

# Утицај велике соларне електране на струје кратких спојева и анализа рада дистантне заштите високонапонског прикључног вода

Никола Сучевић<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Универзитет у Београду, Електротехнички институт „Никола Тесла“,  
Косте Главинића 8а, 11000 Београд, Србија

[nikola.sucevic@ieent.org](mailto:nikola.sucevic@ieent.org)

**Кратак садржај:** У фокусу овог рада налази се анализа рада соларне електране при појави кратких спојева на високонапонском воду који повезује електрану са преносном мрежом. У раду је анализиран одзив соларне електране при појави квара на воду и допринос струји кратких спојева. Анализиран је рад система релејне заштите далековода, уважавајући карактеристике струја кратких спојева соларне електране и доприноса преносне мреже. Такође, дати су предлози за преподешења заштитних функција како би се омогућило адекватно реаговање система заштите. Моделовање мреже и анализе вршене су у софтверском пакету DigSILENT PowerFactory.

**Кључне речи:** соларна електрана, струје кратких спојева, релејна заштита, 110 kV далековод

## 1. Увод

Иако се већи део електричне енергије у свету и даље производи у конвенционалним електранама које користе фосилна горива (угаљ, гас, нафта), ови традиционални извори енергије суочавају се са бројним изазовима: раст цена примарних енергената, бриге због зависности од увоза фосилних горива из других земаља, као и растућа еколошка забринутост због утицаја производње електричне енергије коришћењем фосилних горива на животну средину [1].

Као резултат ових и других изазова, дошло је до интензивног развоја алтернативних извора енергије и нових технологија за производњу

електричне енергије. Обновљиви извори енергије, као што су соларна, биомаса, геотермална, хидро и енергија ветра, појавили су се као потенцијалне алтернативе које решавају неке од ових проблема.

Производња електричне енергије из соларних електрана је као један од најзначајнијих метода производње електричне енергије из обновљивих извора, која решава већину наведених проблема који се јављају при експлоатацији конвенционалних извора, при чему је изузетно значајно то што има минималан утицај на животну средину.

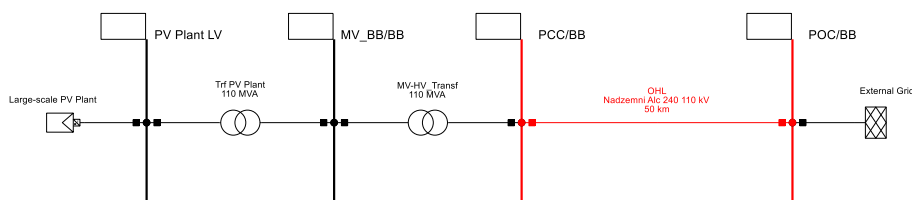
Соларне електране се генерално повезују на локалну енергетску мрежу или раде аутономно, напајајући локалну потрошњу у изолованом раду од мреже.

Соларне електране повезане на локалну енергетску мрежу, углавном се повезују на дистрибутивну мрежу, како на ниском напону (0,4 kV), тако и на средњем напону (10-35 kV). Услед пораста инсталисане снага појединачних соларних електрана, у последње време све више се повезују и на преносну мрежу ( $\geq 110$  kV).

## 2. Анализирана мрежа

Мрежа која је предмет анализе приказана је на слици 1. Посматрана соларна електрана има укупну инсталисану снагу од 110 MVA, а повезана је на преносну мрежу 110 kV напонског нивоа, преко повезног далековода дужине 50 km.

Соларни инвертори су преко трансформације 0,69/20 kV/kV, повезани на преносну мрежу трансформацијом 20/110 kV/kV.



Слика 1: Модел соларне електране

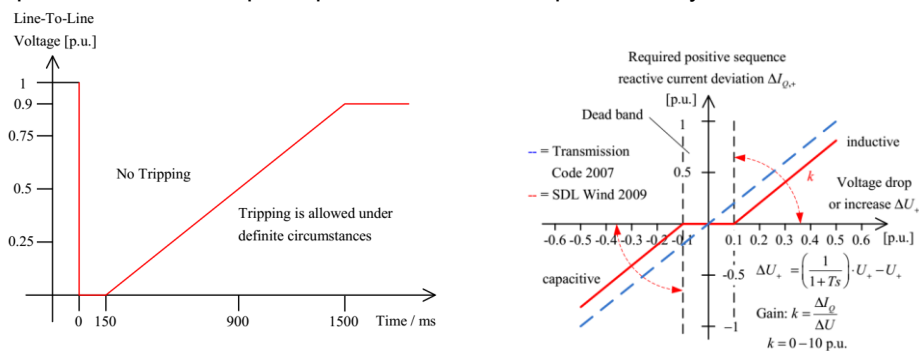
Моделовање мреже урађено је применом софтверског пакета *DlgSILENT PowerFactory* [3].

## 3. Софтверски модел

Са аспекта рада система релејне заштите важно је познавати понашање соларних електрана у случају појаве квара. Како се фотонапонске електране на мрежу повезују преко инвертора, њихово

понашање при појави квара значајно се разликује од понашања класичних генератора. Обновљиви извори енергије који се преко инвертора повезују на мрежу су у великој мери контролирали извори струје кратког споја, а њихово понашање зависи од примењених управљачких алгоритама.

При појави поремећаја у мрежи, од соларних електрана се захтева да одређени период остану повезане на мрежу при појави пропада напона у тачки њиховог прикључења **Error! Reference source not found.** Такође, од соларне електране се захтева да покуша подржи напон, односно да покуша да повећа вредност напона **Error! Reference source not found.** Ово се најчешће остварује инјектирањем струје, и то реактивне компоненте струје чији интензитет зависи од интензитета пропада напона. Карактеристични захтеви приказани су на слици 2:

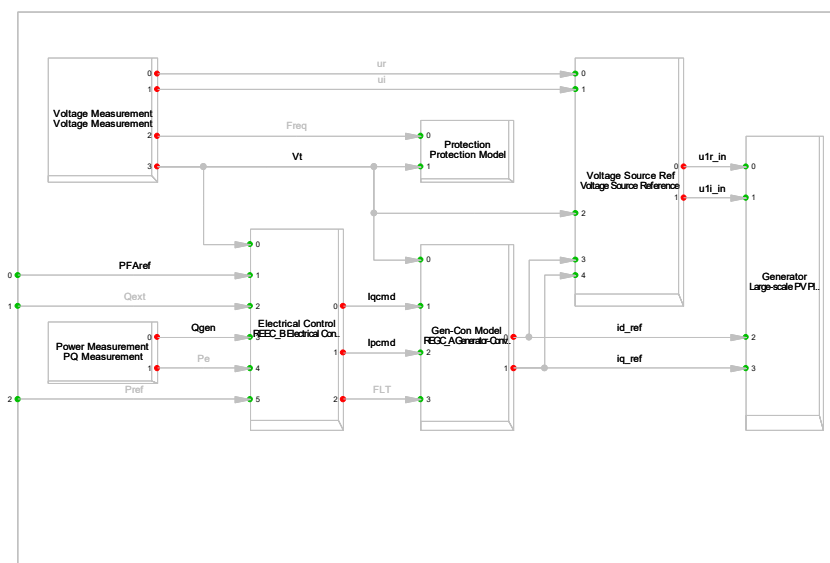


Слика 2: Fault-Ride Trough и Dynamic voltage support карактеристика

*DigSILENT PowerFactory* за потребе прорачуна кратких спојева омогућава моделовање соларних електрана на више начина [5], а у овом раду ће се користити детаљан модел електране са имплементираним управљачким алгоритмима. У овом раду користи ће се модел велике соларне електране „*WECC Generic Model for Large-scale PV Plants*“, детаљно описан у [6], који је развијен од стране WECC (*Western Electricity Coordinating Council*), а чији су детаљи имплементације у *DigSILENT PowerFactory* дати у [7].

Модел за управљање соларне електране приказан је на слици 3. Улазне величине управљања су напон, фреквенција, активна и реактивна снаге. У управљачкој структури имплементирани алгоритми за „*Fault-Ride Trough*“ функционалност, као и за „*Dynamic voltage support*“. Сви детаљи о управљачким функцијама и њиховој имплементацији у софтвер дати су у [6] и [7].

Frame WECC Large-scale PV Plant: Frame for WECC Large-scale Photovoltaic Plant Model

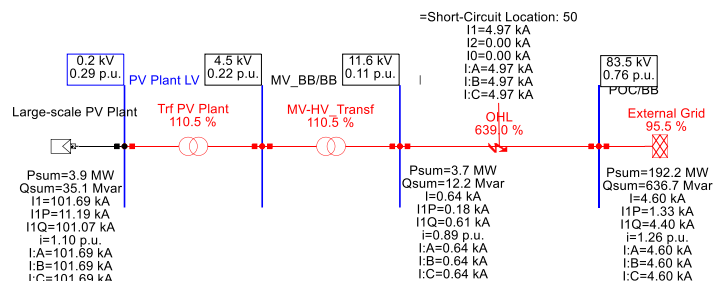


Слика 3: Управљање соларног инвертора(WECC модел)

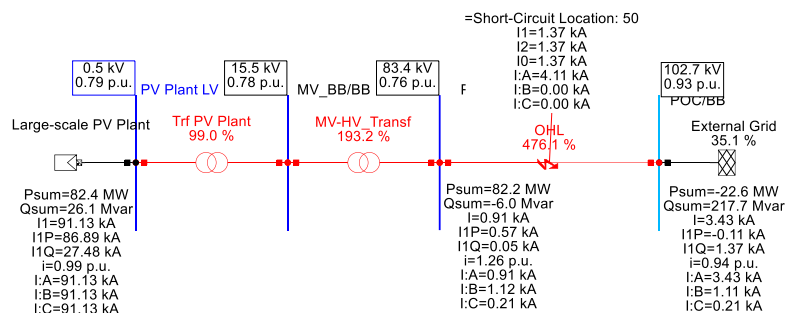
У фокусу анализа ће бити промена инјектирања струје при настанку квара на прикључном далеководу услед дејства управљачких алгоритама соларне електране и утицај на понашање система заштите високонапонског прикључног далековода.

#### 4. Струје кратких спојева

Како би се анализирано понашање соларне електране при појави квара, симулирани су кратки спојеви половини дужине прикључног далековода. На сликама 4 и 5 приказане су расподеле струја кратких спојева за задати квар:



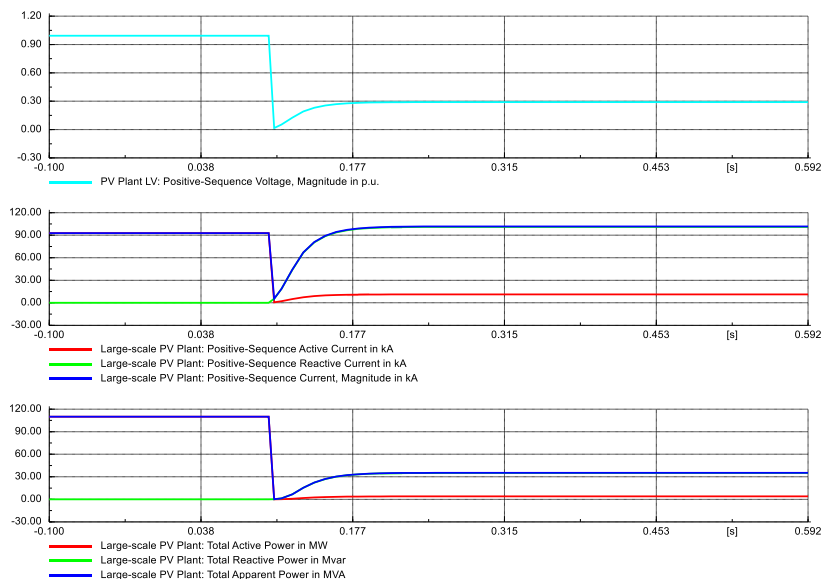
Слика 4: Трофазни кратак спој на половини далековода



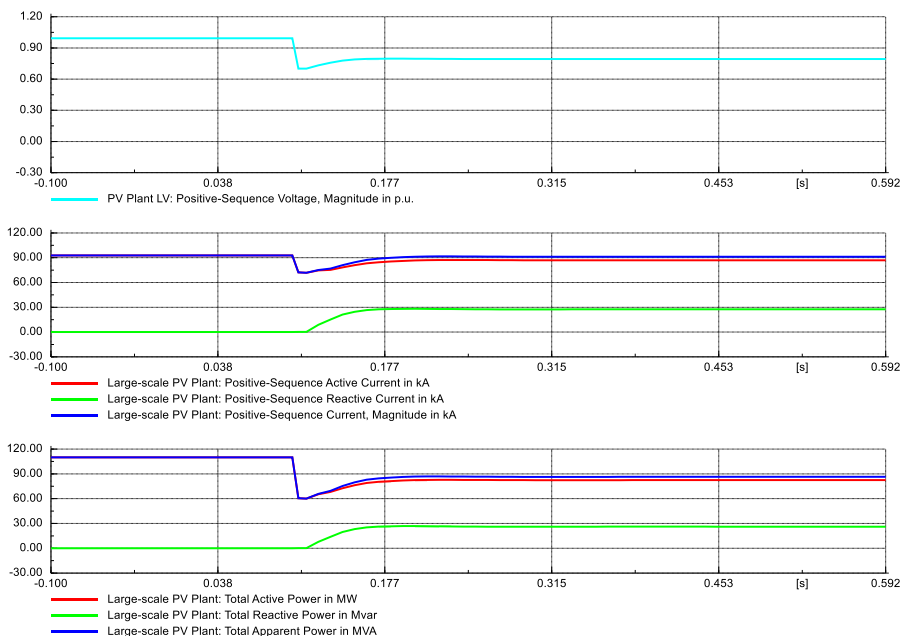
Слика 5: Једнофазни кратак спој на половини далековода

Анализирајући слике 4 и 5, може се уочити да су посматрано са прикључка високонапонског вода на страни соларне електране, струје једнофазног квара са земљом су значајно веће од струја трофазних кварова. Разлог за то јесте то што је нултна тачка трансформатора на 110 kV страни директно уземљена, што има за последицу то да су струје кварова са земљом веће. Стога, може се закључити да детекција кварова са земљом не представља проблем за систем заштите, те ови кварови неће бити предмет даљих анализа.

Са друге стране, интересантно је посматрати промене снаге инјектирања електране при задатим кваровима, што је илустровано на слици 6 и слици 7:



Слика 6: Промена напона, снаге и струје инјектирања соларне електране при трофазном кратком споју на половини далековода



Слика 7: Промена напона, снаге и струје инјектирања соларне електране при једнофазном кратком споју на половини далековода

На основу приказаног, може се уочити да трофазни квар представља већи поремећај за саму електрану, јер долази до већег пада напона на сабирницама електране, те ће промене струја услед рада управљачког алгорита бити веће. Са слика се такође може закључити да управљање соларне електране има очекиван одзив на појаву пропада напона, јер услед пада напона долази до повећања реактивне струје инјектирања, што је у складу са захтевима мреже описаним у поглављу 3.

У наставку рада анализираће се струје трофазних и двофазних кратких спојева. Ове струје су од интереса при провери осетљивости система релејне заштите повезног високонапонског далековода.

## 5. Релејна заштита далековода

Као што је приказано у поглављу 4, допринос струја квара при кратким спојевима без земљоспоја на далеководу са стране соларне електране је на нивоу радних струја.

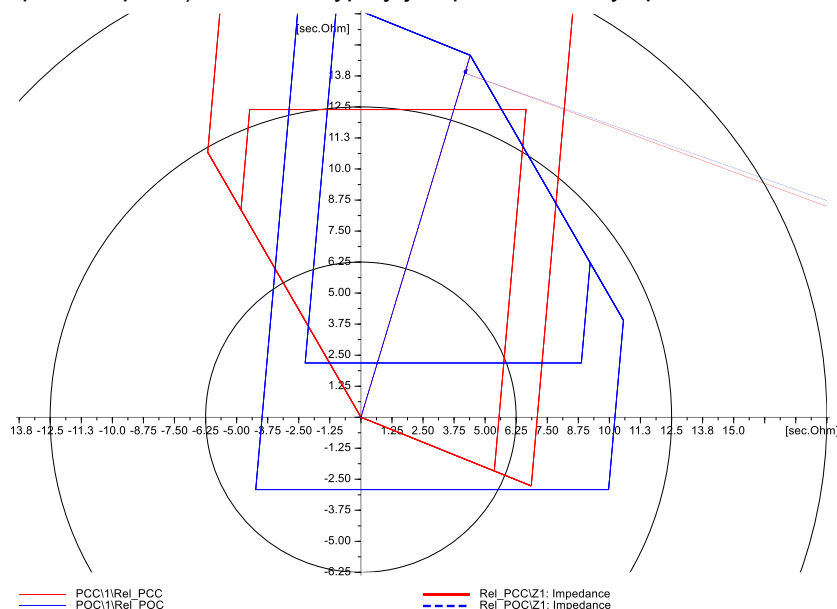
Са аспекта заштите, овакав ниво струја кратких спојева представља проблем систему заштите да одреди да ли је настали режим квара или није. Потребно је анализирати како се најчешће примењени системи заштите високонапонских далековода понашају у оваквим

условима рада. Стога, анализираће се рад дистантне заштите далековода која се најчешће примењује као основна заштита 110 kV далековода.

Подешења дистантне заштите далековода изабрана су према принципима уобичајеним критеријумима који се најчешће користе при параметрирању функција [8]-[10]. Оваквим подешавањима омогућава се да дистантна заштита све кварове који се десе на 80% дужине далековода, посматрано од места уградње релеја искључује у првом степену без временске задршке, док ће кварови на преосталих 20% дужине бити елиминисани у другом степену са временском задршком од 0,4 s.

Како би се проверио рад дистантне заштите на далеководу који повезује електрану са преносном мрежом, симулираће се трофазни и двофазни кратки спојеви на више карактеристичних места на посматраном далеководу.

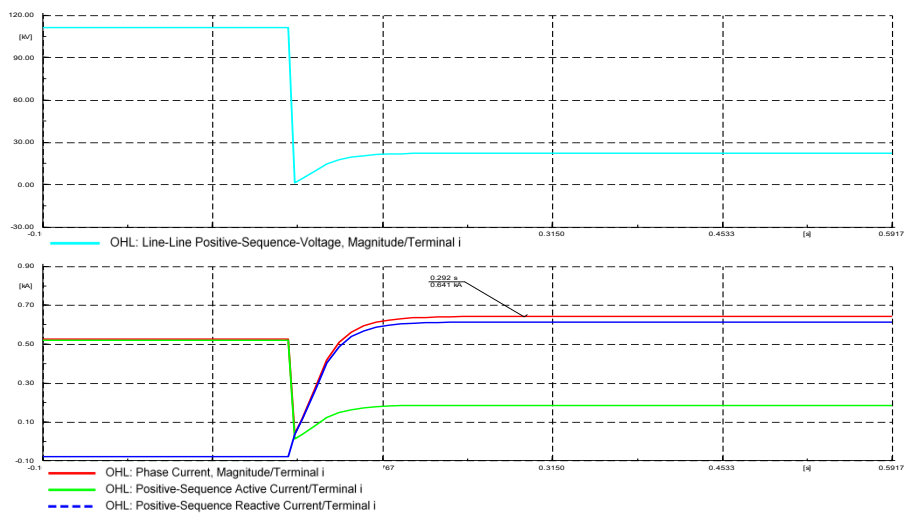
Први квар који је потребно симулирати јесте квар на 95% дужине далековода посматрано од стране соларне електране (квар је у близини сабирница мреже), заштитни уређај мери импедансу према слици 8:



Слика 8: Мерна импеданса при квару на 95% дужине далековода посматрано са стране соларне електране

На основу приказаног, може се закључити да дистантна заштита далековода правилно мери импедансу до места квара, те ће обезбедити искључење у другом степену, након 0,4 s, што је у складу са подешењима.

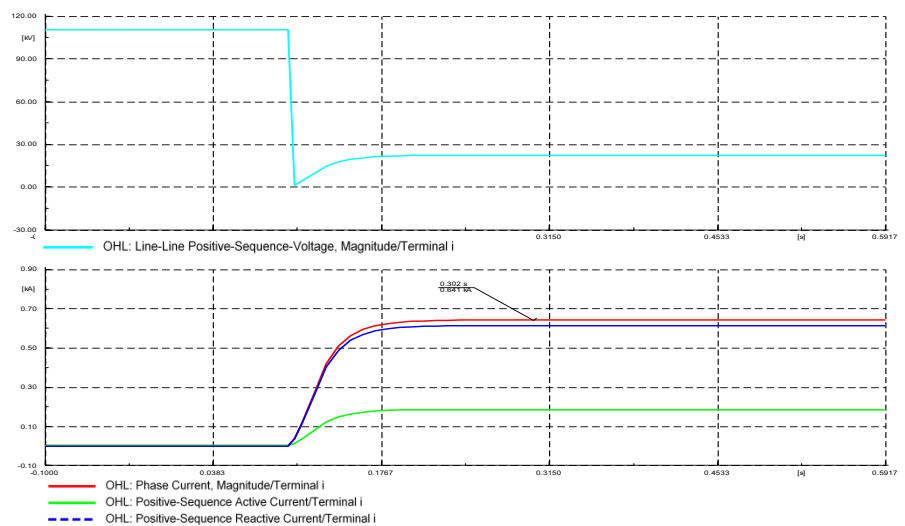
На слици 9 приказане су промене струје при настанку квара коме је претходно рад електране са инјектирањем  $P=P_N$  и  $Q=0$ .



Слика 9: Промена напона и струје (prefault  $P=P_N$ ;  $Q=0$ )

Према приказаном, долази до значајне промене активне и реактивне компоненете струје, али укупна струја остаје блиска номиналној, што одговара одзиву контролног алгоритма.

Уколико је режиму квара претходно рад у празном ходу  $P=Q=0$ , тада се добија одзив приказан на слици 10:

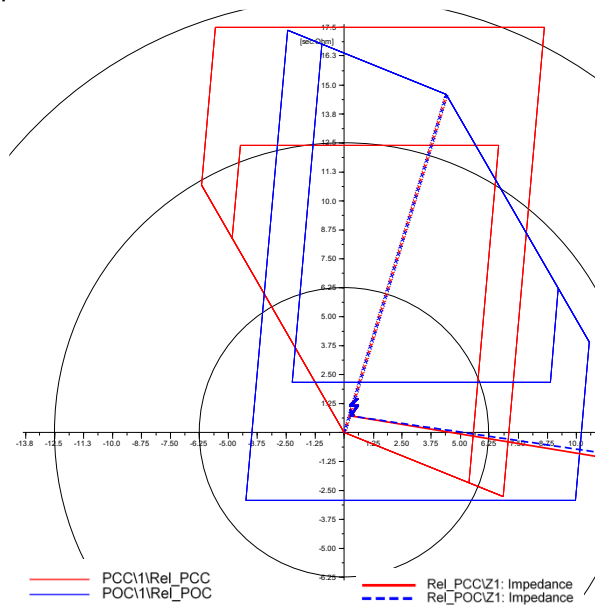


Слика 10: Промена напона и струје (prefault  $P=0$ ;  $Q=0$ )



Слично ранијем закључку, укупна струја не одступа значајно од номиналне. Додатно, може се закључити да струја квара соларне електране не зависи од режима рада који је претходио квару.

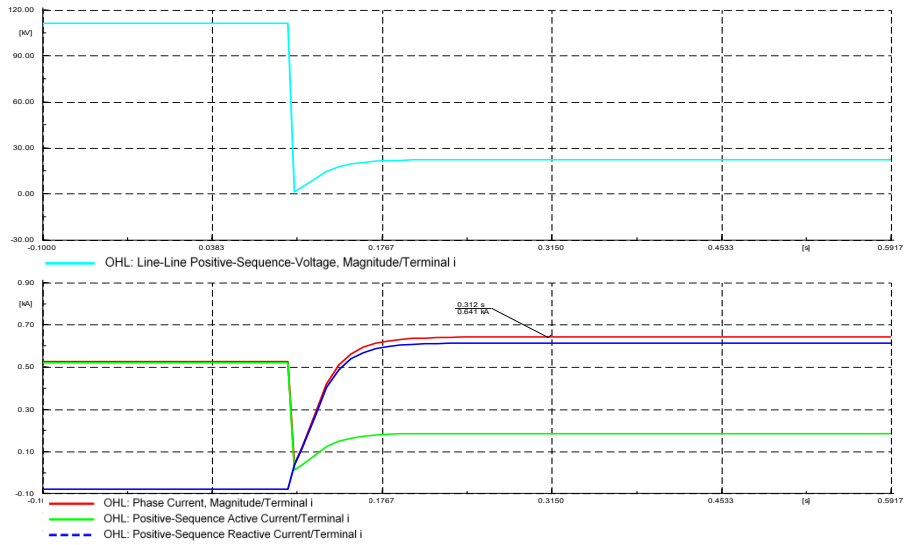
Други квар који је потребно симулирати јесте квар на 5% дужине далековода посматрано од стране соларне електране (квар је у близини високонапонских сабирница електране), заштитни уређај мери импедансу према слици 11:



**Слика 11: Мерна импеданса при квару 5% дужине далековода посматрано са стране соларне електране**

На основу приказаног, може се закључити да дистантна заштита далековода правилно мери импедансу до места квара, та ће обезбедити искључење у првој зони, без временске задршке.

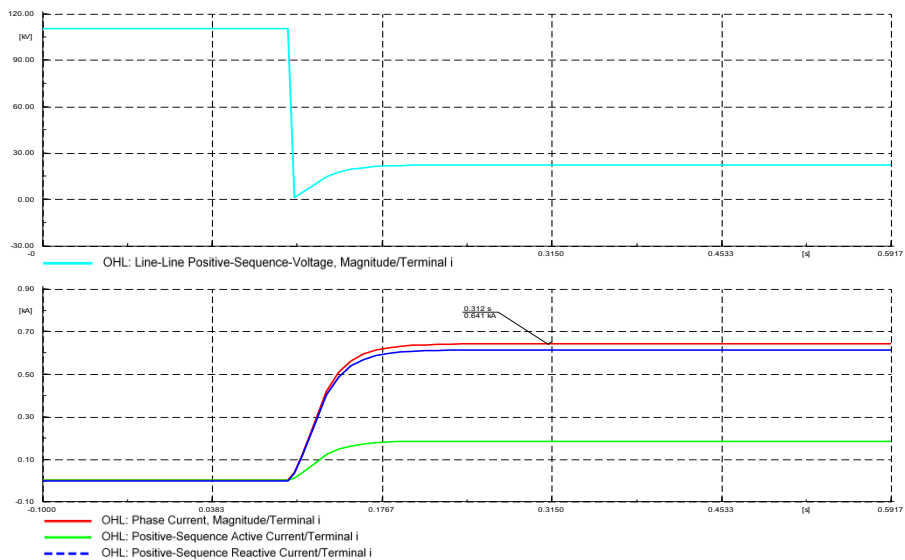
Уколико је режиму квара претходио рад са номиналним оптерећењем  $P=P_N$  и  $Q=0$ , тада се добија одзив приказан на слици 12:



Слика 12: Промена напона и струје (prefault  $P=P_N$ ;  $Q=0$ )

Према приказаном, долази до значајне промене активне и реактивне компоненете струје, али укупна струја остаје блиска номиналном, што одговара одзиву контролног алгоритма.

Уколико је режиму квара претходио рад у празном ходу  $P=Q=0$ , тада се добија одзив приказан на слици 13:



Слика 13: Промена напона и струје (prefault  $P=0$ ;  $Q=0$ )

Према приказаном, може се закључити да радни режим који претходи квару, не утиче значајно на ниво струја кратких спојева.

Како би се обезбедила прорада дистантне заштите, мора бити испуњен услов за побуду функције. Савремене нумеричке дистантне заштите су фазно селективне, а при избору петље за прорачун импедансе (како би се одредила фазе које су захваћене кваром) имају могућност избора критеријума. Критеријум може да буде:

1. Прекострујни услов: као услов прораде функције, мора постојати струја већа од задатог прага. Прекострујни услов се подешава тако да не долази до побуде заштите при високим преносима снаге кроз далековод (типично се подешава на 120% називне струје далековода)
2. Напоном контролисани прекострујни услов: слично као код прекострујног, прорада дистантне заштите у неком степену условљена је испуњењем прекострујног услова, али у овом случају струјни праг зависи од мереног напона, па је у одређеној мери могућа побуда заштите и при струјама мањим од номиналне струје.
3. Подимпедантни услов: као услов за прораду дистантне заштите јесте да се мерена импеданса налази у зони реаговања побудног степена, који се најчешће код савремених уређаја дефинише као степен дистантне заштите са великим досегом, при чему се мора водити рачуна да карактеристика побудног степена не залази у зону рада далековода са максималним погонским оптерећењима.

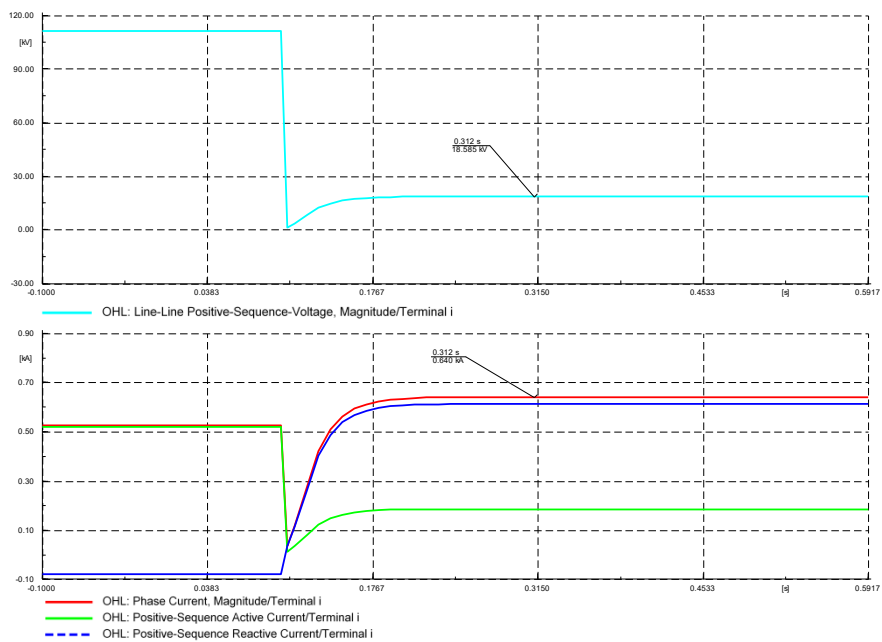
Детаљи имплементације зависе од примењеног заштитног уређаја и могу се наћи у упутствима произвођача [12] и [13], а генералне смернице дате су у [14].

Као што је раније наведено, прекострујна побуда мора да буде подешена изнад радних струја. Стога, може се закључити да прекострујна побуда није добар избор за побудни елемент дистантне заштите далековода, као да то није ни напоном контролисана побуда, због интензитета струја кратких спојева соларне електране који су врло блиски нормалним радним струјама електране. Уколико заштитна функција користи подимпедантну побуду, подешену са већим досегом од осталих степеноста функције, обезбеђује се адекватна побуда функције.

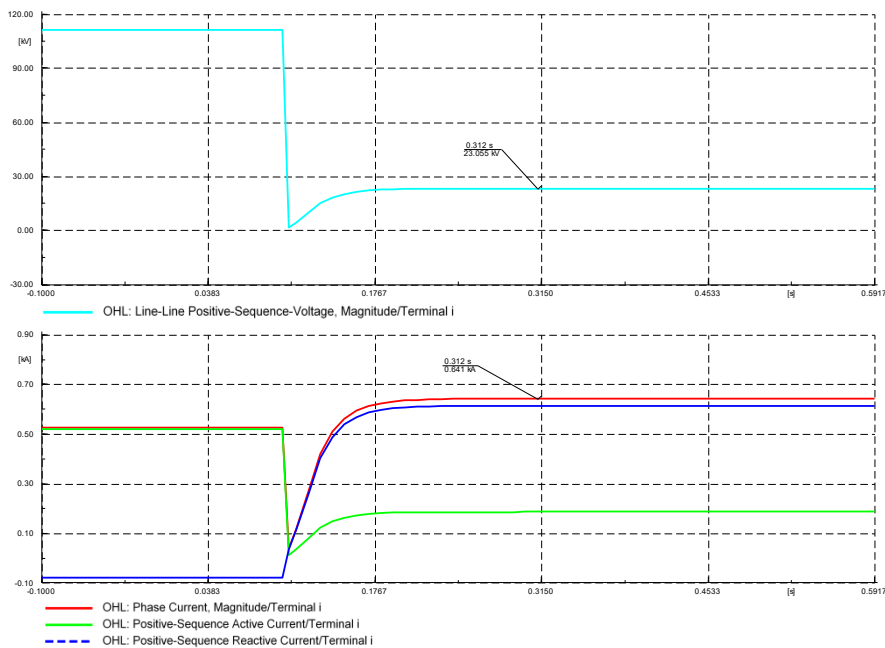
Додатни фактор који отежава примену дистантних заштита на радијалним далеководима који напајају соларне електране, представља утицај такозваног *SIR* („*Source-to-Impedance Ratio*“) фактора. Овај фактор се дефинише као однос импедансе штићеног далековода и импедансе еквивалента мреже „иза“ вода  $SIR = Z_{ekv,s} / Z_{vod}$ , односно места мерења напона. Како је показано да су струје квара из соларне електране мале (велика импеданса еквивалента мреже), може се закључити да ће дистантне заштите имати проблем са детекцијом кварова који су блиски другом крају вода, због несавршености струјних и напонских трансформатора [8].

Уколико је импеданса извора велика у поређењу са импедансом вода, напон на почетку вода је доста низак при квару на другом крају вода, па ће услед грешака мерења напона постоји могућност да реле погрешно реагује за кварове који су ван штићеног вода. Уколико је овај однос већи, односно што је мрежа „иза“ далековода мања, тј. мрежа веће снаге, грешке имају мањи утицај на рад заштите јер су мерени напони знатно већи.

Како би се илустровао овај феномен, могу се посматрати напони и струје при квару на 80% дужине далековода (граница досега првог степена) и на 99% дужине, посматрано од ВН сабирница соларне електране, што је приказано на слици 14 и слици 15:



Слика 14: Квар на 80% дужине далековода



Слика 15: Квар на 99% дужине далековода

На сликама 14 и 15 се уочава да су струје при оба квара практично идентичне, док се напони разликују. У првом случају, реле мери напон од 18,585 kV, а у другом 23,055 kV, што представља разлику од само 4% називног напона. Овако мала разлика у мереном напону може да изазове погрешну прораду заштите услед несавршености напонских мерних трансформатора. Такође, треба нагласити да ће овај утицај бити значајнији што је вод краћи.

## 6. Закључци

Услед све већег пораста броја соларних електрана које се повезују на преносну мрежу, намеће се потреба за провером утицаја нових извора на струје кратких спојева у мрежи, као и на рад система релејне заштите.

У првом делу овог рада је анализирано је понашање соларних електрана при појави кварова у мрежи и утицај на струје кратких спојева.

Закључено је да при настанку квара долази до повећања интензитета реактивне компоненте струје соларне електране, на рачун смањења активне компоненте. При томе укупна струје квара соларне електране не прелази значајно номиналну струје, што је у складу са ограничењима инвертора и радом управљачког алгоритма. Уочено је да

радни режим пре квара не утиче на интензитет укупне струје соларне електране при квару. Такође, у посматраном примеру, место настанка квара на повезном далеководу не утиче значајно на допринос соларне електране струји квара.

У другом делу овог рада анализирано је како се понаша систем релејне заштите високонапонског далековода којим је соларна електрана повезана на преносну мрежу.

Анализа је извршена на стандардизованом моделу велике соларне електране, са примењеним уобичајеним функцијама и логиком подешавања заштите високонапонског вода.

На основу приказаног закључује се да је постојеће концепте заштите високонапонских далековода могуће успешно применити и за водове који повезују соларне електране на високонапонску мрежу, али се мора водити о начину подешавања и уважити специфичност ниског интензитета струја кратких спојева које соларна електрана инјектира на место квара.

У раду су приказане специфичности имплементације заштитних функција за примену дистантне заштите далековода, при чему је наглашено које посебне мере морају бити примењене при подешавањима заштитних функција. Сви предлози који су дати, постоје као опција у савременим заштитним уређајима, а њихова примена обезбеђује довољну осетљивост заштите, уз очување селективности и координисаност система.

## Литература

- [1] [www.eia.gov](http://www.eia.gov)
- [2] *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems, Part 0: Calculation of currents, 2016-01*, IEC 60909-0-2016, Edition 2.0,
- [3] [www.digsilent.com](http://www.digsilent.com)
- [4] Tobias Neumann, István Erlich, "Short Circuit Current Contribution of a Photovoltaic Power Plant", *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 45, Issue 21, 2012, Pages 343-348, <https://doi.org/10.3182/20120902-4-FR-2032.00061>.
- [5] DlgSILENT PowerFactory 2018, Technical Reference Documentation, Static Generator, ElmGenstat, DlgSILENT GmbH, December 2017.
- [6] Western Electricity Coordinating Council, Modeling and Validation Work Group, WECC PV Power Plant Dynamic Modeling Guide, Prepared by WECC Renewable Energy Modeling Task Force, 2014.
- [7] G. Lammert, L. D. P. Ospina, P. Pourbeik, D. Fetzer and M. Braun, "Implementation and validation of WECC generic photovoltaic system models in DlgSILENT PowerFactory," *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, Boston, MA, 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM.2016.7741608

- [8] *IEEE Guide for Application Protective Relay Applications to Transmission Lines* IEEE Std C37.113-2015, 2015.
- [9] G. Ziegler, *Numerical Distance Protection, Principles and Application*, Publicis MCD, Munich and Erlangen, ISBN: 3-89578-142-8, 1999.
- [10] Walter A. Elmore, *Protective Relaying Theory and Application*, ABB Power T&D Company Inc, Relay Division, Coral Springs, Florida, 1995.
- [11] *IEEE Guide for Application of Digital Line Current Differential Relays Using Digital Communication*, , IEEE Std C37.243-2015, 2015
- [12] ABB, Relion Protection and Control, 630 series Tehnical Manual, Revision: E, Product version: 1.3 Document ID: 1MRS756508, Issued: 2014-11-28
- [13] Siemens, SIPROTEC, 7SA6, Manual, C53000-G1176-C156-7, Release date 02.2011
- [14] Техничко упутство за подешавање заштита водова високог напона, ТУ-РЗУ-03/1:2014, ЈП ЕМС, Београд, Фебруар 2014.

**Abstract:** The focus of this paper is the analysis of the solar power plant operation in the emergence at occurrence of short-circuits on high-voltage line that connects the power plant to the transmission network. The paper analyzes the response of the solar power plant in the event of a fault on line and the solar plant contribution to the short-circuit currents. The operation of the relay protection system of the transmission line has been analyzed, taking into account the short-circuit currents characteristics of the solar power plant and the contribution of the transmission network to the total short-circuit (fault) current. Additionally, suggestions are provided for the setting of protective functions in order to get the adequate response from the protection system. Network modeling and analysis are performed using the DIgSILENT PowerFactory software package

**Keywords:** solar power plant, short-circuit currents, relay protection, 110 kV transmission line

## **Influence of Large Solar Power Plant on Short-circuit Currents and Analysis of Operation of Distance Protection System of High-voltage connection Line**

Nikola Sučević

Рад примљен у уредништво: 11.10.2018. године

Рад прихваћен: 14.12.2018. године

