

VERIFIKACIJA PODEŠENJA ZAŠTITNOG UREĐAJA U SREDNENAPONSKOM DOVODNOM  
POLJU KORIŠĆENJEM DIGITALNOG SIMULATORA SISTEMA U REALNOM VREMENUTHE MPCU SETTINGS VERIFICATION FOR IMPLEMENTATION IN MV INCOMER BAY USING  
REAL-TIME HARDWARE-IN-THE-LOOP TESTING

Miljana TODOROVIĆ, Saturn Electric DOO, Srbija  
Marko MEDIĆ, Saturn Electric DOO, Srbija  
Milorad ZAKIĆ, Saturn Electric DOO, Srbija  
Adrien GENIĆ, Tajfun HIL DOO, Srbija

## KRATAK SADRŽAJ

Konvencionalan način za ispitivanje performansi zaštitnih uređaja jeste analiza odziva na injektiranje struja i napona različitih vrednosti pomoću ispitnih kofera. Testiranje sa uređajem u petlji, ili kako se češće naziva RT-HIL (eng. *Real-Time Hardware-In-The-Loop*) način testiranja zaštitnog uređaja, koristi digitalni simulator modela elektroenergetske mreže u realnom vremenu na koji je povezan realan zaštitni uređaj, čime se omogućava njegovo testiranje za različite realne događaje u mreži.

U radu je predstavljena verifikacija podešenja zaštitnog uređaja SEL-451 u 10 kV transformatorskom polju u TS 35/10 kV/kV pomenutom metodologijom testiranja. Model mreže je razvijen u modulu Schematic Editor softverskog paketa *Typhoon Control Center* i simulacije su izvršene korišćenjem HIL 602+ simulatora u realnom vremenu.

Kako bi se ispitalo podešenje realnog zaštitnog uređaja za ugradnju u 10 kV dovodno polje, modelovana su dva prekostrujna releja, od kojih jedan na 35 kV strani transformatora, a drugi u 10 kV izvodnom polju. Zatim su simulirana dva slučaja. Prvi se odnosi na simulaciju kvara na izvodu i proveru rada uprošćene zaštite sabirnica realizovane u zaštitnom uređaju SEL-451. Signal blokade zaštite sabirnica koji se generiše na osnovu uslova koji su definisani u modelu prekostrujnog releja izvoda se šalje sa HIL 602+ simulatora ka SEL-451 uređaju preko IEC 61850 GOOSE poruke. Druga provera se odnosi na rad zaštite od otkaza prekidača u SEL-451 uređaju. U tom slučaju je simuliran kvar na 10 kV sabirnicama, kao i zaglavljani polovi prekidača. Signal detekcije otkaza prekidača koji u tom slučaju generiše zaštitni uređaj SEL-451 se šalje ka HIL 602+ simulatoru korišćenjem IEC 61850 GOOSE poruke i uvodi u logiku isključenja 35 kV prekidača zajedno sa uslovima dobijenim iz modela prekostrujnog releja na 35 kV strani transformatora.

Prilikom simulacije oba slučaja je dat prikaz snimaka događaja iz HIL SCADA softvera, kao i snimaka istih događaja iz zaštitnog uređaja SEL-451. Osim što je pokazano da je podešenje SEL-451 ispravno, ukazano je na velike mogućnosti HIL okruženja za testiranje.

**Ključne reči:** RT-HIL testiranje releja; Uprošćena zaštita sabirnica, Zaštita od otkaza prekidača, GOOSE poruke, Verifikacija podešenja releja

## ABSTRACT

A conventional way to test the performance of protective devices is to analyze the response to different voltage and current injections using the relay test set. Real-Time Hardware-In-The-Loop (RT-HIL) testing of protection device uses a real-time digital simulator (RTDS) of a power system. Protective relays are then physically wired to RTDS, and their behavior is evaluated for various fault cases.

The paper presents SEL-451 relay settings verification using RT-HIL testing. Relay is implemented to protect 10 kV incomer bay. The power system is modeled in HIL Schematic Editor module and executed in real-time using the HIL 602+ real-time simulator.

In order to test 10 kV incomer relay SEL-451 settings, two overcurrent relays are modeled. The first one positioned on the 35 kV side of the transformer and the other one to protect 10 kV feeders. Then, two cases are simulated. The first one is the feeder fault simulation. During the first simulation, feeder overcurrent relay generates a busbar protection blocking signal during the fault and send it from the HIL 602+ simulator to the SEL-451 relay via IEC 61850 GOOSE message. The second simulation relates to the operation of the breaker failure protection in the SEL-451 relay. In this case, 10 kV bus fault and 10 kV incomer breaker failure are simulated. The breaker failure detection signal generated by the SEL-451 relay is sent to the HIL 602+ simulator

using the IEC 61850 GOOSE message. The signal is processed together with a 35 kV relay current detection a signal to form signal for a 35 kV circuit breaker trip.

Event recordings from the HIL SCADA software, as well as the recordings of the same events from the SEL-451 relay are shown for both simulated cases. The relay settings verification is performed successfully and the advantages of the HIL testing environment are pointed out.

**Key words:** RT-HIL relay tests, Busbar Blocking Scheme, Breaker Failure Protection, GOOSE, Relay Settings Verification

Kontakt informacije o autorima:

[miljana.todorovic@saturnelectric-sr.com](mailto:miljana.todorovic@saturnelectric-sr.com)

[marko.medic@saturnelectric-sr.com](mailto:marko.medic@saturnelectric-sr.com)

[milorad.zakic@saturnelectric-sr.com](mailto:milorad.zakic@saturnelectric-sr.com)

[adrien@typhoon-hil.com](mailto:adrien@typhoon-hil.com)

## UVOD

U radu će biti prezentovani koraci za verifikaciju podešenja prekestujne zaštite i zaštite od otkaza prekidača zaštitnog uređaja dovodnog sredjenaponskog polja testiranjem uređaja u petlji, pomoću digitalnog simulatora sistema u realnom vremenu. Ovakvi testovi imaju višestruke primene. Mogu se koristiti u fabrikama za ispitivanje performansi novih modela releja, za provere različitih realnih aplikacija, kao i u edukativne svrhe. U radu je pokazan primer na koji način bi se verifikovala podešenja zaštitnog uređaja pomenutom metodologijom, pre puštanja u rad uređaja.

## PRINCIP TESTIRANJA U REALNOM VREMENU

U ovom poglavlju predstavljene su metodologije testiranja u realnom vremenu sa fokusom na upotrebu simulatora koji rade u realnom vremenu. U drugom potpoglavlju opisan je simulator korišćen u predmetnom radu.

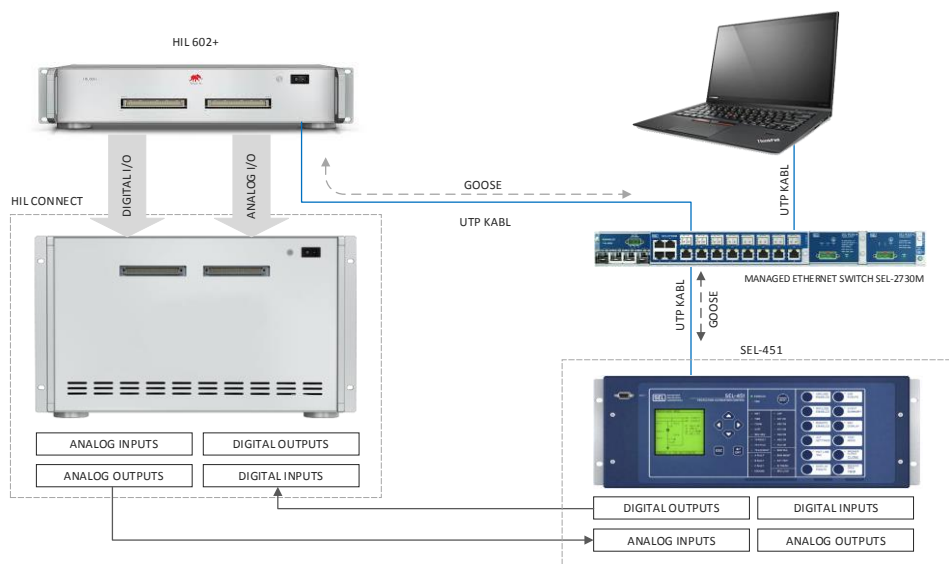
### Metodologija testiranja u realnom vremenu

Smatra se da uređaj koji je podvrgnut testiranju se testira u realnom vremenu ako je sam uređaj nepromenjen u odnosu na krajnju primenu. Pod ovu definiciju spada širok spektar metodologija kao što su: testiranje uređaja na terenu, u realnom sistemu, testiranje uređaja u laboratoriji koja verno predstavlja celokupan sistem, testiranje uređaja koristeći analogne ili digitalne simulatore koji rade u realnom vremenu. Uobičajeno je da se pod testiranjem u realnom vremenu misli na metodologiju korišćenja digitalnih simulatora koji rade u realnom vremenu pri procesu testiranja.

Prilikom testiranja digitalnim simulatorom, uređaj koji se testira, npr. zaštitni uređaj, se povezuje na simulator na isti način na koji se povezuje na realni sistem: preko digitalnih i analognih signala i komunikacionih protokola. Deo elektroenergetske mreže, koji je potreban kako bi se zaštitni uređaj testirao, simulira se unutar simulatora u realnom vremenu. Ovakav sistem, gde imamo pravi, fizički uređaj povezan na digitalni simulator naziva se uređaj u petlji, češći naziv je HIL (eng. *Hardware In the Loop*). HIL sistemi mogu da se podele na one u kojima postoji značajan protok energije između simulatora i uređaja koji se testira (PHIL, eng. *Power Hardware In the Loop*) i one u kojima postoji samo protok informacija u obliku signala (SHIL eng. *Signal Hardware In the Loop*). SHIL se najčešće odnosi na slučaj kada je uređaj koji se testira kontrolna jedinica, relej i sl. te se mnogo češće koristi izraz CHIL (eng. *Controller Hardware In the Loop*), (1).

CHIL metodologija se zasniva na tome da se mozak sistema (deo sistema sa složenim programom koji je potrebno testirati) zadrži u celosti, a da se ostatak (sistemi i uređaji kroz koje protiče značajna energija kao sto su distributivna mreža, rastavljači, transformatori i sl.) modeluje i simulira u digitalnom simulatoru.

Sistem koji je primenjen u radu za testiranje zaštitnog uređaja koristeći CHIL metodologiju je ilustrovan na SL 1.



SL 1 – ILUSTRACIJA TESTIRANJA ZAŠTITNOG UREĐAJA CHIL METODOLOGIJOM

### HIL602 simulator i prpratni softver

U predmetnom radu korišćen je HIL602+ simulator. Simulator u realnom vremenu mora da poseduje određen broj tehničkih karakteristika i mogućnosti kako bi se relej mogao povezati na isti način kao u pravi sistem te kako sam relej ne bi primetio nikakvu razliku koja bi mogla uticati na njegov rad.

Uz sam simulator korišćen je i softverski paket *Typhoon Control Center* koji uključuje:

- Schematic editor – alat za grafičko modelovanje sistema koji uključuje i biblioteku komponenata
- SCADA – grafički alat za interakciju i upravljanje samim radom simulatora i modela tokom rada simulacije
- Test IDE – paket softvera koji omogućuje potpunu automatizaciju testiranja

Softverski paket izvršava tranzijentnu simulaciju električne mreže u realnom vremenu. Rezultati simulacije su vremenski oblici svih napona i struja u mreži na osnovu kojih se dalje proračunavaju snage i efektivne vrednosti, takođe u realnom vremenu. Električna mreža predstavljena je jednačinama stanja (eng. *State Space Representation*). Prekidači snage su modelovani kao električno idealni prekidači. Svaka permutacija prekidača u kolu predstavljena je jednim sistemom jednačina stanja. Celokupno električno kolo predstavljeno je velikim brojem jednačina stanja. Taj broj jednak je  $2^i$ , gde je  $i$  ukupan broj prekidača u kolu, (2).

### FORMIRANJE MODELA MREŽE

Kako bi se proverila podešenja zaštitnog uređaja SEL-451 za zaštitu dovodnog 10 kV polja u transformatorskoj stanici 35/10 kV/kV metodom testiranja pomoću digitalnog simulatora sistema u realnom vremenu, formiran je model dela EES-a u modulu Schematic Editor, (3).

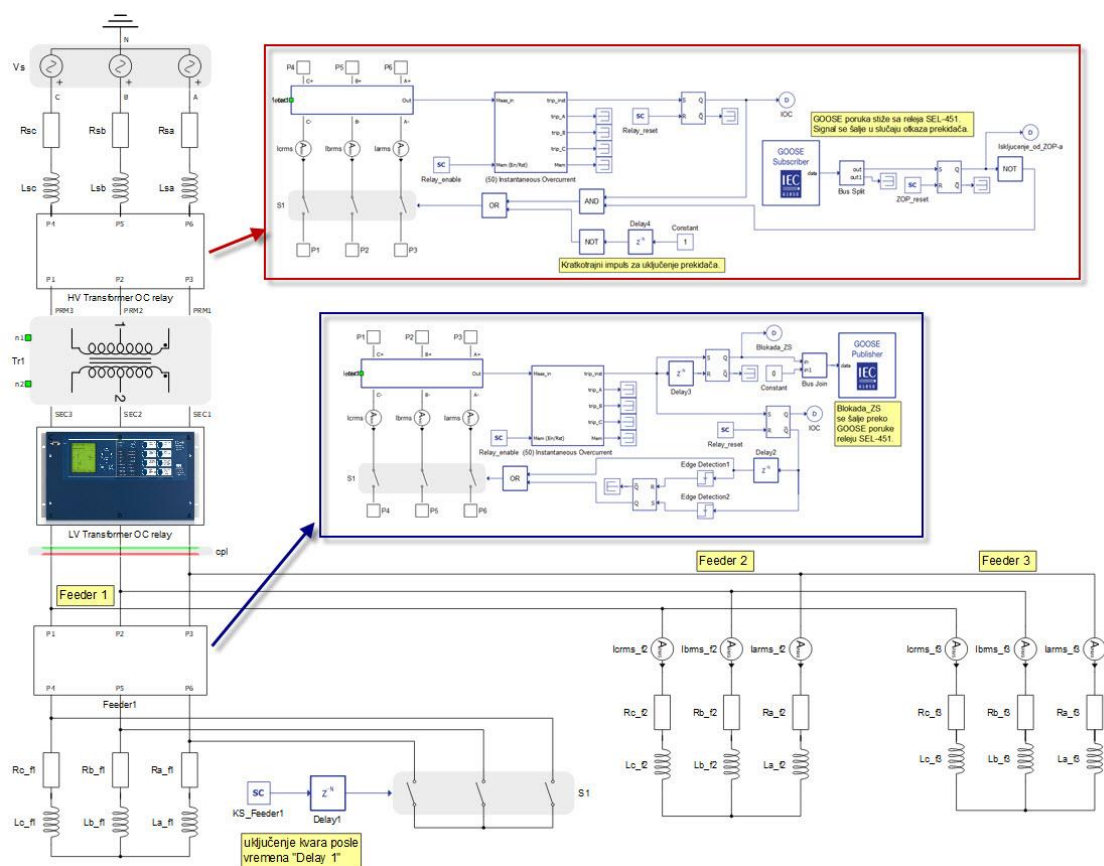
U modelu postoje tri zaštitna uređaja. Prvi, prekostrujni zaštitni uređaj, se nalazi na 35 kV strani transformatora i modelovan je u okviru modula Schematic Editor. Drugi uređaj se nalazi na 10 kV strani transformatora i na njegovo mesto je povezan zaštitni uređaj SEL-451. Na jednom od 10 kV izvoda se takođe nalazi modelovan prekostrujni zaštitni uređaj.

Za praćenje odziva sistema je korišćen SCADA modul, gde je omogućeno zadavanje položaja prekidača i vrednosti bitova koji su definisani kao SCADA ulazi. Opisan model test mreže, modelovane u modulu Schematic Editor, je prikazan na SL 2.

Veze unutar bloka „Feeder 1“ su prikazane na SL 2 unutar plavog pravougaonika. Za potrebu modelovanja prekostrujnog izvodnog releja je iskorišćen blok „Instantaneous Overcurrent“. Signal isključenja prekostrujnog releja se dalje koristi za isključenje prekidača, kao i za formiranje signala blokade zaštite sabirnica.

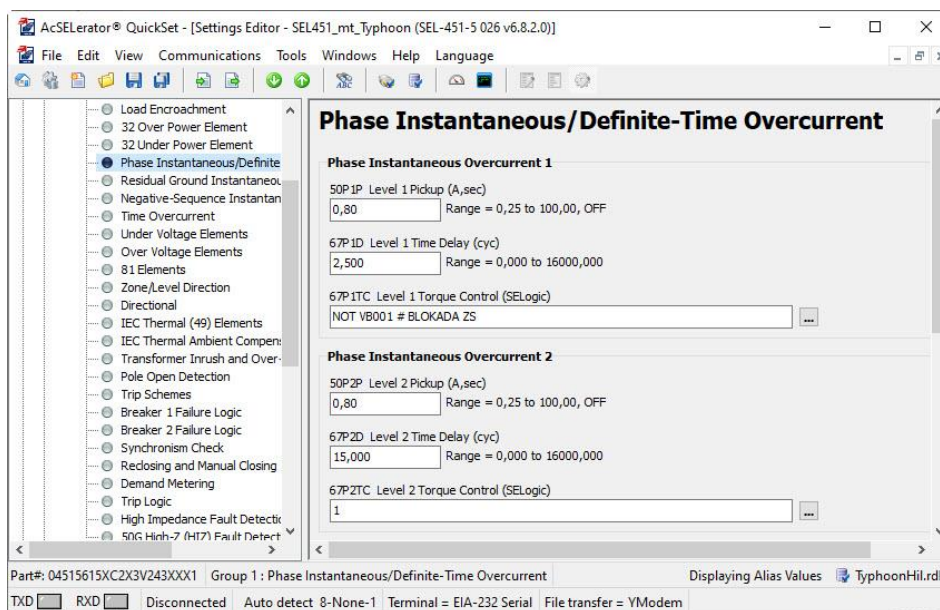
S obzirom da korišćeni model prekidača nema vreme odlaganja reagovanja, neophodno je bilo napraviti logiku koja će omogućiti da se prekidač isključi nakon nekog vremena od trenutka od kada je pobuđen signal za isključenje, u konkretnom slučaju nakon vremena podešenja elementa „Delay 2“. Vreme „Delay 2“ se podešava na zbir vremena odlaganja delovanja izvršnog releja, vreme pobuđivanja isključnog kalema prekidača snage,

vreme isključenja glavnih kontakata prekidača snage i vreme gašenja električnog luka u prekidaču snage, što iznosi oko 120 ms.



## SL 2 – JEDNOPOLNA ŠEMA TEST MREŽE MODELOVANA U MODULU SCHEMATIC EDITOR

Sa druge strane, koristeći signal isključenja prekostrujnog releja, formira se signal blokade zaštite sabirnica. Signal je onog trajanja koliko je prisutna pobuda prekostrujnog elementa izvoda, što je modelovano pomoću „Delay 3“ elementa, čije je podešenje takođe 120 ms. Tako formiran signal blokade zaštite sabirnica se upisuje u IEC 61850 GOOSE poruku (kao VB001), koja se preko mreže šalje ka zaštitnom uređaju SEL-451. Za vreme trajanja signala, rad prekostujne zaštite u zaštitnom uređaju je blokiran. Blokada rada prekostrujne zaštite je realizovana pomoću „67P1TC Level 1 Torque Control“ jednačine na način prikazan na SL 3, (4).



## SL 3 – PODEŠENJE PREKOSTRUJNE ZAŠTITE UREĐAJA SEL-451 U AcSElerator QUICKSET PROGRAMU

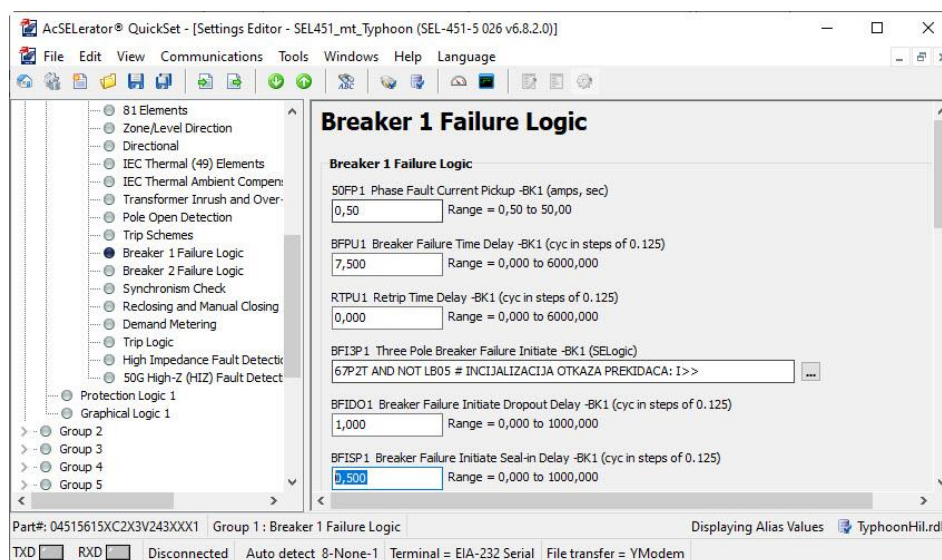
Kako je na poziciji 10 kV dovoda sa 35/10 kV/kV transformatora predviđen zaštitni uređaj SEL-451, u okviru modula Schematic Editor je neophodno definisati struje koja će se, pomoću HIL 602+ uređaja i HIL Connect uređaja za pojačavanje signala, dovesti na strujne ulaze uređaja SEL-451. Modelovani strujni merni transformatori su prenosnog odnosa 300/5 A/A, a struje sa sekundara modelovanih SMT-a se u okviru modula HIL SCADA dodeljuju adekvatnim analognim izlazima, koje se kasnije preko HIL Connect pojačavača dovode na strujne ulaze uređaja SEL-451, (5), (6).

U releju su aktivirana dva stepena prekostrujne zaštite sa definisanim vremenom reagovanja. Podešenja prekostrujnih članova su određena na osnovu struje kratkog spoja sa uvažanim koeficijentom rezerve od 0,8, što u konkretnom slučaju primarno iznosi 2400 A, odnosno 40 A sekundarno. Kako je maksimalna struja na izlazu iz pojačavača 2 A, koeficijent pojačavača je podešen na 0,02 (kako bi se maksimalna trenutna vrednost očekivane sekundarne struje od oko 100 A preslikavala na 2 A na izlazu iz pojačavača). Stoga je podešenje prekostrujnog člana u zaštitnom uređaju 0,8 A sekundarno.

Vreme odlaganja delovanja prvog stepena prekostrujnog člana je 50 ms. Reagovanje zaštite je uslovljeno time da se nije pobudila nijedna kratkospojna zaštita na izvodima. Vreme odlaganja delovanja drugog stepena prekostrujnog člana je podešeno na 300 ms (što je vreme minimalnog koordinacionog intervala) i delovanje tog stepena je bezuslovno. Sva podešenja prekostrujnih zaštita su data na SL 3.

Unutar bloka „LV Transformer OC relay“, koji predstavlja zaštitni uređaj SEL-451 sa SL 2, se nalazi i prekidač snage, kome je signal za komandovanje binarni ulaz HIL 602+ uređaja. Isključenje 10 kV dovodnog prekidača u modelu je realizovano žičanom vezom binarnog izlaza zaštitne jedinice i uređaja HIL Connect, odnosno HIL 602+, na kome se simulira test model. Jednosmerni napon od 24 V je obezbeđen pomoću SEL-AMS (eng. *Adaptive Multichannel Source*) uređaja i taj napon se dovodi na binarni ulaz uređaja HIL 602+ preko binarnog izlaza releja, koji je konfigurisan tako da predstavlja signal za isključenje. Binarni ulaz se potom dovodi na SR Flip Flop kolo, sa čijeg  $\bar{Q}$  izlaza se signal prosleđuje ka prekidaču. Na R ulaz u SR Flip Flop kolu se dovodi reset releja.

U okviru SEL-451 zaštitnog uređaja je implementirana i zaštita od otkaza prekidača. Otkaz prekidača će se nakon zadatog kvara inicirati u HIL SCADA modulu forsiranim zatvaranjem kontakata prekidača 10 kV dovoda. Signal za zaštitu od otkaza prekidača se iz SEL-451 uređaja šalje IEC 61850 GOOSE porukom koja se preko mreže prosleđuje releju na 35 kV strani transformatora koji je modelovan u okviru modula Schematic Editor. Podešenja zaštite od otkaza prekidača unutar zaštitnog uređaja SEL-451 su prikazana na SL 4.



#### SL 4 – PODEŠAVANJE FUNKCIJE ZAŠTITE OD OTKAZA PREKIDAČA UREĐAJA SEL-451 u AcSElerator QUICKSET PROGRAMU

Uslov za isključenje prekidača na 35 kV strani transformatora je da relej meri struju veću od podešene (a podešava se na nominalnu ili nešto manju vrednost od nominalne) i da je prisutan signal zaštite od otkaza prekidača. Način na koji se to realizuje unutar bloka „HV Transformer OC relay“ je prikazan na SL 2 unutar crvenog pravougaonika.

## PODEŠAVANJE KOMUNIKACIJE

IEC 61850 je internacionalni standard koji definiše komunikacione protokole za uređaje koji se koriste prvenstveno u trafostanicama, ali i u drugim elektroenergetskim objektima. Neke od osnovnih ideja za uvođenje ovog standarda su bile definisanje jednog protokola koji bi se koristio na nivou čitave trafostanice, a koji bi omogućio sve podatke neophodne u trafostanici, kao i interoperabilnost između uređaja i sistema proizvedenih od strane različitih proizvođača.

U okviru IEC 61850 standarda definisano je više različitih tipova komunikacije i komunikacionih protokola:

- MMS (Manufacturing Messaging Specification) protokol
- GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) protokol
- Sampled Values

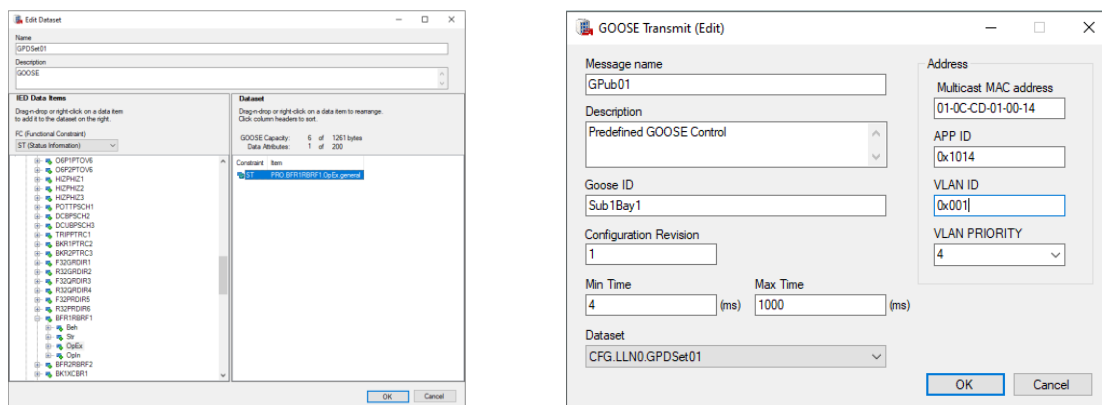
U predmetnom radu o verifikaciji podešenja zaštitnog uređaja SEL-451 je primenjen samo GOOSE protokol, stoga drugi protokoli opisani standardom IEC 61850 neće biti obrađeni.

IEC 61850 GOOSE je „peer-to-peer“ protokol, definisan standardom IEC 61850, (7). GOOSE protokol daje mogućnost za veoma brzu i pouzdanu razmenu statusa, komandi i merenja između uređaja. Zbog toga se prvenstveno koristi za brze poruke koje imaju funkcije zaštite (isključenja, blokade, itd).

Protokol šalje GOOSE poruke više puta povećavajući verovatnoću da ih drugi prime. Slanje GOOSE poruka je neprekidno. Kada je GOOSE jednom omogućen, uređaj će neprekidno slati GOOSE poruke bez obzira na sam sadržaj poruke, sve dok se slanje poruke ne onemogući.

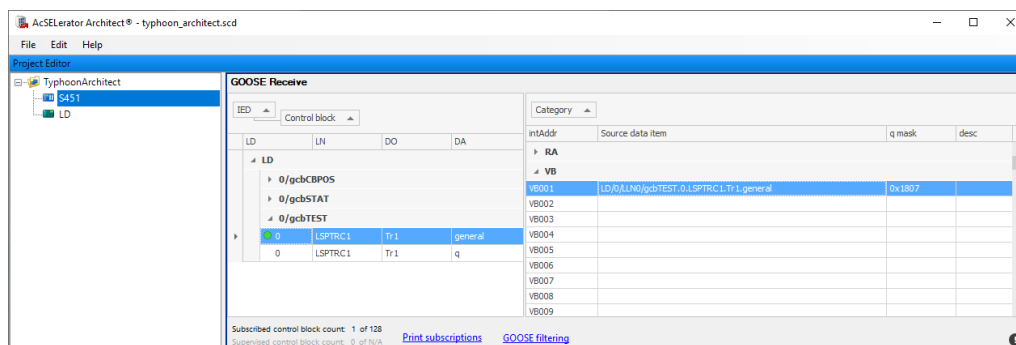
Svaka GOOSE poruka koja se pošalje sa nekog uređaja sadrži identifikaciju poruke (*GOOSE Control Block Reference*), informaciju o „APP ID“, kao i MAC adresu. Neki uređaji koji primaju GOOSE poruke koriste identifikaciju i MAC adresu za prepoznavanje i filtriranje dolazećih poruka.

Podešavanja IEC 61850 GOOSE poruka koje su korišćene u radu su urađena u softveru AcSELeRator Architect, izborom signala koji se šalju kao GOOSE poruke i podešavanjem osnovnih parametara poruke (ID, configuration revision, Min i Max time, VLAN...). U konkretnom radu GOOSE poruka koju relej šalje je signal zaštita od otkaza prekidača (BFR1RBRF1.OpEx.General).



SL 5 – PODEŠAVANJE GOOSE PORUKA KOJE SE ŠALJU U SEL ARCHITECT SOFTVERU

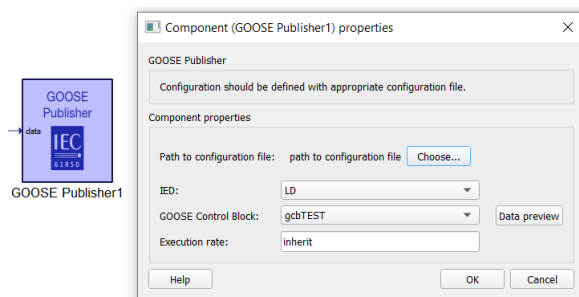
U istom softveru se podešavaju uređaji za primanje određene GOOSE poruke koje stižu sa drugih uređaja (u našem slučaju signal blokada zaštite sabirnica koji stiže sa uređaja HIL 602+).



SL 6 – PODEŠAVANJE UREĐAJA U SEL ARCHITECT SOFTVERU ZA DOBIJANJE GOOSE PORUKE

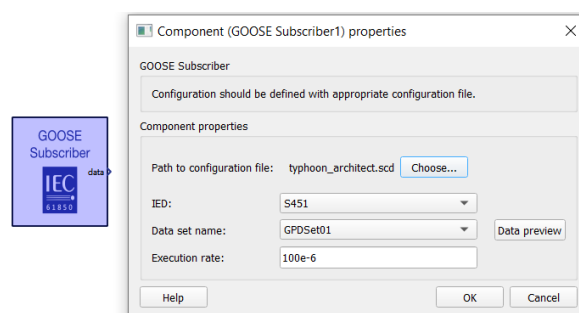
Podešavanje GOOSE komunikacije uređaja modelovanih u Schematic Editor modulu se obavlja uz pomoć dve komponente dostupne u biblioteci:

1. GOOSE Publisher komponenta, koja služi za podešavanje GOOSE poruka koje se šalju sa HIL uređaja:



## SL 7 – PODEŠAVANJE ODLAZNIH GOOSE PORUKA U SCHEMATIC EDITORU

2. GOOSE Subscriber komponenta, koja služi za podešavanje prijema GOOSE poruka.



## SL 8 – PODEŠAVANJE ODLAZNIH GOOSE PORUKA U SCHEMATIC EDITORU

### SIMULACIJA I PROVERA RADA UREĐAJA

Kako bi se proverila podešenja zaštitnog uređaja SEL-451 i njegov rad u modelovanom okruženju, biće prikazani rezultati dva karakteristična slučaja:

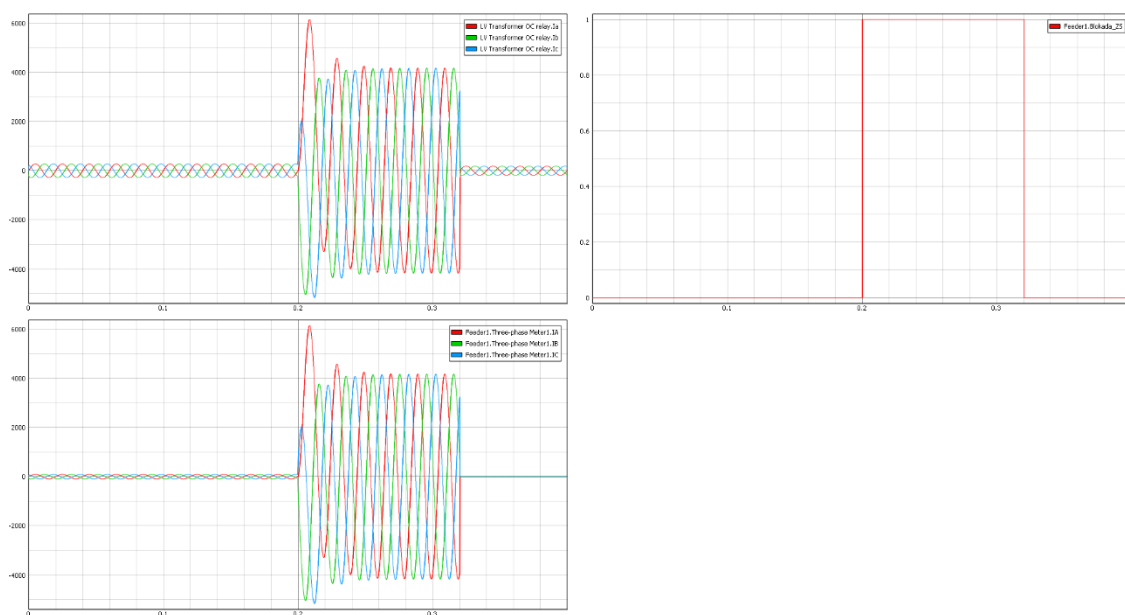
- Kratak spoj na izvodu broj 1, gde se očekuje rad izvodnog releja i prosleđivanje poruke za blokadu zaštite sabirnica do SEL-451 uređaja, na osnovu koje zaštitni uređaj, iako ima strujni uslov, ne sme da reaguje;
- Simulacija kratkog spoja na 10 kV sabirnicama uz dodatnu simulaciju zaglavljenog prekidača na 10 kV strani transformatora. U ovom slučaju se očekuje da relej SEL-451 ima uslove za isključenje, ali da s obzirom da su zaglavljeni polovi prekidača šalje poruku preko mreže modelovanom releju u 35 kV ćeliji, koji uz ispunjen strujni uslov za isključenje, isključuje 35 kV prekidač.

### Simulacija rada blokade zaštite sabirnica

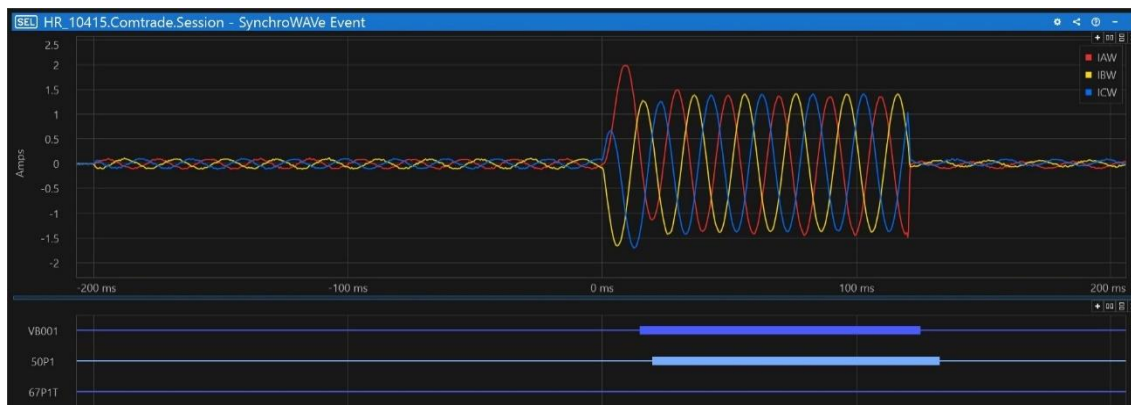
Rad blokade zaštite sabirnica je ispitan na sledeći način. U trenutku  $t=200\text{ ms}$  je zadat trolezni kratak spoj na prvom izvodu, neposredno posle prekidača. Očekivan sled događaja je da se neposredno nakon zadanog kvara (nakon vremena koje je neophodno za detekciju kvara) pobude i prekostrujne zaštite prvog izvoda i prekostrujna zaštita dovoda. Kako je u simulaciji signal za isključenje izvoda „zakasnio“ (kako bi se simuliralo da se struja ne prekida u istom trenutku kada je detektovan kvar), to se očekuje da se struja prvog izvoda isključi 120 ms od trenutka od kada je detektovan kvar. Sve to vreme je prisutan signal blokade zaštite sabirnica koji se šalje zaštitnom uređaju SEL-451. Sa druge strane, uređaj SEL-451 od trenutka kvara pa nakon vremena koje je potrebno algoritmu da proglasi kvar (oko 25 ms) takođe ima ispunjen strujni uslov za isključenje, međutim s obzirom na primljeni signal za blokadu zaštite sabirnica, ne prosleđuje signal za isključenje prekidača. Nakon izolovanja kvara, kroz dovodni prekidač se uspostavlja radna struja.

Na SL 9 su prikazane trenutne vrednosti struja dovoda u sve tri faze (gore levo), zatim trenutne vrednosti struja prvog izvoda u sve tri faze (dole levo) i signal blokade zaštite sabirnica koji se šalje zaštitnom uređaju SEL-451 (gore desno). Na SL 10 je prikazan snimak događaja iz SEL-451 uređaja, gde se vidi da se element 50P1 pobuđuje od trenutka kvara nakon vremena neophodnog releju za detekciju kvara. Takođe, prikazano je i stanje

bita VB001, koji predstavlja signal blokade zaštite sabirnica, te stoga relej nije izdao signal za isključenje prekidača (element 67P1T je sve vreme nepobuđen).



SL 9 – PRIKAZ ANALOGNIH I DIGITALNIH VELIČINA IZ HIL SCADA SISTEMA ZA SLUČAJ KVARA NA PRVOM IZVODU



SL 10 – SNIMAK DOGAĐAJA IZ ZAŠTITNOG UREĐAJA SEL-451 ZA SLUČAJ KVARA NA PRVOM IZVODU

### Simulacija rada zaštite od otkaza prekidača

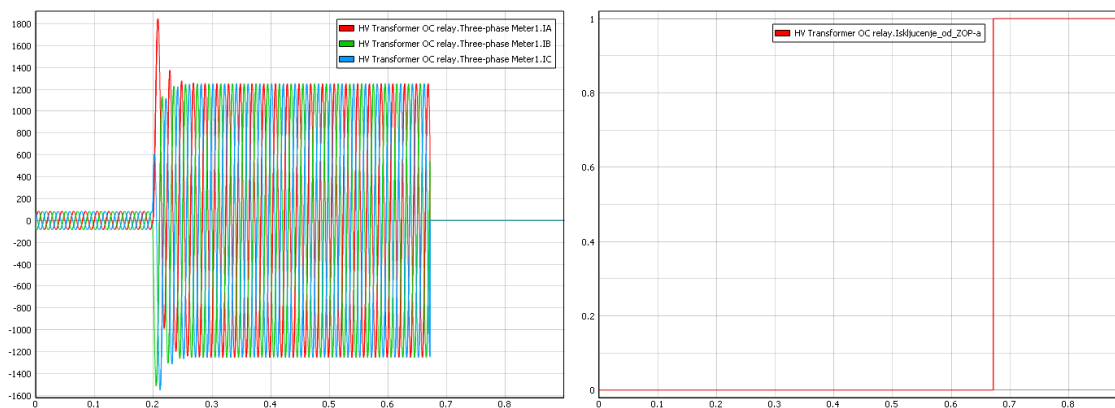
Simulacija otkaza dovodnog 10 kV prekidača je simulirana na sledeći način. Kvar je zadat na istom mestu kao i u prethodnoj simulaciji ali je izabrana opcija u HIL SCADA modulu da se prekidač „Feeder1.S1“ kontroliše softverski i podešen na opciju zatvoren. Time je simulirano kao da je kvar zadat na 10 kV sabirnicama.

Potom je izabrana opcija u HIL SCADA modulu da se i prekidač „LV Transformer OC relay.S1“ kontroliše softverski i da je podešen na opciju zatvoren. Time je simulirano stanje zaglavljenih polova prekidača. Zaštitni uređaj SEL-451 od trenutka kvara pa nakon vremena neophodnog za detekciju kvara ima strujni uslov drugog prekostrujnog elementa sa SL 3. Nakon isteka vremena podešenog odlaganja delovanja tog elementa (15 ciklusa), i zaštita od otkaza prekidača dobija uslov za inicijalizaciju. Ukoliko je i nakon podešenog vremena zaštite od otkaza prekidača (7,5 ciklusa) zadovoljen strujni uslov zaštite od otkaza prekidača a prekidač još uvek zatvoren, pobuđuje se bit BFTRIP1 koji se preko GOOSE poruke prosleđuje u softver. Sa tim uslovom, i uz uslov da je pobuđen i strujni detektor na VN strani transformatora, formira se signal za isključenje prekidača na VN strani transformatora, i time izoluje kvar u slučaju zaglavljenih polova prekidača.

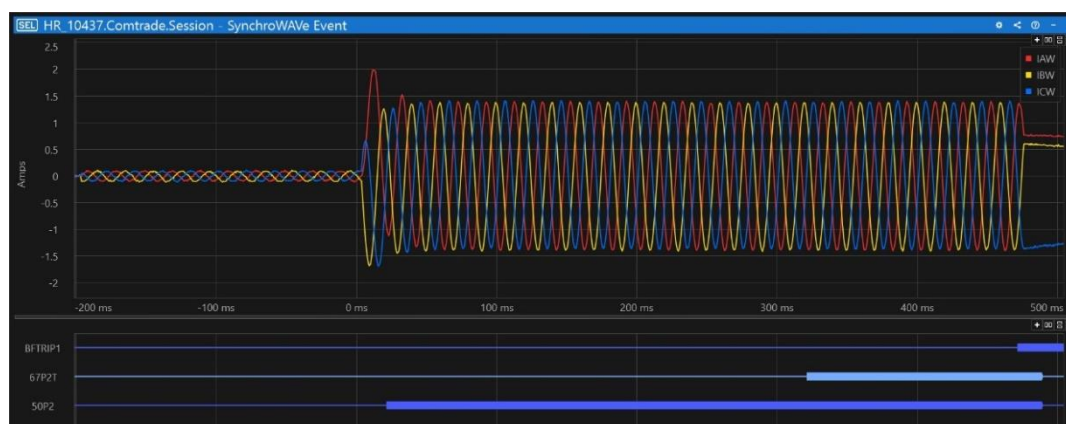
Na SL 11 su prikazane trenutne vrednosti struja na višenaponskoj strani transformatora u sve tri faze i latch-ovan signal otkaza prekidača koji se šalje sa zaštitnog uređaja SEL-451. Na SL 12 je prikazan snimak događaja iz SEL-451 uređaja, gde se vidi da se element 50P2 pobuđuje od trenutka kvara nakon vremena neophodnog releju za detekciju kvara. Takođe, prikazano je i stanje bita 67P2T koji se vodi na inicijalizaciju zaštite od otkaza



prekidača, a koji se pobuđuje nakon vremena odlaganja delovanja drugog stepena prekostrujne zaštite, 67P2D (koje je podešeno na 300 ms). Prikazano je i stanje signala BFTRIP1, koji se pobuđuje nakon podešenog vremena zaštite od otkaza prekidača nakon inicijalizacije (podešeno na 150 ms).



SL 11 – PRIKAZ ANALOGNIH I DIGITALNIH VELIČINA IZ HIL SCADA SISTEMA ZA SLUČAJ BLOKADE PREKIDAČA NA 10 kV STRANI TRANSFORMATORA PRILIKOM KVARA



SL 12 – SNIMAK DOGAĐAJA IZ ZAŠTITNOG UREĐAJA SEL-451 ZA SLUČAJ BLOKADE PREKIDAČA NA 10 kV STRANI TRANSFORMATORA PRILIKOM KVARA

## ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen princip verifikacije podešenja SEL-451 zaštitnog uređaja u realnom vremenu pomoću digitalnog simulatora sistema. Modelovan je jednostavan test sistem kako bi bilo omogućeno da se proverí podešenje zaštitnog uređaja, sa aspekta rada prekostrujne zaštite uz uvažavanje signala blokade zaštite sabirnica i podešenje zaštite od otkaza prekidača. Simulacijama je pokazano da je podešenje SEL-451 uređaja ispravno, a detaljno je predstavljen primer testiranja kroz koji je ukazano na neke od mogućnosti HIL testiranja uređaja.

## LITERATURA

- (1) Martin Schlager, 2008, Hardware-in-the-Loop Simulation: A Scalable, Component-based, Time-triggered Hardware-in-the-loop Simulation Framework, VDM Verlag Dr. Müller
- (2) D. Majstorovic, I. Celanovic, N. Teslic, N. Celanovic, and V. Katic, 2011, “Ultra-low latency hardware-in-the-loop platform for rapid validation of power electronics designs,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, pp. 4708 – 4716
- (3) Typhoon HIL Software Manual, april 2019
- (4) SEL-451 Relay Protection, Automation and Control System Instruction Manual, jul 2009
- (5) HIL4/6 Series Hardware User Guide, T-UG001 (v3.7), decembar 2019
- (6) Modular HIL Connect Datasheet, septembar 2019
- (7) IEC 61850-7-1:2011 Communication networks and systems for power utility automation - Part 7-1: Basic communication structure - Principles and models, jul 2011