. Потврда задовољења захтева о брзини промене производње реактивне снаге (позитивна промена).

Дакле, и активна и реактивна снага могу да промене вредност са нулте на номиналну у периодима краћим од оних захтеваних стандардима. Наравно, кратак транзијент у снагама обезбеђује не само ефикасну експлоатацију примарног извора енергије већ и правовремено реаговање у хаваријским ситуацијама.



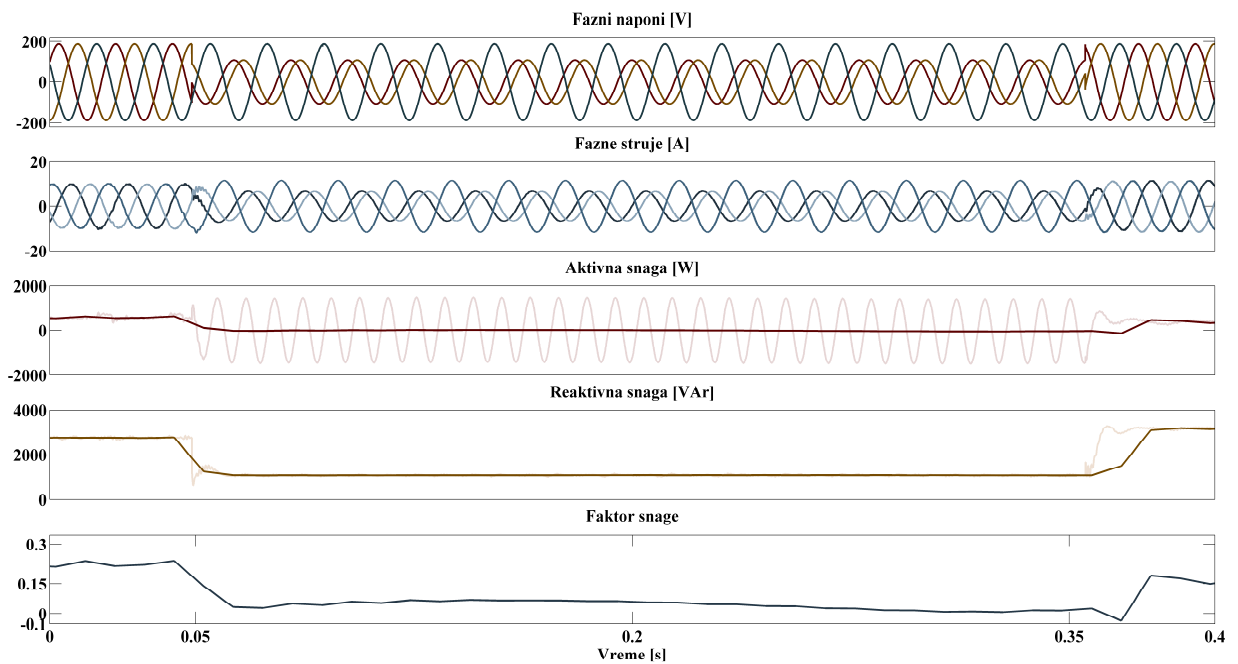
Слика 4.13. Потврда задовољења захтева о брзини промене производње реактивне снаге (негативна промена).

Један од најзначајнијих захтева је *LVRT* захтев, односно обавеза дистрибуираног извора да остане повезан на електричну мрежу у току појаве пропада напона. На слици 4.14. се види да је извор остао повезан на електричну мрежу чак и у току трофазног кратког споја директно на сабирницама у трајању од 650 ms. Ова слика потврђује да претварач управљан предложеним контролним алгоритмом задовољава најстроже захтеве *Grid Code*-ова.



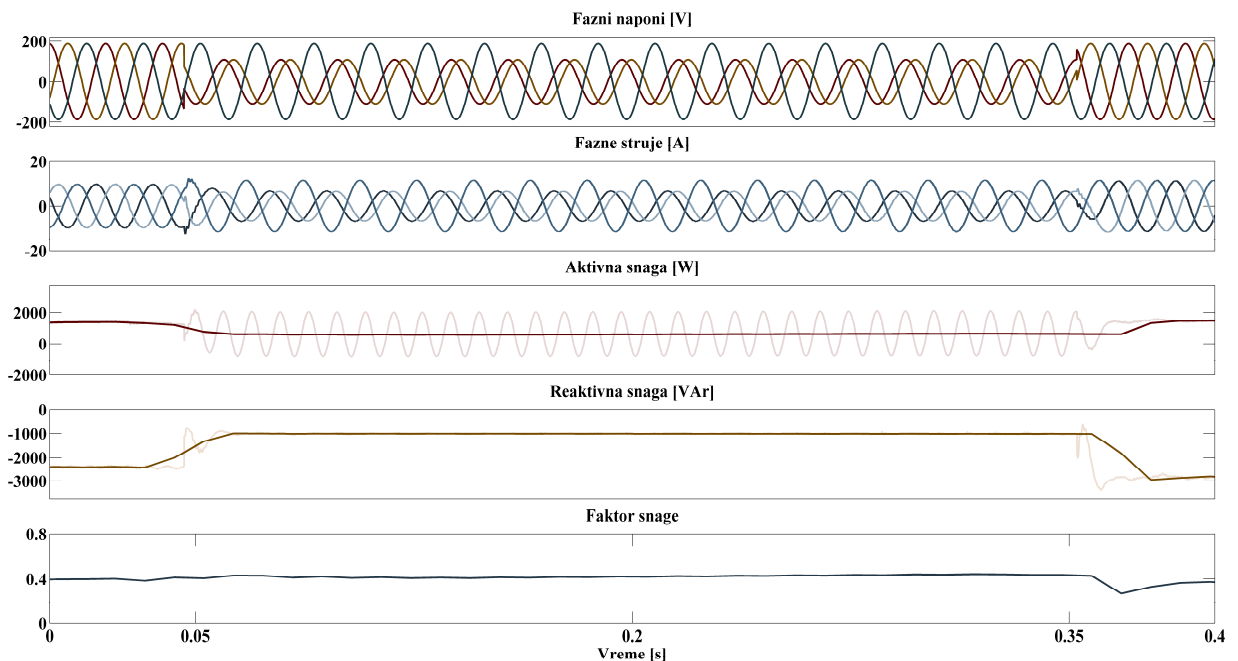
Слика 4.14. Потврда задовољења *LVRT* захтева.

Слика 4.15. и слика 4.16. потврђују да извор може да производи дефинисан однос активне и реактивне снаге, како пре квара, тако и у току квара. Другим речима, оператер може да дефинише колики фактор снаге претварач треба да производи било да се ради о номиналном или хаваријском режиму. Слика 4.15. приказује профиле величина када је задат фактор снаге од 0.15 капацитивно. Услед чињенице да је производња реактивне снаге доминантна, дозвољене су осцилације у активној снази.



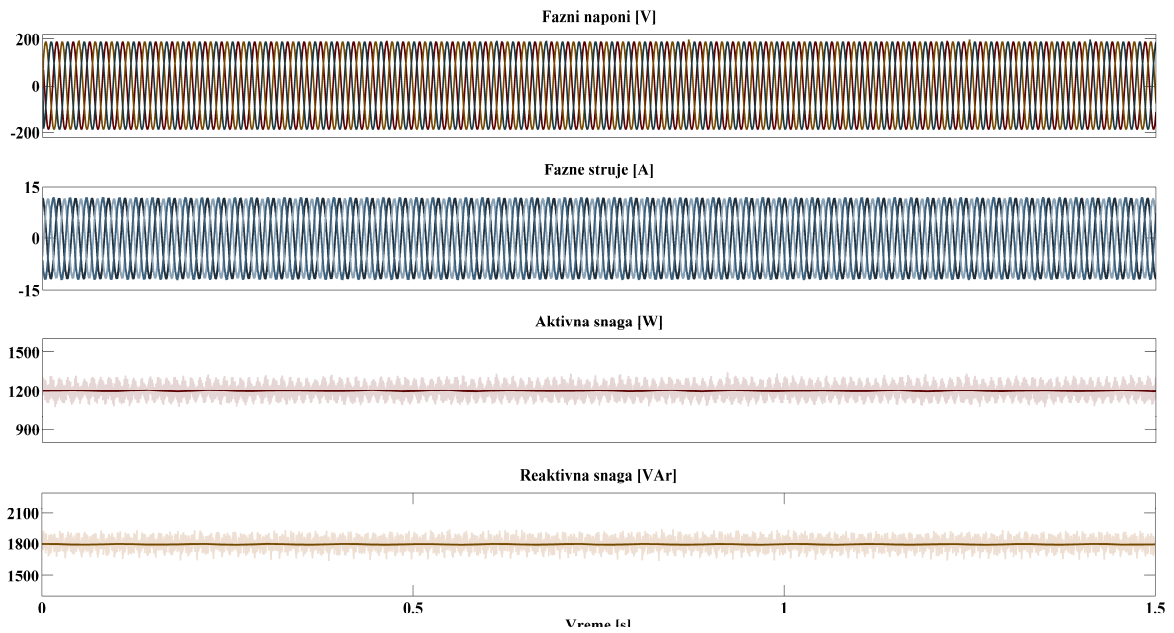
Слика 4.15. Потврда задовољења захтева о реализацији специфицираног фактора снаге (капацитивно).

Са друге стране, слика 4.16. приказује профиле напона, струја и снага када је фактор снаге подешен на 0.4 индуктивно. Оба ова теста приказују радне тачке које се налазе изван зоне дефинисане стандардима, односно, задовољавају и лимите који су захтевнији од оних у тренутно важећим регулативама ($[-0.4, 0.4]$). Потврда да контролни алгоритам обезбеђује рад у свим тачкама опсега $[-1, 1]$, дакле, у читавом опсегу који се дефинише за фактор снаге, ће индиректно бити дата кроз резултате који су приложени у следећем поглављу.



Слика 4.16. Потврда задовољења захтева о реализацији специфицираног фактора снаге (индуктивно).

Слика 4.17. приказује одзиве при промени фреквенције са 45 Hz на 55 Hz у периоду од једне секунде. Не уочавају се нестабилности нити прескоци у величинама. Промена фреквенције у износу од 1 Hz у року од 0.1 секунде је бржа од свих трендова промене спомињаних стандардима и бржа је од промене која се реално може очекивати у електричној мрежи. У складу са тим, може се очекивати да ће контролни алгоритам обезбедити ефикасну контролу над величинама и при интензивним променама фреквенције.

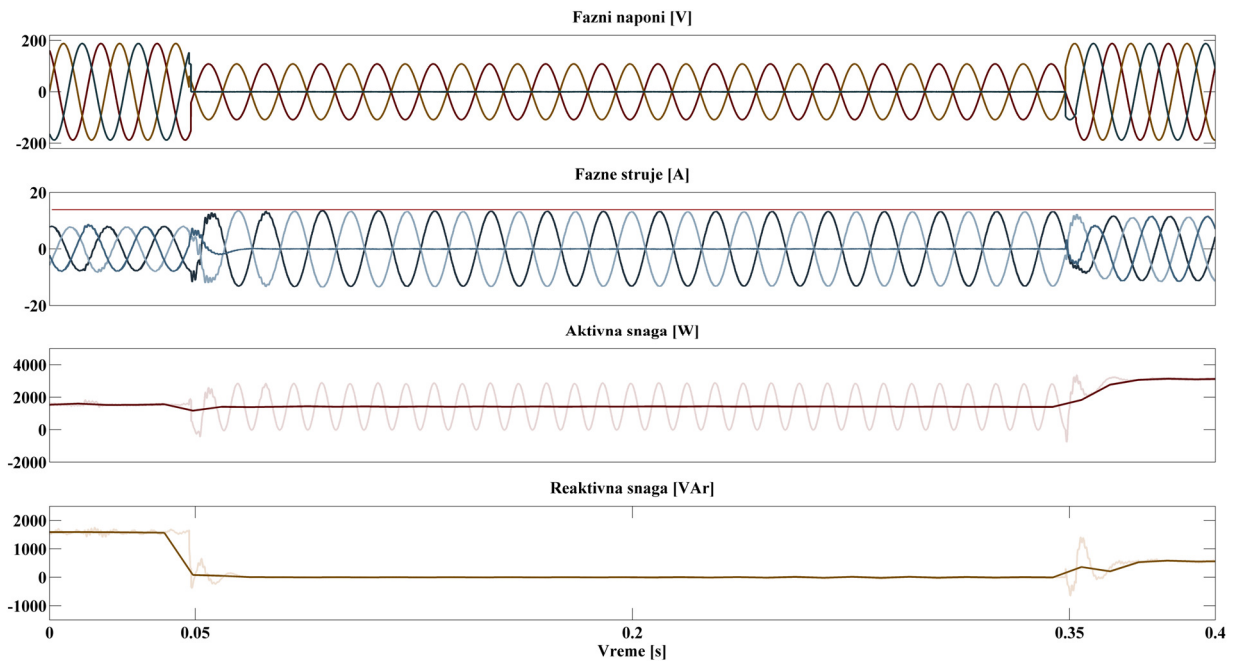


Слика 4.17. Потврда задовољења захтева о стабилном раду претварача раду при променама мрежне учестаности.

Даље, имплементација механизма за ограничавање и постављање амплитуда фазних струја на максималну дозвољену вредност је од изузетног значаја услед чињенице да је пораст струја појава уско везана за најдраматичније поремећаје - кратке спојеве у току којих је нарочито значајно да се максимизује производња како би се обезбедио најинтензивнији утицај на мрежу, али и како би се наставило са експлоатацијом примарног извора енергије. У наставку је демонстрирана максимална експлоатација доступних производних капацитета у хаваријским ситуацијама, без угрожавања сигурности претварача. У наставку је приказан већи број експерименталних резултата којима се потврђује да се претварач неће одспојити од мреже услед реаговања прекострујне заштите, али и којима се потврђује да ће инвертор производити максималну могућу количину електричне енергије.

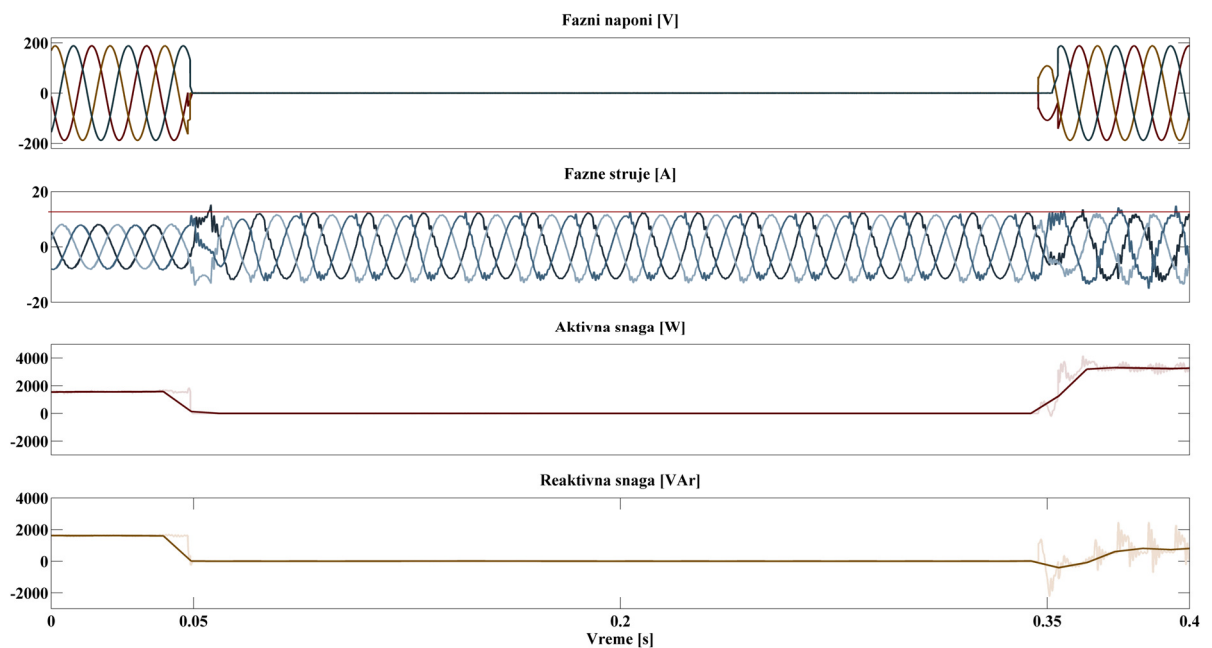
Сви кратки спојеви трају 300 ms. Затим, улазна активна снага је све време постављена на вредност од 1500 W. Слично, без обзира на режим рада претварача, задаје се референца за реактивну снагу од 1500 VAr. Који део захтеване производње снага ће бити реализован зависи од примењене стратегије управљања.

Слика 4.18. приказује таласне облике напона на секундарној страни трансформатора, фазне струје, активну и реактивну снагу пре, током и након кратког споја са примарне стране трансформатора. Изазван је кратак спој две фазе. Примењен је алгоритам којим се дозвољавају осцилације у активној снази. Осцилације у реактивној снази нису присутне. Може се уочити и да је производња активне снаге приоритизована. Производња реактивне снаге је у потпуности престала, док је производња активне снаге умањена за око 100 W. Дакле и у овом контексту механизам за прорачун струјних референци добро функционише. Струје су лимитиране на 11.6 A, односно на 1 p.j. Једна релативна јединица у фазним струјама је за $\sqrt{3}$ већа од номиналне фазне струје.



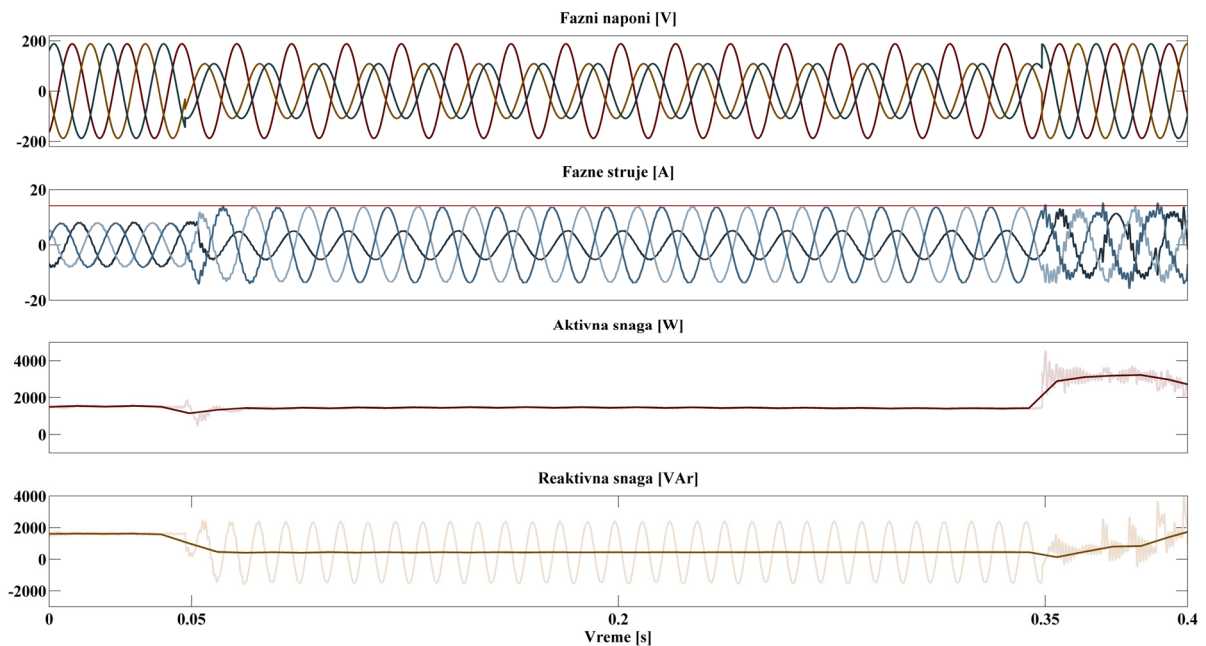
Слика 4.18. Потврда задовољења захтева о ограничењу струје (P приоритизовано, $\Delta Q=0$, двофазни к.с.).

На слика 4.19. су дати резултати добијени приликом трофазног кратког споја на примарној страни трансформатора. Алгоритам примењује истоветан поступак као и у претходном тесту. Поново су струје ограничене и заправо теку само кроз спрежну индуктивност и трансформатор ка месту кратког споја са земљом. Услед ограничених струја и готово нултих напона на секундару, развијене снаге су мале и реализују се само у филтру и трансформатору.



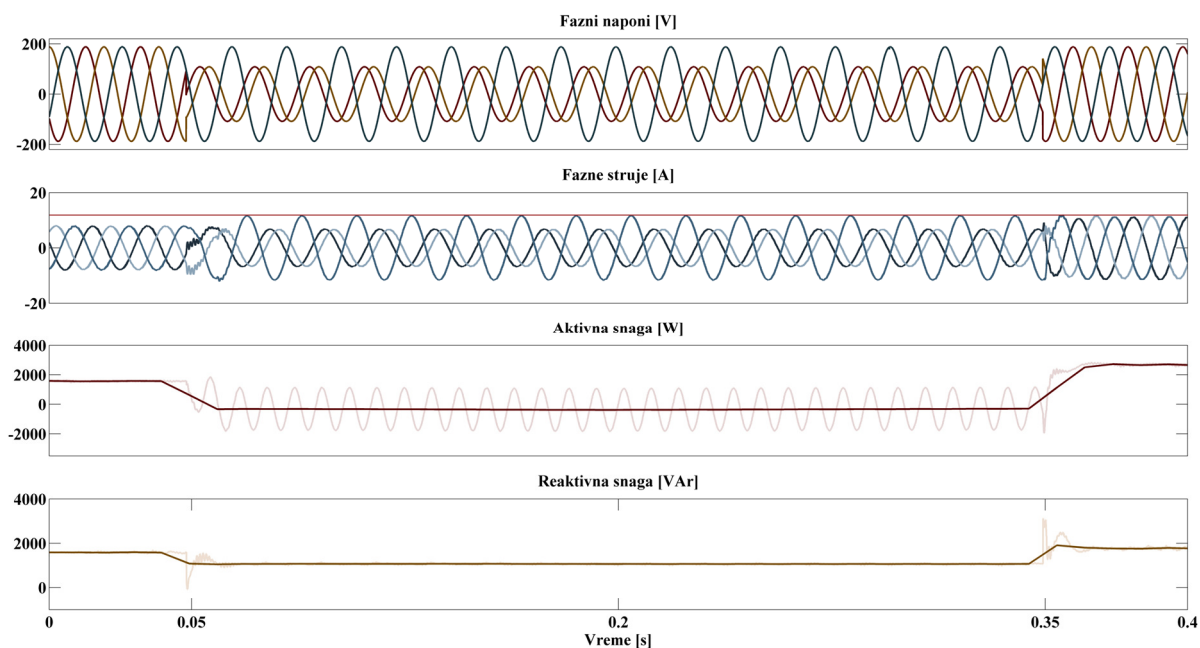
Слика 4.19. Потврда задовољења захтева о ограничењу струје (P приоритизовано, $\Delta Q=0$, трофазни к.с.)

У следећем тесту су дозвољене осцилације у реактивној снази, док активна снага не садржи осцилације. Поново је приоритизована производња активне снаге. У овом тесту једнофазни кратки спој је емулиран. Слика 4.20. приказује резултате снимљене у току овог теста. Након отклањања узрока кратког споја јавља се значајан скок у активној снази. Ово је последица вишка енергије који се акумулисао у кондензатору у току кратког споја, а коју је потребно спровести у мрежу кроз транзијентно увећање производње активне снаге. Након што се уклони вишак наелектрисања и напон U_{dc} врати на номиналну вредност, производња активне снаге се вратила на 1500 W. У реактивној снази се такође примећује увећање у производњи, мада нешто мање. Ово транзијентно увећање је последица искључиво подешавања параметара регулатора и транзијентни процес се завршава 15 ms након нестанка дејства квара.



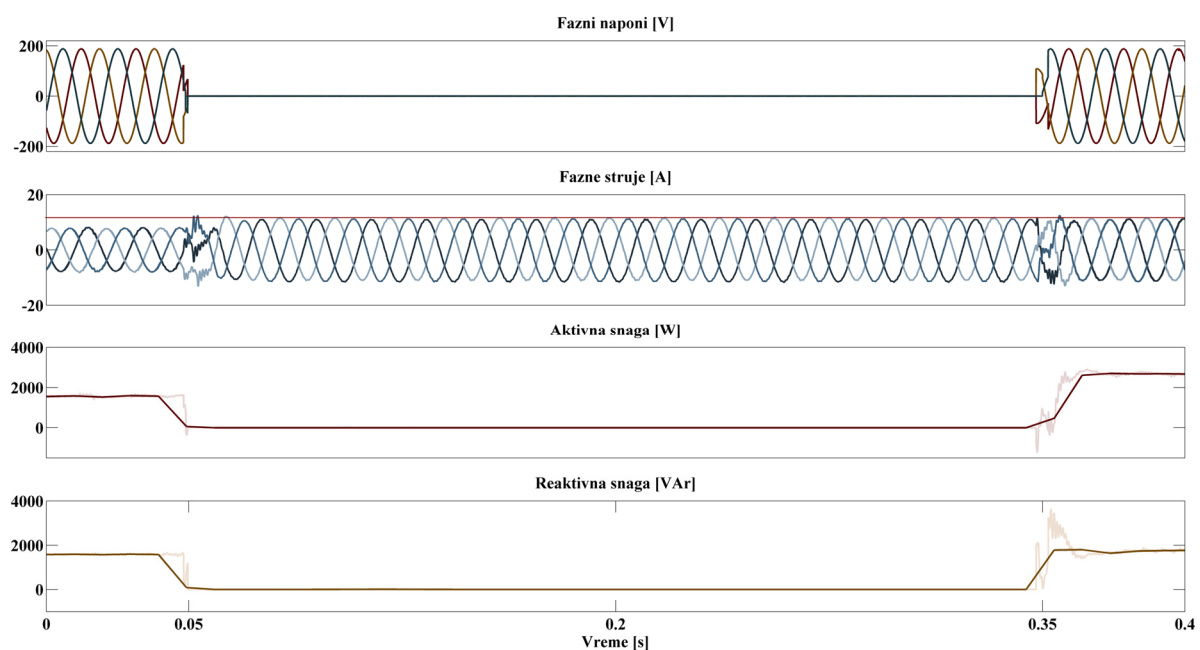
Слика 4.20. Потврда задовољења захтева о ограничењу струје (P приоритизовано, $\Delta P=0$, једнофазни к.с.).

Затим је тестиран случај у ком се дозвољавају осцилације у активној снази, а производња реактивне снаге је приоритизована. Слика 4.21. даје релевантне таласне облике. Овај механизам има највише смисла употребити у току кратког споја услед чињенице да је реактивна снага ефикаснија у регенерацији напонског профила, а осцилације је свакако боље омогућити у снази чија производња није приоритизована. У складу са примењеним контролним алгоритмом и дужином пропада напона, у току кратког споја производња активне снаге је у потпуности престала, док је производња реактивне опала за 300 VAr. Након нестанка ефеката кратког споја може се уочити да активна снага има вредност која је већа од оне пре кратког споја. Ово је последица потребе да се уклони вишак наелектрисања које се нагомилало у једносмерном међуколу у току квара. Кочioni чопер јесте онемогућио неконтролисан раст напона у DC колу, али је пораст зауставио на нивоу који је виши од номиналног напона. Како би се напон DC кола вратио на номиналну вредност потребно је не само инјектовати снагу коју производи примарни извор енергије, већ и активну снагу која ће извући овај вишак наелектрисања.



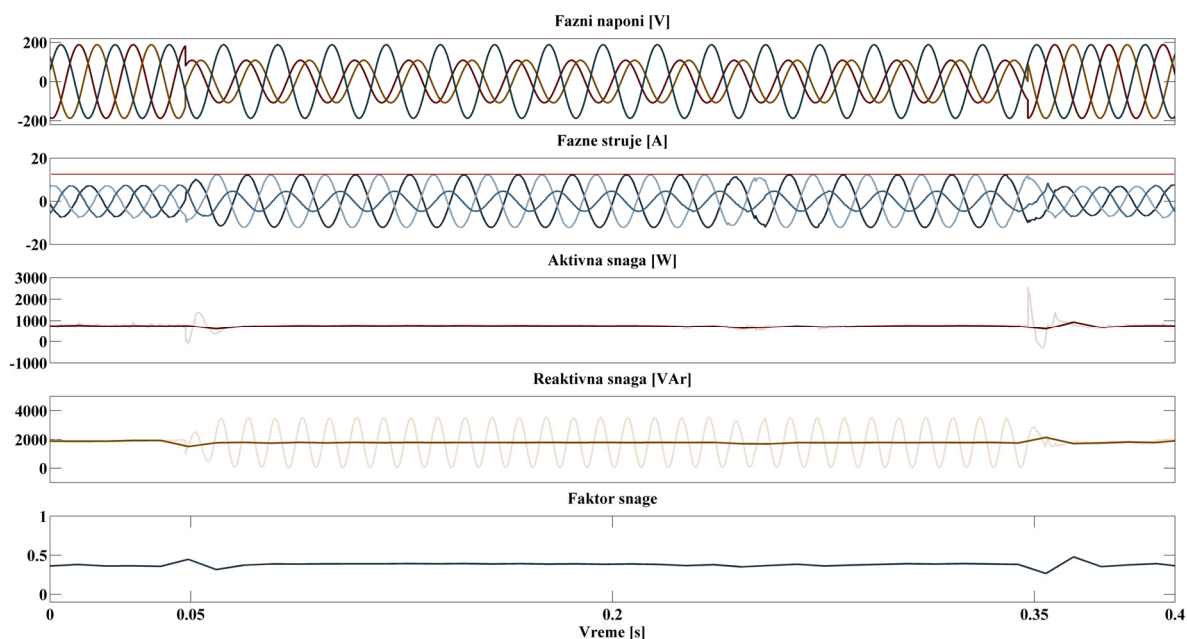
Слика 4.21. Потврда задовољења захтева о ограничењу струје (Q приоритизовано, $\Delta Q=0$, једнофазни к.с.).

Механизам за прорачун референци струја из теста са слике 4.21. је такође био изложен трофазном кратком споју. Слика 4.22. приказује релевантне таласне облике. На основу овог теста се поново може закључити да је приступ развијен у трећем поглављу врло ефикасан.



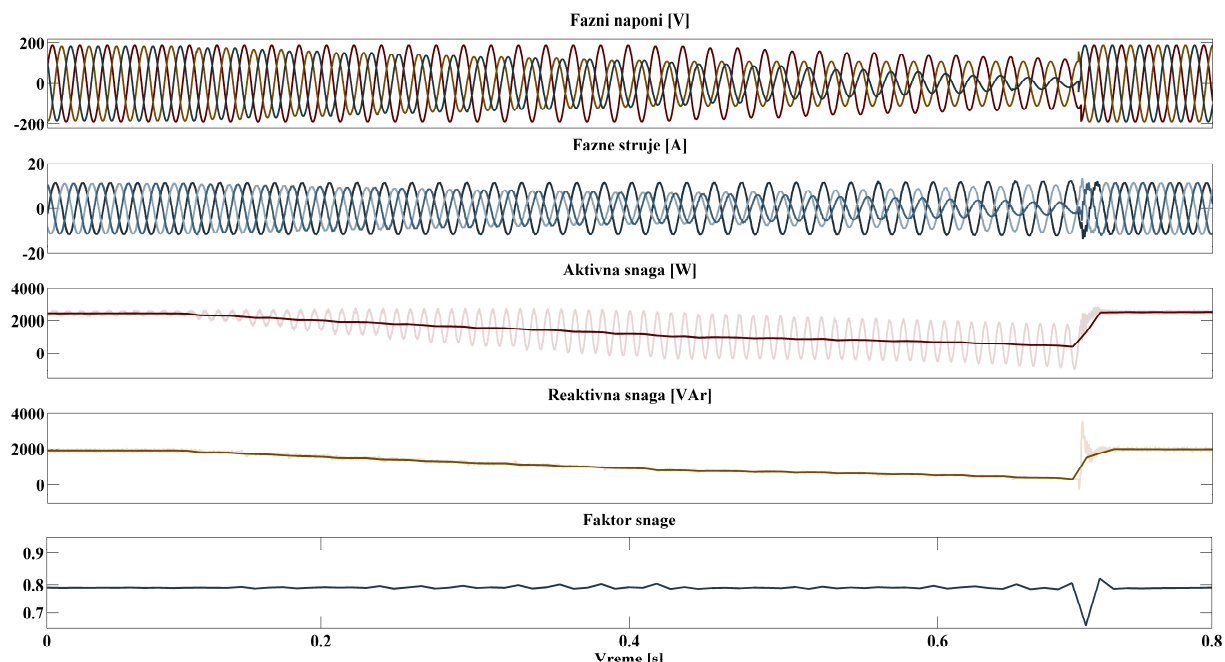
Слика 4.22. Потврда задовољења захтева о ограничењу струје (Q приоритизовано, $\Delta Q=0$, трофазни к.с.).

Слика 4.23. приказује профиле електричних величина добијених при кратком споју фазе са земљом. У овом случају се захтевао константан фактор снаге пре кратког споја и у режиму са кратим спојем. Захтеван је фактор снаге од 0.4 капацитивно. Дозвољене су осцилације у реактивној снази. Ипак, у овом случају снаге нису драстично оборене - производње су опале за мање од 100 W, односно 100 VAr.



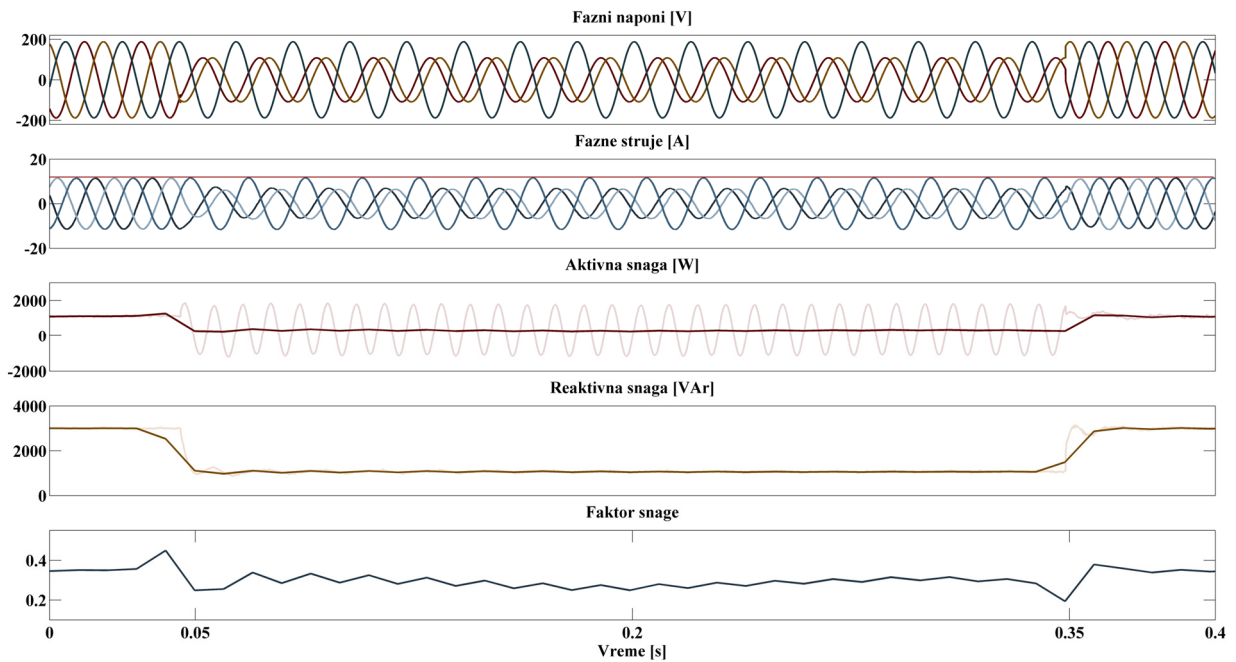
Слика 4.23. Потврда задовољења захтева о ограничењу струје ($\cos\varphi=0.4$, $\Delta P=0$, једнофазни к.с.).

У току следећег теста, два фазна напона мреже су континуално мењани са номиналне вредности на нулту вредност у периоду од 0.5 секунди. Дакле, промена напона није била моментална. На слици 4.24. се може видети да фактор снаге приближно задржава дефинисану вредност од 0.8 у свим режимима. У току промене профила напона јавља се извесно одступање, али је оно последица чињенице да се радни режим стално мења, односно претварач се све време налази у прелазном режиму. Осим тога, нагла транзијентна промена фактора снаге након отклањања узрока кратког споја је очекивана услед наглог скока у референци активне снаге, а поново услед нагомилане енергије у DC колу. Убрзо после овог транзијента, фактор снаге се поново усталио на вредности од 0.8. Дозвољене су биле осцилације у реактивној снази.



Слика 4.24. Потврда задовољења захтева о ограничењу струје ($\cos\varphi$ - променљиво, $\Delta P=0$, променљив профил напона).

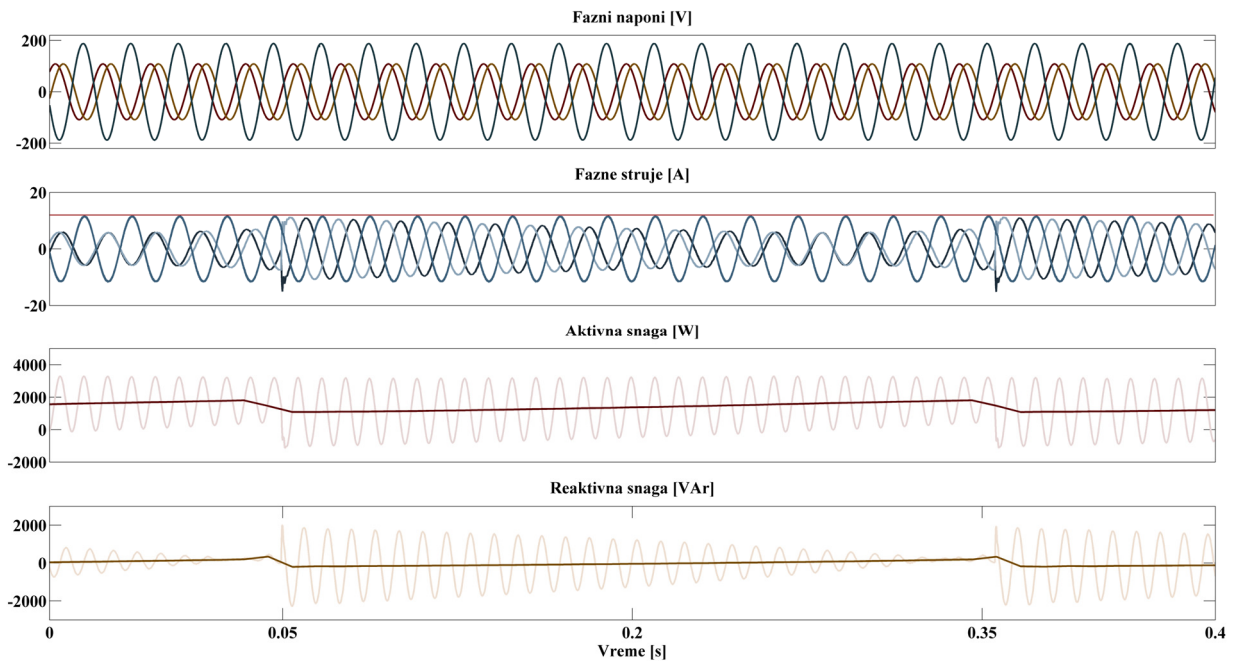
Слика 4.25. приказује још један тест у којем се захтевао константан фактор снаге. Овог пута је дефинисана вредност од 0.3 капацитивно, при чему су биле дозвољене осцилације у активној снази. Изазван је једнофазни кратак спој. Као и у претходним тестовима, струје су ограничене, чак и у транзијентима.



Слика 4.25. Потврда задовољена захтева о ограничењу струје ($\cos\varphi=0.3$, $\Delta Q=0$, једнофазни к.с.).

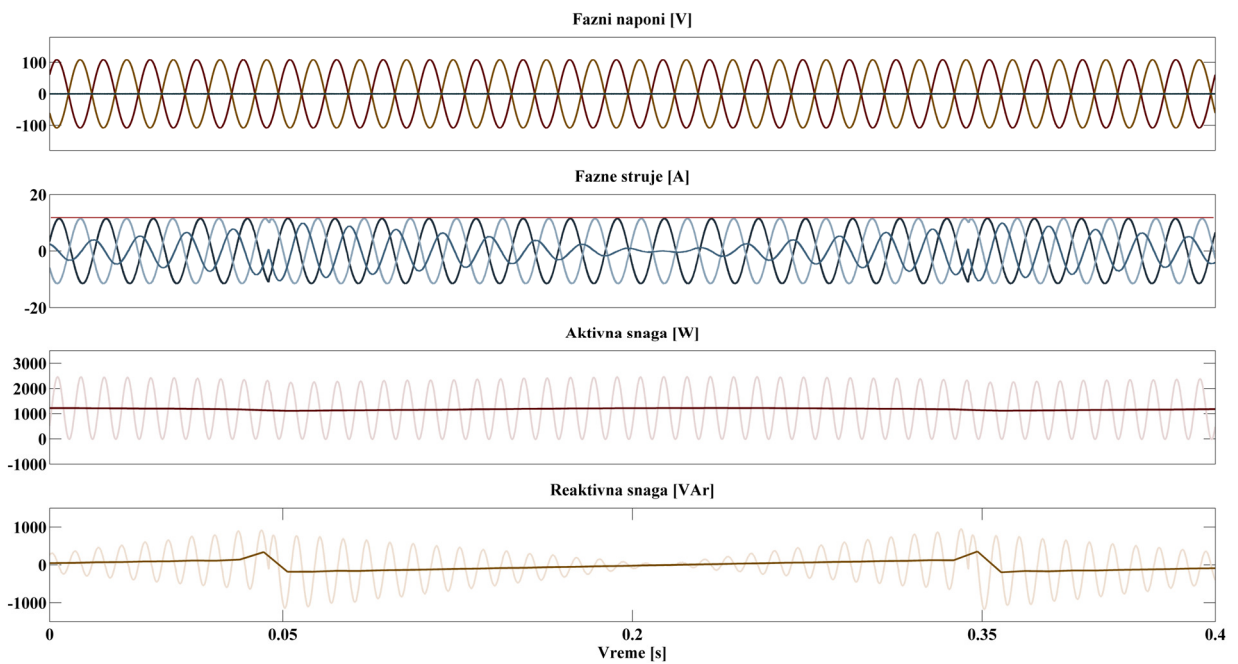
Следећи огледи су осмишљени с циљем да се тестира механизам за лимитирање струја када се акценат ставља на производњу активне и реактивне снаге кроз генерисање позитивних и негативних компоненти струја при чему се осцилације у снагама не разматрају. Подешавањем параметара k_{p+} , k_{p-} , k_{q+} и k_{q-} мењан је однос у којем су се снаге производиле кроз генерисање позитивних, односно негативних компоненти. Поменути параметри су мењани континуално са нуле на јединицу у периоду од 0.3 секунде. Промена је реализована генерисањем рампе у оквиру програма који се извршавао на контролеру. Битно је напоменути да овај приступ изискује употребу неке врсте детектора пропада напона. Како би се елиминисала потреба за овим механизмом, а са циљем уклањања свих процеса који би отежавали процену квалитета рада самог механизма за лимитирање струја, учињено је да је кратак спој у енергетском делу поставке перманентан. У реалном раду би се се користио неки механизам за детекцију пропада напона и управљачки алгоритам би се у току пропада изменио са оног који је прикладан за номиналне режиме на тренутно разматрани, који је прикладан за режиме са кратким спојевима.

У првом тесту везаном за ову парадигму прорачуна референци, захтевана је производња активне снаге. Изазван је једнофазни кратак спој. Са слике 4.26. се може уочити да се са променом параметара k_{p+} , k_{p-} , k_{q+} и k_{q-} мења и профил произведених снага. Две појаве је важно уочити. Прва је да се осцилације у реактивној снази могу учинити малим адекватним подешавањем поменутих параметара. Друга појава се тиче средње вредности активне снаге. Може се уочити да средња вредност активне снаге расте са порастом параметра који увећава позитивне компоненте струје. Дакле, искоришћеност производних капацитета није иста у свакој радној тачки. Ипак, и даље се не може рећи која радна тачка је најбоља услед чињенице да је онемогућен утицај претварача на мрежу и на основу приказаног теста се не може закључити које вредности параметара k_{pq+} је најсмисленије употребити.



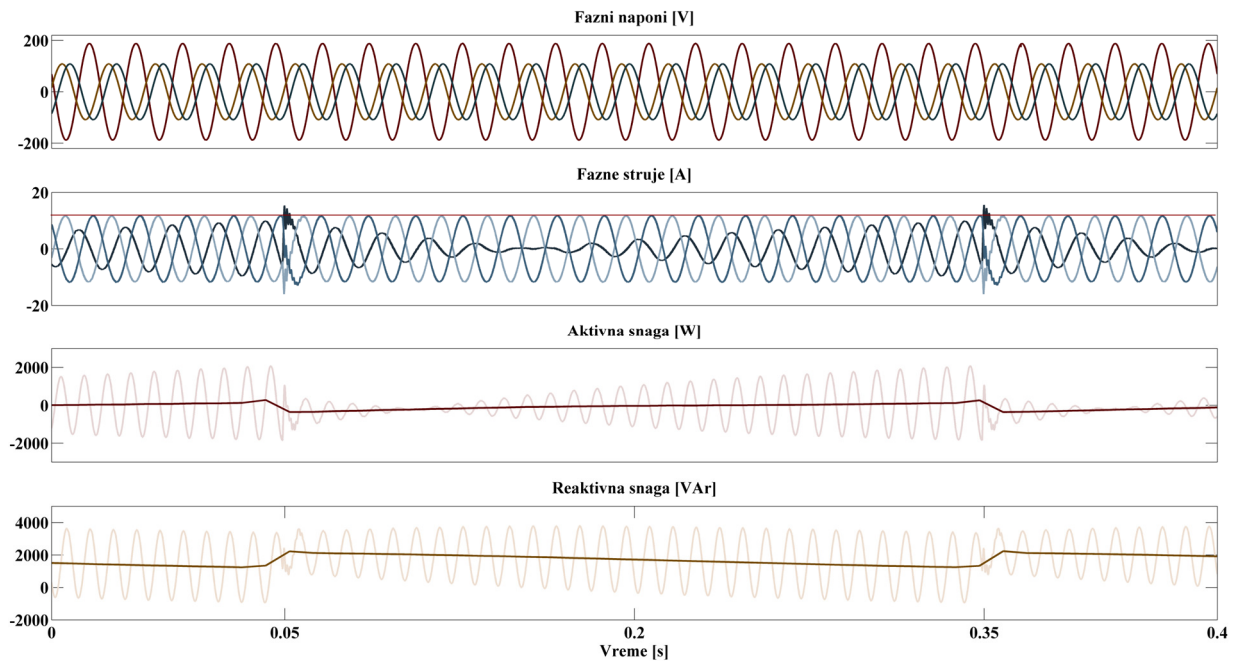
Слика 4.26. Потврда задовољења захтева о ограничењу струје (P , k_{pq+-} - променљиво, једнофазни к.с.).

Резултати приказани на слици 4.27. су добијени за примену истог управљачког алгоритма, али при двофазном кратком споју са земљом. Све констатације изнесене за претходни тест важе и овде.

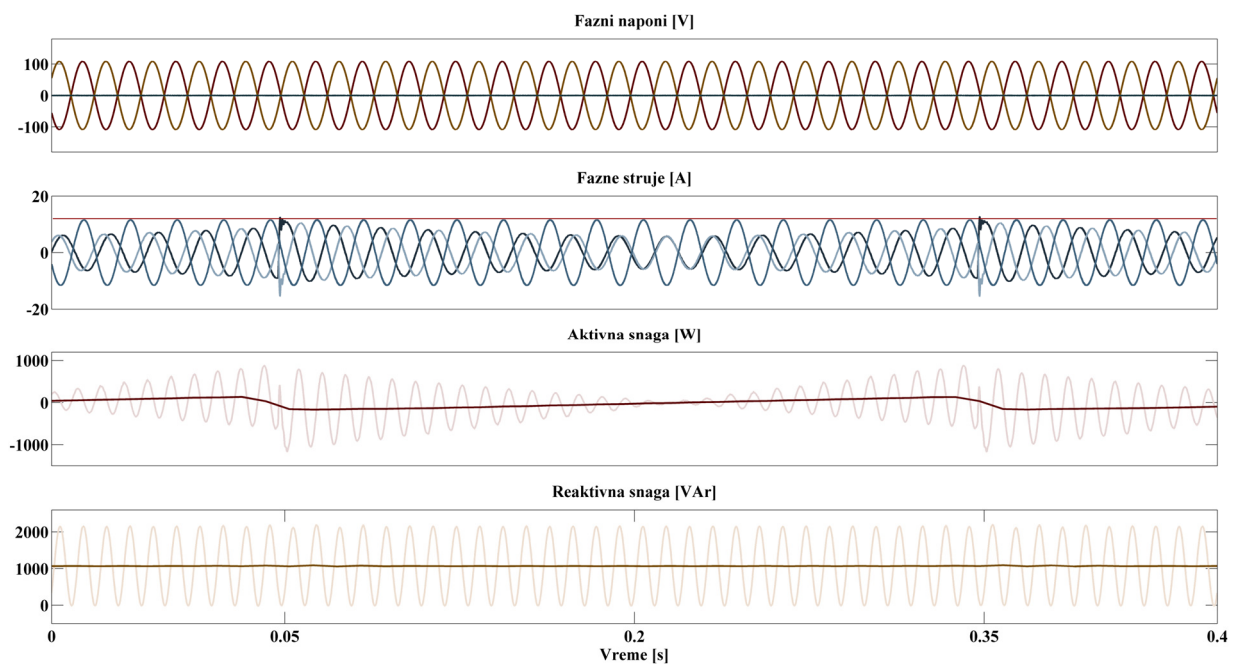


Слика 4.27. Потврда задовољења захтева о ограничењу струје (P , k_{pq+-} - променљиво, двофазни к.с.).

Слике 4.28. и 4.29. приказују тестове сличне са претходна два, али је овог пута произведена реактивна снага. Први тест је реализован у току једнофазног, а други тест у току двофазног кратког споја са земљом. У сва четири теста струје су на лимиту. Једино у току дискретне и драстичне промене параметара k_{pq+-} која се одиграва на почетку и крају периода од 300 ms се могу уочити краткорочни пикови у струјама. Њих у реалним режимима не би било услед тога што се овим параметри не мењали у крупним скоковима, ако би се уопште и мењали у току кратких спојева.



Слика 4.28. Потврда задовољења захтева о ограничењу струје (Q , k_{pq+-} - променљиво, једнофазни к.с.).



Слика 4.29. Потврда задовољења захтева о ограничењу струје (Q , k_{pq+-} - променљиво, двофазни к.с.).

4.3. Анализа напредних функционалности контролног алгорита

У току локалних кратких спојева и резултујућих одступања фазних напона од номиналних, од пресудног значаја је спречавање одспајања дистрибуираног извора од мреже и поштовање пропозиција за производњу енергије које су дефинисане законским регулативама. Претходним поглављем је потврђено да развијени контролни алгорита задовољава све прописане норме и обезбеђује сигурну и максимизовану производњу електричне енергије, како у номиналном режиму, тако и у режимима у којима се у електричним величинама јављају одступања од номиналних вредности.

Резултати приложени у овом поглављу треба да демонстрирају утицај који инвертори имају на мрежу и да покажу какав је ефекат примене појединачних до сада разматраних контролних структура, са посебним освртом на напонске прилике. Експериментални резултати добијени применом ових контролних алгоритама на емулираним моделима ће навести на извесне закључке о томе који приступ је потребно применити у специфичним ситуацијама.

Резултати тестова су подељени у три групе – за сваки од три размотрена приступа за прорачун референци је издвојен један део поглавља. У сваком делу и за сваку од контролних структура су дати:

- Таласни облици фазних напона секундарне стране трансформатора, фазних струја секундарне стране трансформатора, активне и реактивне снаге (за једну производну јединицу),
- Таласни облици фазних струја за три производне јединице,
- Векторски дијаграм струја који одговара примењеном алгоритму,
- Табела у којој су дате амплитуде фазних напона.

Прва група резултата, од поменуте четири, је добијена за једноставан модел у којем је један инвертор повезан са мрежом бесконачне снаге. Модел који је коришћен у току ових тестова је сличан оном који је дат на слици 4.7. Разлика је у томе што је дистрибутивни трансформатор преко подземног кабла, а не директно, повезан са мрежом. Осим тога, инсталисана снага претварача је значајно повећана и сад износи 3 MVA. Овим путем је омогућена промена локалних напонских прилика инјектовањем различитих профила снага. Како би се нагласио утицај претварача на напонске прилике у мрежи, кратки спојеви су учињени трајним и инвертор је генерисао снаге у трајању од 300 ms. Другим речима, мрежа је све време изложена кратком споју, а инвертор производи задат профил снага само у трајању од 300 ms, док је у остатку приказаних периода производња једнака нули.

Преостале три групе резултата су снимљене коришћењем модела дистрибутивне мреже који је разматран у 4.9. Инвертори коришћени у овим тестовима су такође инсталисане снаге 3 MVA. Резултати добијени употребом модела дистрибутивне мреже су конципирани с циљем потврде исправности функционисања разматраних механизма за прорачун референци у режимима који су блиски режимима који се реализују на терену и у пракси и са циљем демонстрирања измене напонских профила до којих долази применом појединих контролних структура. Ипак, услед краткорочности изражених пропада напона и односа снаге кратког споја и снаге извора, измене напонских профила нису саме по себи значајне. Краткорочност кратких спојева, односно брзина реаговања заштитних система, чини одступање напона од номиналних у току самог квара мање значајним за потрошаче. Осим тога, струје које се реализују на местима кратког споја су вишеструко веће од струја које може да произведе дистрибуирани извор и самим тим дистрибуирани извори никада неће моћи у потпуности да неутралишу последице кратких спојева, односно компензују струје кратких спојева. Разлог због којег је у овом поглављу пажња посвећена и напонским приликама и разлог због којег су фазни напони узети за величине од интереса се огледа у чињеници да се у експериментима користе претварачи велике снаге, те да дистрибуирани извори могу значајно да измене профил напона на прикључним сабирницама и могу да изазову како приближавање напона номиналним, тако и њихово удаљавање од пожељног напонског профила. С тим у вези, није свеједно који контролни алгоритам се примењује за одређени кратак спој и одређену локацију квара. Наравно, демонстриране измене напонских прилика могу да се разматрају у контексту режима у којима постоји трајна несиметрија у напонима (она изазвана несиметричним оптерећењем).

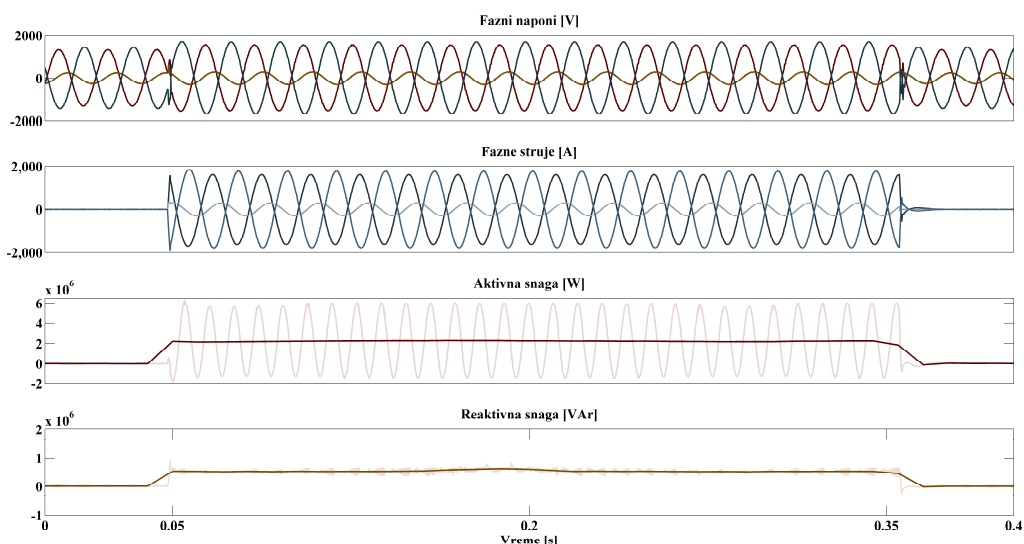
Приказани напони су филтрирани како би се уклонио прекидачки шум. У току тестирања инвертори су били изложени или једнофазном кратком споју или кратком споју две фазе (без уземљења). Ова два типа кратких спојева су најчешћи и чине преко 80% кратких спојева који се јављају у пракси [43]. У току свих тестова активан је кратак спој у близини чвора у којем је прикључена производна јединица „1“ обележена на слици 4.8. Дислоцираност преостале три тачке

у којима се мере електричне величине сугерише да ће режим у тим тачкама бити нешто другачији од режима у тачки „1“, те да се на основу ових тестова могу донети релевантни закључци. У чвору „4“ није било производне јединице, већ су само мерени напони на тој локацији, а са циљем оцењивања утицаја производње енергије у остале три разматране тачке на мерну тачку која се налази на крају дистрибутивне мреже и која је удаљена од трансформаторских станица у којима су прикључени инвертори. Важна је и напомена да је у наставку издвојен већи број тестова услед чињенице да међусобни утицај мреже и претварача на овај начин није до сада проучаван.

4.3.1. Приоритизација производње активне или реактивне снаге, с освртом на осцилације у снагама

Током реализовања резултата датих у овом поглављу захтевана је производња од 0.7 р.ј. и активне и реактивне снаге, односно око 2.1 MW и 2.1 MVA_r. У зависности од типа кратког споја и примењеног алгоритма, остварене снаге су биле једнаке задатим или су биле ниже.

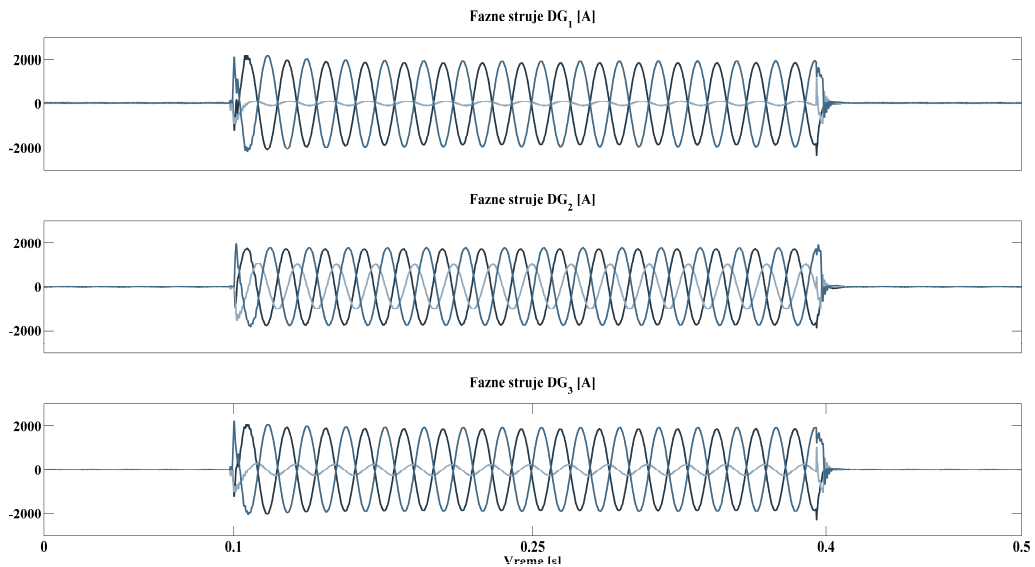
Слика 4.30. пружа резултате добијене применом алгоритма који минимизира осцилације у реактивној снази, при чему је приоритизована производња активне снаге. Алгоритам је тестиран на моделу који подразумева једну производну јединицу повезану на мрежу бесконачне снаге преко подземног кабла. Изазван је двофазни кратак спој.



Слика 4.30. Одзиви фазних напона, фазних струја, активне и реактивне снаге (P приоритизовано, $\Delta Q=0$, двофазни к.с.).

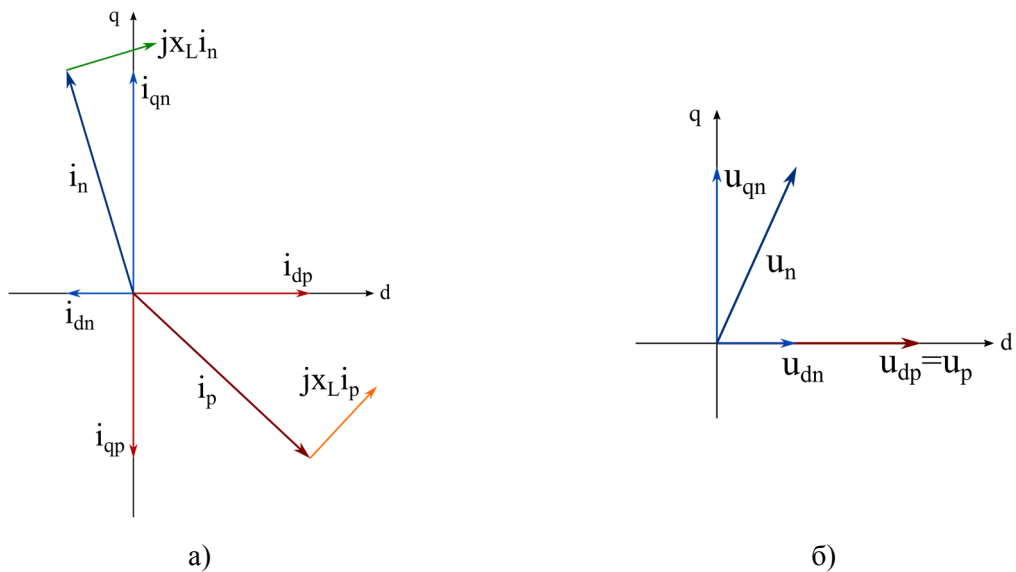
Може се видети да је средња вредност активне снаге 2.1 MW, односно произведена активна снага је једнака референтној и кратак спој не резултује умањењем производње активне снаге. Са друге стране, производња реактивне снаге јесте умањена и износи 0.7 MVA_r.

Слика 4.31. приказује струје које производе три производне јединице повезане на реалну дистрибутивну мрежу. Иако је профил произведених струја сличан, очигледна је различитост у несиметрији струја. Струја фазе a производне јединице „1“ је готово нула, док то није случај за јединицу „2“ и „3“. Производна јединица „2“ је најближа трансформатору који је спрега између дистрибутивне и преносне мреже (извору бесконачне снаге), те кратак спој код јединице „1“ изазива мању несиметрију напона, а тиме и несиметрију произведених струја.



Слика 4.31. Одзиви фазних струја три дистрибуирана извора (P приоритизовано, $\Delta Q=0$, двофазни к.с.).

На слици 4.32. а) су приказане позитивне и негативне, директне и попречне компоненте струја производне јединице „1“ за разматран контролни алгоритам и квар у дистрибутивној мрежи. Поменути струјне компоненте су референце израчунате на контролеру и затим очитане са контролера кроз *CCS* софтверски алат. Слично важи и за приказане напонске компоненте. Естимиране напонске компоненте су очитане са контролера у режимима док производња није активирана. Узимајући у обзир систем једначина (3.8) - (3.11) који се користи за прорачун референци и разматрани кратак спој који резултује појавом u_{dp} , u_{dn} и u_{qn} компоненти напона очекивано је да ће се захтевати производња све четири компоненте струје. Слика 4.32. б) даје векторски дијаграм компоненти напона за двофазни кратак спој када нема дејства инвертора. Како би се поједноставило разматрање, узео се да је еквивалентна импеданса између инвертора и мреже чиста индуктивност. Поредећи инкременте напона који се реализују на овој индуктивности под утицајем позитивних и негативних компоненти реализованих струја, може се уочити да ће позитивна компонента струје допринети увећању позитивне компоненте напона, што свакако јесте пожељан ефекат који резултује увећањем свих фазних напона. Ипак, и негативна компонента доприноси увећању негативне компоненте напона, што резултује увећањем несиметрије.



Слика 4.32. Векторски дијаграми фазних струја и напона на сабирницама (P приоритизовано, $\Delta Q=0$, двофазни к.с.).

Дакле, последица оваквог векторског дијаграма струја је измена профила напона напона који се реализује у току кратког споја када има производње електричне енергије у односу на онај који би се добио када у току кратког споја производње не би било. Табела 4.1. даје амплитуде фазних напона у току пропада када је активирана производња. У табели 4.1. леви број у пару је вредност амплитуде фазног напона за режим са инверторима, док је десни број вредност амплитуде фазног напона за режиме без производње.

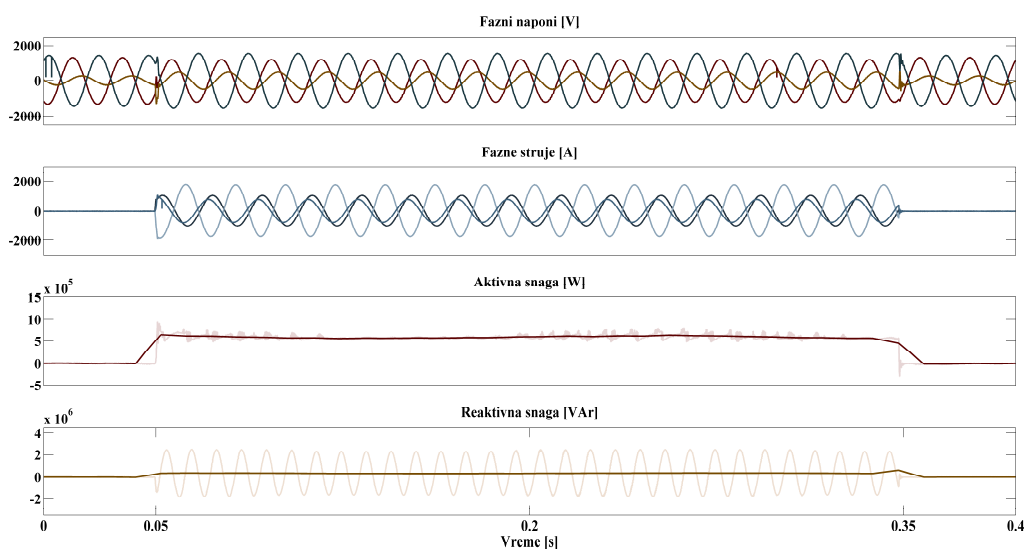
У прилогу су дати дијаграми амплитуда три фазна напона за кратак спој фазе и земље и двофазни кратак спој, док производња није активирана. Са ових дијаграма су очитане десне вредности у табели 4.1. као и вредности у свим наредним табелама које су њој сличне.

Очекивано, може се уочити да су се амплитуде свих фазних напона увећале. Проблем се огледа у чињеници да је и несиметрија драстично повећана. Два фазна напона која би без дејства инвертора били скоро на номиналним вредностима су увећани за око 600 V, док се најнижи фазни напон увећао тек за 80 V.

Напон	Чвор 1	Чвор 2	Чвор 3	Чвор 4
U_a	80.49 0	941.7 686	222 136	166 135
U_b	1663 1184	1601 1143	1657 1156	1232 1154
U_c	1732 1184	1623 1173	1703 1171	1267 1169

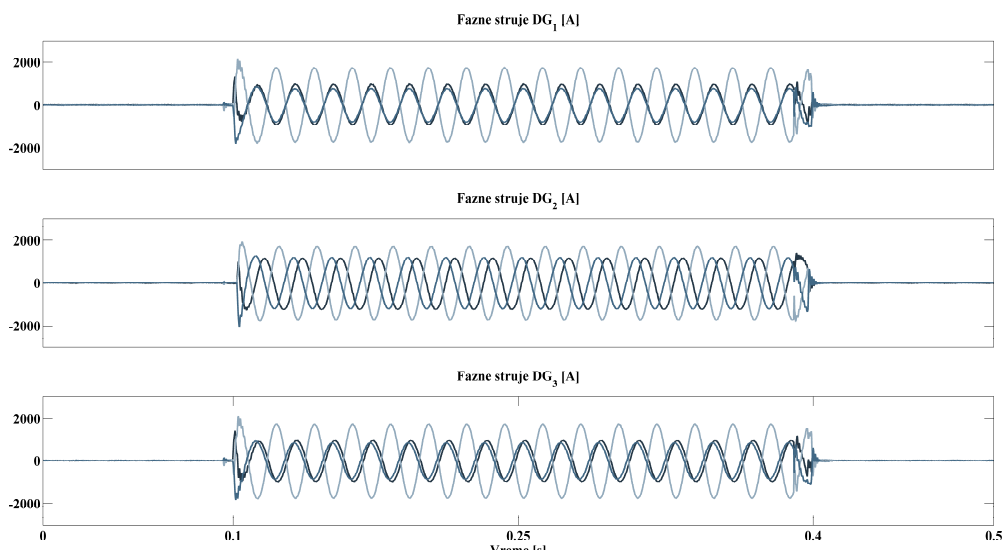
Табела 4.1. Фазни напони са и без дејства дистрибуираних извора (P приоритизовано, $\Delta Q=0$, двофазни к.с.).

Следећи тест је подразумевао прорачун референци струја којима треба да се реализује приоритизација производње активне снаге, при чему се дозвољавају осцилације у реактивној снази. Произведен је захтеван профил, али је произведена привидна снага драстично мања у односу на претходни тест. Произведена је активна снага у износу од 0.7 MW. Другим речима, реализовано је умањење приоритизоване (активне) снаге. Ово имплицира да је референца за реактивну снагу спуштена на нулу. На слици 4.33. се може видети да средња вредност реактивне снаге није нула, већ нешто већа од ове вредности (испод 0.1 MVar). Ово је последица грешке у реализовању референци до којих долази у току рада инвертора. Ипак, ова грешка није велика и може се занемарити.



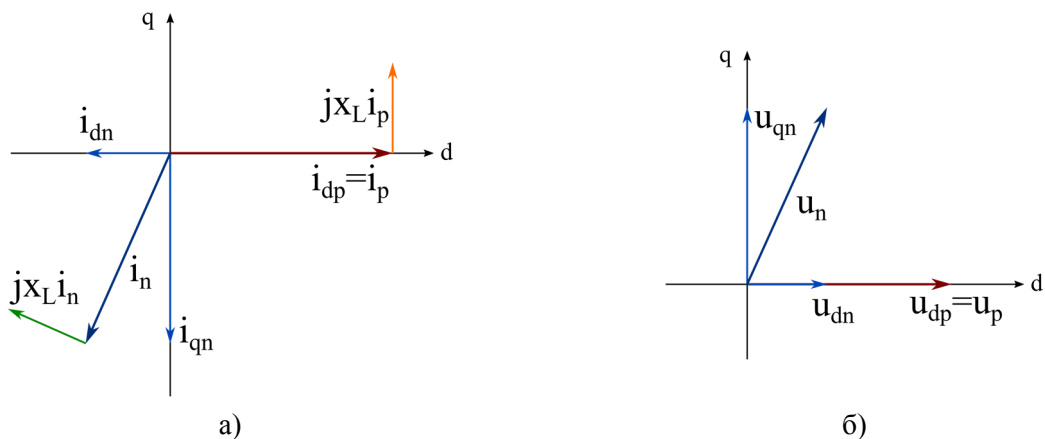
Слика 4.33. Одриви фазних напона, фазних струја, активне и реактивне снаге (P приоритизовано, $\Delta P=0$, двофазни к.с.).

Фазне струје инвертора повезаних на сложену мрежу имају сличан облик као и струје реализоване на једноставном моделу. Дакле, произведени су исти профили струја, што се може видети са слике 4.34., односно профили активне и реактивне снаге. Осим тога, струје су ограничене и налазе се у оквиру дефинисаних лимита. Ово сугерише да би примена овог алгоритма у пракси довела до задовољавајућег понашања инвертора. Ипак, чињеница да је произведена драстично мања привидна снага чини овај приступ мање пожељним.



Слика 4.34. Одзиви фазних струја три дистрибуирана извора (P приоритизовано, $\Delta P=0$, двофазни к.с.).

На слици 4.35. је приказан векторски дијаграм струја реализованих у првој производној јединици. Може се уочити да је овај векторски дијаграм другачији од оног који је био забележен у претходном тесту, иако оба механизма за прорачун референци имају циљ максимизацију активне снаге и то за исти квар у мрежи. У складу са наведеним, и утицај на напонски профил је нешто другачији. Инкременти напона поново увећавају и позитивну и негативну компоненту напона. Ипак, углови између инкремента и компоненти мрежног напона је већи него у претходном тесту (90° за позитивне компоненте и 120° за негативне компоненте), те утицај инкремента неће бити толико изражен као што је то био случај у претходном тесту.



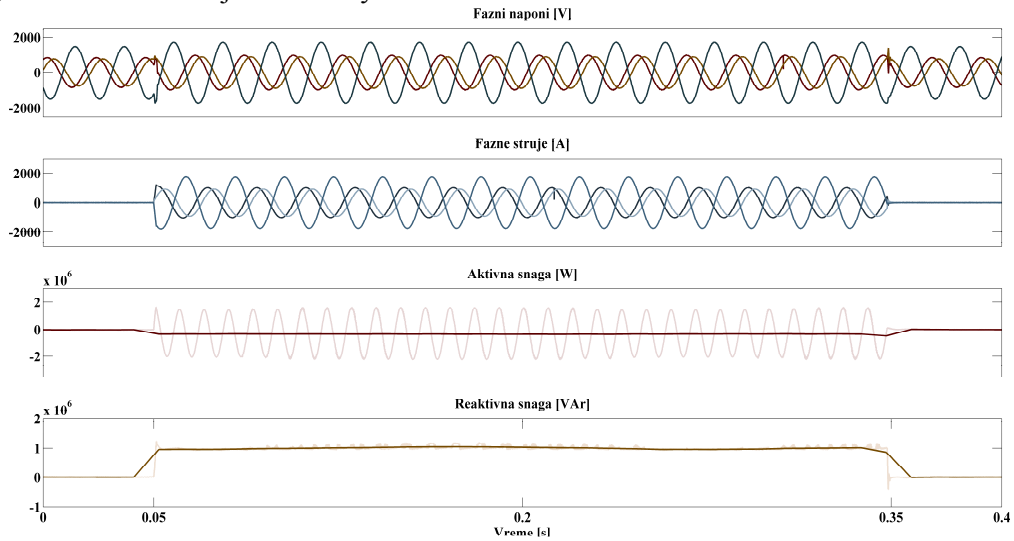
Слика 4.35. Векторски дијаграми фазних струја струја и напона на сабирницама (P приоритизовано, $\Delta Q=0$, двофазни к.с.).

Последица овакве оријентисаности вектора је мања несиметрија него што је то био случај у претходном тесту. Табела 4.2. пружа информације о томе колико се напонски профил изменио за разматрани тест и активирањем овог механизма за прорачун референци. Нарочито се на основу вредности напона у чвору „1“ може уочити разлика између овог и претходног теста. У претходном тесту напон U_a је достигао вредност од 80 V , док је овде тај напон на вредности од око 500 V . Разлика између највишег и најнижег напона у претходном тесту је око 1600 V , док је овде та разлика много мања - око 900 V .

Напон	Чвор 1	Чвор 2	Чвор 3	Чвор 4
U_a	509 0	1023 686	560.3 136	189 135
U_b	950 1184	1239 1143	971 1156	1166 1154
U_c	1432 1184	1448 1173	1420 1171	1202 1169

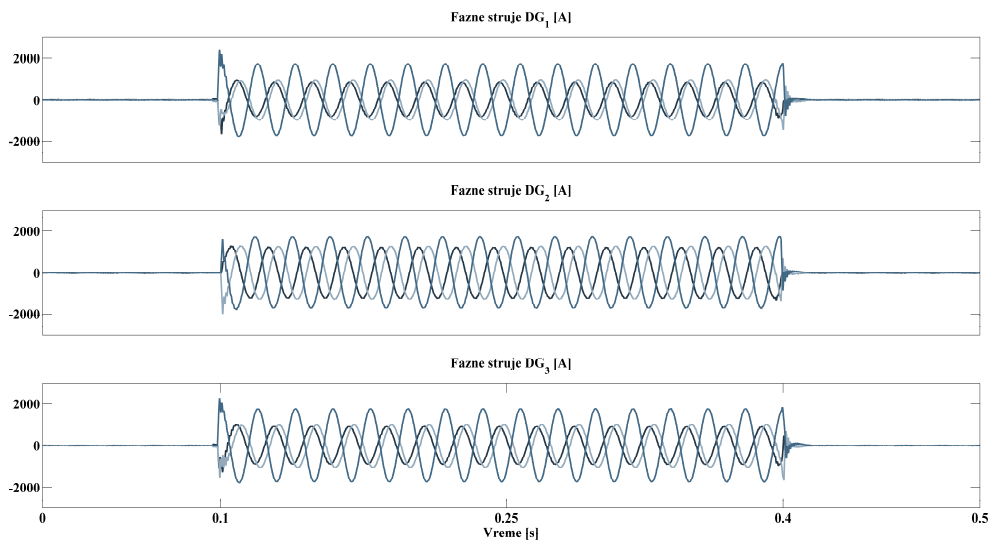
Табела 4.2. Фазни напони са и без дејства дистрибуираних извора (P приоритизовано, $\Delta Q=0$, двофазни к.с.).

Одзиви приказани на слици 4.36. су добијени када је приоритизована производња реактивне снаге. Дозвољене су осцилације у активној снази. Овај алгоритам за једнофазни кратак спој са земљом резултује производњом реактивне снаге у износу од 1.1 MVar. У складу са тиме, производња активне снаге је блиска нули.



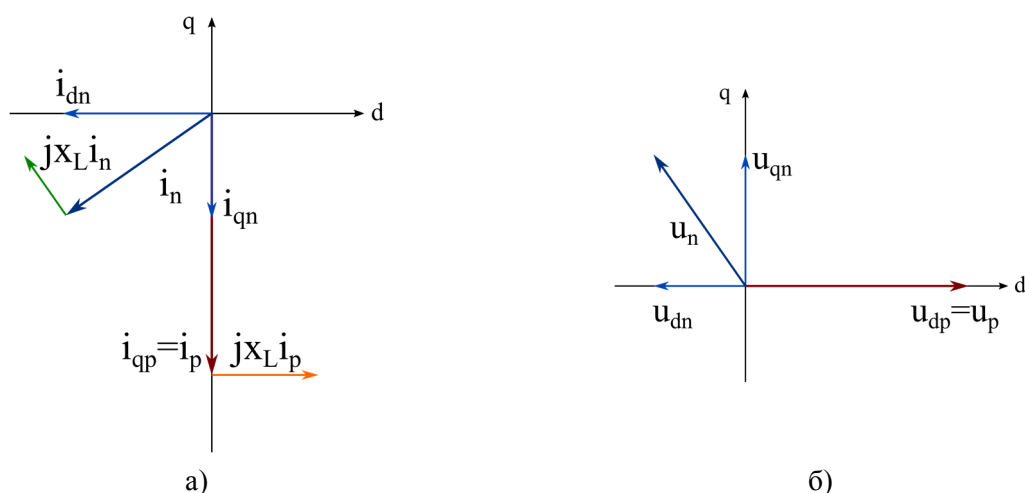
Слика 4.36. Одзиви фазних напона, фазних струја, активне и реактивне снаге (Q приоритизовано, $\Delta Q=0$, једнофазни к.с.).

Уколико се узму у обзир поменута производња снага и таласни облици струја за једну производну јединицу, приказани на слици 4.36., и таласни облици струја три дистрибуирана извора, приказани на слици 4.37., може се закључити да драстична разлика између једне фазне струје и преостале две резултује скромнијом производњом. У поређењу са симетричним струјама, када је искоришћеност струјних капацитета гледано пофазно максимална, снижене вредности нижих фазних струја очекивано резултује мањом производњом снага.



Слика 4.37. Одзиви фазних струја три дистрибуирана извора (Q приоритизовано, $\Delta Q=0$, једнофазни к.с.).

Дијаграм приказан на слици 4.38. а) предочава оријентисаност струјних компоненти за разматрани режим. Инкремент у напону генерисан позитивним компонентама струја је потпуно колинеаран са позитивном компонентом и доприноси значајном увећању позитивне компоненте напона. Важно је приметити да је i_{qp} далеко највећа компонента. Са друге стране, инкремент генерисан негативним компонентама напона је такође колинеаран са одговарајућом компонентом мрежног напона. Колинеарност негативних компоненти није пожељна услед тога што је она еквивалентна са увећањем несиметричности. Ипак, посматрајући слику 4.36. и фазне струје, може закључити да је увећање позитивне компоненте напона доминантно услед очигледног увећања сва три фазна напона.



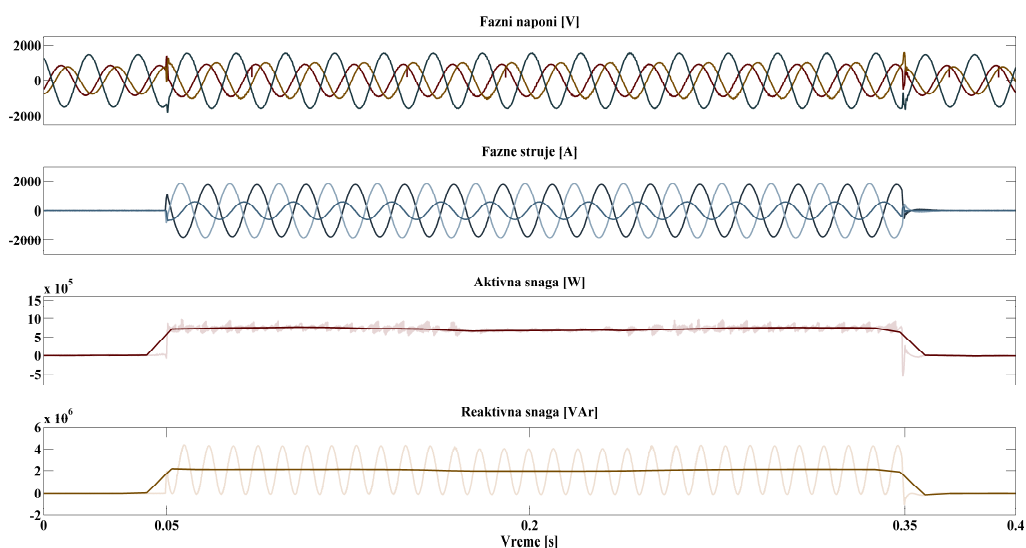
Слика 4.38. Векторски дијаграми фазних струја и напона на сабирницама (Q приоритизовано, $\Delta Q=0$, једнофазни к.с.).

У прилог овој тврдњи иде и табела 4.3. која пореди амплитуде фазних напона са и без инјектовања снага у току пропада. Битно је уочити да је заједнички утицај сва три инвертора допринео чак и промени напонског профила код мерног места „4“.

Напон	Чвор 1	Чвор 2	Чвор 3	Чвор 4
U_a	1018 662	1289 928	1039 697	785.8 768
U_b	868.5 760	1228 945	913.2 769	689.2 696
U_c	1809 1361	1725 1278	1787 1338	1351 1336

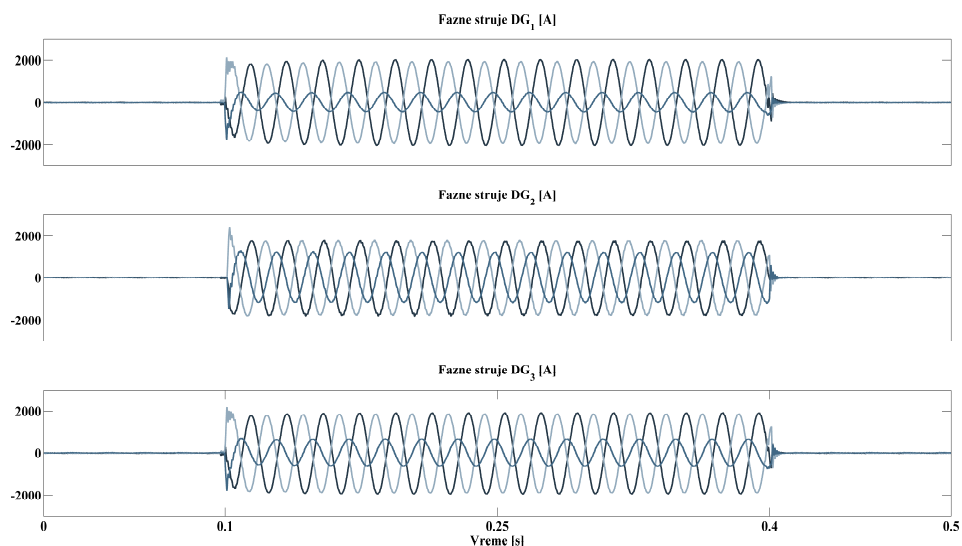
Табела 4.3. Фазни напони са и без дејства дистрибуираних извора (P приоритизовано, $\Delta Q=0$, једнофазни к.с.).

Последњи издвојени експериментални резултати који демонстрирају рад алгорита када се захтева приоритизација снаге је приказан на слици 4.39. Предност у производњи је дата реактивној снази. Изазван је био монофазни кратак спој на примарној страни дистрибутивног трансформатора. Са слике се може уочити да је искоришћеност производних капацитета врло добра. Производња реактивне снаге је на нивоу од 2.1 MVar. Производња активне снаге је умањена и износи 0.9 MW.



Слика 4.39. Одзиви фазних напона, фазних струја, активне и реактивне снаге (Q приоритизовано, $\Delta P=0$, монофазни к.с.).

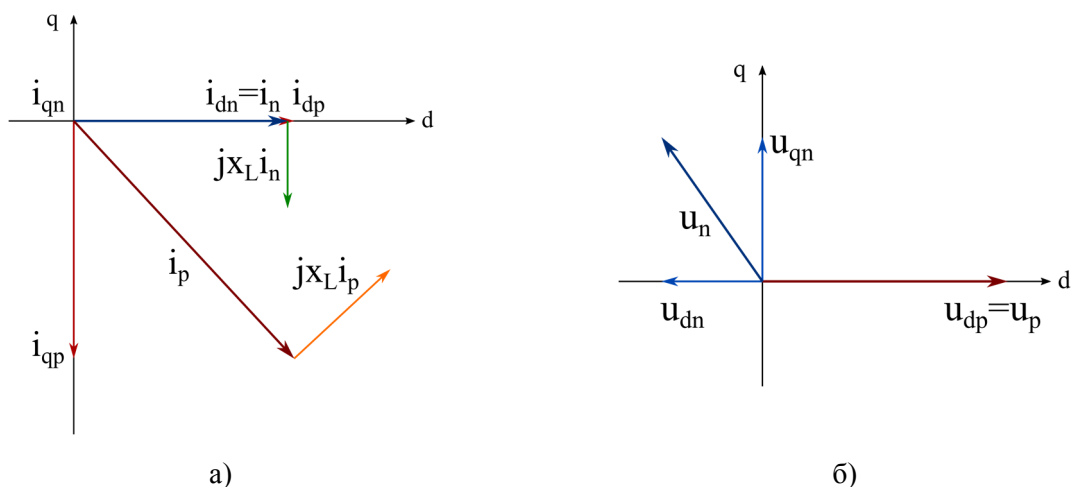
Слика 4.40. даје струјне одзиве три производне јединице. С обзиром да је кратак спој изазван у близини јединице „1“, њене струје су изразито несиметричне. Нешто дубље у мрежи се налази јединица „3“ и њене струје су мање несиметричне. С обзиром да је најближа преносној мрежи, најмања несиметрија се очекивано примећује у фазним струјама производне јединице „3“.



Слика 4.40. Одзиви фазних струја три дистрибуирана извора (Q приоритизовано, $\Delta P=0$, монофазни к.с.).

Поред тога, све струје су ограничене и са становишта струјне заштите контролни алгоритам очекивано функционише. Поређењем ових таласних облика и таласних облика претходна три теста, може се закључити да су производни капацитети боље искоришћени када се дозвољавају осцилације у доминантној снази. Другим речима, када се захтева приоритизација извесне снаге, боље је дозволити осцилације у тој снази, него у снази која има мањи приоритет.

Дијаграм струја везан за овај тест је приказан на слици 4.41. На основу њега се може закључити да је овај механизам за рачунање референци врло користан и за кориговање напонског профила на прикључним сабирницама. Иако инкремент напона који је последица позитивних компоненти струја није колинеаран са позитивном компонентом напона, угао између њих је мањи од 60° . Услед тога и услед чињенице да је позитивна струја велике амплитуде, може се очекивати да ће се позитивна компонента напона значајно увећати. Подједнако битан закључак се може донети за инкремент напона који је последица негативних компоненти струја. Овај инкремент је колинеаран са попречном негативном компонентом мрежног напона, али је супротног смера. Другим речима, негативне компоненте струја имају ефекат умањења негативне компоненте напона, а тиме и несиметрије. Ово може и да се види са слике 4.39. на основу фазних напона. Сва три напона су увећана и фазни помераји који су последица квара су смањени. Другим речима, напони су ближи балансираним, односно номиналним, напонима.



Слика 4.41. Векторски дијаграми фазних струја струја и напона на сабирницама (Q приоритизовано, $\Delta P=0$, монофазни к.с.).

Табела 4.4. потврђује овај закључак. У сва четири чвора напони су повећани и разлика између њих се смањила. Дакле, у режимима са кваром, уколико би избор био слободан, овај приступ би од поменути четири било најбољи избор.

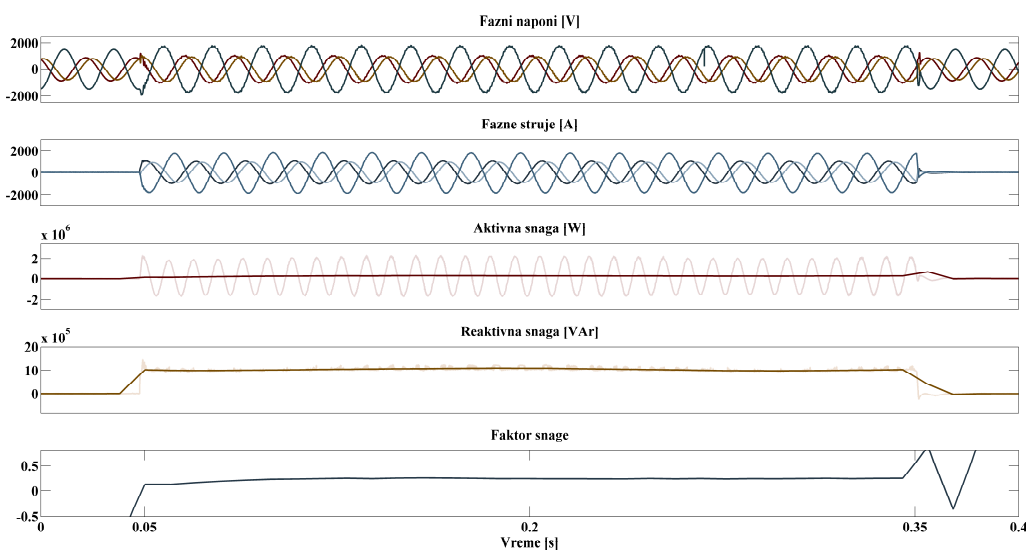
Напон	Чвор 1	Чвор 2	Чвор 3	Чвор 4
U_a	1206 662	1416 928	1226 697	778.2 768
U_b	838.8 760	1267 945	956.9 769	734.2 696
U_c	1479 1361	1563 1278	1507 1338	1361 1336

Табела 4.4. Фазни напони са и без дејства дистрибуираних извора (Q приоритизовано, $\Delta P=0$, монофазни к.с.).

4.3.2. Одржавање константног фактора снаге, с освртом на осцилације у снагама

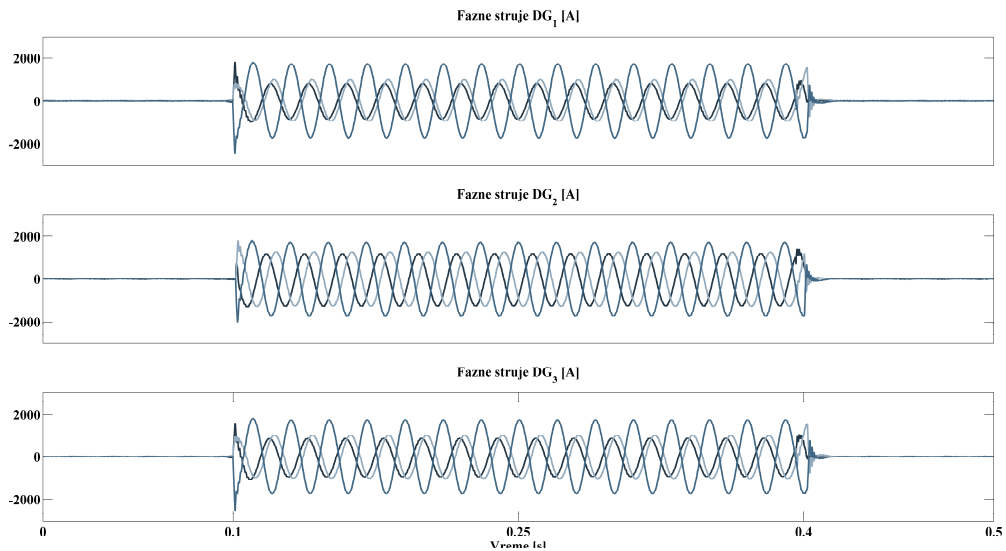
У овом поглављу су дати резултати експеримената када се од контролног алгоритма захтева да реализује максималну производњу активне и реактивне снаге, при чему се захтева одређена вредност фактора снаге пре и после квара. У складу са тиме, на графицима је приказан и резултујући фактор снага. Битно је напоменути да је производња снага пре и после квара нулта, из разлога који су напоменути на почетку поглавља 4.3. Осим тога, приказан фактор снаге је израчунат на основу генерисаних снага, а не референци струја. Последица тога је да фактор снаге у периодима када нема производње електричне енергије на појединим графицима осцилује, али ово је само нумеричких проблем и нема било каквог утицаја на рад било претварача било мреже на коју је претварач повезан.

Први тест којим се захтева генерисање константног фактора снаге подразумевао је и производњу активне снаге са осцилацијама, док су осцилације реактивне снаге минимизирани. Изазван је био једнофазни кратак спој са земљом. Захтеван је фактор снаге у износу од 0.1. Реализована је активна снага од око 0.1 MW, док је произведено око 1 MVAR реактивне снаге. Као што је у претходном поглављу констатовано, уколико се минимизују осцилације снаге која је доминантна, искоришћеност производних капацитета у контексту произведених снага је мања. Слика 4.42. даје таласне облике величина од интереса.



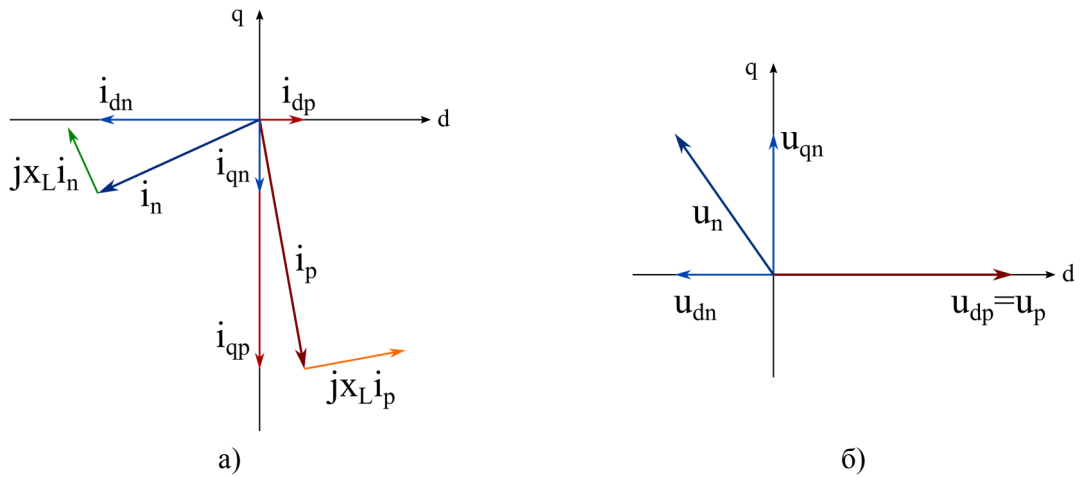
Слика 4.42. Одзиви фазних напона, фазних струја, активне и реактивне снаге ($\cos\varphi=0.1$, $\Delta Q=0$, једнофазни к.с.).

Профили произведених струја три инверторске јединице повезане на дистрибутивну мрежу су приказани на слика 4.43. Струје су лимитиране и може се уочити да су таласни облици струја различити услед чињенице да производне јединице нису подједнако удаљене од места квара, односно услед тога што еквивалентна импеданса коју претварачи виде са својих прикључних сабирница није иста.



Слика 4.43. Одзиви фазних струја три дистрибуираних извора ($\cos\varphi=0.1, \Delta Q=0$, једнофазни к.с.).

Векторски дијаграм струја једне производне јединице за овај режим је дат на слици 4.44. Очекивано, овај дијаграм је сличан тесту број три из претходног поглавља, када је била приоритизована производња реактивне снаге, при кратком споју фазе са земљом и при чему је задато $\Delta Q=0$. Произведене струје дејствују у циљу повећања, како позитивне компоненте напона, тако и негативне компоненте напона.



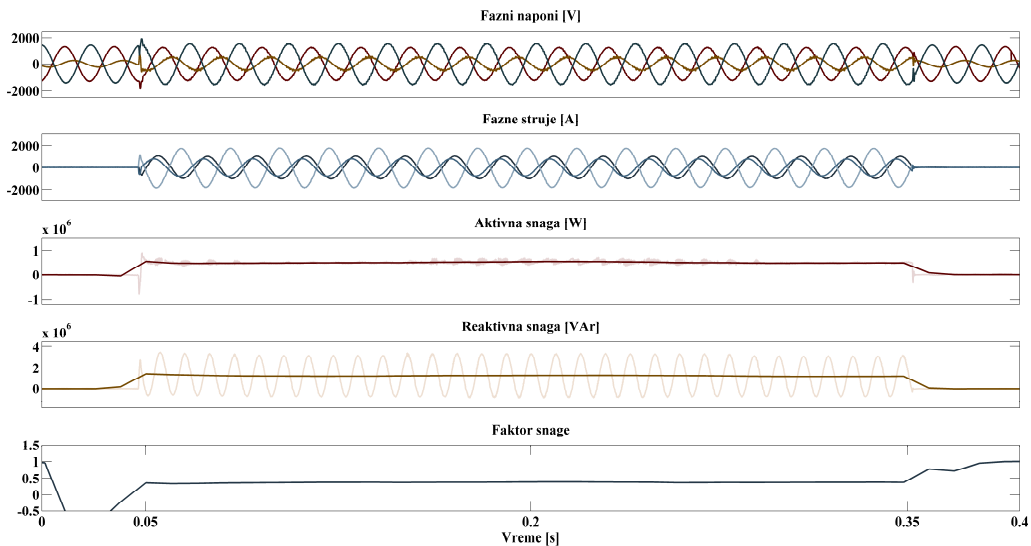
Слика 4.44. Векторски дијаграми фазних струја и напона на сабирницама ($\cos\varphi=0.1, \Delta Q=0$, једнофазни к.с.).

Овај тренд може да се препозна посматрањем бројних вредности датих у табели 4.5. Нарочито у чворовима „1“, „2“ и „3“ може да се уочи да је увећана амплитуда свих напона, али и да је повећана несиметрија три фазна напона. Сличан тренд, мада мање изражен, може да се уочи и за чвор „4“.

Напон	Чвор 1	Чвор 2	Чвор 3	Чвор 4
U_a	1030 662	1294 928	1052 697	793.1 768
U_b	881 760	1236 945	928.9 769	698.6 696
U_c	1834 1361	1737 1278	1817 1338	1368 1336

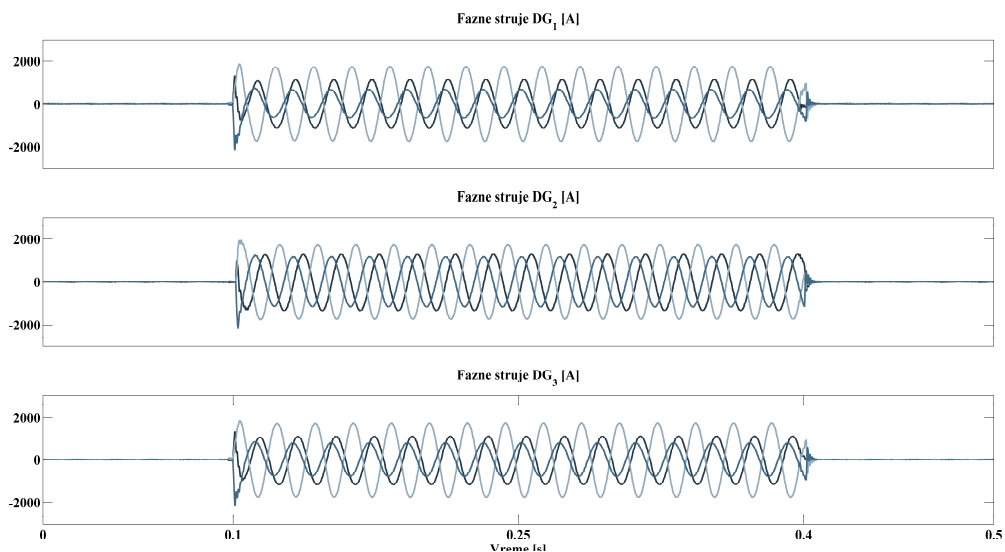
Табела 4.5. Фазни напони са и без дејства дистрибуираних извора ($\cos\varphi=0.1, \Delta Q=0$, једнофазни к.с.).

Када се у току двофазног кратког споја захтева производња фактора снаге од 0.4, при чему су допуштене осцилације у реактивној снази, а у активној су минималне, добијају се одзиви приказани на слици 4.45. Генерисана је активна снага од 0.8 MW и произведена је средња реактивна снага од 1.8 MVar.



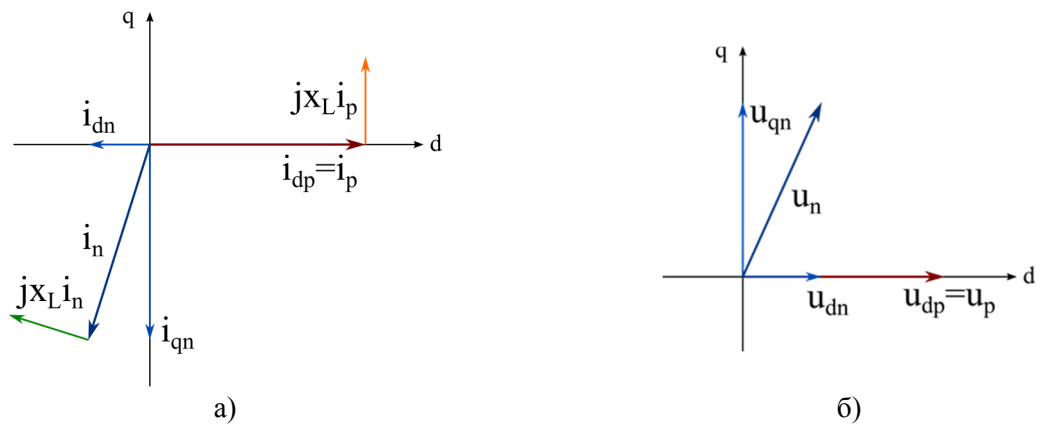
Слика 4.45. Одзиви фазних напона, фазних струја, активне и реактивне снаге ($\cos\varphi=0.4$, $\Delta P=0$, двофазни к.с.).

Слика 4.46. приказује таласне облике фазних струја генерисаних у току пропада. На основу ових таласних облика може да се закључи да локација кратког споја не утиче значајно на транзијентни одзив струја. Другим речима, иако је локација кратког споја најближа локацији производне јединице „1“, промену струја овог инвертора са нултих на нове референтне вредности не карактеришу увећани прескоци или осцилације у односу на струје преостале две јединице.



Слика 4.46. Одзиви фазних струја три дистрибуирана извора ($\cos\varphi=0.4$, $\Delta P=0$, двофазни к.с.).

Генерисане компоненте струја за овај сценарио на први поглед не пружају нарочито интересантну измену напонског профила мреже - слика 4.47. Присуство само директне позитивне компоненте у позитивном синхронотирајућем координатном систему резултује појавом квадратурне позитивне компоненте напона. Дакле, долази до увећања позитивног вектора напона, али и до промене фазног става ове компоненте напона. Осим тога, негативан вектор струје резултује инкрементом напона који је приближно нормалан на оригинални вектор негативне компоненте. У складу са тим, и негативна компонента напона ће бити у извесном обиму повећана. У случају негативне компоненте такође долази до измене фазног става. Ове измене фазних ставова сугеришу да ће се фазни напони изменити у различитим износима.



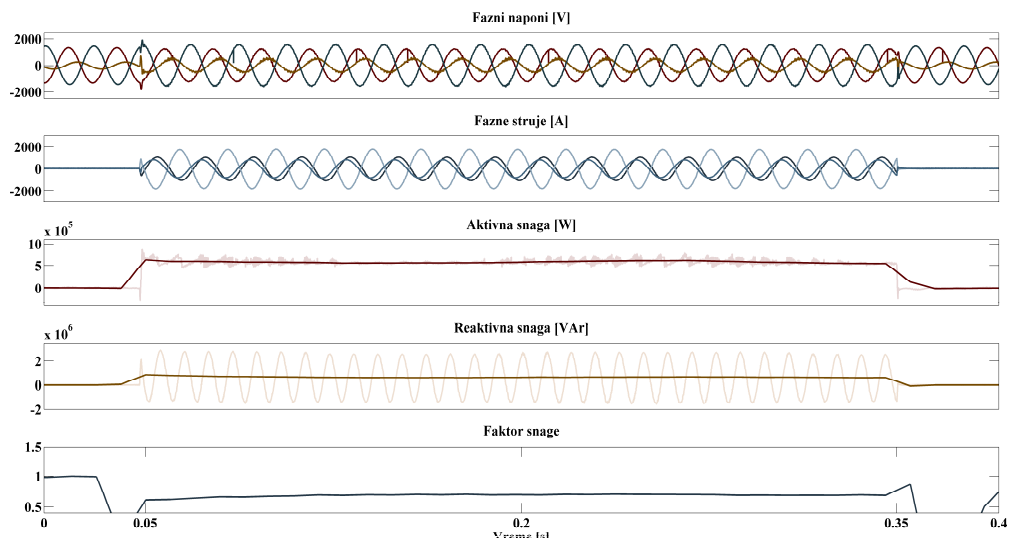
Слика 4.47. Векторски дијаграми фазних струја и напона на сабирницама ($\cos\varphi=0.4, \Delta P=0$, двофазни к.с.).

Ова тврдња је потврђена табелом 4.6. Може се видети да су фазни напони измењени у различитим износима. Занимљиво је уочити да је најнижи напон највише повећан. У вези са тиме, корисно је поново се осврнути на слику 4.45. Види се да је највиша струја фазе чији је напон најнижи. Дакле, овај механизам за генерисање референци струја има велик практичан значај.

Напон	Чвор 1	Чвор 2	Чвор 3	Чвор 4
U_a	745.9 0	1221 686	819 136	367.6 135
U_b	1003 1184	1413 1143	1121 1156	1127 1154
U_c	1508 1184	1536 1173	1492 1171	1300 1169

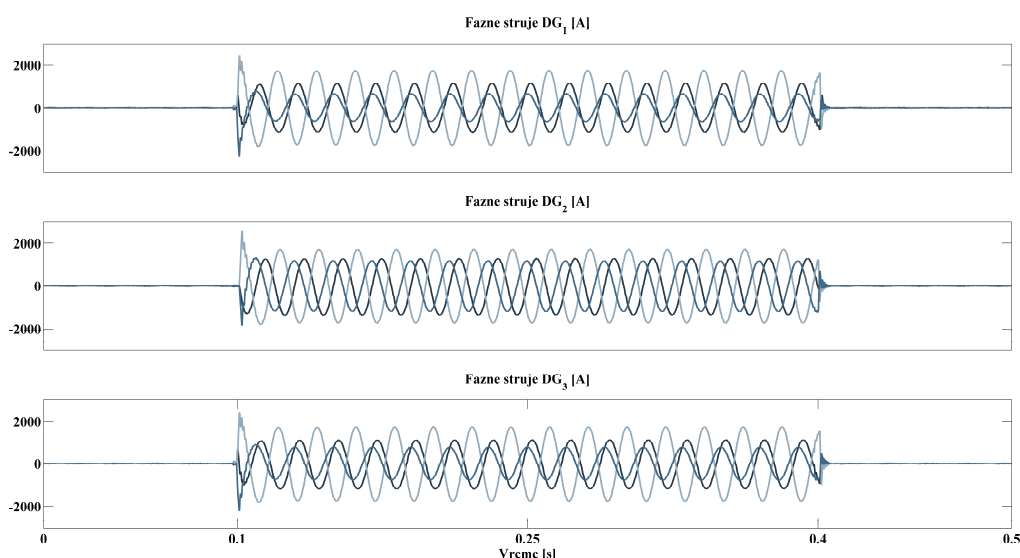
Табела 4.6. Фазни напони са и без дејства дистрибуираних извора ($\cos\varphi=0.4, \Delta P=0$, двофазни к.с.).

Следећи тест је сличан претходном, с том разликом што је сада захтеван фактор снаге од 0.6, што би требало да резултује нешто већим уделом активне снаге у генерисаној привидној снази. Ипак, произведена је активна снага у износу од 0.7 MW, док је произведено 0.9 MVar реактивне снаге. Дакле, увећање фактора снаге има за резултат умањење активне снаге - резултат који донекле није очекиван. На слици 4.48. се могу видети одговарајући таласни облици за овај тест.



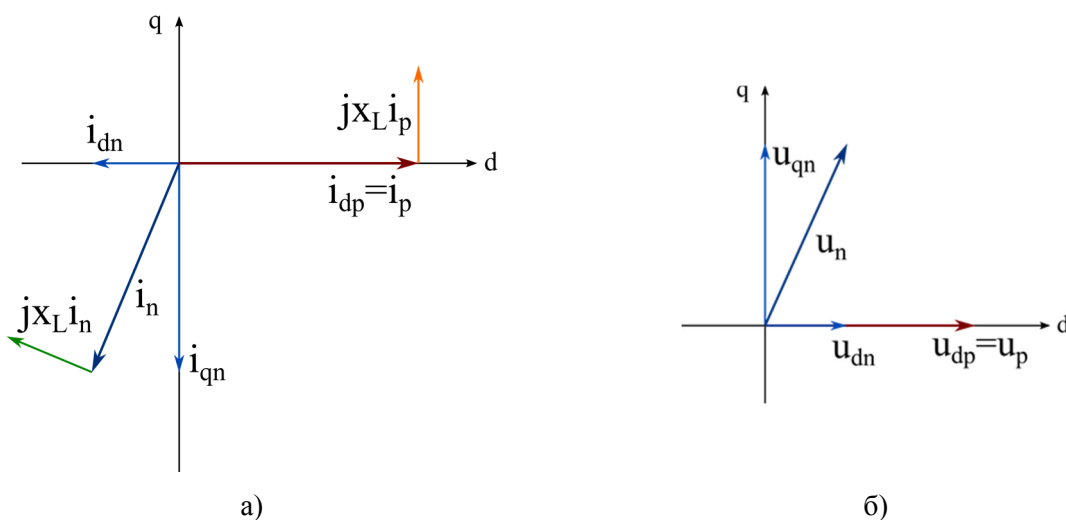
Слика 4.48. Одзиви фазних напона, фазних струја, активне и реактивне снаге ($\cos\varphi=0.6, \Delta P=0$, двофазни к.с.).

Таласни облици фазних струја дати на слици 4.49. сугеришу да су одзиви задовољавајући. Битно је уочити и да струје имају врло добар таласни облик након проласка транзијента. Не јављају се било какве осцилације у амплитудама струја и не постоје било какве назнаке да управљачка структура постаје нестабилна. Ово је врло значајно за несиметрије које у дистрибутивној мрежи јесу трајне - на првом месту оне изазване несиметричним оптерећењем и несиметричном производњом (једнофазни соларни инвертори, на пример).



Слика 4.49. Одзиви фазних струја три дистрибуирана извора ($\cos\varphi=0.6, \Delta P=0$, двофазни к.с.).

С обзиром да је разматран исти пропад и иста контролна структура, очекивано је да је векторски дијаграм струја сличан оном који је разматран за претходни тест, што се може и видети са слике 4.50.



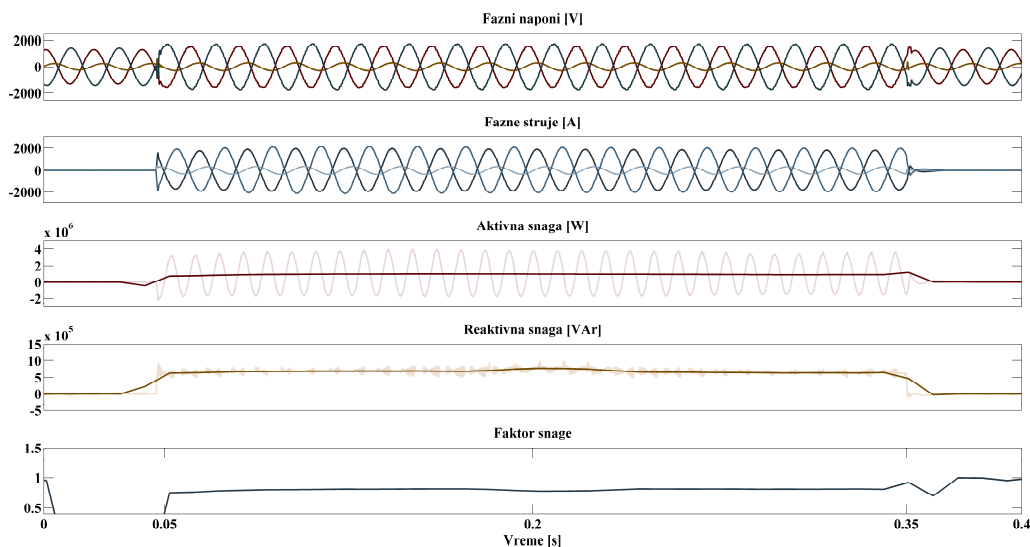
Слика 4.50. Векторски дијаграми фазних струја струја и напона на сабирницама ($\cos\varphi=0.6, \Delta P=0$, двофазни к.с.).

Слично векторском дијаграму, и табела 4.7. бележи измене амплитуда напона и сведочи о сличном тренду промене. Разлика између овог и претходног теста је у вредности промене напона. Овде су те измене мање за око 50 V за сваки фазни напон. Овај детаљ је врло битан услед тога што он пружа потенцијално објашњење зашто је привидна снага опала, односно због чега је производња активне снаге опала, иако је фактор снаге увећан. Производња веће количине реактивне енергије, у разматраним тестовима доводи до значајнијег увећања напонских компоненти и тиме се за исте струјне лимите реализују веће снаге.

Напон	Чвор 1	Чвор 2	Чвор 3	Чвор 4
U_a	738.8 0	1139 686	794.4 136	374.9 135
U_b	912.9 1184	1261 1143	983,3 1156	1123 1154
U_c	1515 1184	1505 1173	1502 1171	1307 1169

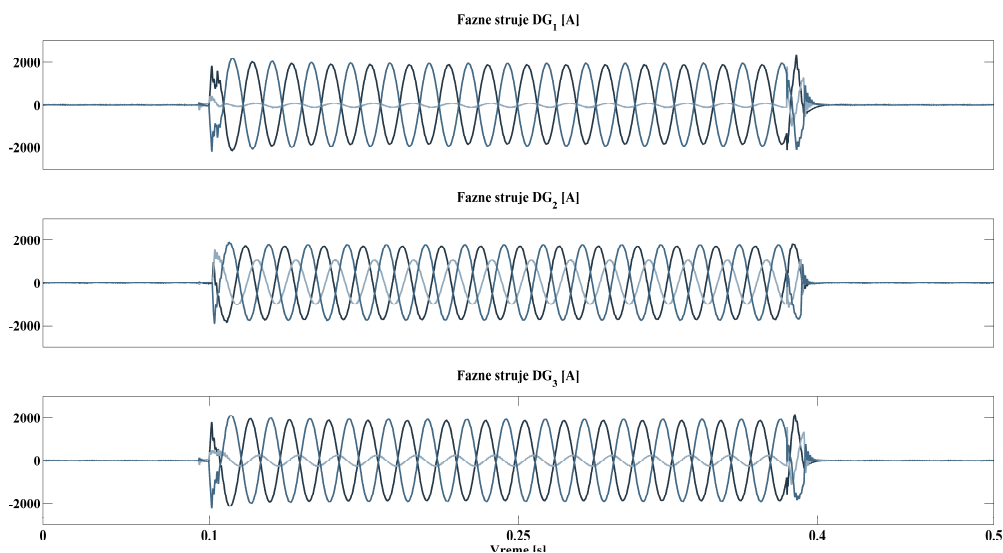
Табела 4.7. Фазни напони са и без дејства дистрибуираних извора ($\cos\varphi=0.6, \Delta P=0$, двофазни к.с.).

Последњи експеримент у којем се захтева производња одређеног односа активне и реактивне снаге је забележен у току двофазног кратког споја. Захтеван је фактор снаге од 0.9. Резултати су приказани на слици 4.51. Произведена је активна снага од 1.5 MW и реактивна снага у износу од 0.7 MVA_r. Решење привидне контрадикторности између умањења активне снаге из претходног теста и увећања производње активне снаге са даљим увећањем фактора снаге се налази у чињеници да су у овом тесту дозвољене осцилације у активној снази, те да су таласни облици струја другачији. Као што је раније константовано, таласни облици струја приказани на слици 4.51. су повољнији за ефикасно коришћење производних капацитета.



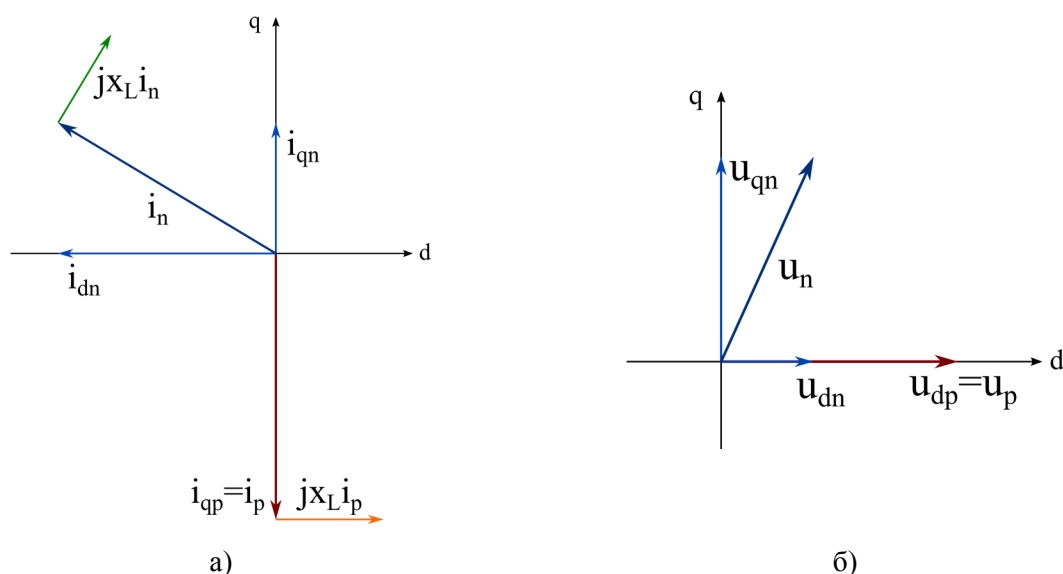
Слика 4.51. Одзиви фазних напона, фазних струја, активне и реактивне снаге ($\cos\varphi=0.9$, $\Delta Q=0$, двофазни к.с.).

Поново фазне струје дистрибуираних извора имају задовољавајуће таласне облике. Заправо, у устаљеном стању тотална хармонијска дисторзија величина приказаних на слици 4.52. износи око 1.1%, што је значајно мање од прописаног нивоа од 5%.



Слика 4.52. Одзиви фазних струја три дистрибуирана извора ($\cos\varphi=0.9$, $\Delta Q=0$, двофазни к.с.).

Компоненте инјектованих струја у случају разматраног режима изазивају инкременте и за позитивну и за негативну компоненту напона. На основу векторског дијаграма приказаног на слици 4.53. може се очекивати да се сви фазни напони увећају услед повећања позитивне компоненте, али и да се увећа несиметрија услед увећања негативне компоненте напона. Која од тенденција ће бити доминантнија зависи од вредности појединих компоненти струја и од фазних ставова величина које се разматрају.



Слика 4.53. Векторски дијаграми фазних струја и напона на сабирницама ($\cos\varphi=0.9, \Delta Q=0$, двофазни к.с.).

На основу табеле 4.8. може се закључити да се разлика у амплитудама, односно несиметрија, увећала, иако сви фазни напони имају веће вредности од оних које су забележене у дистрибутивној мрежи без дистрибуираних извора. На овом месту је погодно уочити једну врло битну чињеницу. Услед дејства претварача, два фазна напона производне јединице „1“ имају вредности преко 1600 V. Уколико се узме да је амплитуда номиналног фазног напона $\sqrt{2} \cdot 1500 / \sqrt{3}$ (приближно 1230 V) и да је горња граница 20% виша од номиналне (приближно 1470 V), може се закључити да би се активирала пренапонска заштита претварача. Другим речима, иако су струје ограничене, одспајање претварача би могло бити иницијализовано активирањем пренапонске заштите. Дакле, овај приступ прорачуна референци није пригодан за употребу у разматраном режиму. Уколико се поново анализирају напонски профили свих претходних тестова, може се закључити да су у свим тестовима поједине амплитуде фазних напона или изнад поменутог лимита, или врло близу њега. Овај проблем је нарочито изражен код једнофазних кратких спојева код којих се један фазни напон и без помоћи претварача увећава изнад номиналне вредности. На пример, производна јединица „1“ у случају кратког споја у њеној близини мери амплитуду једног фазног напона од 1361 V. Код ових кратких спојева би било пожељно не увећавати позитивну компоненту и реализовати корекцију само негативне компоненте напона. Ипак, до сада разматрани контролни механизми не пружају могућност произвољне корекције компоненти напона. Акцент је био на профилима произведених снага, односно на таласностима које се у снагама јављају.

Напон	Чвор 1	Чвор 2	Чвор 3	Чвор 4
U_a	84.23 0	912.9 686	228.8 136	164.6 135
U_b	1673 1184	1529 1143	1669 1156	1195 1154
U_c	1746 1184	1555 1173	1721 1171	1234 1169

Табела 4.8. Фазни напони са и без дејства дистрибуираних извора ($\cos\varphi=0.9, \Delta Q=0$, двофазни к.с.).

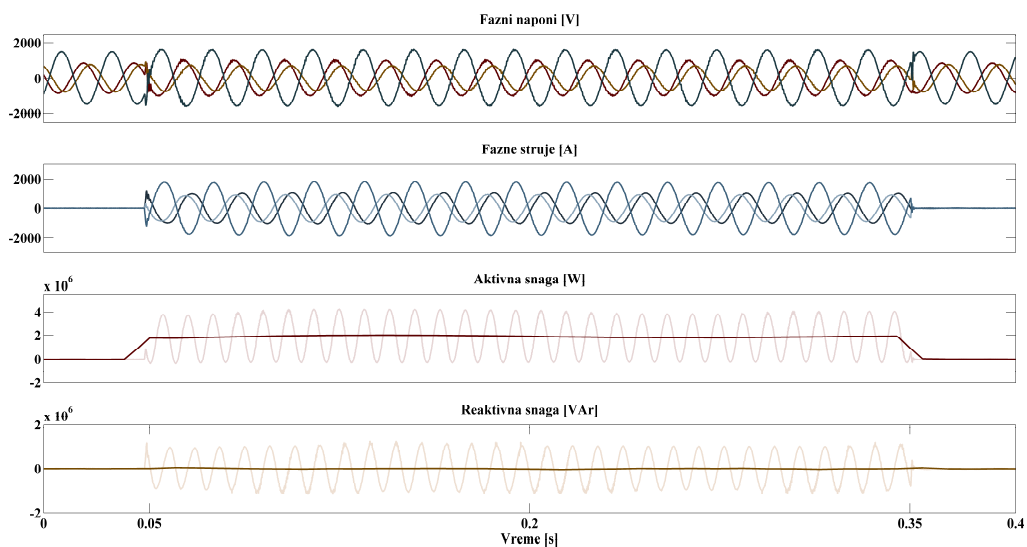
4.3.3. Дефинисање односа позитивних и негативних компоненти струја којима се реализују референце снага

Узимајући у обзир профил напона у току једнофазног кратког споја када производни системи нису активни, али и могућности увећања несиметрије уколико се примени неадекватан контролни алгоритам, чак и у случају двофазног кратког споја, наводи на закључак да до сада разматрани механизми за прорачун референци струја не пружају исцрпан скуп могућности за производњу енергије. Другим речима, омогућавање флексибилне контроле производње активне и реактивне снаге кроз произвољно одабране компоненте струја би могло да резултује додатним опцијама које

би у извесним режимима биле од већег практичног значаја од до сада разматраних контролних структура.

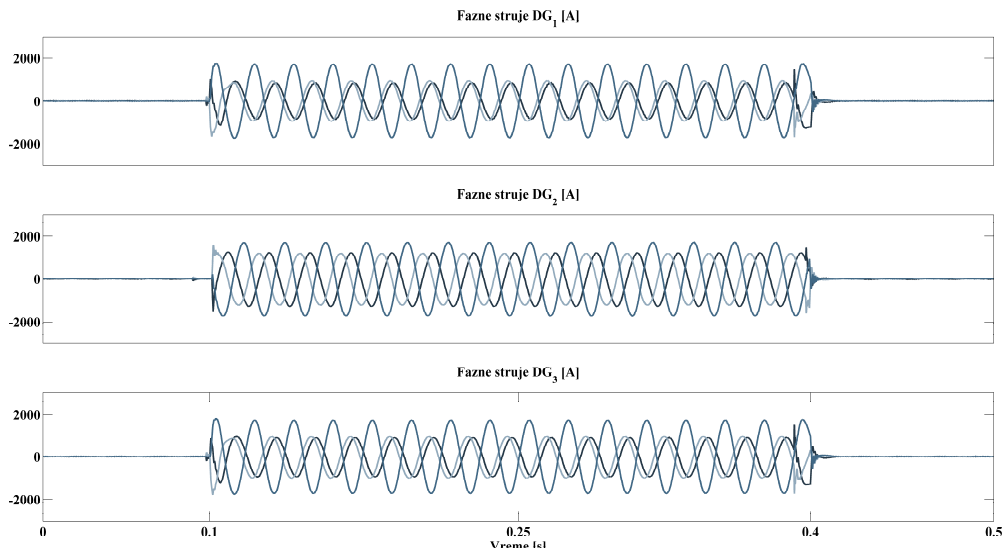
Резултати тестова који су дати у наставку су добијени задавањем референце од 1 р.ј. активне или реактивне снаге и задавањем параметара k_{p+} , k_{p-} , k_{q+} и k_{q-} . Уколико се разматра производња активне снаге, референца реактивне снаге је била на нули и обрнуто. Управо дефинисањем параметара k_{p+} , k_{p-} , k_{q+} и k_{q-} треба да се реализује производња снага кроз позитивне, кроз негативне или кроз и једне и друге компоненте струја.

Таласни облици приказани на слици 4.54. су добијени када је захтевана производња активне снаге. Задато је да $\kappa_{p+} = \kappa_{p-} = 0.5$. Постављањем κ_{p+} на 0.5 се захтева да се половина активне снаге произведе генерисањем позитивних компоненти струја, док друга половина мора да се реализује кроз негативне компоненте струја. Средња вредност произведене активне снаге је 2 MW, односно произведено је око 67% референтне вредности. Као што је очекивано на основу система једначина на којима се базира разматрани механизам за рачунање референци, приметне су осцилације и у активној и у реактивној снази.



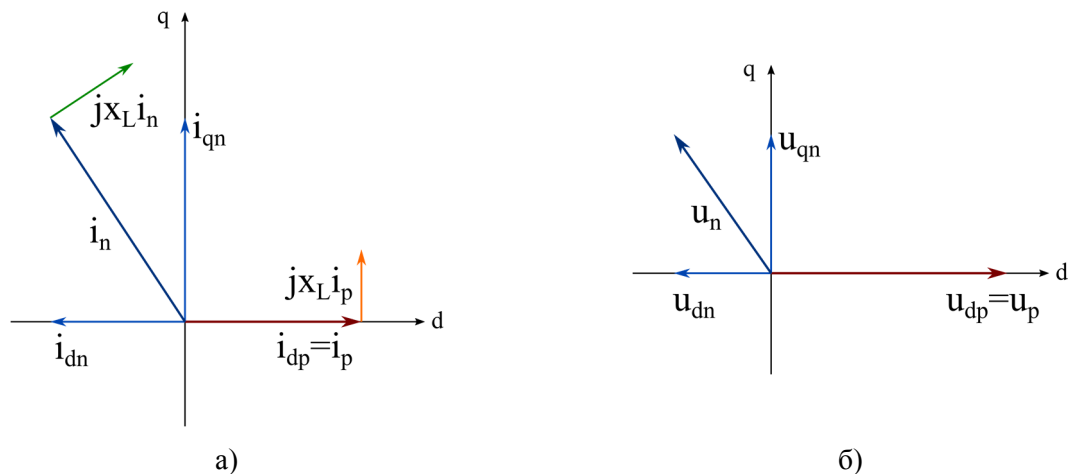
Слика 4.54. Одзиви фазних напона, фазних струја, активне и реактивне снаге (P , $\kappa_{p+}=0.5$, једнофазни к.с.).

Слика 4.55. пружа одзиве струја три инвертора. Занимљиво је приметити да су транзијентни одзиви струја и у овом тесту врло добри. Како овај приступ за прорачун референци захтева детекцију пропада напона, он је овде морао бити имплементиран. Овде је искоришћен врло рудименталан приступ – узимано је да се десио пропад када је директна и позитивна компонента напона, естимирана од стране *PLL*-а, пала испод вредности од 0.9 р.ј. Ипак, чак и овако једноставан начин детекције пропада не резултује деградацијом таласних облика струја и долази се до закључка да не постоји потреба за сложенијим механизмом за детекцију пропада. Осим тога, струје су несиметричне, што је очекивано с обзиром да се генеришу и позитивне и негативне компоненте струја.



Слика 4.55. Одзиви фазних струја три дистрибуирана извора ($P, \kappa_{p+}=0.5$, једнофазни к.с.).

Резултујући дијаграм вектора компоненти струја је приказан на слици 4.56. Оба инкремента напона су нормална на коресподентне векторе компоненти напона, те не долази до изражене промене нити позитивне, нити негативне компоненте. Вектор позитивне компоненте напона је нешто већи од вектора негативне компоненте, а вектор позитивне компоненте струја је нешто мањи од вектора негативне компоненте што је у складу са подешавањима параметара κ_{p+} . Разматрајући овај резултат, може се закључити да са дубином пропада расте однос позитивне и негативне компоненте струје, односно да се за мање изражен пропад бележи увећана негативна компонента струје услед мање изражене негативне компоненте напона.



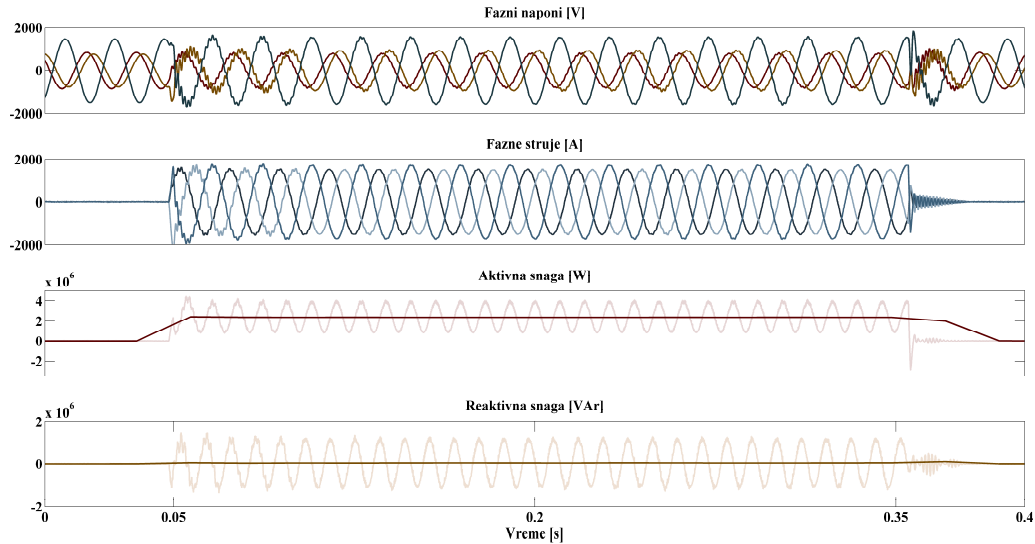
Слика 4.56. Векторски дијаграми фазних струја струја и напона на сабирницама ($P, \kappa_{p+}=0.5$, једнофазни к.с.).

Узимајући у обзир табелу 4.9., потврђује се да се у овом режиму профил напона није изменио на начин који је апликативан у пракси. Напон фазе c у чвору „1“ је за око 200 V изнад лимита, тако да би овај приступ резултовао одспајањем инвертора.

Напон	Чвор 1	Чвор 2	Чвор 3	Чвор 4
U_a	768.6 662	647 928	717.6 697	799.1 768
U_b	882.8 760	1252 945	957 769	744 696
U_c	1617 1361	1487 1278	1605 1338	1428 1336

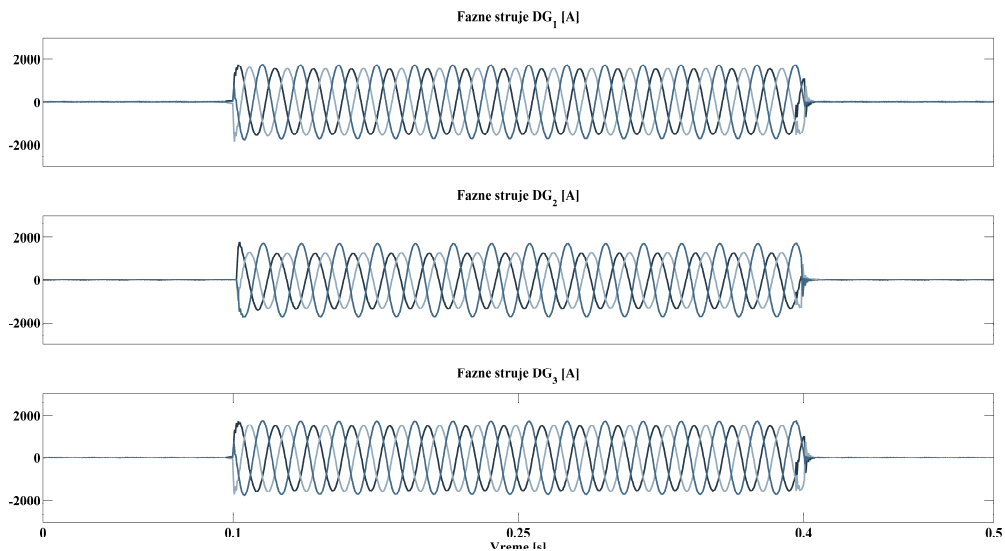
Табела 4.9. Фазни напони са и без дејства дистрибуираних извора ($P, \kappa_{p+}=0.5$, једнофазни к.с.).

У следећем тесту, чији резултати су приказани на слици 4.57., је захтевана производња активне снаге, али је постављено да k_{p+} буде 0.95, односно захтевало се да се снага доминантно производи кроз генерисање позитивних компоненти струја. Овако задата производња активне снаге је са становишта генерисаних струја аналогна режиму производње активне снаге у режимима са балансираним мрежним напонима. Ипак, како су овде напони несиметрични, јављају се осцилације како у активној, тако и у реактивној снази.



Слика 4.57. Одзиви фазних напона, фазних струја, активне и реактивне снаге ($P, k_{p+}=0.95$, једнофазни к.с.).

Слика 4.58. даје одзиве струја за овај режим и такође сведочи да су струје приближно балансиране, односно симетричне. Када би параметар k_{p+} био постављен на 1 струје би биле потпуно симетричне, мада би ово довело до даљег увећања осцилација у снагама.

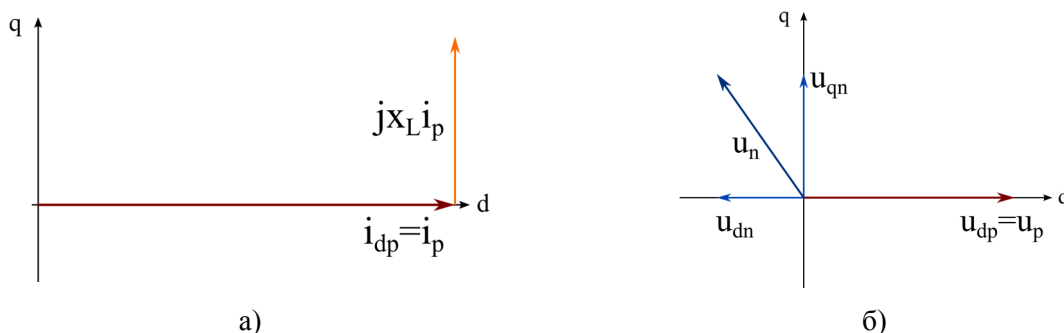


Слика 4.58. Одзиви фазних струја три дистрибуирана извора ($P, k_{p+}=0.95, 1$ к.с.).

Уколико се занемаре негативне компоненте струја, долази се до векторског дијаграма струја на којем се налази само позитивна компонента струје. Он је приказан на слици 4.59. Како је веза између укупне активне снаге и позитивне активне снаге дата изразом (4.1),

$$P^+ = u_{dp} \cdot i_{dp}^r + u_{qp} \cdot i_{qp}^r = k_{p+} \cdot P \approx P \tag{4.1}$$

и како је u_{qp} нула услед дејства синхронизационе јединице, долази се до чињенице да ће се на векторском дијаграму видети само i_{dp} компонента струје. Као последица оваквих струјних референци долази до извесног увећања позитивне компоненте напона и до измене његовог фазног става. Негативна компонента напона, односно несиметрија фазних напона није измењена.



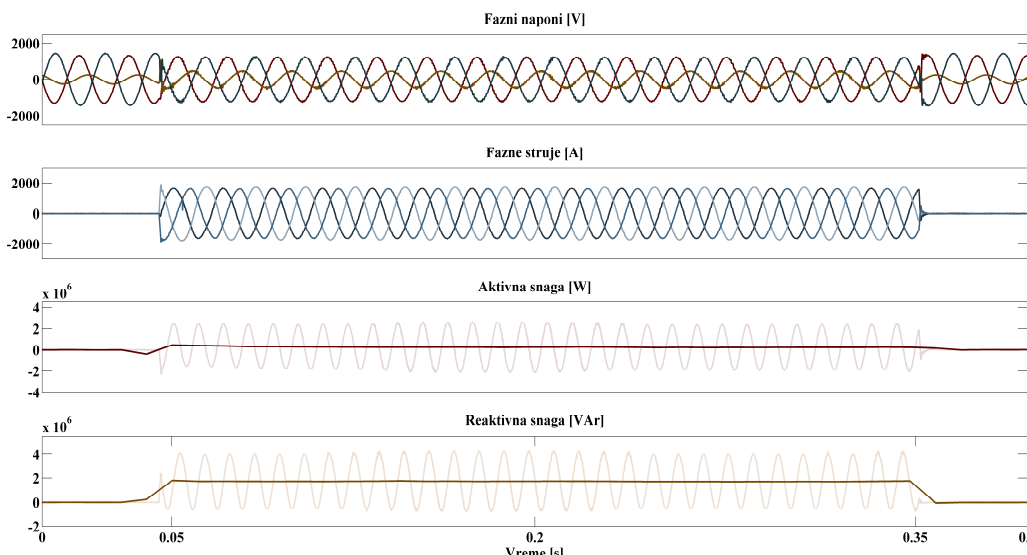
Слика 4.59. Векторски дијаграми фазних струја и напона на сабирницама ($P, \kappa_{p+}=0.95$, једнофазни к.с.).

Ова тврдња је потврђена табелом 4.10., али и сликом 4.57. на којој се види да је дошло до симетричне измене фазног става и амплитуда фазних напона.

Напон	Чвор 1	Чвор 2	Чвор 3	Чвор 4
U_a	1151 662	1115 928	1137 697	821.2 768
U_b	1039.8 760	1075 945	738.1 769	747.8 696
U_c	1602 1361	1497 1278	1595 1338	1429 1336

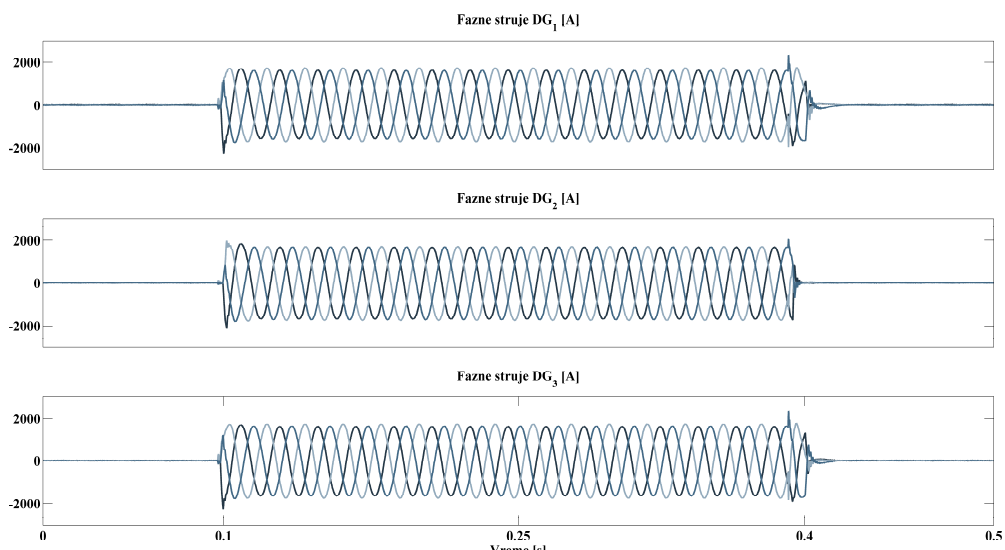
Табела 4.10. Фазни напони са и без дејства дистрибуираних извора ($P, \kappa_{p+}=0.95, I$ к.с.).

Преостали тестови су подразумевали производњу реактивне снаге. У току првог теста из ове групе захтевана је производња 1 р.ј. реактивне снаге и то кроз негативне компоненте струја. У складу са тиме, параметар κ_{q+} је био постављен на 0.05, односно κ_{q-} је био постављен на 0.95. Изазван је двофазни кратак спој. Произведена је реактивна снага у износу од 2.1 MVar. Реализовање реактивне снаге само кроз негативне компоненте би требало да резултује умањењем несиметрије напона мерених на прикључним сабирницама инвертора, а која је последица самог кратког споја. Слика 4.60. приказује таласне облике напона, струја, активне и реактивне снаге за овај тест.



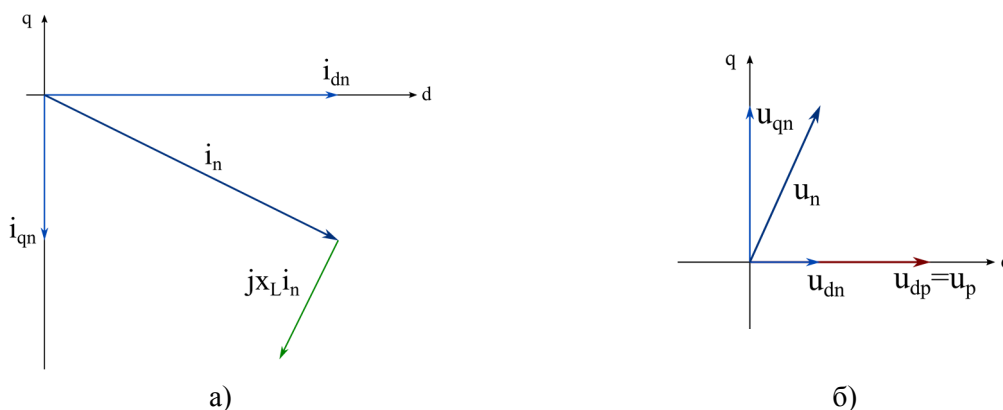
Слика 4.60. Одзиви фазних напона, фазних струја, активне и реактивне снаге ($Q, \kappa_{q+}=0.05$, двофазни к.с.).

Сви таласни облици потврђују да се контролни алгоритам понаша у складу са пропозицијама. С обзиром да се инјектују само негативне компоненте струја, у abc домену се реализује тројка балансираних струја. Одзиви приказани на слици 4.61. потврђују да контролни алгоритам резултује одговарајућим одзивима фазних струја када се алгоритам аплицира на инверторе који су повезани на дистрибутивну мрежу. Поново се може закључити да локација квара не утиче значајно на транзијентне процесе, да таласни облици струја не сугеришу да би продужење квара имало негативне последице на квалитет одзива и може се уочити да је хармонијски садржај фазних струја сиромашан.



Слика 4.61. Одзиви фазних струја три дистрибуирана извора ($Q, \kappa_{q+}=0.05$, двофазни к.с.).

Векторски дијаграм струја иде у прилог тврдњи да производња реактивне снаге кроз негативне компоненте резултује умањењем несиметрије (слика 4.62.). Може се уочити да је компонента напона која се реализује утицајем ових струја колинеарна са вектором негативне компоненте напона, али је супротног смера. Другим речима, негативна компонента напона на сабирницама ће бити умањена и несиметрија неће бити толико изражена.



Слика 4.62. Векторски дијаграми фазних струја струја и напона на сабирницама ($Q, \kappa_{q+}=0.05$, двофазни к.с.).

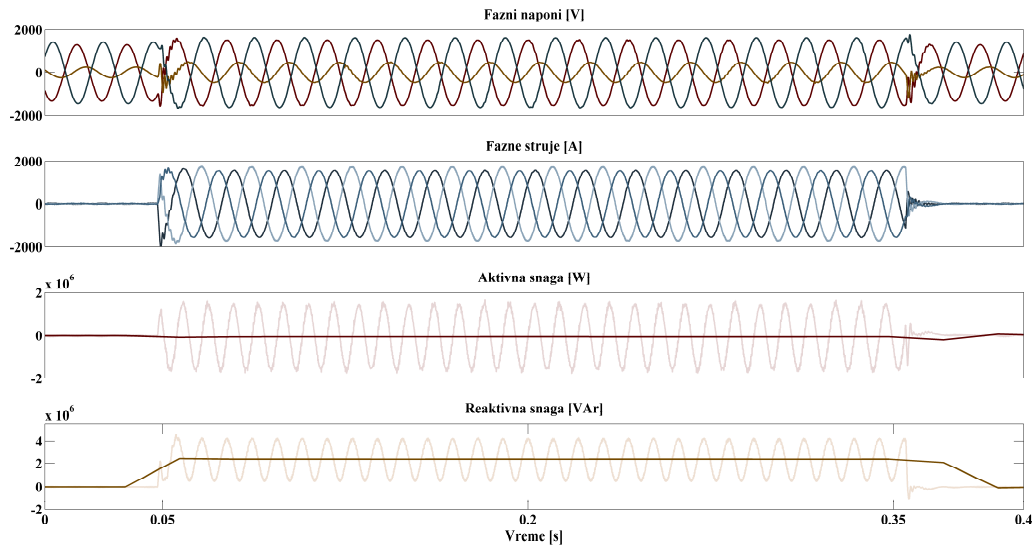
На пример, за производну јединицу „1“ најнижи напон је порастао, док су виша два напона мање вредности у односу на вредности које се бележе када инвертор није активан (табела 4.11.). Овај тренд јасно може да се уочи и на слици 4.60. на којој се види да се напони у abc домену мењају управо на овај начин. Разматран механизам за реализовање референци струја може имати посебног практичног значаја за једнофазне кратке спојеве где један фазни напон расте у односу на вредност пре кратког споја.

Напон	Чвор 1	Чвор 2	Чвор 3	Чвор 4
U_a	475.4 0	1161 686	623.7 136	185 135
U_b	952 1184	1060 1143	953.3 1156	1158 1154
U_c	818.6 1184	844.5 1173	782.6 1171	1154 1169

Табела 4.11. Фазни напони са и без дејства дистрибуираних извора ($Q, \kappa_{q+}=0.05, 2 \text{ к.с.}$).

У том режиму би инјектовање негативних компоненти напона довело до умањења овог фазног напона и његово удаљавање од напонског лимита. Тиме би се створила могућност за генерисање снага са умањеном бојазни да ће пренапонска заштита бити активирана.

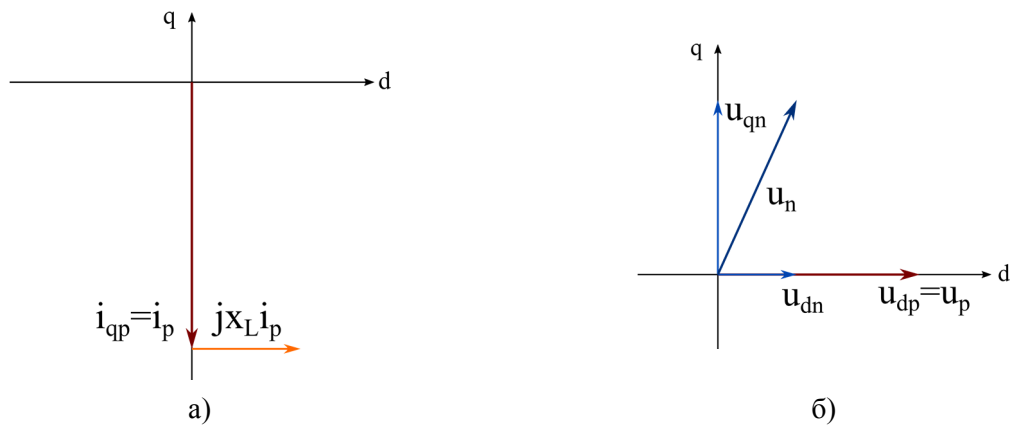
Следећи тест је сличан претходном, с једином разликом што је сада реактивна снага произведена кроз позитивне компоненте струја, односно параметар k_{q+} био постављен на 0.95. Одзиви за овај режим су приказани на слици 4.63. И у овом тесту је произведена реактивна снага од око 2.1 MVar. Другим речима, искоришћеност производних капацитета је иста за последња два теста.



Слика 4.63. Одзиви фазних напона, фазних струја, активне и реактивне снаге ($Q, k_{q+}=0.95$, двофазни к.с.).

Таласни облици фазних струја инвертора који су повезани на дистрибутивну мрежу за овај тест нису приказани услед чињенице да су врло слични онима за претходни тест (слика 4.61.). Са друге стране, векторски дијаграм струја приказан на слици 4.64. је нешто другачији. Услед присуства једино директне позитивне компоненте напона, генерисна је једино попречна компонента струје. Негативна вредност i_{qp} , приказана на дијаграму, је последица израза (4.2).

$$Q^+ = -u_{dp} \cdot i_{qp}^r + u_{qp} \cdot i_{dp}^r = k_{q+} \cdot Q \approx Q \tag{4.2}$$



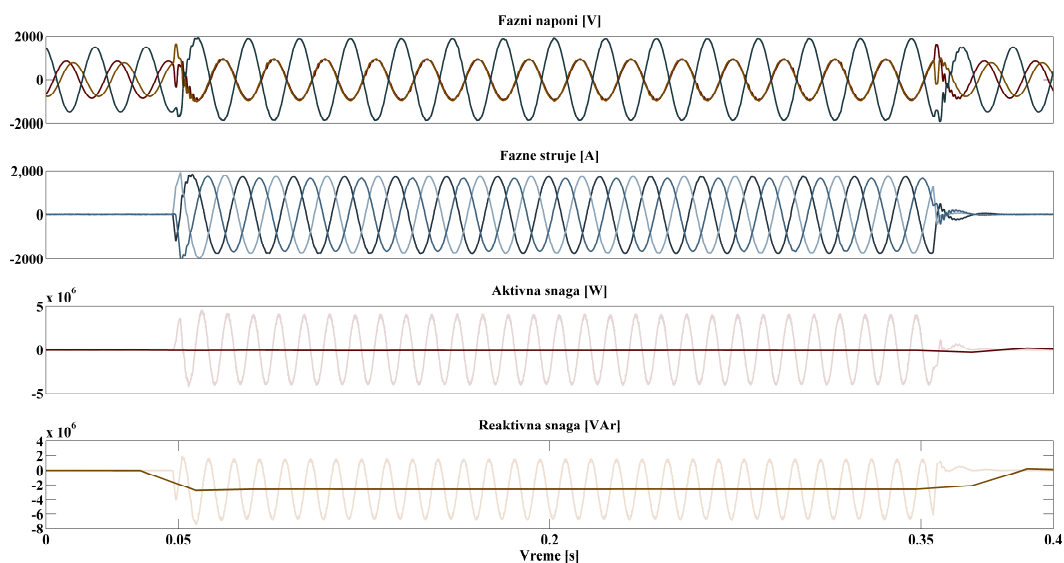
Слика 4.64. Векторски дијаграми фазних струја струја и напона на сабирницама ($Q, k_{q+}=0.95$, двофазни к.с.).

Очигледно је да реализован инкремент напона доводи до увећања позитивне компоненте напона, а ово је еквивалентно подједнаком издизању сва три напона. Ово је потврђено табелом 4.12., где су напони све три производне јединице увећани за око 400 V. Овај приступ прорачуну референци струја је идеалан за симетричне пропаде управо због поменутог ефекта на напонски профил.

Напон	Чвор 1	Чвор 2	Чвор 3	Чвор 4
U_a	470.2 0	1141 686	605.6 136	165 135
U_b	1568 1184	1510 1143	1562 1156	1165 1154
U_c	1535 1184	1464 1173	1497 1171	1183 1169

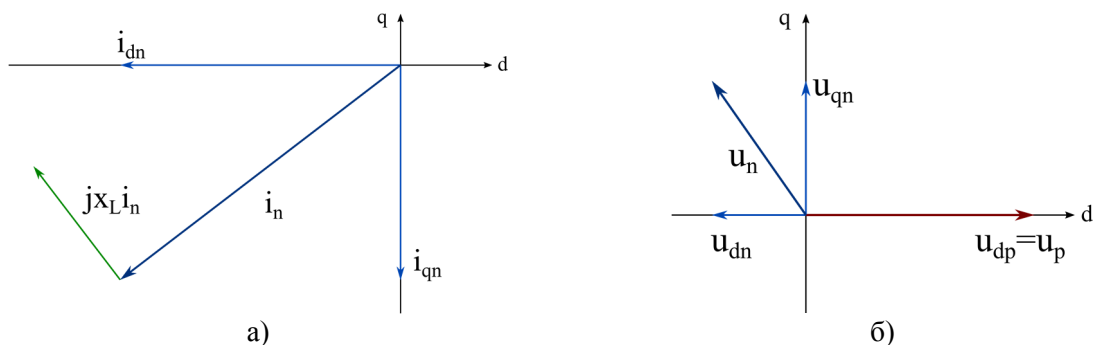
Табела 4.12. Фазни напони са и без дејства дистрибуираних извора ($Q, k_{q+}=0.95$, двофазни к.с.).

Таласни облици приказани на слици 4.65. су забележени када је захтевано индуктивно понашање инвертора, односно апсорпција реактивне снаге. Задата је референца од -1 р.ј. при једнофазном кратком споју. Услед ограничења струја, реализована је снага од 2.1 MVA_r, односно 0.7 р.ј. Снага је произведена посредством негативних компоненти струја, односно k_{q+} је био постављен на вредност 0.05. У складу са тиме, струје су балансиране.



Слика 4.65. Одзиви фазних напона, фазних струја, активне и реактивне снаге ($-Q, k_{q+}=0.05$, двофазни к.с.).

Векторски дијаграм струја и реализован инкремент напона, приказани на слици 4.66., доприносе увећању негативне компоненте напона и тиме увећању несиметрије напона.



Слика 4.66. Векторски дијаграми фазних струја струја и напона на сабирницама ($-Q, k_{q+}=0.05$, двофазни к.с.).

Овај тренд је могуће уочити и у табели 4.13. Ипак, увећање несиметрије, односно удаљавање напонског профила од симетричног је најједноставније уочити у abc домену на слици 4.65. Највиши напон је највише увећан, при чему су преостала два напона сада практично истог фазног става – тренд потпуно супротан оном који се могао видети на слици 4.39. Услед овога тешко је замислити радни режим у којем би производња негативне снаге путем негативних компоненти струја имала практичног значаја. Слично важи и за остале комбинације кратких спојева и производних профила негативне реактивне снаге. Негативна реактивна снага не доприноси побољшању локалних напонских прилика.

Напон	Чвор 1	Чвор 2	Чвор 3	Чвор 4
U_a	685.4 662	635.7 928	640.9 697	774.2 768
U_b	347.1 760	465.3 945	293.4 769	674.6 696
U_c	866.4 1361	954.4 1278	870.8 1338	1322 1336

Табела 4.13. Фазни напони са и без дејства дистрибуираних извора ($-Q, k_{q+}=0.05$, двофазни к.с.).

5. Закључак

Управљачки алгоритми намењени за инверторе повезане на мрежу су дужи низ година у фокусу интересовања истраживача. Изузимајући изворе електричне енергије који се базирају на фосилним горивима, највећи део савремених постројења за производњу електричне енергије подразумева употребу претварача енергетске електронике, на првом месту инвертора, те је њихов значај и значај контролних структура које руководе радом ових уређаја несумњив за развој енергетских система. До сада је инвертор посматран као изолована јединица чији је основни и неретко једини задатак био кондиционирање електричне енергије са циљем прослеђивања енергије, која је на располагању у примарном извору енергије, у електричну мрежу. Ипак, ови уређаји могу и морају да реализују и изванредан број функционалности које су до сада биле недовољно разматране у научној литератури. У складу са тиме, ова дисертација је имала за циљ изучавање контролног алгоритма инвертора повезаног на мрежу у ширем контексту од оног у којем је овај уређај само извор извесног струјног профила који не може да делује на мрежу на коју је повезан.

Са акумулацијом могућих и потребних функционалности које инвертор повезан на мрежу треба да демонстрира започето је анализом релевантних законских регулатива, такозваних *Grid code*-ова. Ови документи дефинишу оквире које дистрибуирани извор минимално мора да задовољи како би могао да се повеже на електричну мрежу у одређеној земљи. На основу већег броја *Grid code*-ова, оних који важе у највећим електроенергетским системима, генерисан је скуп карактеристика које контролни алгоритам мора да поседује и скуп лимита у оквиру којих морају да се нађу електричне величине које контролише инвертор како би се дозволило повезивање дистрибуираног извора на било коју електричну мрежу у свету. Са друге стране, како ови стандарди, иако строги и обавезујући, не исцрпљују све могуће захтеве који би се могли ставити пред инвертор повезан на мрежу и њему припадајући контролни алгоритам, те су разматране и друге, додатне, функционалности које нису или су у ограниченом обиму разматране у *Grid code*-овима. Под овим се првенствено мисли на функционалности које инвертор може да демонстрира у току појаве несиметричних мрежних напона, који су последица кратких спојева у електричној мрежи. Како би се развио овакав напредни контролни алгоритам, детаљно је проучена научна литература и за сваку од подструктура је предложено решење које у овом тренутку представља оптимум између сложености саме подструктуре и задовољења потреба за реализацијом проширеног скупа функција инвертора. Као последица, читав управљачки програм је било могуће имплементирати на стандардном индустријском контролеру, без било каквих квалитативних или квантитативних ограничења. Анализа садржаја законских регулатива од значаја и предлог структуре контролног алгоритма претварача повезаног на мрежу су дати у другом поглављу дисертације.

Највећи број предложених решења у раду се односи на механизме за прорачун референци струја и снага које морају да се реализују како би се постигао изванредан контролни циљ. Предложене су три парадигме за прорачун референци. Прва обезбеђује приоритизацију производње активне или реактивне снаге, при чему се анулирају осцилације у једној од снага. Други приступ обезбеђује производњу константног фактора снаге пре и за време поремећаја у мрежи, такође са анулираним осцилацијама у једној од снага. Трећа парадигма обезбеђује максимизацију производње задатих референци снага при чему оператер може да дефинише који део задатих референци ће се реализовати кроз позитивне, а који кроз негативне компоненте струја. Сва три приступа резултују максимално допустивом производњом електричне енергије с обзиром на тренутне прилике у електричној мрежи. Другим речима, која год од парадигми да се примени, претварач ће произвести максималну количину електричне енергије за дати режим, без да се прекораче струјна ограничења прекидачких елемената инвертора. Парадигме за прорачун референци су дате у трећем поглављу дисертације.

Резултујући контролни програм који је предложен у раду, не само да задовољава све релевантне стандарде, већ може да резултује производњом сваког теоријски могућег профила струја, односно профила активне и реактивне снаге, који је у оквиру физичких могућности дистрибуираног извора. Три групе метода за прорачун референци струја и активне и реактивне снаге који су у раду разматрани покривају читав спектар могућности за реализацију производње електричне енергије од стране дистрибуираног извора.

Након што је потврђено да предложено решење задовољава поменуте законске регулативе, приступљено је испитивању ефеката употребе механизма за прорачун референци. Испитивања су иницијално била вршена на емулационом моделу који подразумева једну производну јединицу која је повезана на мрежу бесконачне снаге. Други круг испитивања је подразумевао извођење експеримената на емулационом моделу дистрибутивне мреже са прикљученим дистрибуираним изворима. Модел дистрибутивне мреже је развијен и верификован на бази локалне дистрибутивне мреже. Прецизније, емулациони модел пасивне дистрибутивне мреже је развијен коришћењем мерења о потрошњи у локалној дистрибутивној мрежи Новог Сада и коришћењем података о карактеристикама трансформатора и водова који чине ову дистрибутивну мрежу. Затим је овај пасивни модел надограђен заменом четири пасивна потрошачка подручја са дистрибуираним изворима и добијен је модел на којем су вршени експерименти. Управо примена *Hardware-In-the-Loop* емулационог окружења је омогућила употребу нових приступа у проучавању проблематике дистрибуираних извора.

На основу ова два скупа испитивања донесен је већи број закључака који су приложени у четвртном поглављу. Остварени резултати су омогућили смислену и свеобухватно анализу рада инвертора и анализу утицаја инвертора на дистрибутивну мрежу. Услед чињенице да, како стандарди, тако и релевантна научна литература не разматрају експлицитно повратни утицај дистрибуираног извора на дистрибутивну мрежу на коју је повезан, акценат је био стављен на испитивање ефеката производње појединих профила струја и снага на дистрибутивну мрежу и локалне напонске прилике. Овај вид испитивања интеракције дистрибуираног извора и мреже на коју је повезан није до сада разматран у научној литератури. Између осталог, потврђено је да дистрибуирани извор не може да пројектује свој утицај дубоко у дистрибутивну мрежу и да значајно измени токове снага у току појаве несиметричних напона, односно у току самог кратког споја. Са друге стране, локалне напонске прилике може драстично да измени и то на начине који су повољни за инвертор и локална потрошачка подручја, али и на начине који су непожељни за инвертор и локална потрошачка подручја. Коришћењем појединих профила струја, несиметрија напона може значајно да се смањи, али и да се повећа, уколико се користи погрешан профил. У раду је приложен већи број тестова и наглашено је како употреба појединих механизма за прорачун референци утиче на несиметрију напона. Даље, утврђено је да само мали број ових механизма обезбеђује повезаност инвертора на мрежу у току споја једне фазе са земљом. Сви преостали механизми могу да доведу до одспајања извора услед реаговања пренапонске заштите, а тиме се свакако повећава опасност од напонског колапса мреже. У тексту је показано и да различите парадигме за прорачун референци генерално резултују у различитим нивоима производње активне и реактивне снаге за идентичне прилике у мрежи, што ће рећи да се могућност генерисања енергије разликује за различите приступе. Самим тим, оперативне могућности претварача, како у контексту експлоатације примарног извора енергије, тако и кориговања напонских прилика могу драстично да одступају у зависности који метод за прорачун референци је примењен у извесном радном режиму.

Са становишта будућих истраживања, предложен контролни алгоритам и донесени закључци представљају заиста погодан оквир и користан скуп информација. Прво унапређење ће бити усмерено у правцу развоја аутоматизованог система за кориговање напонских прилика у мерним тачкама које су у близини једног дистрибуираног извора. Другим речима, циљ ће бити елиминисање оператера као непосредног доносиоца одлуке који производни профил треба да буде примењен у специфичној ситуацији. Овим би се заокружио контролни алгоритам реализован поштовањем модуларног метода.

Након тога би се могло приступити развоју свеобухватног контролног система за дистрибуиране изворе - контролног система који би управљао већим бројем једница симултано. Другим речима, оствариле би се могућности за примену централизованог метода управљања дистрибуираним изворима. Овим системом би се омогућило руковођење дистрибуираним изворима, како у режимима са кратким спојевима, тако и у режимима без поремећаја, а све са циљем остваривања пуног потенцијала дистрибуираних извора као активног регулаторног елемента електроенергетског система.

6. Прилози

Табела П.1. садржи вредности параметара које су од значаја за синтезу контролног програма.

Параметар	Симбол	Вредност
Прекидачка учестаност и учестаност извршавања струјне петље	T_{pwm} and T_i	10 kHz
Учестаност извршавања петље за регулацију напона једносмерног међукола	T_{dc}	200 Hz
Базна струја	$I_b (\sqrt{3} I_n)$	11.6 A
Базни напон	$U_b (U_{nl})$	230 V
Пропорционално дејство струјног регулатора	K_{pi}	7.9
Резонантно дејство струјног регулатора	K_{ri}	3900
Пропорционално дејство регулатора напона једносмерног међукола	K_{pdc}	81.2
Интегрално дејство регулатора напона једносмерног међукола	K_{idc}	14

Табела П.1. Параметри контролног програма.

У табели П.2. су дате вредности параметара које су коришћене за поједностављен емулациони модел приказан на слици 4.7.

Параметар	Симбол	Вредност
Отпорност спрежног филтра	R_a, R_b, R_c	0.2 Ω
Индуктивност спрежног филтра	L_a, L_b, L_c	0.01 H
Номинални фазни напон	U_a, U_b, U_c	230 V
Номинална фазна струја	I_a, I_b, I_c	6.7 A
Номиналан напон једносмерног међукола	U_{dc}	360 V
Номинална фреквенција мрежног напона	f	50 Hz
Отпорност кочионог чопера и отпорника за претпуњење	$R_{br}, R_{pa}, R_{pb}, R_{pc}$	100 Ω
Напон укључивања транзистора кочионог чопера		650 V
Напон искључивања транзистора кочионог чопера		600V

Табела П.2. Параметри емулираног модела једне дистрибутивне јединице.

Табела П.3. садржи параметре једног типа кабла који се користи у дистрибутивној мрежи Новог Сада. Ради уштеде ресурса емулятора у емуляционим моделима су занемариване оточне импедансе каблова.

Параметар	Вредност
Дужина кабла	0.495 km
Номинална фреквенција	50 Hz
Индуктивност позитивне еквивалентне шеме	0.000395 H/km
Индуктивност негативне еквивалентне шеме	0.000395 H/km
Индуктивност нулте еквивалентне шеме	0.00197 H/km
Отпорност позитивне еквивалентне шеме	0.232 Ω /km
Отпорност негативне еквивалентне шеме	0.232 Ω /km
Отпорност нулте еквивалентне шеме	1.15 Ω /km

Табела П.3. Параметри једног кабла коришћеног у емулираном моделу дистрибутивне мреже.

У табели П.4. су издвојени најзначајнији параметри једног типа трансформатора који се користи у дистрибутивној мрежи Новог Сада. Трансформатор чији су параметри дати у табели П.4., као и сви остали дистрибуирани трансформатори у разматраној дистрибутивној мрежи, је спреге Dy .

Параметар	Вредност
Номинална привидна снага	1 MW
Преносни однос	20000/1500
Номинална фреквенција	50 Hz
Номинални напон примарне стране	20 kV
Номинални напон секундарне стране	1500 V
Напон кратког споја	4.5%
Снага кратког споја	6500 W
Струја празног хода	1.2%
Снага празног хода	1300 W

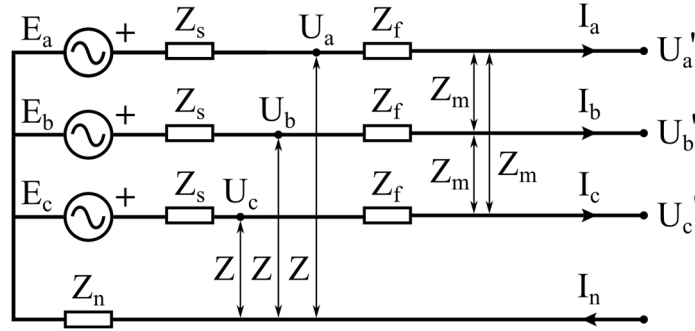
Табела П.4. Параметри једног трансформатора коришћеног у емулираном моделу дистрибутивне мреже.

У табелу П.5. су унесене очитане или естимиране ефективне вредности напона и струја у дистрибутивним подстаницама дела дистрибутивне мреже Новог Сада. Табела садржи и вредности фактора снаге у појединим подстаницама, односно потрошње активне и реактивне снаге. Табела П.5. садржи и естимиране губитке у процесу дистрибуирања електричне енергије.

No.	U_{\min} [%]	Opterećenje [%]	I_{\max} [A]	S [kVA]	P [kW]	Q [kVAr]	$\cos\varphi$	P_{gub} [kW]	Q_{gub} [kVAr]
1.	108.39	17.08	1.86	68.3	66.2	16.7	0.97 ind	1158	6133
2.	105.55	21.77	1.48	54.4	52.7	13.7	0.97 ind	0.861	4547
4.	105.59	36.52	3.97	146.1	142.2	33.3	0.97 ind	1580	7660
5.	105.68	10.63	1.82	66.9	60.1	29.4	0.90 ind	1759	8581
6.	105.88	3.51	0.6	22.1	17.3	13.8	0.78 ind	1691	8340
7.	111.29	61.08	10.43	384.8	383.7	28.2	1.00 ind	3592	17405
8.	105.82	22.8	2.48	91.2	87.4	25.9	0.96 ind	1255	7794
9.	111.19	21.76	3.72	137.1	133.2	32.4	0.97 ind	1730	10089
10.	105.68	24.17	2.63	96.7	89.5	36.6	0.93 ind	1277	6592
11.	105.57	24	0.65	24	22.1	9.3	0.92 ind	0.492	2371
12.	105.69	31.34	5.36	197.4	191.9	46.6	0.97 ind	2017	7107
13.	104.73	65.1	11.17	410.1	395.4	108.8	0.96 ind	3876	18570
14.	105.49	25.36	1.73	63.4	61.6	15	0.97 ind	0.82	4977
15.	110.76	22.6	6.16	226	223.4	34.2	0.99 ind	2395	14780
16.	105.36	34.83	5.98	219.4	217.9	26.1	0.99 ind	2147	7665
17.	105.34	41.32	7.1	260.3	258.7	28.8	0.99 ind	1855	4354
18.	104.81	52.18	5.7	208.7	203.2	47.4	0.97 ind	2141	8901
19.	105.51	30.35	5.22	191.2	191	-9.5	1.00 cap	2458	11130
20.	105.03	42.08	4.59	168.3	166.6	23.7	0.99 ind	1754	8791
21.	110.93	24.92	4.28	157	155.6	21.2	0.99 ind	1259	6189
22.	105.87	17.67	1.92	70.7	65.4	26.8	0.93 ind	1171	7520
23.	111.04	1.79	0.2	7.2	1	7.1	0.15 ind	1041	7086
24.	106.07	0.9	0.1	3.6	0.7	3.5	0.19 ind	0.687	3535
25.	105.78	0.9	0.1	3.6	0.7	3.5	0.19 ind	0.683	3516
26.	105.92	0.9	0.1	3.6	0.7	3.5	0.19 ind	0.685	3525
27.	111.69	0.79	0.14	5	1	4.9	0.20 ind	0.973	4896
28.	104.89	65.01	7.1	260.1	257.9	33.5	0.99 ind	2126	9170

Табела П.5. Потрошња и напонски нивои очитани на делу дистрибутивне мреже Новог Сада.

У наставку је дато извођење зависности напонског профила на секундарној страни дистрибутивног трансформатора од типа кратког споја на примарној страни трансформатора. Размотрени су земљоспој и кратак спој две фазе услед чињенице да су ова два кратка споја најчешћа. Прецизније, покажеће се да се земљоспој на секундарној страни трансформатора манифестује као \mathcal{C} тип несиметрије напона, док се спој две фазе манифестује као \mathcal{D} тип несиметрије напона. Одговарајући изрази за преостале кратке спојеве се аналогно изводе. Разматрање је примерено започети са сликом П.1. на којој је приказана уопштена еквивалентна шема једног електричног извора.



Слика П.1. Апстрахована еквивалентна шема електричног извора.

Претпоставиће се да је извор напајања уравнотежен, односно да важи (п.1).

$$\begin{aligned} Z_{aa_s} &= Z_{bb_s} = Z_{cc_s} = Z_s \\ Z_{aa_f} &= Z_{bb_f} = Z_{cc_f} = Z_f \\ Z_{ab} &= Z_{ba} = Z_{bc} = Z_{cb} = Z_{ac} = Z_{ca} = Z_m \\ Z_{an} &= Z_{bn} = Z_{cn} = Z_{na} = Z_{nb} = Z_{nc} = Z \end{aligned} \quad (\text{п.1})$$

Могуће је разматрати напон на прикључцима извора, али је могуће разматрати и напоне који би се читали после кабла (енг. *feeder*) којим се извор повезује на потрошач или остатак електричне мреже. Везе између напона су дате са п.2, где су напони без апострофа напони на прикључцима електричног извора.

$$\begin{aligned} U_a &= U'_a + I_a \cdot Z_f \\ U_b &= U'_b + I_b \cdot Z_f \\ U_c &= U'_c + I_c \cdot Z_f \end{aligned} \quad (\text{п.2})$$

Коришћењем кола приказаног на слици П.1. може се доћи до израза (п.3) за напон фазе a .

$$U_a = E_a - I_b \cdot Z_m - I_c \cdot Z_m + I_n \cdot Z - I_a \cdot Z_s + (I_a + I_b + I_c) \cdot Z - I_n \cdot Z_n \quad (\text{п.3})$$

Реорганизовањем претходног израза долази се до (п.4).

$$U_a = E_a - I_a \cdot (Z_s + Z_n - 2Z) - I_b \cdot (Z_m + Z_n - 2Z) - I_c \cdot (Z_m + Z_n - 2Z) \quad (\text{п.4})$$

Слично се добија за преостале две фазе:

$$\begin{aligned} U_b &= E_b - I_a \cdot (Z_m + Z_n - 2Z) - I_b \cdot (Z_s + Z_n - 2Z) - I_c \cdot (Z_m + Z_n - 2Z) \\ U_c &= E_c - I_a \cdot (Z_m + Z_n - 2Z) - I_b \cdot (Z_m + Z_n - 2Z) - I_c \cdot (Z_s + Z_n - 2Z). \end{aligned} \quad (\text{п.5})$$

Изрази за напоне после прикључног кабла су дати са (п.6).

$$\begin{aligned} U'_a &= E_a - I_a \cdot (Z_s + Z_n - 2Z + Z_f) - I_b \cdot (Z_m + Z_n - 2Z) - I_c \cdot (Z_m + Z_n - 2Z) \\ U'_b &= E_b - I_a \cdot (Z_m + Z_n - 2Z) - I_b \cdot (Z_s + Z_n - 2Z + Z_f) - I_c \cdot (Z_m + Z_n - 2Z) \\ U'_c &= E_c - I_a \cdot (Z_m + Z_n - 2Z) - I_b \cdot (Z_m + Z_n - 2Z) - I_c \cdot (Z_s + Z_n - 2Z + Z_f) \end{aligned} \quad (\text{п.6})$$

Затим је коришћењем израза (п.4) - (п.6) и израза (п.7) могуће изразити тројке напона у домену симетричних компоненти.

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \text{ где важи да } \begin{matrix} U_{a1} = U_1 \\ U_{a2} = U_2 \\ U_{a0} = U_0 \end{matrix} \quad (\text{п.7})$$

је

Израз за позитивну компоненту напона добија облик:

$$\begin{aligned} U_1 &= \frac{1}{3}(U_a + aU_b + a^2U_c) \\ &= \frac{1}{3}\{[E_a - I_a \cdot (Z_s + Z_n - 2Z + Z_f) - I_b \cdot (Z_m + Z_n - 2Z) - I_c \cdot (Z_m + Z_n - 2Z)] + \\ &\quad a[E_b - I_a \cdot (Z_m + Z_n - 2Z) - I_b \cdot (Z_s + Z_n - 2Z + Z_f) - I_c \cdot (Z_m + Z_n - 2Z)] + \\ &\quad a^2[E_c - I_a \cdot (Z_m + Z_n - 2Z) - I_b \cdot (Z_m + Z_n - 2Z) - I_c \cdot (Z_s + Z_n - 2Z + Z_f)]\} \\ &= \frac{1}{3}\{E_a + aE_b + a^2E_c \\ &\quad - [(I_a + aI_b + a^2I_c)((Z_s + Z_n - 2Z + Z_f) + a(Z_m + Z_n - 2Z) + a^2(Z_m + Z_n - 2Z))]\} \\ &= [E_1 - I_1(Z_s + Z_f + Z_n(1 + a + a^2) + Z_m(a + a^2) - 2Z(1 + a + a^2))] \\ &= E_1 - I_1(Z_s - Z_m + Z_f) \end{aligned} \quad (\text{п.8})$$

Сличним извођењем се долази до израза за негативну компоненту напона који је дат са (п.9).

$$\begin{aligned} U_2 &= \frac{1}{3}(U_a + a^2U_b + aU_c) \\ &= E_2 - I_2(Z_s - Z_m + Z_f) \end{aligned} \quad (\text{п.9})$$

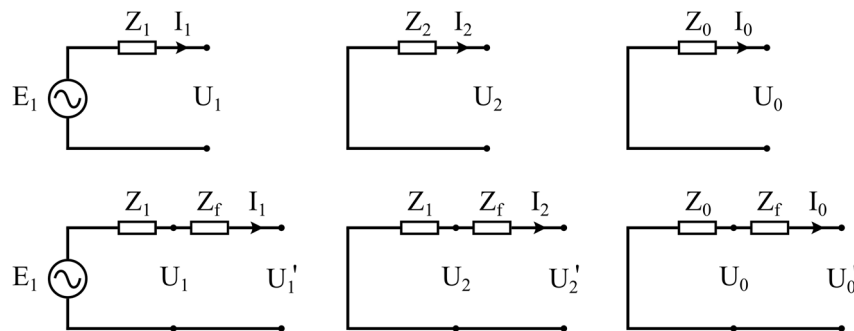
Израз за нулту компоненту је дат са (п.10).

$$\begin{aligned} U_0 &= \frac{1}{3}(U_a + U_b + U_c) \\ &= E_0 - I_0(Z_s + 3Z_n + 2Z_m + Z_f - 6Z) \end{aligned} \quad (\text{п.10})$$

Узимајући у обзир да су електромоторне силе симетричне долази се до израза (п.11). Уколико се не разматра прикључни кабал, из (п.11) је потребно уклонити импедансу Z_f .

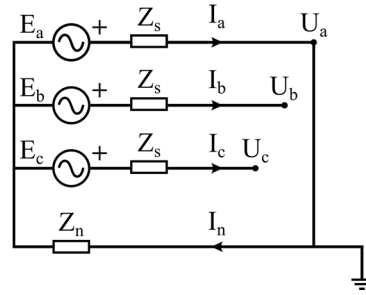
$$\begin{aligned} U_1 &= E_1 - I_1(Z_s - Z_m + Z_f) = E_1 - I_1 \cdot Z_1 \\ U_2 &= -I_2(Z_s - Z_m + Z_f) = -I_2 \cdot Z_2 \\ U_0 &= -I_0(Z_s + 3Z_n + 2Z_m + Z_f - 6Z) = -I_0 \cdot Z_0 \end{aligned} \quad (\text{п.11})$$

Еквивалентна кола која одговарају овим изразима су приказана на слици П.2.



Слика П.2. Еквивалентна кола електричног извора у домену симетричних компоненти.

Уколико се деси кратак спој једне фазе извора са земљом, еквивалентна шема приказана на слици П.1. добија облик приказан на слици П.3.



Слика П.3. Еквивалентна шема у случају земљоспоја.

Дакле, у случају земљоспоја очигледно важе релације (п.12).

$$\begin{aligned} I_b &= 0 \\ I_c &= 0 \\ U_a &= 0 \end{aligned} \tag{п.12}$$

Као последица релација из (п.12), позитивна, негативна и нулта компонента фазних струја се рачунају на основу (п.13).

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) = \frac{1}{3}I_a \\ I_2 &= \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) = \frac{1}{3}I_a \\ I_0 &= \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3}I_a \end{aligned} \tag{п.13}$$

Уврштавањем ових израза у (п.11) долази се до израза за симетричне компоненте напона у случају земљоспоја:

$$\begin{aligned} U_1 &= E_1 - I_1 \cdot Z_1 = E_1 - \frac{1}{3}I_a \cdot Z_1 \\ U_2 &= -I_2 \cdot Z_2 = -\frac{1}{3}I_a \cdot Z_2 \\ U_0 &= -I_0 \cdot Z_0 = -\frac{1}{3}I_a \cdot Z_0 \end{aligned} \tag{п.14}$$

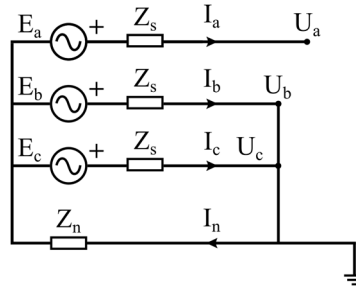
Узимајући у обзир релацију $U_a = 0 \Rightarrow U_1 + U_2 + U_0 = 0$, односно $E_1 - \frac{1}{3}I_a \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_0) = 0$ долази се до израза за фазне струје које се имају у току земљоспоја:

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{3E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = I_1 = I_2 = I_0 \\ I_b &= 0 \\ I_c &= 0 \end{aligned} \tag{п.15}$$

Уврштавањем (п.15) у (п.14) и изражавањем фазних напона на основу симетричних компоненти, долази се до вредности фазних напона који се јављају на прикључцима електричног извора - (п.16).

$$\begin{aligned} U_a &= 0 \\ U_b &= a^2U_1 + aU_2 + U_0 = \frac{-\frac{j}{\sqrt{3}}(Z_2 - aZ_0)}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \cdot E_1 \\ U_c &= aU_1 + a^2U_2 + U_0 = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}}(Z_2 - a^2Z_0)}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \cdot E_1 \end{aligned} \tag{п.16}$$

Са друге стране, уколико се догоди кратак спој две фазе, еквивалентна шема приказана на слици П.1. добија облик приказан на слици П.4.



Слика П.4. Еквивалентна шема у случају кратког споја две фазе.

Користећи слику П.4. једноставно се долази до закључка да важе релације (п.17).

$$\begin{aligned} I_a &= 0 \\ -I_b &= I_c \\ U_b &= U_c \end{aligned} \quad (\text{п.17})$$

Као последица (п.17) долази се до израза за симетричне компоненте струја:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) = \frac{1}{3}(a - a^2)I_b = j \frac{I_b}{\sqrt{3}} \\ I_2 &= \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) = \frac{1}{3}(-a + a^2)I_b = -j \frac{I_b}{\sqrt{3}} \\ I_0 &= \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = 0 \end{aligned} \quad (\text{п.18})$$

Слично, добијају се и изрази за симетричне компоненте напона:

$$\begin{aligned} U_1 &= \frac{1}{3}(U_a + aU_b + a^2U_c) = \frac{1}{3}(U_a + (a + a^2)U_b) \\ U_2 &= \frac{1}{3}(U_a + a^2U_b + aU_c) = \frac{1}{3}(U_a + (a + a^2)U_b) \\ U_0 &= \frac{1}{3}(U_a + U_b + U_c) \end{aligned} \quad (\text{п.19})$$

Очекивано, може се закључити да важи да је $-I_1 = I_2$ и да је $U_1 = U_2$. Коришећењем ових релација и израза (п.11) долази се до (п.20).

$$E_1 = I_1 \cdot Z_1 - I_2 \cdot Z_2 = j \frac{I_b}{\sqrt{3}} \cdot Z_1 + j \frac{I_b}{\sqrt{3}} \cdot Z_2 \quad (\text{п.20})$$

Коначно, изрази за фазне струје у случају кратког споја две фазе се рачунају помоћу израза (п.21).

$$\begin{aligned} I_a &= 0 \\ I_b &= -\frac{j\sqrt{3} \cdot E_1}{Z_1 + Z_2} \\ I_c &= \frac{j\sqrt{3} \cdot E_1}{Z_1 + Z_2} \end{aligned} \quad (\text{п.21})$$

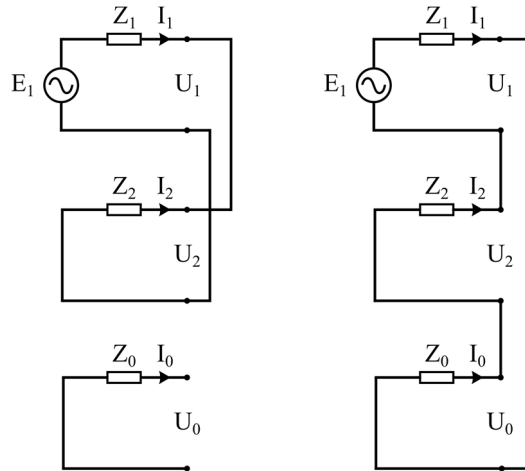
На основу (п.18) и (п.20) може се закључити да важи:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{E_1}{Z_1 + Z_2} \\ I_2 &= -\frac{E_1}{Z_1 + Z_2} \end{aligned} \quad (\text{п.22})$$

Из (п.11), (п.19) и (п.22) следи да важи релација $U_1 = U_2 = -I_2 \cdot Z_2 = \frac{E_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}$. На крају се добија да су изрази за фазне напона дати са (п.23).

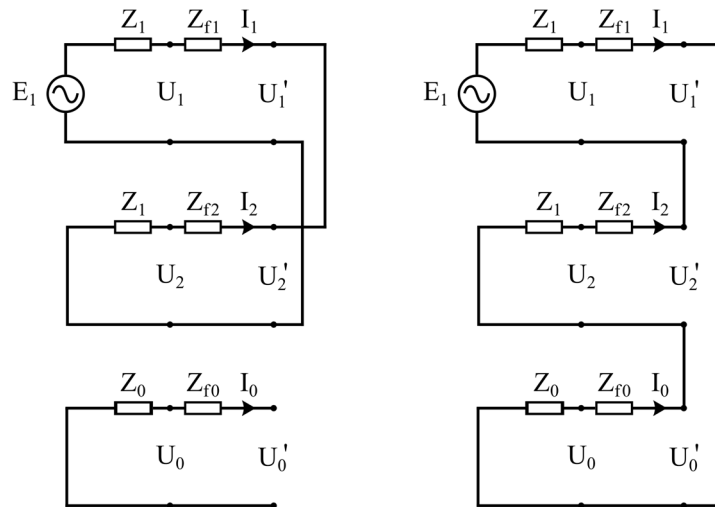
$$\begin{aligned}
 U_a &= U_1 + U_2 + U_0 = 2 \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot E_1 \\
 U_b &= a^2 U_1 + a U_2 + U_0 = \frac{(a^2 + a) E_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = -\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot E_1 \\
 U_c &= U_b = -\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot E_1
 \end{aligned}
 \tag{п.23}$$

На основу (п.13) и (п.14) и (п.18) и (п.19) могу да се нацртају еквивалентна кола за домен симетричних компоненти за разматране кварове. Слика П.5. приказује ова еквивалентна кола.



Слика П.5. Еквивалентне шеме за кратак спој две фазе (лево) и земљоспој (десно).

Уколико би се узео у обзир утицај прикључног кабла и уколико би се разматрали напони U_{abc}' на слици П.1. дошло би се до нешто уопштенијих шема које су дате на слици П.6.



Слика П.6. Еквивалентне шеме за кратак спој две фазе (лево) и земљоспој (десно) узимајући у обзир прикључни кабал.

Разматрањем слике П.6. може се доћи до израза за симетричне компоненте напона када се кратак спој деси после прикључног кабла, односно дубље у мрежи на коју је извор повезан, а не на самим сабирницама генератора. При земљоспоју симетричне компоненте напона се рачунају на основу (п.24).

$$\begin{aligned}
 U_1 &= \frac{Z_{f1} + Z_{f2} + Z_{f0} + Z_2 + Z_0}{(Z_{f1} + Z_{f2} + Z_{f0}) + (Z_1 + Z_2 + Z_0)} \cdot E_1 \\
 U_2 &= \frac{Z_2}{(Z_{f1} + Z_{f2} + Z_{f0}) + (Z_1 + Z_2 + Z_0)} \cdot E_1 \\
 U_0 &= \frac{Z_0}{(Z_{f1} + Z_{f2} + Z_{f0}) + (Z_1 + Z_2 + Z_0)} \cdot E_1
 \end{aligned}
 \tag{п.24}$$

Трансформисањем ових вредности у домен фазних величина добијају се изрази за фазне напоне на прикључцима генератора када се деси кратак спој иза прикључног кабла.

$$\begin{aligned} U_{aks} &= U_a - U_a \cdot \frac{Z_1 + Z_2 + Z_0}{(Z_{f1} + Z_{f2} + Z_{f0}) + (Z_1 + Z_2 + Z_0)} \\ U_{bks} &= a^2 U_a - U_a \cdot \frac{a^2 Z_1 + a Z_2 + Z_0}{(Z_{f1} + Z_{f2} + Z_{f0}) + (Z_1 + Z_2 + Z_0)} \\ U_{cks} &= a U_a - U_a \cdot \frac{a Z_1 + a^2 Z_2 + Z_0}{(Z_{f1} + Z_{f2} + Z_{f0}) + (Z_1 + Z_2 + Z_0)} \end{aligned} \quad (\text{п.25})$$

Уколико се претпостави да важи да је $Z_1 \approx Z_2 \approx Z_0$, што је оправдано претпоставити за случајеве када је генератор уземљен преко нулте импедансе, а узимајући у обзир (п.11), добија се да је U_{aks} , што је напон фазе a у току кратког споја изражен преко његовог падана када нема кратког споја, умањен за изванштан проценат у односу за напон када кратког споја нема. Са друге стране, U_{bks} и U_{cks} под поменутиим претпоставкама имају вредности које су блиске фазним напонима када нема кратког споја.

Када се изрази у (п.25) нормализују долази се до израза (п.26). У литератури се овај профил напона назива B тип несиметрије напона [65].

$$\begin{aligned} u_{aks} &= u \\ u_{bks} &= -\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot j\sqrt{3} \\ u_{cks} &= -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot j\sqrt{3} \end{aligned} \quad (\text{п.26})$$

Слично, за кратак спој две фазе симетричне компоненте напона, узимајући у обзир слику П.6., се рачунају на основу (п.27).

$$\begin{aligned} U_1 &= E_1 - E_1 \cdot \frac{Z_1}{(Z_1 + Z_2) + (Z_{f1} + Z_{f2})} \\ U_2 &= -E_1 \cdot \frac{Z_2}{(Z_1 + Z_2) + (Z_{f1} + Z_{f2})} \\ U_0 &= 0 \end{aligned} \quad (\text{п.27})$$

Преласком у домен фазних величина добијају се изрази за фазне напоне на сабирницама извора када се кратак спој деси након прикључног кабла.

$$\begin{aligned} U_{aks} &= U_a - U_a \cdot \frac{Z_1 - Z_2}{(Z_1 + Z_2) + (Z_{f1} + Z_{f2})} \\ U_{bks} &= a^2 U_a - U_a \cdot \frac{a^2 Z_1 - a Z_2}{(Z_1 + Z_2) + (Z_{f1} + Z_{f2})} \\ U_{cks} &= a U_a - U_a \cdot \frac{a Z_1 - a^2 Z_2}{(Z_1 + Z_2) + (Z_{f1} + Z_{f2})} \end{aligned} \quad (\text{п.28})$$

Уколико се претпостави да важи релација $Z_1 = Z_2$, након нормализације се долази до тражених израза за фазне напоне. У литератури се овај профил напона назива C тип несиметрије напона.

$$\begin{aligned} u_{aks} &= 1 \\ u_{bks} &= -\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot u \cdot j\sqrt{3} \\ u_{cks} &= -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot u \cdot j\sqrt{3} \end{aligned} \quad (\text{п.29})$$

На крају је потребно напоне из (п.26) и (п.29), који се могу остварити на примарној страни трансформатора у случају земљоспоја, односно кратког споја две фазе, изразити са секундарне стране дистрибутивног трансформатора. У [65] је за овај процес предложена трансформација (п.30). Она се користи у случајевима када је дистрибутивни трансформатор типа Dy .

$$T = \frac{j}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{п.30})$$

Применом матрице из (п.30) на (п.26) добија се:

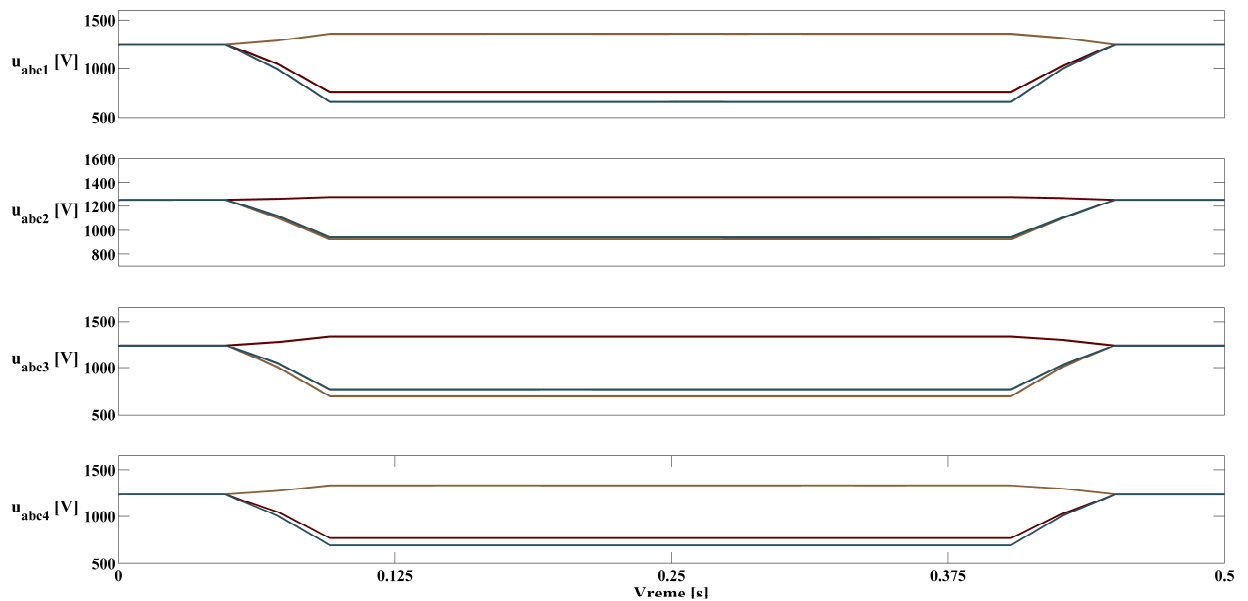
$$\begin{aligned} u_{aks}^{sek} &= 1 \\ u_{bks}^{sek} &= -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}u' \\ u_{cks}^{sek} &= -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}u'. \end{aligned} \quad (\text{п.31})$$

Применом матрице из (п.30) на (п.29) добија се:

$$\begin{aligned} u_{aks}^{sek} &= u \\ u_{bks}^{sek} &= -\frac{1}{2}u - j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ u_{cks}^{sek} &= -\frac{1}{2}u + j\frac{\sqrt{3}}{2}. \end{aligned} \quad (\text{п.32})$$

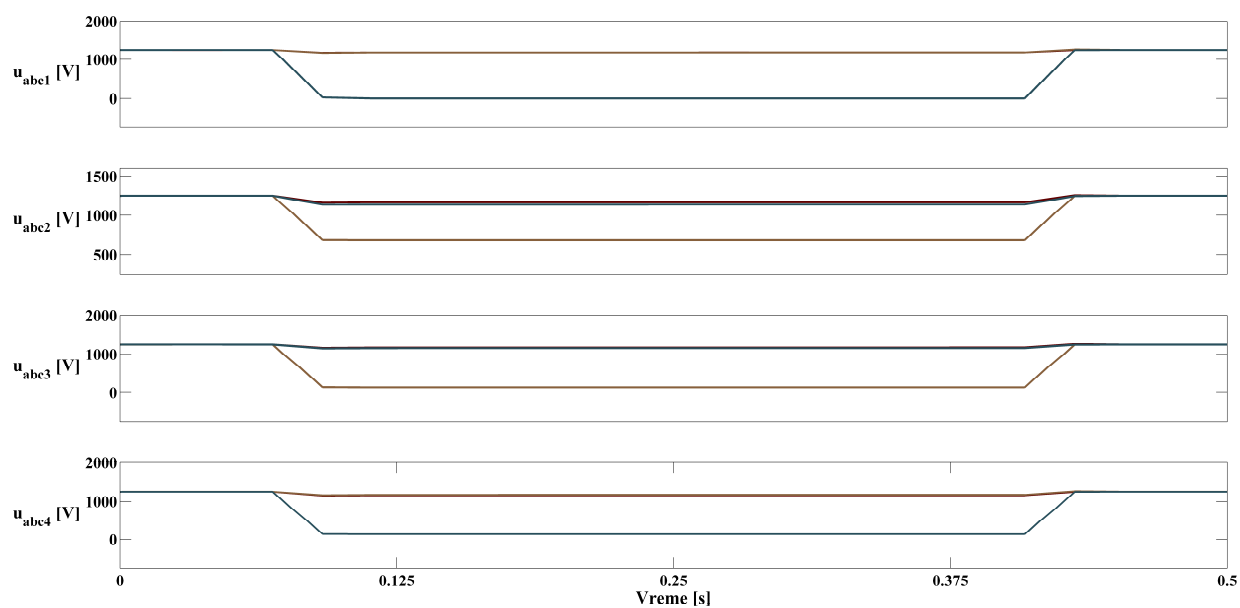
Овим је доказ тврдње да се земљоспој на секундарној страни трансформатора манифестује као Ц тип несиметрије напона, док се спој две фазе манифестује као Д тип несиметрије напона завршен.

Слика П.7. приказује напонске профиле у четири чвора дистрибутивне мреже када се деси земљоспој код производне јединице „1“. Приказане амплитуде фазних напона су снимљене док производња дистрибуираних извора није била активирана.



Слика П.7. Амплитуде фазних напона на секундару трансформатора при земљоспоју.

На слици П.8. су приказани напонски профили у четири чвора дистрибутивне мреже када се деси кратак спој две фазе код производне јединице „1“.



Слика П.8. Амплитуде фазних напона на секундару трансформатора за кратак спој две фазе.

7. Литература

- [1] IEA, “World Energy Outlook”, 2014.
- [2] British Petroleum, “BP Statistical Review of World Energy”, Jun 2017.
- [3] International Energy Agency, “Energy Efficiency Indicators for Public Electricity Production from Fossil Fuels”, Jul 2008.
- [4] U.S. Energy Information Administration, “International Energy Outlook”, 2017.
- [5] International Energy Agency, “Key World Energy Statistics”, 2017.
- [6] World Energy Council, “World Energy Scenarios, Composing energy futures to 2050”, 2013.
- [7] <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS?end=2014&start=1990&view=chart>
- [8] DOE Global Energy Storage Database, “Projects and database results, <http://www.energystorageexchange.org/projects>”, 2017.
- [9] N. Flourentzou, V. G. Agelidis, and G. D. Demetriades, “VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 3, pp. 592–602, Mar. 2009.
- [10] P. Bresesti, W. L. Kling, R. L. Hendriks, and R. Vailati, “HVDC Connection of Offshore Wind Farms to the Transmission System”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 1, pp. 37–43, Mar. 2007.
- [11] S. Rohjans, C. Danekas, and M. Usler, “Requirements for Smart Grid ICT-architectures”, 2012, pp. 1–8.
- [12] I. A. Tøndel, J. Foros, S. S. Kilskar, P. Hokstad, and M. G. Jaatun, “Interdependencies and reliability in the combined ICT and power system: An overview of current research”, *Appl. Comput. Inform.*, vol. 14, no. 1, pp. 17–27, Jan. 2018.
- [13] Z. Lukszo, G. Deconinck, and M. P. C. Weijnen, Eds., “Securing Electricity Supply in the Cyber Age”, vol. 15. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010.
- [14] FS UNEP collaborating centre, “Global Trends in Renewable Energy Investment”, 2017.
- [15] P. Loper et al., “Organic–Inorganic Halide Perovskites: Perspectives for Silicon-Based Tandem Solar Cells”, *IEEE J. Photovolt.*, vol. 4, no. 6, pp. 1545–1551, Nov. 2014.
- [16] B. C. Rowan, L. R. Wilson, and B. S. Richards, “Advanced Material Concepts for Luminescent Solar Concentrators”, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 14, no. 5, pp. 1312–1322, 2008.
- [17] M. Wolf, “Limitations and Possibilities for Improvement of Photovoltaic Solar Energy Converters: Part I: Considerations for Earth’s Surface Operation”, *Proc. IRE*, vol. 48, no. 7, pp. 1246–1263, Jul. 1960.
- [18] L. Mishnaevsky, K. Branner, H. Petersen, J. Beauson, M. McGugan, and B. Sørensen, “Materials for Wind Turbine Blades: An Overview”, *Materials*, vol. 10, no. 11, p. 1285, Nov. 2017.

[19] Mike Barhman, Neil Kirby, and Robyn Koropatnick, “HVDC Projects Listing Prepared for the HVDC and Flexible AC Transmission Subcommittee of the IEEE Transmission and Distribution Committee”, 2012.

[20] <http://www.infobuildenergia.it/Allegati/8063.pdf>

[21] L. Gyugyi, C. D. Schauder, S. L. Williams, T. R. Rietman, D. R. Torgerson, and A. Edris, “The unified power flow controller: a new approach to power transmission control”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 10, no. 2, pp. 1085–1097, Apr. 1995.

[22] P. N. Vovos, A. E. Kiprakis, A. R. Wallace, and G. P. Harrison, “Centralized and Distributed Voltage Control: Impact on Distributed Generation Penetration”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 476–483, Feb. 2007.

[23] D. J. Gotham and G. T. Heydt, “Power flow control and power flow studies for systems with FACTS devices”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, no. 1, pp. 60–65, Feb. 1998.

[24] R. Gnativ and J. V. Milanovic, “Voltage sag propagation in systems with embedded generation and induction motors”, 2001, pp. 474–479 vol.1.

[25] S. Barsali, M. Ceraolo, P. Pelacchi, and D. Poli, “Control techniques of Dispersed Generators to improve the continuity of electricity supply”, 2002, vol. 2, pp. 789–794.

[26] Michael Owen, “‘Wind farms key’ to SA blackouts”, 2017.

[27] B. H. Lee and K. Y. Lee, “A study on voltage collapse mechanism in electric power systems”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, no. 3, pp. 966–974, Aug. 1991.

[28] R. A. Schlueter, “A voltage stability security assessment method”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, no. 4, pp. 1423–1438, Nov. 1998.

[29] Tennet TSO GmbH, “Grid Code - High and extra high voltage”, Germany, 2015.

[30] E. ON GmbH, “Grid Code - High and extra high voltage”, <http://www.eon-netz.com>.

[31] VDN, “Transmission Code Network and System Rules of the German Transmission System Operators”, Germany, 2007.

[32] BDEW, “Technical Guideline Generating Plants Connected to the Medium-Voltage Network”, Germany, 2008.

[33] Energinet, “Technical regulation 3.2.5 for wind power plants with a power output greater than 11 kW”, Denmark, Sep. 2010.

[34] Transmission Lines Department “Wind turbines connected to grids with voltages below 100 kV”, Denmark, 2004.

[35] Ekraft - Eltra, “Wind turbines connected to grids with voltages above 100 kV”, 2004.

[36] Red Eléctrica de España, “Installations connected to a power transmission system and generating equipment : minimum design requirements, equipment, operations, commissioning and safety”, Spain, 2011.

[37] National Grid Electricity Transmission plc, “The Grid Code”, United Kingdom, 2016.

[38] EirGrid, “EirGrid Grid Code”, Ireland, 2015.

- [39] Nordel, “Nordic Grid Code”, 2017.
- [40] Entso-e, “Network Code : Requirements for grid connection applicable to all generators”, 2015.
- [41] FERC, “Interconnection for Wind Energy”, USA, 2016.
- [42] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China, “Technical rule for connecting wind farm to power system”, 2012.
- [43] Milan S. Čalović i Andrija T. Sarić, “Osnovi Analize Elektroenergetskih Mreža i Sistema”.
- [44] S.-K. Chung, “A phase tracking system for three phase utility interface inverters”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, no. 3, pp. 431–438, May 2000.
- [45] J. Svensson, M. Bongiorno, and A. Sannino, “Practical Implementation of Delayed Signal Cancellation Method for Phase-Sequence Separation”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 1, pp. 18–26, Jan. 2007.
- [46] Y. F. Wang and Y. W. Li, “Grid Synchronization PLL Based on Cascaded Delayed Signal Cancellation”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 7, pp. 1987–1997, Jul. 2011.
- [47] P. Rodriguez, J. Pou, J. Bergas, J. I. Candela, R. P. Burgos, and D. Boroyevich, “Decoupled Double Synchronous Reference Frame PLL for Power Converters Control”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 2, pp. 584–592, Mar. 2007.
- [48] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, “Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 5, pp. 1398–1409, Oct. 2006.
- [49] N. Jaalam, N. A. Rahim, A. H. A. Bakar, C. Tan, and A. M. A. Haidar, “A comprehensive review of synchronization methods for grid-connected converters of renewable energy source”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 1471–1481, Jun. 2016.
- [50] F. J. Rodriguez, E. Bueno, M. Aredes, L. G. B. Rolim, F. A. S. Neves, and M. C. Cavalcanti, “Discrete-time implementation of second order generalized integrators for grid converters”, in *34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2008. IECON 2008, 2008*, pp. 176–181.
- [51] A. Luna et al., “Grid Voltage Synchronization for Distributed Generation Systems Under Grid Fault Conditions”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 4, pp. 3414–3425, Jul. 2015.
- [52] “New Positive-sequence Voltage Detector for Grid Synchronization of Power Converters under Faulty Grid Conditions”, *37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06, 2006*, pp. 1–7.
- [53] J. Matas, M. Castilla, J. Miret, L. G. de Vicuña, and R. Guzman, “An Adaptive Prefiltering Method to Improve the Speed/Accuracy Tradeoff of Voltage Sequence Detection Methods Under Adverse Grid Conditions”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 5, pp. 2139–2151, May 2014.
- [54] P. Rodriguez, A. Luna, I. Candela, R. Mujal, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, “Multiresonant Frequency-Locked Loop for Grid Synchronization of Power Converters Under Distorted Grid Conditions”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 127–138, Jan. 2011.

[55] I. Todorović, I. Isakov, and S. Grabic, “Assessment of GCCs’ synchronization units under various grid voltage conditions”, Infotech 2018, Jahorina, pp. 1–6.

[56] Stevan Grabić, “Pogon Vetroelektrane sa Sinhronim Generatorom sa Stalnim Magnetima Upravljan Serijskim Pretvaračem”, 2011.

[57] Ivan Todorović, Stevan Grabić, Zoran Ivanović, Vlado Porobić, and Evgenije Adžić, “Grid Connected Inverter DC-link Voltage Charge Analysis”, presented at the International Symposium on Power Electronics, Novi Sad, Serbia, 2015.

[58] Amirnaser Yazdani and Reza Iravani, “Voltage-Sourced Converters in Power Systems”.

[59] Z. Wang, B. Wu, D. Xu, M. Cheng, and L. Xu, “DC-Link Current Ripple Mitigation for Current-Source Grid-Connected Converters Under Unbalanced Grid Conditions”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 8, pp. 4967–4977, Aug. 2016.

[60] Vladimir Strezoski, “Analiza elektroenergetskih sistema”, 2018.

[61] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari, and G. Andersson, “Improving power system dynamics by series-connected FACTS devices”, IEEE Trans. Power Deliv., vol. 12, no. 4, pp. 1635–1641, Oct. 1997.

[62] H. Akagi, S. Inoue, and T. Yoshii, “Control and Performance of a Transformerless Cascade PWM STATCOM With Star Configuration”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 43, no. 4, pp. 1041–1049, 2007.

[63] J. G. Nielsen and F. Blaabjerg, “A Detailed Comparison of System Topologies for Dynamic Voltage Restorers”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 5, pp. 1272–1280, Sep. 2005.

[64] A. Adamczyk, R. Teodorescu, R. N. Mukerjee, and P. Rodriguez, “Overview of FACTS devices for wind power plants directly connected to the transmission network”, 2010, pp. 3742–3748.

[65] Math H. J. Bollen, “Understanding power quality problems”.

[66] Зоран Ивановић, “Побољшане технике управљања претвараčem према мрежи у случају пропада напона у дистрибутивним мрежама са системима за складиштење електричне енергије”, 2013.

[67] K. Ma, W. Chen, M. Liserre, and F. Blaabjerg, “Power Controllability of a Three-Phase Converter With an Unbalanced AC Source”, IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 3, pp. 1591–1604, Mar. 2015.

[68] I. Vechiu, O. Curea, and H. Camblong, “Transient Operation of a Four-Leg Inverter for Autonomous Applications With Unbalanced Load”, IEEE Trans. Power Electron., vol. 25, no. 2, pp. 399–407, Feb. 2010.

[69] Y. Li, D. M. Vilathgamuwa, and P. C. Loh, “Microgrid Power Quality Enhancement Using a Three-Phase Four-Wire Grid-Interfacing Compensator”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 6, pp. 1707–1719, Nov. 2005.

[70] W. Wei, L. Pengfei, L. Fen, and L. Guihua, “An improved voltage support strategy of grid-connected inverter under unbalanced grid condition”, 2017, pp. 1–6.

[71] M. M. Shabestary and Y. A.-R. I. Mohamed, “Advanced Voltage Support and Active Power Flow Control in Grid-Connected Converters Under Unbalanced Conditions”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 2, pp. 1855–1864, Feb. 2018.

[72] M. Mohammadalizadeh Shabestary and Y. A. I. Mohamed, “Asymmetrical Ride-Through (ART) and Grid-Support in Converter-Interfaced DG Units under Unbalanced Conditions”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, pp. 1–1, 2018.

[73] L. H. M. Leite, W. Boaventura, L. de Errico, E. Nohme Cardoso, R. Dutra, and B. Marciano Lopes, “Fault ride through capability and voltage support in distribution grid with photovoltaic distributed generation”, 2015, pp. 130–135.

[74] J. Miret, A. Camacho, M. Castilla, L. G. de Vicuña, and J. Matas, “Control Scheme With Voltage Support Capability for Distributed Generation Inverters Under Voltage Sags”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 11, pp. 5252–5262, Nov. 2013.

[75] A. Camacho, M. Castilla, J. Miret, P. Marti, and M. Velasco, “Maximizing positive sequence voltage support in inductive-resistive grids for distributed generation inverters during voltage sags”, 2016, pp. 2343–2348.

[76] A. Camacho, M. Castilla, J. Miret, L. G. de Vicuna, and G. L. Miguel Andres, “Control Strategy for Distribution Generation Inverters to Maximize the Voltage Support in the Lowest Phase During Voltage Sags”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 3, pp. 2346–2355, Mar. 2018.

[77] A. Camacho, M. Castilla, J. Miret, J. C. Vasquez, and E. Alarcon-Gallo, “Flexible Voltage Support Control for Three-Phase Distributed Generation Inverters Under Grid Fault”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1429–1441, Apr. 2013.

[78] A. Camacho, M. Castilla, J. Miret, L. G. de Vicuna, and R. Guzman, “Positive and Negative Sequence Control Strategies to Maximize the Voltage Support in Resistive–Inductive Grids During Grid Faults”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 6, pp. 5362–5373, Jun. 2018.

[79] Б. Јефтенић, В. Васић, и Ђ. Орос, “Регулисани електромоторни погони - решени проблеми са елементима теорије”.

[80] Slobodan N. Vukosavić, “Električne mašine”, 2010.

[81] M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, and F. Blaabjerg, Eds., “Control in power electronics: selected problems”, New York: Academic Press, 2002.

[82] Remus Teodorescu, Marco Liserre, and Pedro Rodriguez, “Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems”, Wiley-IEEE Press, 2011.

[83] M. H. Rashid, Ed., “Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook”, Fourth Edition, Oxford: Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier, 2018.

[84] T. Orłowska-Kowalska, Ed., “Advanced and intelligent control in power electronics and drives”, Cham: Springer, 2014.

[85] L. Wang, “PID and predictive control of electrical drives and power converters using MATLAB/Simulink”, Solaris South Tower, Singapore: IEEE, Wiley, 2015.

[86] K. M. Passino, S. Yurkovich, “Fuzzy control”, Menlo Park, Calif: Addison-Wesley, 1998.

[87] Ivan Todorović, Petar Gartner, Stevan Grabić, and Vladimir Katić, “Ultracapacitors as auxiliary energy source in electric vehicles”, presented at the X International Symposium on Industrial Electronics INDEL, Banja Luka, 2014, pp. 301–307.

[88] G. Ding et al., “Adaptive DC-Link Voltage Control of Two-Stage Photovoltaic Inverter During Low Voltage Ride-Through Operation,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 6, pp. 4182–4194, Jun. 2016.

[89] C. Liu, D. Xu, N. Zhu, F. Blaabjerg, and M. Chen, “DC-Voltage Fluctuation Elimination Through a DC-Capacitor Current Control for DFIG Converters Under Unbalanced Grid Voltage Conditions”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 7, pp. 3206–3218, Jul. 2013.

[90] H.-S. Song and K. Nam, “Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 46, no. 5, pp. 953–959, Oct. 1999.

[91] Y. Suh and T. A. Lipo, “Control scheme in hybrid synchronous stationary frame for PWM AC/DC converter under generalized unbalanced operating conditions”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 3, pp. 825–835, May 2006.

[92] Y. Suh and T. A. Lipo, “Modeling and analysis of instantaneous active and reactive power for PWM AC/DC converter under generalized unbalanced network”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 3, pp. 1530–1540, Jul. 2006.

[93] M. Reyes, P. Rodriguez, S. Vazquez, A. Luna, R. Teodorescu, and J. M. Carrasco, “Enhanced Decoupled Double Synchronous Reference Frame Current Controller for Unbalanced Grid-Voltage Conditions”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 9, pp. 3934–3943, Sep. 2012.

[94] Z. R. Ivanović, E. M. Adžić, M. S. Vekić, S. U. Grabić, N. L. Čelanović, and V. A. Katić, “HIL Evaluation of Power Flow Control Strategies for Energy Storage Connected to Smart Grid Under Unbalanced Conditions”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 11, pp. 4699–4710, Nov. 2012.

[95] P. Rodriguez, A. V. Timbus, R. Teodorescu, M. Liserre, and F. Blaabjerg, “Flexible Active Power Control of Distributed Power Generation Systems During Grid Faults”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 5, pp. 2583–2592, Oct. 2007.

[96] Y. Sato, T. Ishizuka, K. Nezu, and T. Kataoka, “A new control strategy for voltage-type PWM rectifiers to realize zero steady-state control error in input current”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 34, no. 3, pp. 480–486, May 1998.

[97] D. N. Zmood and D. G. Holmes, “Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 3, pp. 814–822, May 2003.

[98] X. Yuan, W. Merk, H. Stemmler, and J. Allmeling, “Stationary-frame generalized integrators for current control of active power filters with zero steady-state error for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operating conditions”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 2, pp. 523–532, Mar. 2002.

[99] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre, and P. C. Loh, “Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters”, *IEE Proc. - Electr. Power Appl.*, vol. 153, no. 5, p. 750, 2006.

- [100] D. Ruiu, R. I. Bojoi, L. R. Limongi, and A. Tenconi, “New Stationary Frame Control Scheme for Three-Phase PWM Rectifiers Under Unbalanced Voltage Dips Conditions”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 1, pp. 268–277, Jan. 2010.
- [101] J. Miret, M. Castilla, A. Camacho, L. G. de Vicuña, and J. Matas, “Control Scheme for Photovoltaic Three-Phase Inverters to Minimize Peak Currents During Unbalanced Grid-Voltage Sags”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 10, pp. 4262–4271, Oct. 2012.
- [102] J. L. Sosa, M. Castilla, J. Miret, J. Matas, and Y. A. Al-Turki, “Control Strategy to Maximize the Power Capability of PV Three-Phase Inverters During Voltage Sags”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 4, pp. 3314–3323, Apr. 2016.
- [103] W. Jiang, Y. Wang, J. Wang, L. Wang, and H. Huang, “Maximizing Instantaneous Active Power Capability for PWM Rectifier Under Unbalanced Grid Voltage Dips Considering the Limitation of Phase Current”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 10, pp. 5998–6009, Oct. 2016.
- [104] Y. Yang and F. Blaabjerg, “Low-Voltage Ride-Through Capability of a Single-Stage Single-Phase Photovoltaic System Connected to the Low-Voltage Grid”, *Int. J. Photoenergy*, vol. 2013, pp. 1–9, 2013.
- [105] P. Rodriguez, G. Medeiros, A. Luna, M. C. Cavalcanti, and R. Teodorescu, “Safe current injection strategies for a STATCOM under asymmetrical grid faults”, 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2010, pp. 3929–3935.
- [106] P. Rodriguez, A. Luna, G. Medeiros, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, “Control of STATCOM in wind power plants based on induction generators during asymmetrical grid faults”, 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA, 2010, pp. 2066–2073.
- [107] A. Camacho, M. Castilla, J. Miret, R. Guzman, and A. Borrell, “Reactive Power Control for Distributed Generation Power Plants to Comply With Voltage Limits During Grid Faults”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 11, pp. 6224–6234, Nov. 2014.
- [108] A. Milicua, G. Abad, and M. Á. R. Vidal, “Online Reference Limitation Method of Shunt-Connected Converters to the Grid to Avoid Exceeding Voltage and Current Limits Under Unbalanced Operation Part I: Theory”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 3, pp. 852–863, Sep. 2015.
- [109] A. Milicua, G. Abad, and M. Á. R. Vidal, “Online Reference Limitation Method of Shunt-Connected Converters to the Grid to Avoid Exceeding Voltage and Current Limits Under Unbalanced Operation Part II: Validation”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 3, pp. 864–873, Sep. 2015.
- [110] E. Ebrahimi, M. J. Sanjari, and G. B. Gharehpetian, “Control of three-phase inverter-based DG system during fault condition without changing protection coordination”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 814–823, Dec. 2014.
- [111] A. Camacho, M. Castilla, J. Miret, A. Borrell, and L. G. de Vicuña, “Active and Reactive Power Strategies With Peak Current Limitation for Distributed Generation Inverters During Unbalanced Grid Faults”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 3, pp. 1515–1525, Mar. 2015.

[112] M. M. Shabestary and Y. A. R. I. Mohamed, “An Analytical Method to Obtain Maximum Allowable Grid Support by Using Grid-Connected Converters”, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 1558–1571, Oct. 2016.

[113] T. Zheng, L. Chen, Y. Guo, and S. Mei, “Flexible unbalanced control with peak current limitation for virtual synchronous generator under voltage sags”, *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 61–72, Jan. 2018.

[114] I. Todorović, S. Grabić, and Z. Ivanović, “Grid-connected converter active and reactive power production maximization with respect to current limitations during grid faults”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 101, pp. 311–322, Oct. 2018.

[115] Ivan Todorović, Ivana Isakov, and Stevan Grabić, “Safe Reactive Power Production Schemes For the Grid-Connected Converters Affected by the Voltage Unbalances”, presented at the 2018 COMPEL, Padova, Italy, 2018.

[116] Texas Instruments, “<http://www.ti.com/product/TMS320F28335>”.

[117] Matlab/Simulink, “<https://www.mathworks.com/products/matlab-coder.html>”.

[118] Марко Векић, “Нови поступак за развој управљачких склопова енергетске електронике заснован на емулацији у стварном времену”.

[119] Ivana Isakov, Ivan Todorović, Vladimir Katić, and Stevan Grabić, “Control Strategy for Two-Stage PV Power Converter During Simultaneous Grid Fault and Irradiance Change”, presented at the 18th International Conference on Power Electronics and Motion Control, Budapest, 2018.