

Primena softverskog alata DIgSILENT POWERFACTORY za modelovanje sistema relejne zaštite industrijske mreže

Nikola Sučević¹, Dejan Milošević^{2,3}

¹Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a,
11000 Beograd, Srbija

nikola.sucevic@ieent.org

²Global Substation Solutions d.o.o Beograd (GSS) , 11000 Beograd, Srbija

³Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Kratak sadržaj: U radu je prikazan postupak modelovanja sistema relejne zaštite jednog realnog industrijskog postrojenja u softverskom alatu DIgSILENT PowerFactory. Kao podloga za model sistema zaštite, izvršeno je modelovanje jednog podrazvoda u industrijskom postrojenju. U radu je prikazan postupak modelovanja izabranih zaštitnih funkcija sistema relejne zaštite asinhronih motora 6 kV naponskog nivoa, transformatora 6/0,4 kV/kV, kao i zaštite u spojnom polju i zaštite u dovodnim poljima posmatranog podrazvoda. U radu je prikazan i odziv simuliranog sistema relejne zaštite na izabrane poremećaje.

Ključne reči: relejna zaštita, DIgSILENT PowerFactory, industrijska mreža

1. Uvod

DIgSILENT PowerFactory je softverski alat kreiran od strane nemačke kompanije DIgSILENT GmbH koji služi za modelovanje i analizu elektroenergetskih sistema [1].

Softver omogućava modelovanje mreža naizmennog i jednosmernog napona svih naponskih nivoa, u odvojenim ili jedinstvenim bazama podataka. DIgSILENT Power Factory sadrži razne module koji omogućavaju vršenje uobičajenih (tokovi snaga, proračun struja kratkih spojeva, analiza harmonika, itd.) i naprednih (dinamičke simulacije, simulacije rada sistema relejne zaštite, itd.) analiza elektroenergetskih sistema.

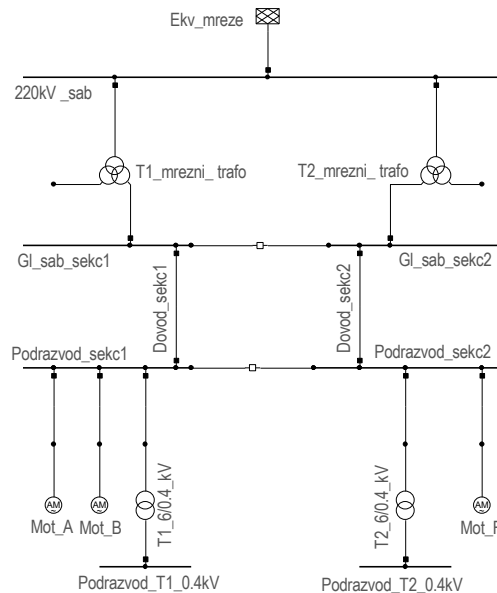
U fokusu ovog radu je analiza mogućnosti primene softverskog paketa za potrebe modelovanja i simulacije rada sistema relejne zaštite industrijskih mreža.

U radu je prikazan je postupak modelovanja zaštitnih uređaja i simulacija odziva sistema zaštite na zadate poremećaje. Prikazano modelovanje izabranih funkcija zaštitnih uređaja asinhronih motora naponskog nivoa 6 kV i transformatora 6/0,4 kV/kV, kao i uprošćene zaštite sabirnica i zaštite od otkaza prekidača u spojnom polju posmatranog podrazvoda postrojenja.

Kako bi se utvrdio odziv sistema zaštite, u modelu su simulirani izabrani poremećaji i prikazan je način na koji sistem reaguje.

2. Model postrojenja

Industrijska mreža koja je predmet analize sastoji se od razvoda naponskih nivoa 220 kV, 35 kV, 6 kV i 0,4 kV. Preko transformatora 220/35/6 kV/kV/kV vrši se napajanje elektroenergetske mreže razvoda 6 kV koji je u fokusu ove analize. Sama mreža naponskog nivoa 6 kV sastavljena je od više podrazvoda, a koncipirana je tako da omogući kontinuitet u napajanju potrošača, tako što se sa glavnog razvoda 6 kV svi podrazvodi napajaju preko dva redundantna dovoda. Jednopolna šema mreže i jednog podrazvoda sa dve sekcije koji je predmet analize prikazana je na slici 1.



Slika 1. Jednopolna šema analizirane mreže

Na osnovu podataka o elementima mreže, u softverskom paketu DIgSILENT PowerFactory formiran je odgovarajući model koji je poslužio kao podloga za model sistema relejne zaštite.

Model industrijskog postrojenja sadrži sve potrebne podatke o ekvivalentu prenosne mreže na mestu priključenja industrijskog postrojenja, transformatorima 220/35/6 kV/kV/kV, sabirnicama, kablovskim vodovima 6 kV, asinhronim motorima 6 kV naponskog nivoa i transformatorima 6/0,4 kV/kV. Takođe, u modelu postoje potrebni podaci o mernim transformatorima koji se koriste u sistemu relejne zaštite.

3. Modelovanje sistema relejne zaštite

Model industrijskog postrojenja koji je opisan u prethodnom poglavlju, služi kao osnova za modelovanje sistema relejne zaštite. Modelovanje sistema zaštite izvršeno je tako da su uvažavane karakteristike primenjenih zaštitnih uređaja, a podešenja zaštitnih funkcija su izabrana tako da se elementi elektroenergetske mreže na odgovarajući način, u skladu sa relevantnim standardima, štite od mogućih nedozvoljenih naprezanja i havarija. Treba napomenuti da modelovani zaštitni uređaji i njihova podešenja pojedinačnih zaštitnih funkcija odgovaraju realnom stanju zaštite u jednom industrijskom postrojenju.

Postupak modelovanja sistema relejne zaštite i simulacija rada opisani su u sledećim poglavljima.

3.1. Zaštita motora 6 kV naponskog nivoa

Za zaštitu asinhronih motora 6 kV naponskog nivoa u posmatranoj industrijskoj mreži koristi se multifunkcionalni mikroprocesorski relej ABB REM610 [2].

Ovaj rele obezbeđuje zaštitu motora od negativnih posledica kratkih spojeva (uključujući i zemljospojeve u posmatranoj izolovanoj mreži) i od havarija koje mogu nastati usled nedozvoljeno dugog termičkog preopterećenja, predugog starta motora, ukočenja rotora, pojave struje inverznog redosleda itd. Spisak modelovanih funkcija zaštita u uređaju ABB REM610 dat je u tabeli 1:

Tabela 1: Zaštita motornih izvoda

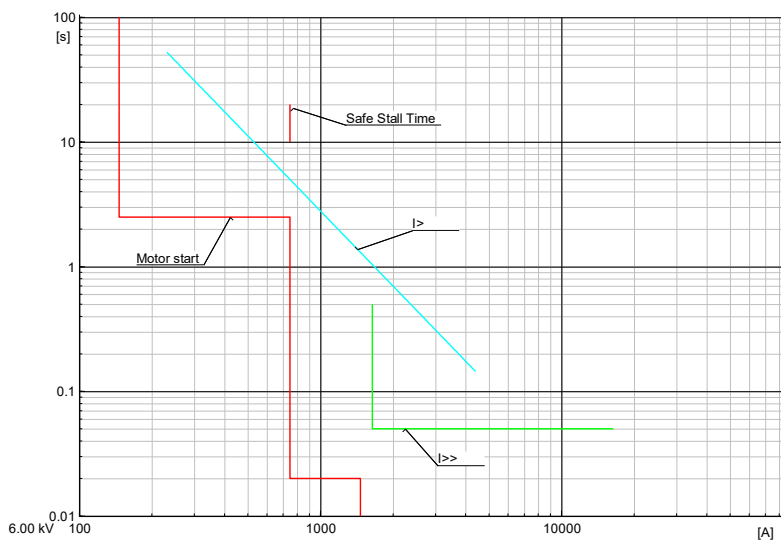
Zaštitni uređaj	Zaštitne funkcije
ABB REM610	Zaštita od termičkog preopterećenja
	Prekostrujna zaštita (dva stepena)
	Podstrujna zaštita
	Neusmerena zemljospojna zaštita
	Zaštita od struja inverznog redosleda
	Zaštita od obrnutog redosleda faza
	Nadzor starta motora
	Zaštita od otkaza prekidača

Treba napomenuti da model releja u softveru ne podržava neke funkcionalnosti koje postoje u stvarnom uređaju, kao što su signalizacija termičkog preopterećenja, nadzor sekundarnih kola ili merenje temperature posredstvom RTD modula [3].

Kako bi se ilustrovala jedna od funkcionalnosti modela releja, opisan je princip rada zaštitne funkcije nadzora starta motora i prikazan je postupak modelovanja iste. Ova zaštita realizovana je prekostrujnom zaštitom sa inverznom karakteristikom reagovanja koja je definisana jednačinom $I^2 \cdot t = k$, koja proverava da li dolazi do prekoračenja dozvoljenog toplotnog impulsa pri polasku motora. Prema [4], zaštitna funkcija mora da omogući normalan polazak motora, prilikom koga ne dolazi do prekoračenja toplotnog impulsa. Na osnovu merenja struje funkcija proračunava da li je prekoračen dozvoljeni toplotni impuls, a u slučaju da jeste izdaje odgovarajuće signale za isključenje prekidača motora. Prikaz jednog od koraka u podešavanju parametara krive ilustrovan je na slici 2:

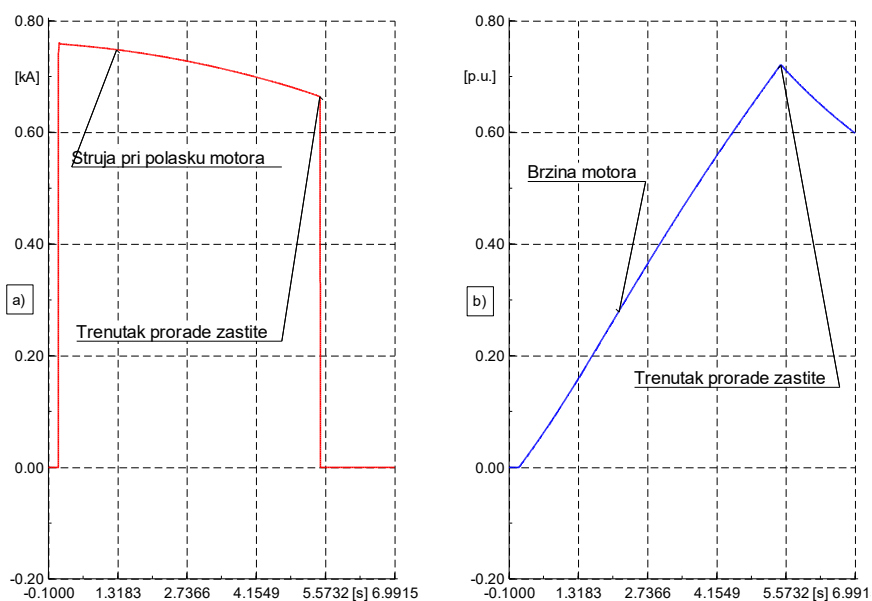
Slika 2. Podešenje parametara krive nadzora starta motora

Koordinacije ove zaštitne funkcije, polaska motora i dozvoljenog vremena trajanja ukočenog rotora grafički je predstavljena na slici 3:



Slika 3. Koordinacija zaštite i polaska motora

Simulacija neuspješnog starta motora ilustrovana je na slici 4. U simulaciji je mehaničko opterećenje motora takvo da ne dozvoljava uspješan polazak istog. Na slici 4 b) uočavamo da brzina motora za oko 5 s dostiže oko 70% nominalne, a struja motora je još uvek bliska polaznoj (slika 4 a)), što može da termički ugrozi motor. Stoga, zaštita šalje signal za isključenje prekidača motora, čime on gubi izvor napajanja i počinje da usporava.



Slika 4. Simulacija prorade zaštite od predugog starta motora

3.2. Zaštita transformatora 6/0,4 kV/kV

Za zaštitu transformatora 6/0,4 kV/kV se koristi mikroprocesorski relej ABB REF610 0. Spisak funkcija koje su primenjene u konkretnom slučaju dat je u tabeli 2:

Tabela 2: Zaštita transformatorskih izvoda

Zaštitni uređaj	Zaštitne funkcije
ABB REF610	Prekostrujna zaštita (tri stepena)
	Neusmerena zemljospojna zaštita (dvostepena)
	Zaštita od prekida faznog provodnika
	Zaštita od otkaza prekidača

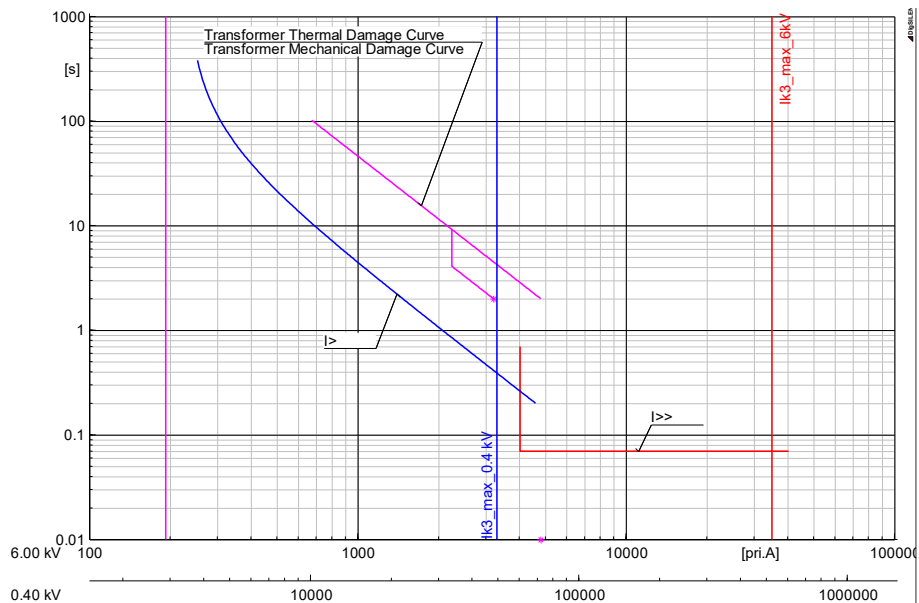
Treba napomenuti, da model releja u softveru ne podržava neke funkcionalnosti koje postoje u stvarnom uređaju kao što su zaštita od otkaza prekidača, nadzor sekundarnih kola i signalizacija preopterećenja [5].

Prekostrujne zaštite transformatora se podešavaju tako se obezbedi brzo isključenje struja kratkih spojeva, maksimalno iskoriste mogućnosti opterećenja transformatora, a takođe da se ostvari koordinacija sa zaštitama koje postoje na razvodu 0,4 kV. U konkretnom primeru u logici isključenja prekidača transformatorskog izvoda primenjuju se dva stepena prekostrujne zaštite, jedan sa inverznom karakteristikom delovanja (prekostrujna zaštita), a drugi sa definisanim vremenom reagovanja (kratkospojna zaštita). Kao kriterijum za podešenje ovih funkcija može se koristiti podatak o nominalnoj struji transformatora i maksimalnoj struji kratkog spoja na niskonaponskim sabirnicama. Podešenje prekostrujne zaštite izabrano je tako da se ne pobuđuje pri nominalnom opterećenju transformatora, tip krive se može izabrati tako da što bolje prati karakteristiku oštećenja transformatora, a vremenskim podešenjem se obezbeđuje da zaštita bude koordinisana sa zaštitama na niskonaponskoj strani transformatora. Podešenja kratkospojne zaštite je potrebno izabrati tako da zaštita maksimalno brzo eliminiše kratke spojeve na izvodnom kablu 6 kV i samom transformatoru (bez vremenskog zatezanja), a da ne detektuje kvarove na sabirnicama 0,4 kV transformatora, kako bi i ova funkcija bila koordinisana sa zaštitama na 0,4 kV razvodu transformatora. Prema navedenim kriterijumima, koji su u skladu sa [6], ove zaštitne funkcije se mogu podesiti kao na slici 5:

Basic Data	IEC Symbol: I> ANSI Symbol: 51	OK
Tripping Times	Measure Type: Phase Current (3ph)	Cancel
Blocking	Name: 51P	Relay
Description	Type: ABB\REF 610\REF 610\51P	Calculate
	<input type="checkbox"/> Out of Service	
	Tripping Direction: None	
	Characteristic: IEC Extremely Inverse	
	Current Setting: 1.15 p.u. 1.15 sec.A 230. pri.A	
	Time Dial: 1.05 Reset Delay: 0.05 s	
Basic Data	IEC Symbol: I>> ANSI Symbol: 50	OK
Tripping Times	Measure Type: Phase Current (3ph)	Cancel
Blocking	Name: 50P1	Relay
Description	Type: ABB\REF 610\REF 610\50P1	
	<input type="checkbox"/> Out of Service	
	Tripping Direction: None	
	Pickup Current: 20.16 p.u. 20.16 sec.A 4032. pri.A	
	Time Setting: 0.04 s	
	Total Time: 0.07 s	

Slika 5. Podešenje parametara prekostrujne i kratkospojne zaštite transformatora 6/0,4 kV/kV

Grafički prikaz jednog koraka u parametrisanju prekostrujnih zaštita transformatora, uz prikaz krivih oštećenja transformatora (prema [6]), nominalne struje transformatora i struje kratkog spoja na sabirnicama 6 kV i 0,4 kV dat je na slici 6:



Slika 6. Podešenje prekostrujne i kratkospojne zaštite transformatora 6/0,4 kV/kV

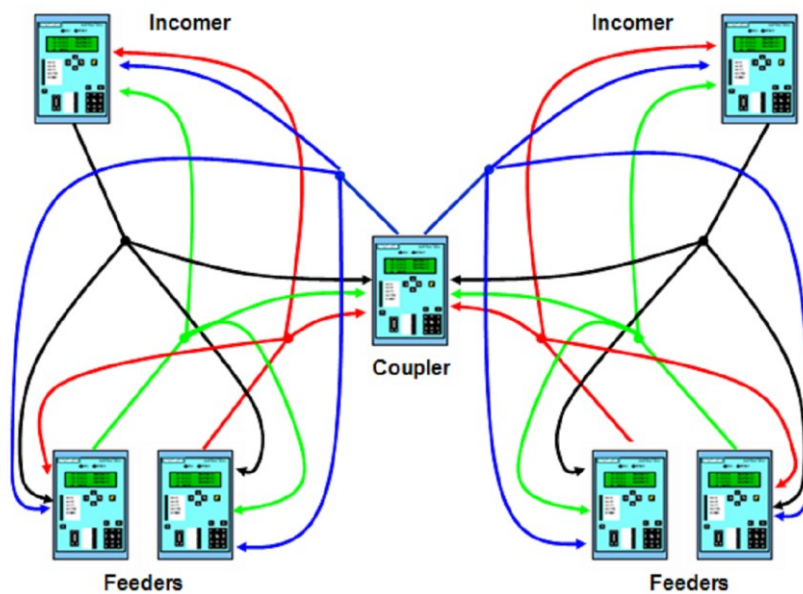
3.3. Zaštita u spojnom polju

Za zaštitu spojnog polja analiziranog podrazvoda koristi se mikroprocesorski relej ABB REF610. Akitvirane zaštitne funkcije koje su primenjene u konkretnom slučaju date su u tabeli 3:

Tabela 3: Zaštita transformatorskih izvoda

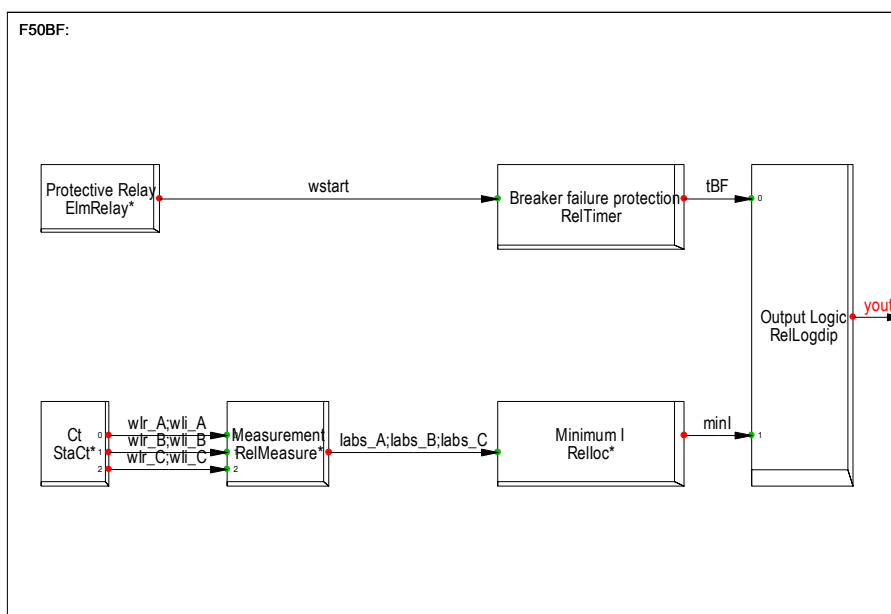
Zaštitni uređaj	Zaštitne funkcije
ABB REF610	Prekostrujna zaštita (tri stepena)
	Neusmerena zemljospojna zaštita
	Uprošćena zaštita sabirnica
	Zaštita od otkaza prekidača

Kao što je ranije napomenuto, zaštita od otkaza prekidača (*eng. CBFP*) nije modelovana u okviru predefinisnog modela ABB REF610. Kako bi se prevazišao ovaj nedostatak, za potrebe modelovanja ove zaštitne funkcije u spojnom polju podrazvoda iskorišćen je poseban model zaštitnog uređaja koji ima samo funkciju zaštite od otkaza prekidača [7]. Šema veze releja je [8] ilustrovana na slici 7:



Slika 7. Šema veze zaštite od otkaza prekidača

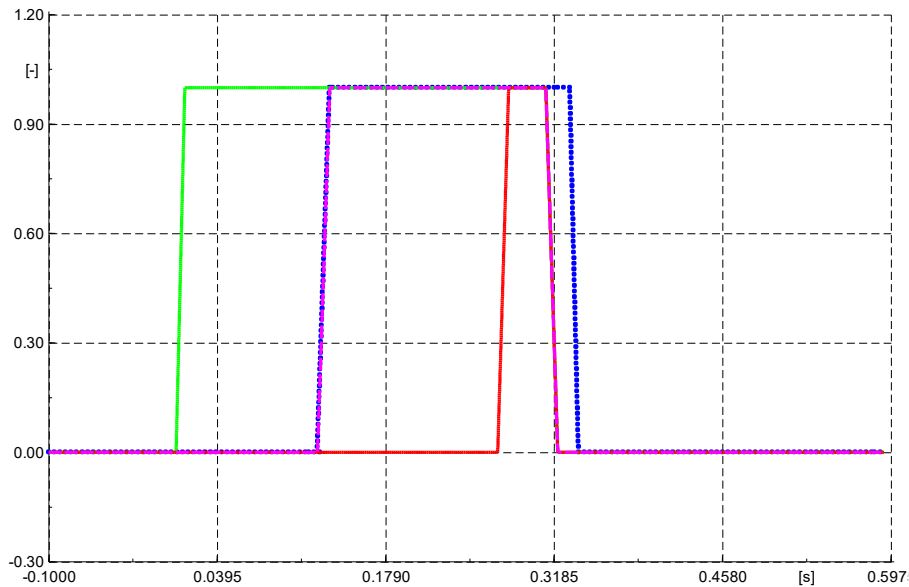
Model releja za zaštite od otkaza prekidača u spojnom polju i prikazan je na slici 8:



Slika 8. DIGSILENT model zaštite od otkaza prekidača

Zaštita od otkaza prekidača funkcioniše tako što u slučaju postojanja signala za isključenje prekidača i struje iznad podešenog praga detekcije u dovoljno dugom vremenskom intervalu, funkcija proglašava otkaz prekidača [9]. U skladu sa logikom rada prikazanoj na slici 7, ova funkcija šalje signal za isključenje svim ćelijama na razvodu (i dovodnim i izvodnim).

Na slici 9 prikazani su signali pri pojavi kvara na jednoj sekciji sabirnica i otkazu prekidača u spojnom polju:



Slika 9. Signali pri radu zaštite od otkaza prekidača

Sa slike 9 se vidi da se pri pojavi kratkog spoja pobuđuje prekostrujni član koji detektuje prisustvo struje kroz prekidač (zeleni linija), uprosćena zaštita sabirnica izdaje signal isključenja posle podešenog vremena reagovanja od 100 ms (plava linija) istovremeno startujući tajmer zaštite od otkaza prekidača (ljubičasta linija). Pošto ne dolazi do isključenja prekidača, struja nastavlja da teče i drži pobuđen prekostrujni član i signal za isključenje, po isteku podešenog vremena prorade zaštite od otkaza prekidača od 150 ms zaštita proglašava otkaz prekidača i šalje odgovarajuće signale za isključenje svim prekidačima na razvodu (crvena kriva). Nakon vremena reagovanja prekidača u dovodu (oko 60 ms), nastupa isključenje celog razvoda i svi signali zaštite se resetuju.

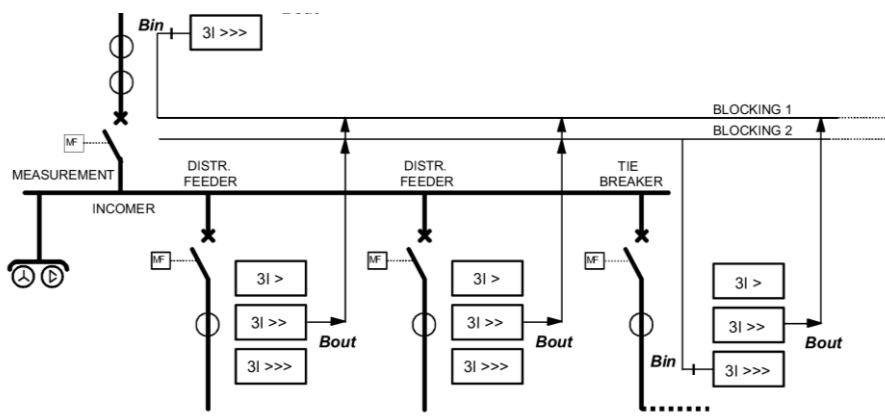
3.4. Zaštita sabirnica 6 kV (zaštita u dovodnim poljima razvoda)

Za zaštitu u dovodnim polja analiziranog podrazvoda koristi se mikroprocesorski rele *ABB REF610*. Akitvirane zaštitne funkcije koje su primenjene u konkretnom slučaju date su u tabeli 4:

Tabela 4: Zaštita transformatorskih izvoda

Zaštitni uređaj	Zaštitne funkcije
<i>ABB REF610</i>	Prekostrujna zaštita (tri stepena)
	Neusmerena zemljospojna zaštita
	Uprošćena zaštita sabirnica
	Zaštita od otkaza prekidača

U okviru zaštitnih terminala koji se nalaze u dovodnim poljima na sekcije razvoda realizovana je uprošćena zaštita sabirnica (UZS). Zaštita je realizovana kao prekostrujna zaštita, čiji uslov prorade je pobuda prekostrujnog člana i nepostojanje signala blokade iz releja u izvodnim ćelijama i releja u spojnom polju. Princip rada ove zaštite [10] ilustrovan je na slici slici 10:

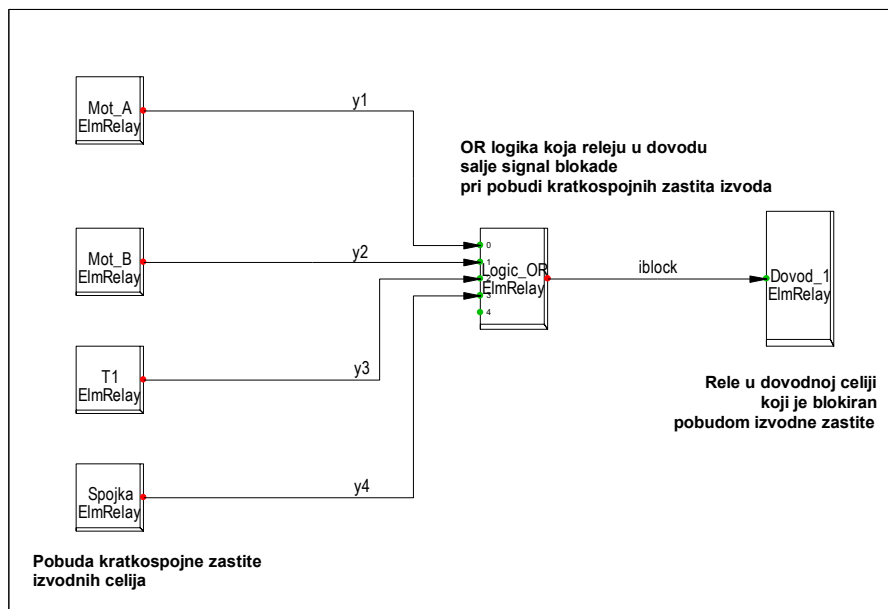


Slika 10. Princip rada uprošćene zaštite sabirnica

Prorada UZS mora da ima neko vremensko odlaganje, kako bi se ostavilo dovoljno vremena zaštitama u izvodnim ćelijama da pri kvaru koji nije na samim sabirnicama blokiraju zaštite u dovodima na razvod. Za blokiranje prorade ove zaštite koriste se brze prekostrujne (kratkospojne) zaštite u izvodnim ćelijama i spojnom polju. U slučaju pojave kratkog spoja na izvodu, zaštita istovremeno sa izdavanjem signala za isključenje prekidača na izvodu pogođenom kvarom, generiše signal blokade prorade kratkospojnim zaštitama u dovodnim poljima i spojnom polju. U slučaju pojave kvara na sabirnicama, ukoliko je spojno polje otvoreno ne generiše se signal blokade niti od jedne zaštite, te zaštita u dovodnoj ćeliji, tj. UZS eliminiše kvar. Pri pojavi kratkog spoja na sekciji koja se

napaja preko zatvorenog spojnog polja, zaštita u spojnom polju će generisati signal za isključenje prekidača spojnog polja, istovremeno blokirajući kratkospojnu zaštitu u dovodu na drugu sekciju sabirnica, te će sekcija koja nije pogođena kvarom sačuvati kontinuitet napajanja. Opisana logika rada je u skladu sa relevantnim standardom [11].

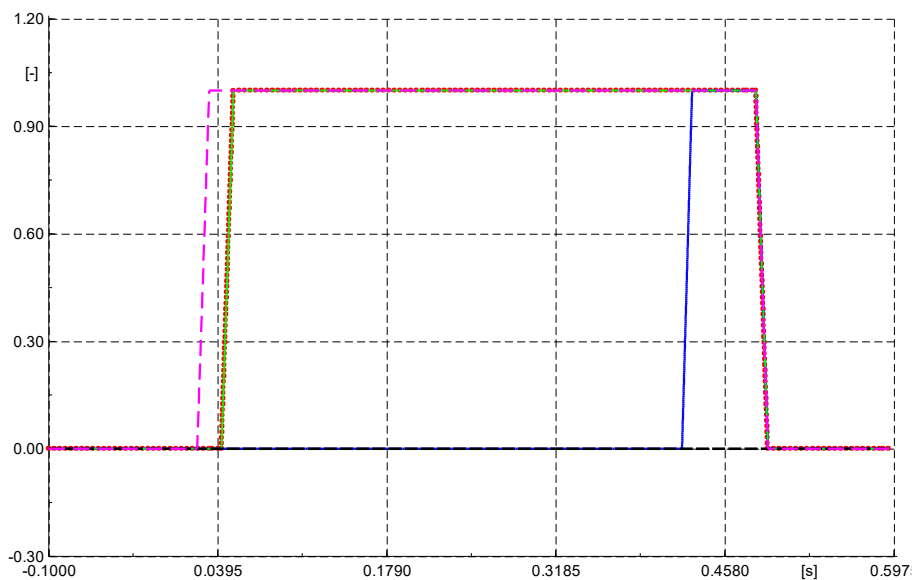
Na osnovu logike sa slike 10, kreiran je model releja za potrebe modelovanja uprošćene zaštite sabirnica i prikazan je na slici 11:



Slika 11. DlgSILENT model uprošćene zaštite sabirnica

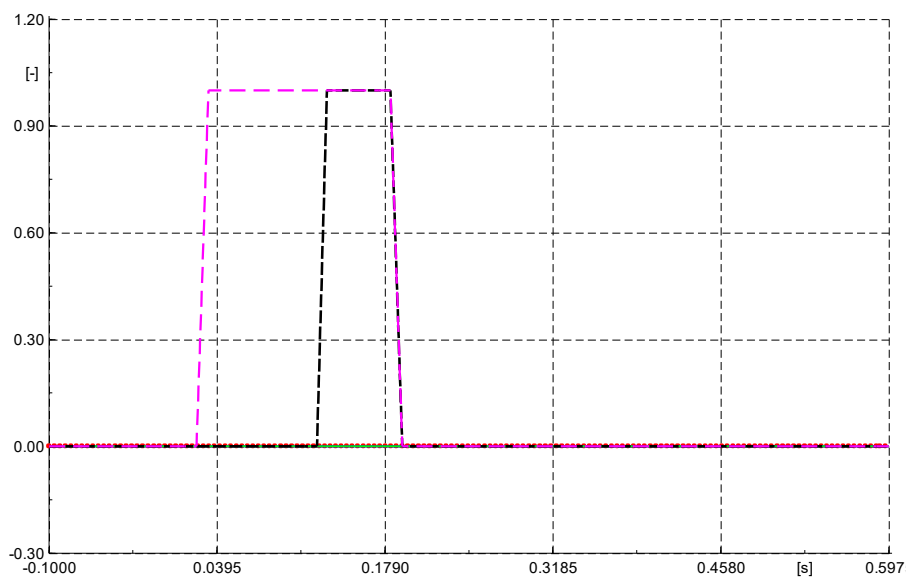
Na slikama 12 i 13 prikazani su signali blokade i prorade koji se javljaju pri radu uprošćene zaštite sabirnica.

Na slici 12 je prikazan slučaj kvara na izvodnom kablu, gde se može uočiti signal pobude UZS (ljubičasta linija), koja startuje tajmer UZS podešen na 100 ms. Pobuda zaštite na izvodu (crvena linija) generiše signal blokade UZS (zelena linija), te će u slučaju da zaštita na izvodu nije otklonila kvar niti je proradila zaštita od otkaza prekidača izvodne ćelije, kvar biti isključen od strane nezavisne prekostrujne zaštite u dovodnoj ćeliji (plava linija) koja je vremenski koordinisana sa zaštitama na izvodnim ćelijama i deluje sa vremenskim odlaganjem od 400 ms.



Slika 12. Signali pri radu UZS (kvar na izvodnom kablju)

Na slici 13 je prikazan rad UZS slučaja kvara na sabirnicama, gde se može uočiti da dolazi do pobude prekostrujnog člana UZS (ljubičasta linija) i da ne postoji signal blokade od strane izvodnih zaštita, te UZS i deluje sa vremenskim odlaganjem od 100 ms (crna linija).



Slika 13. Signali pri radu UZS (kvar na sabirnicama)

4. Zaključci

DlgSILENT PowerFactory je softverski alat koji omogućava modelovanje elektroenergetskih sistema za potrebe vršenja različitih analiza, uključujući i modelovanje, simulaciju i analizu rada sistema relejne zaštite industrijskih postrojenja.

U radu je dat osvrt na konfiguraciju industrijske mreže i model iste koji služi kao podloga za model sistema relejne zaštite.

U radu su prikazane neke mogućnosti koje softver pruža za modelovanje sistema relejne zaštite industrijske mreže. Prikazan je algoritam modelovanja uređaja zaštite, uz prikaz karakteristika izabranih zaštitnih funkcija na pozicijama od interesa i dat je opis rada sistema zaštite u slučaju pojave zadatih poremećaja. Za izabrane ćelije u podrazvodu, detaljno je prikazana logika rada pojedinih zaštitnih funkcija, kako bi se ilustrovala funkcionalnost modela. Takođe, za potrebe analize složenih relejnih sistema kreirani su modeli releja potrebni za simulaciju rada uprošćene zaštite sabirnica. Prikazan je način rada zaštite od predugog starta motora, kao i prekostrujne i kratkospojne zaštite transformatora 6/0,4 kV/kV. Potom je modelovana zaštita od otkaza prekidača u spojnog polju podrazvoda, kao i uprošćena zaštita sabirnica. Prikazani su i signali od interesa koji se generišu u sistemu zaštite pri pojavi zadatih poremećaja u mreži i utvrđen je pravilan odziv sistema zaštite.

Vrednosti podešenja zaštitnih funkcija izabrane su uvažavajući karakteristike šticećenih elemenata i mogućnosti izabranih zaštitnih uređaja, uz očuvanje selektivnosti sistema zaštite.

Na osnovu prikazanog može se zaključiti da je DlgSILENT PowerFactory pogodan za modelovanje, simulaciju i analizu rada sistema relejne zaštite elektroenergetskih mreža industrijskih postrojenja, što je ilustrovano na primeru sistema relejne zaštite jednog realnog postrojenja, baziranog na reljima ABB REM 610 i ABB REF 610, koji uključuje i složene funkcije zaštite koje koriste sistem komunikacije između zaštitnih uređaja.

Literatura

- [1] DlgSILENT PowerFactory, DlgSILENT GmbH, Germany, www.digsilent.com
- [2] DlgSILENT PowerFactory, *Relay model description, ABB REM 610 Version: 001*, DlgSILENT GmbH, Germany, 2013.
- [3] ABB Oy Distribution Automation, Motor Protection Relay REM610 Technical Reference Manual 1MRS752263-MUM Issued: 25.11.2003 Version: H/18.11.2011, 2003.
- [4] *IEEE Guide for AC Motor Protection*, IEEE Std C37.96-2000.

- [5] DlgSILENT PowerFactory, *Relay model description, ABB REF 610 Version: 003*, DlgSILENT GmbH, Germany, 2015.
ABB Oy Distribution Automation, Feeder Protection Relay REF610 Technical Reference Manual 1MRS755310 Issued: 05.10.2004 Version: G/20.05.2009, 2004.
- [6] *IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers*, IEEE Std C37.91-2000
- [7] DlgSILENT PowerFactory, *Relay model description, DlgSILENT F50BF Breaker failure Generic Relay, Version: 001*, DlgSILENT GmbH, Germany, 2013.
- [8] Dylan L. P. Jenkins, *Busbar protection based on overcurrent reverse interlocking principle and peer to peer relay communication*, Project Report, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand
- [9] *IEEE Guide For Breaker Failure Protection of Power Circuit Breakers*, IEEE Std C37.119-2005
- [10] ABB Oy Distribution Automation, *Distribution Automation Handbook, Section 8.2 Relay Coordination, 1MRS757285*
- [11] *IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power System Buses*, IEEE Std C37.234-2009

Abstract: This paper presents modeling of industrial network relay protection system using DlgSILENT PowerFactory software. The basis for the model of protection system is a model of a single substation in an industrial network. The paper presents the procedure for modeling of protective devices of 6 kV asynchronous motors, 6/0,4 kV/kV transformers as well as protection in the bus coupler and busbar protection. Protective relay system response for the simulated disturbances is shown in the paper.

Keywords: relay protection, DlgSILENT PowerFactory, industrial network

Application of DlgSILENT POWERFACTORY software for modeling of industrial network relay protection system

Nikola Sučević, Dejan Milošević

Rad primljen u uredništvo: 03.11.2016. godine.

Rad prihvaćen: 06.12.2016. godine.

