

DOI: [10.46793/CIGRE37.B5.07](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B5.07)**B5.07****ПОДЕŠAVANJE UREĐAJA ZA ZAŠTITU VISOKONAPONSKIH KONDENZATORSKIH
BATERIJA I VERIFIKACIJA RADA ZAŠTITNOG UREĐAJA KORIŠĆENJEM
DIGITALNOG SIMULATORA ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA U REALNOM
VREMENU****SETTING CALCULATIONS FOR HIGH VOLTAGE SHUNT CAPACITOR BANK
PROTECTION AND VERIFICATION OF RELAY PROTECTION OPERATION USING
REAL-TIME HARDWARE-IN-THE-LOOP TESTING****Miljana Todorović, Pavle Krička***

Kratak sadržaj: Kondenzatorske baterije se kao uređaji za kompenzaciju reaktivne energije često koriste u elektroenergetskim sistemima za korekciju faktora snage i poboljšanje naponskih prilika, čime utiču na povećanje efikasnosti elektroenergetskih sistema. U radu je predstavljena metodologija proračuna podešenja uređaja za zaštitu kondenzatorskih baterija na primeru iz prakse, gde su kondenzatorske baterije instalisane snage 140 MVar povezane na visokonaponsku 345 kV mrežu i izvedene u formi dvostruke uzemljene zvezde. Za zaštitu visokonaponskih kondenzatorskih baterija su korišćeni primarni i sekundarni sistem relejne zaštite. Kao osnovna zaštitna funkcija je korišćena naponska diferencijalna zaštita, dok su kao rezervne funkcije aktivirane fazna prekostrujna i zemljospojna zaštita kroz inverzni i element sa definisanim vremenom reagovanja, potom prenaponska i podnaponska zaštita, kao i prenaponski element u funkciji dozvole uključenja kondenzatorskih baterija. Kriterijumi za podešavanje navedenih zaštitnih funkcija za konkretnu izvedbu kondenzatorskih baterija su detaljno predstavljeni, kao i proračuni koji odgovaraju konkretnom slučaju. Kako je kao primarni zaštitni uređaj korišćen uređaj koji nema fabrički implementiranu naponsku diferencijalnu zaštitu, ali ima mogućnost slobodnog konfigurisanja programabilne logike, u okviru uređaja je programirana logika rada naponske diferencijalne zaštite. S obzirom na značaj štićenih kondenzatorskih baterija, testiranje programirane zaštitne funkcije unutar zaštitnog uređaja obavljeno je pomoću digitalnog simulatora elektroenergetskog sistema u realnom vremenu, što se uobičajeno naziva RT-HIL način testiranja (engl. Real-Time Hardware-In-the-Loop). U radu su opisani postupak i rezultati testiranja koji su potvrdili ispravan rad u programabilnoj logici realizovane naponske diferencijalne zaštite kondenzatorskih baterija.

Ključne reči: kondenzatorske baterije, relejna zaštita, RT-HIL testiranje

Abstract: Capacitor banks are crucial for power factor correction and voltage stability improving the efficiency of the power system.

* Miljana Todorović, PowerGrid Engineering doo Beograd, miljana.todorovic@powergrid-e.com
Pavle Krička, PowerGrid Engineering doo Beograd, pavle.kricka@powergrid-e.com

This paper presents a methodology for setting calculations of protection devices for shunt capacitor banks using a practical example. In this example, capacitor banks with an installed capacity of 140 MVar are connected to a high-voltage 345 kV network and configured in a grounded double wye formation. For the high-voltage shunt capacitor bank protection, both primary and secondary relay protection systems were utilized. As the main protection function voltage differential protection has been used, while backup functions included phase and ground overcurrent protection with both inverse and definite-time elements, overvoltage and undervoltage protection, and an overvoltage element as permissive condition for power circuit breaker of capacitor bank to close. The criteria for setting these protection functions are presented in detail, along with calculations performed to this specific case. Since the primary protection device did not have factory-implemented voltage differential protection but supported protection free-form logic settings, the logic for voltage differential protection was programmed within the device. Considering the importance of the protected capacitor bank, the operation of the protection device was tested using real-time hardware-in-the-loop (RT-HIL). The paper describes the testing procedures and the results, which confirmed the correct operation of the capacitor bank voltage differential protection developed in freely programmable logic of the device.

Key words: *shunt capacitor bank, relay protection, RT-HIL testing*

1 UVOD

Efikasno upravljanje elektroenergetskim sistemom podrazumeva obezbeđivanje njegove sigurnosti i stabilnosti, uz maksimalan prenos aktivne snage i minimalne gubitke. Upravljanjem tokovima reaktivnih snaga utiče se na profile napona u elektroenergetskoj mreži, smanjenje gubitaka, kao i oslobađanje prenosnih kapaciteta vodova i transformatora, čime se dalje omogućava dodatni prenos energije. Kako potrošnja reaktivne energije smanjuje vrednosti napona u pojedinim čvorovima, dok ih proizvodnja povećava, u zavisnosti da li je zbog preopterećenja ili podopterećenja potrebno kompenzovati reaktivnu energiju, biraju se različiti uređaji za kompenzaciju.

Prema mogućnosti upravljanja proizvodnjom i/ili potrošnjom reaktivne energije, uređaji za kompenzaciju se dele na statičke i dinamičke. Najčešće korišćeni statički uređaji za kompenzaciju su visokonaponske prigušnice i visokonaponske kondenzatorske baterije, dok su najčešće korišćeni dinamički izvori reaktivne energije sinhroni generatori, sinhroni kompenzatori i FACTS uređaji, [1]. Kondenzatorske baterije, kao sistem za kompenzaciju reaktivne energije čiji je sistem zaštite obrađen u radu, su jedan od najčešće korišćenih i najjednostavnijih uređaja za kompenzaciju reaktivne energije na način da na mestu priključenja generišu reaktivnu energiju i time doprinose povećanju napona.

Zadaci sistema za zaštitu uređaja za kompenzaciju reaktivne energije jesu osetljivost na sve potencijalne kvarove unutar štice elementa, izolacija kvarova za što kraće vreme, stabilnost za kvarove van štice elementa, a sve to u slučajevima kada su prisutni i tranzijentni procesi. Kriterijumi i principi zaštite kondenzatorskih baterija zavise od konstrukcije samih baterija (da li unutar kondenzatorskih jedinica postoje osigurači ili ne, koja vrsta dielektrika se koristi, itd.), kao i načina na koji su te jedinice povezane kako bi oformile uređaj za kompenzaciju reaktivne energije (da li su u formi jednostruke ili dvostruke zvezde, uzemljene ili ne) i predstavljeni su u literaturi [2]-[4].

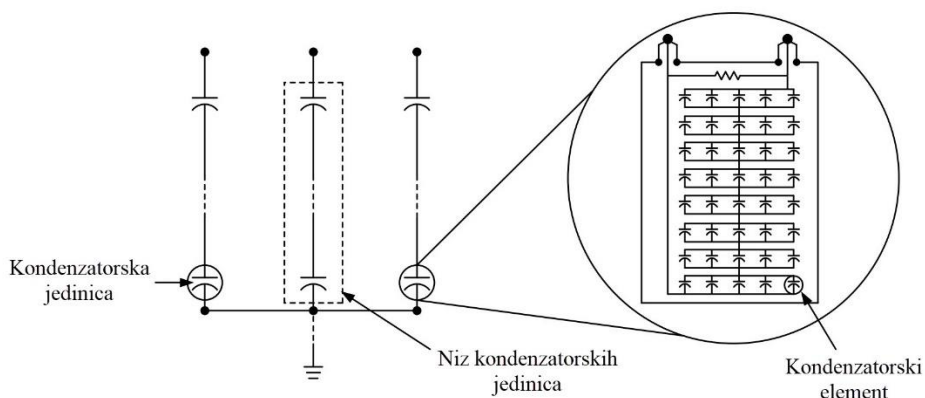
U radu je izdvojena i predstavljena metodologija izrade podešenja zaštite uređaja za kompenzaciju reaktivne energije na visokom naponu, sastavljenog od više paralelnih nizova kondenzatorskih jedinica vezanih u uzemljenu dvostruku zvezdu, ukupne instalisane snage 140 MVar. Dodatno je predstavljen način testiranja zaštitnih uređaja pomoću digitalnog simulatora elektroenergetskog sistema u realnom vremenu.

2 OPIS STRUKTURE VISOKONAPONSKIH KONDENZATORSKIH BATERIJA ZA KOMPENZACIJU REAKTIVNE ENERGIJE

Prema načinu sopstvene zaštite uređaja za kompenzaciju koji se sastoje od više kondenzatorskih jedinica, razlikuju se uređaji kod kojih nisu korišćeni osigurači (engl. *fuseless design*), zatim uređaji koji sadrže interno vezane osigurače (engl. *internally fused design*), kao i oni kod kojih su osigurači eksterno vezani (engl. *externally fused design*).

Kondenzatorski element je osnovni element koji se koristi u izradi kondenzatorskih baterija. Više kondenzatorskih elemenata vezanih u paralelno-rednu vezu čine kondenzatorsku jedinicu. Više kondenzatorskih jedinica vezanih redno čine niz kondenzatorskih jedinica, dok više kondenzatorskih jedinica vezanih u paralelu čine grupu kondenzatorskih jedinica.

Kondenzatorski element (engl. *capacitor element*), kondenzatorska jedinica (engl. *capacitor unit*) i niz kondenzatorskih jedinica (engl. *capacitor string*), na primeru kondenzatorskih baterija bez korišćenja osigurača, su prikazani na slici 1, [5]. U slučaju kondenzatorskih baterija bez korišćenja osigurača, koristi se samo jedna kondenzatorska jedinica u okviru grupe, tj. kondenzatorske jedinice se ne vezuju u paralelu.

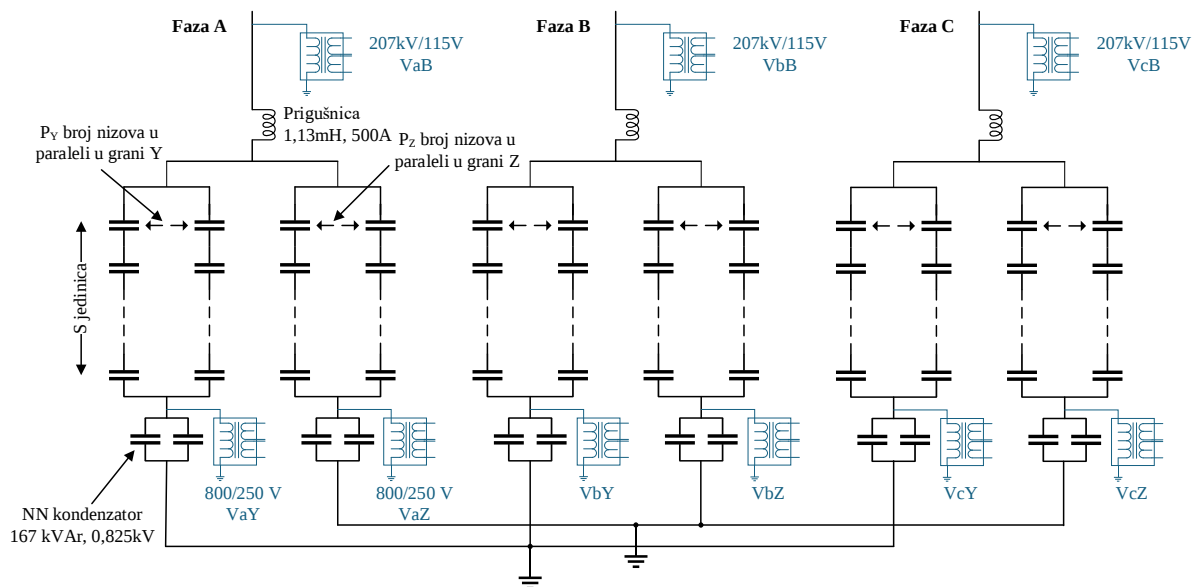


Slika 1: Prikaz kondenzatorskog elementa, kondenzatorske jedinice i niza kondenzatorskih jedinica na primeru kondenzatorske baterije bez korišćenja osigurača

Povezivanjem kondenzatorskih jedinica na red se povećava nominalni napon uređaja za kompenzaciju u celini, dok se dodavanjem takvih nizova kondenzatorskih jedinica u paralelu povećava njihov kapacitet. Kondenzatorske jedinice mogu biti različitog opsega nominalnih napona i snaga, gde naponi mogu biti u opsegu od 240 V do 24940 V, a snage od 2,5 kVar do 1000 kVar, [6]. Četiri najčešće konfiguracije kondenzatorskih baterija jesu u formi neuzemljene zvezde, neuzemljene dvostruke zvezde, zatim uzemljene zvezde i uzemljene dvostruke zvezde.

U radu je predstavljen postupak podešavanja zaštite VN kondenzatorskih baterija za kompenzaciju reaktivne energije instalisanog kapaciteta od 140 MVar.

Kompensacija je izvršena centralno u transformatorskoj stanici na 345 kV naponskom nivou u formi uzemljene dvostruke zvezde. Kondenzatorske baterije su realizovane bez upotrebe osigurača, a korišćene su kondenzatorske jedinice nominalnog napona 20,8 kV i snage 900 kVAr. Svaka kondenzatorska jedinica u analiziranom slučaju je sastavljena od 10 kondenzatorskih elemenata vezanih na red. Niz kondenzatorskih jedinica je sačinjen od 10 kondenzatorskih jedinica vezanih na red ($S=10$), a u svakoj grani su korišćena po 3 paralelna niza ($P_Y=3$ i $P_Z=3$, gde su Y i Z oznake dve grane dvostruke zvezde), kao što je prikazano na slici 2. Dodatno, u svakoj grani između kondenzatorskih baterija i zemlje su povezane u paraleli dve NN kondenzatorske jedinice nominalnog napona 825 V i snage 167 kVAr. Nominalna učestanost mreže je 60 Hz.



Slika 2: VN kondenzatorske baterije u formi uzemljene dvostruke zvezde

Prilikom projektovanja kondenzatorskih baterija, proizvođači su dužni da ispune zahteve definisane standardom, [6]. Sa aspekta podešavanja zaštitnih funkcija, potrebno je imati u vidu dva zahteva, a to je da kondenzatori moraju biti u mogućnosti trajnog rada pri naponima u vrednosti do 110% naznačenog napona, kao i da su u mogućnosti da trajno izdrže struju u vrednosti do 135% naznačene struje.

3 PODEŠAVANJE ZAŠTITE VISOKONAPONSKIH KONDENZATORSKIH BATERIJA

Za zaštitu visokonaponskih kondenzatorskih baterija u konkretnom slučaju su korišćeni primarni i sekundarni sistem relejne zaštite. Kao osnovna zaštitna funkcija je korišćena naponska diferencijalna zaštita, dok su kao rezervne funkcije aktivirane fazna prekostrujna i zemljospojna zaštita kroz inverzni i element sa definisanim vremenom reagovanja, potom prenaponska i podnaponska zaštita, kao i prenaponski element u funkciji dozvole uključivanja kondenzatorskih baterija. Kriterijumi za podešavanje nabrojanih zaštitnih funkcija za konkretnu konfiguraciju kondenzatorskih baterija, kao i proračuni koji odgovaraju konkretnom slučaju su predstavljeni u potpoglavljima od 3.1 do 3.6.

3.1 Naponska diferencijalna zaštita

Kondenzatorski elementi unutar kondenzatorskih jedinica se najčešće sastoje od dva ili tri sloja polipropilenske folije, koja se pri kvaru topi i stvara čvrst kratak spoj bez varničenja ili pražnjenja. Kao posledica ovakvog proboja, dolazi do preraspodele napona na jedan element manje u nizu tako što se povećava napon na preostalim „zdravim“ elementima, odnosno elementima koji nisu pogođeni kvarom. Ako pritom, dođe do kvara još jednog elementa, napon na preostalim „zdravim“ elementima se dodatno povećava. Što se više naponsko naprezanje preostalih „zdravih“ elemenata povećava, povećava se i šansa da veći broj elemenata bude u kvaru. Stoga je neophodno pratiti napone kako bi se na vreme izdao alarm ili isključenje kondenzatorskih baterija, u zavisnosti od veličine prenapona koji trpe preostale kondenzatorske jedinice, odnosno elementi unutar jedinica.

Za realizaciju naponske diferencijalne zaštite kondenzatorskih baterija u formi dvostruke uzemljene zvezde, neophodni su ulazi sa jednog trofaznog naponskog transformatora vezanog na visokonaponske sabirnice i dva trofazna naponska transformatora vezana na tačku spoja niskonaponskih kondenzatorskih jedinica (gde je definisana tačka odvajanja), jedan za granu Y, a drugi za granu Z. Na osnovu merenih napona, definiše se pojam diferencijalnog napona. Formula za računanje diferencijalnog napona za detekciju kvarova u grani Y je definisana sledećim izrazom:

$$dV\varphi = |V\varphi B| - k\varphi V \cdot |V\varphi Y| \quad (1)$$

gde su:

$V\varphi B$ – napon sabirnice u sekundarnim voltima (φ se odnosi na fazu a, b, i c);

$V\varphi Y$ – napon u tački odvajanja u sekundarnim voltima (φ se odnosi na fazu a, b, i c) u grani Y;

$k\varphi V$ – kompenzacioni faktor koji se podešava tako da je diferencijalni napon u normalnom radu 0 (φ se odnosi na fazu a, b, i c).

Za detekciju kvarova u grani Z, diferencijalni napon se računa tako što se u jednačini (1) umesto napona $V\varphi Y$ koriste naponi $V\varphi Z$.

Kada je jedan element u nizu u kvaru, smanjuje se ukupna impedansa, a samim tim dolazi do promene u merenom naponu $V\varphi Y$ (ukoliko je element u kvaru u grani Y). Ukoliko je u kvaru element iznad tačke odvajanja, $V\varphi Y$ raste, pa $dV\varphi$ ima negativnu vrednost. Ukoliko je međutim element u kvaru ispod tačke odvajanja, $V\varphi Y$ pada, pa je $dV\varphi$ u tom slučaju pozitivna vrednost. Kompenzacioni faktor $k\varphi V$ se za inicijalno podešenje izračunava pomoću sledeće formule:

$$k\varphi V = \frac{Z_{ekv}}{0,5 \cdot Z_{CAP_LVekv}} \cdot \frac{PTR_{LV_{CAP}}}{PTR_{BUS}} = 1,3989 \quad (2)$$

gde su:

Z_{ekv} – ekvivalentna impedansa kondenzatorske baterije uključujući i reaktor u jednoj fazi;

Z_{CAP_LVekv} – ekvivalentna impedansa dva niskonaponska kondenzatora vezana u paralelu;

PTR_{BUS} – Prenosni odnos naponskih mernih transformatora vezanih na VN sabirnice (207/0,115 kV/kV = 1800);

$PTR_{LV_{CAP}}$ – Prenosni odnos naponskih mernih transformatora vezanih u tački odvajanja ($800/250 \text{ V/V} = 3,2$).

Imajući u vidu tolerancije proizvođača na navedene podatke o kapacitivnosti kondenzatora, preporučuje se da se faktor kompenzacije odredi na osnovu realnih merenja napona nakon priključenja kondenzatorskih baterija na mrežu. Merenja je neophodno izvršiti pri stabilnim radnim uslovima i bez kvarova u okviru baterije, a faktor kompenzacije određen na taj način treba koristiti u radu naponske diferencijalne zaštite.

Za potrebe podešavanja naponske diferencijalne zaštite, neophodno je da se formira tabela gde se u zavisnosti od broja elemenata u kvaru unutar jednog niza kondenzatorskih jedinica upisuju vrednosti diferencijalnih napona, i napona na preostalim „zdravim“ kondenzatorima u nizu gde je element pogođen kvarom. U slučaju da su kvarom pogođeni elementi iznad tačke odvajanja, a za kondenzatorske baterije karakteristika datih u poglavlju 2, formirana je Tabela 1. Ukupan broj elemenata u nizu u analiziranom slučaju je 100, s obzirom da je u svakoj kondenzatorskoj jedinici po deset elemenata vezanih na red, a u okviru niza je vezano 10 kondenzatorskih jedinica. Nakon kvara, odnosno kratkog spoja jednog od elemenata, ekvivalentna impedansa niza se smanjuje, a samim tim se povećava struja kroz pomenuti niz kondenzatorskih jedinica. Povećanje struje prouzrokuje povećanje napona na svim preostalim kondenzatorskim elementima (i kondenzatorskim jedinicama) u nizu. Tabela se formira do broja elemenata u kvaru prilikom kog se beleži napon na „zdravim“ elementima preko 110% nominalnog, a što je vrednost propisana standardom koju kondenzatori moraju trajno podnositi. Kada naponi na kondenzatorskim elementima dostignu ovaj nivo, rizik od lančanog kvara značajno raste, pa je isključenje neophodno. Obično se koristi kratko vremensko kašnjenje od 1 do 3 periode kako bi se sprečilo isključenje usled prolaznih pojava. Takođe, prema internim pravilima nadležnog Operatora prenosnog sistema, usvaja se da napon sabirnica, pri kojem se vrše proračuni kvarova, odgovara zbiru naznačenih napona kondenzatorskih jedinica u nizu (konzervativan pristup).

Dodatno, određuje se vrednost diferencijalnog napona i u slučaju kvara ispod tačke odvajanja, tj. u slučaju kvara jednog od niskonaponskih kondenzatora. Vrednosti dobijene u tom slučaju su prikazane u Tabeli 2. Usvaja se da je napon sabirnica za ovaj proračun jednak nominalnom naponu mreže.

Tabela 1: Diferencijalni i naponi „zdravih“ elemenata za kvarove iznad tačke odvajanja

Broj elemenata u kvaru	Diferencijalni napon [V, sekundarno]	Napon na „zdravim“ elementima [x naznačeni napon kondenzatora]
0	0,00	1,000
1	-0,39	1,010
2	-0,79	1,019
3	-1,19	1,029
4	-1,60	1,043
5	-2,02	1,053
6	-2,46	1,063
7	-2,90	1,077
8	-3,35	1,087
9	-3,80	1,101
10	-4,27	1,111

Tabela 2: Diferencijalni i naponi „zdravih“ elemenata za kvarove ispod tačke odvajanja

Broj elemenata u kvaru	Diferencijalni napon [V, sekundarno]	Napon na „zdravim“ elementima [x naznačeni napon kondenzatora]
1 (NN kondenzator)	110,66	0,958

Vrednosti u tabeli se dobijaju rešavanjem električnih kola primenom Kirhofovih zakona. Takođe, u literaturi se mogu naći izvedene formule za proračune, ali i softverski paketi koji proračunavaju ove vrednosti automatski, za uobičajene konfiguracije kondenzatorskih baterija, [5]. Takođe, moguće je modelovati kondenzatorske baterije i u nekom od softvera za analizu elektroenergetskih sistema i na taj način verifikovati proračune. Vrednosti u tabelama 1 i 2 su dobijene izvođenjem proračuna, a kasnije verifikovane korišćenjem softvera.

U okviru naponske diferencijalne zaštite VN kondenzatorskih baterija, aktivirani su alarm i dva isključna stepena naponske diferencijalne zaštite sa definisanim vremenom reagovanja. U opštem slučaju, prag alarmnog stepena se podešava tako da se omogući detekcija kvarova koji mogu trajati duži vremenski period. Cilj je da se kvar u kondenzatorskoj bateriji detektuje što je moguće ranije, kako bi se omogućilo planiranje prekida rada radi popravke pre nego što dodatni kvarovi prouzrokuju prinudno isključenje. Prag treba da se podesi tako da se izbegne njegova pobuda zbog promena kapacitivnosti usled varijacija u temperaturi.

U konkretnom slučaju, a prema definisanim internim pravilima nadležnog Operatora prenosnog sistema, alarmni stepen je podešen na vrednost razlike napona koja se meri u slučaju kvara šest kondenzatorskih elemenata (2,46 V), sa vremenom odlaganja delovanja od 5 sekundi, kako bi se izbegli lažni alarmi zbog prolaznih poremećaja u sistemu. Prvi stepen isključenja je podešen na vrednost razlike napona koja se meri u slučaju kvara osam kondenzatorskih elemenata (3,35 V), dok je drugi, brži stepen, podešen na vrednost koja se dobija za slučaj kvara deset kondenzatorskih elemenata (4,27 V). Vreme odlaganja delovanja prvog stepena isključenja je podešeno na 3 periode, dok je vreme odlaganja delovanja drugog stepena podešeno na 1 periodu. Iz tabele 1 se može videti da je napon na „zdravim“ elementima veći od dozvoljenih 110% tek nakon kvara na više od 9 elemenata.

U svim prethodno navedenim slučajevima, gde su analizirani kvarovi na elementima iznad tačke odvajanja, diferencijalni napon je negativnog predznaka. U slučaju kvara ispod tačke odvajanja, meri se pozitivna vrednost diferencijalnog napona, a detekcija kvara jednog niskonaponskog kondenzatora se alarmira. Podešenje pobude alarma se određuje na osnovu vrednosti diferencijalnog napona proračunatog za taj slučaj sa usvojenom marginom. U konkretnom slučaju je alarmni stepen za kvarove ispod tačke odvajanja podešen na 50% vrednosti diferencijalnog napona u slučaju kvara na NN kondenzatoru, tj. na 55 V.

3.2 Prenaponska zaštita

Zaštita kondenzatorskih baterija od povišenog napona je realizovana pomoću jednog stepena sa definisanim vremenom reagovanja. Podešena je na vrednost od 110% nominalnog napona sabirnice, sa vremenom odlaganja delovanja od 1 sekunde ili 60 perioda u analiziranom sistemu učestanosti od 60 Hz. Ukoliko je u zaštitnom uređaju izabran prenaponski element prema merenim linijskim naponima, podešenja su sledeća:

$$59P(L - L)_{PU1(PRI)} = 1,1 \cdot 345 \text{ kV} = 379,5 \text{ kV, primarno} \quad (3)$$

$$59P(L - L)_{PU1(SEC)} = 379,5 \text{ kV} / 1800 = 210,83 \text{ V, sekundarno} \quad (4)$$

$$59P(L - L)_{delay1} = 60 \text{ cyc} \quad (5)$$

3.3 Prenaponski element u funkciji dozvole uključenja kondenzatorskih baterija

Nakon svakog isključenja kondenzatorskih baterija, uključenje je blokirano u narednih 5 minuta, a dodatni uslov je prisustvo napona na sabirnicama. U tu svrhu se koristi još jedan prenaponski element, podešen na vrednost od 90% nominalnog napona mreže, sa vremenskim odlaganjem od 10 sekundi. Ukoliko je u zaštitnom uređaju izabran prenaponski element prema merenim linijskim naponima, podešenja su sledeća:

$$59P(L - L)_{PU2(PRI)} = 0,9 \cdot 345 \text{ kV} = 310,5 \text{ kV, primarno} \quad (6)$$

$$59P(L - L)_{PU2(SEC)} = 310,5 \text{ kV}/1800 = 172,5 \text{ V, sekundarno} \quad (7)$$

$$59P(L - L)_{delay2} = 600 \text{ cyc} \quad (8)$$

3.4 Podnaponska zaštita

Zaštita kondenzatorskih baterija od sniženog napona je realizovana pomoću jednog stepena sa definisanim vremenom reagovanja. Podešena je na vrednost od 70% nominalnog napona mreže, sa vremenom odlaganja delovanja od 45 sekundi ili 2700 perioda. Ukoliko je u zaštitnom uređaju izabran podnaponski element prema merenim linijskim naponima, podešenja su sledeća:

$$27P(L - L)_{PU1(PRI)} = 0.7 \cdot 345 \text{ kV} = 241.5 \text{ kV, primarno} \quad (9)$$

$$27P(L - L)_{PU1(SEC)} = 241.5 \text{ kV}/1800 = 134.17 \text{ V, sekundarno} \quad (10)$$

$$27P(L - L)_{delay1} = 2700 \text{ cyc} \quad (11)$$

3.5 Prekostrujna zaštita

Prekostrujna zaštita VN kondenzatorske baterije je realizovana pomoću jednog elementa sa inverznim vremenom reagovanja i drugog, sa definisanim vremenom reagovanja.

Podešenje praga reagovanja prekostrujnog elementa inverzne karakteristike se podešava prema naznačenoj struji kondenzatorske baterije, uz uvaženju marginu. Osetljivost podešenja se proverava prema struji dvofaznog kratkog spoja, takođe uz uvaženju marginu.

Naznačena struja kondenzatorske jedinice se određuje prema vrednosti naznačene snage i napona.

$$I_{CAP_rated} = 900\text{kVAr}/20,8\text{kV} = 43,27 \text{ A, primarno} \quad (12)$$

Naznačena struja kondenzatorske baterije je šestostruko veća, jer postoje po tri paralelna niza u svakoj od dve grane.

$$I_{CAP_BANK_rated} = 6 \cdot 43,27 \text{ A} = 259,62 \text{ A, primarno} \quad (13)$$

Ukoliko se usvoji sigurnosna margina od 25%, podešenje praga reagovanja prekostrujnog elementa inverznog člana je:

$$51P_{PU1(PRI)} = 1,25 \cdot 259,62 \text{ A} = 324,5 \text{ A, primarno} \quad (14)$$

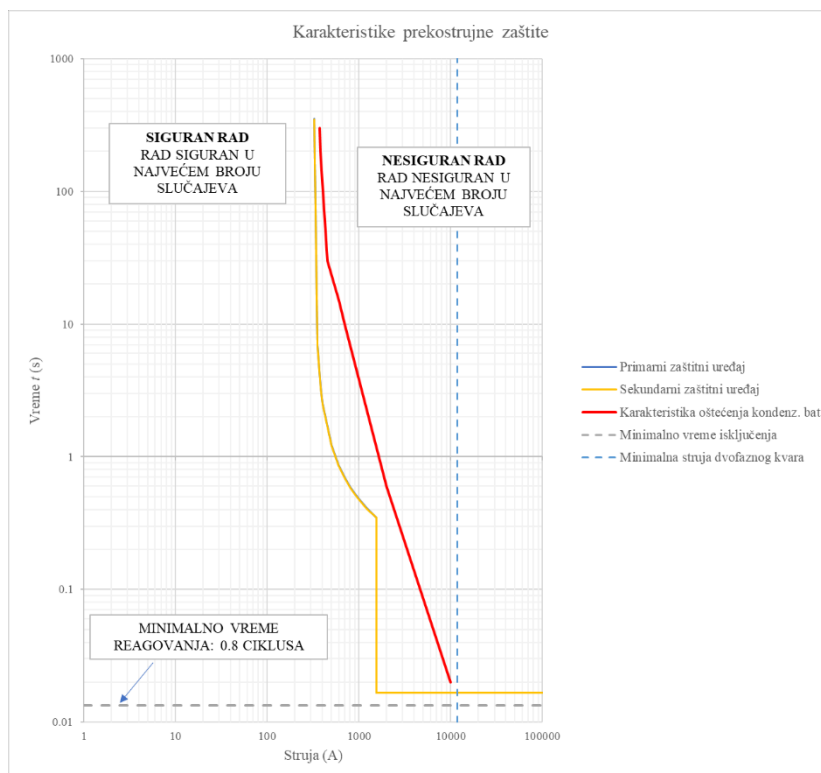
Kako je prenosni odnos strujnih mernih transformatora $CTR=3000/5A/A=600$, podešenje praga reagovanja prekostrujnog elementa inverznog člana u sekundarnim amperima je:

$$51P_{PU1(SEC)} = 324,5A/600 A = 0,54 A, \text{ sekundarno} \quad (15)$$

Osetljivost je proverena i prema struji kvara i ispunjava uslove da je manja od vrednosti minimalne struje dvofaznog kratkog spoja podeljene koeficijentom sigurnosti od 1,5. Tip karakteristike i vremenski multiplikator se biraju tako da karakteristika bude koordinisana sa zadatom krivom oštećenja kondenzatorske baterije, definisane od strane proizvođača opreme. Izabran je tip krive „IEEE Moderately Inverse“, a vremenski multiplikator je podešen na 0,2.

Prag reagovanja prekostrujnog elementa sa definisanim vremenom reagovanja se podešava na šestostruku vrednost naznačene struje kondenzatorske baterije i takođe se proverava prema struji kvara, tj. da li je manji od vrednosti minimalne struje dvofaznog kratkog spoja podeljene sa koeficijentom sigurnosti od 1,5, što je u konkretnom slučaju ispunjeno. Vreme odlaganja delovanja ovog elementa se podešava na 1 periodu.

Prikaz karakteristike reagovanja prekostrujne zaštite podešene u okviru primarnog i sekundarnog uređaja (podešenih na isti način), minimalna struja dvofaznog kratkog spoja, kao i karakteristika oštećenja kondenzatorske baterije su dati na slici 3.



Slika 3: Prikaz podešenja prekostrujne zaštite i karakteristike oštećenja kondenzatorske baterije

3.6 Zemljospojna zaštita

Zemljospojna zaštita VN kondenzatorske baterije je realizovana pomoću jednog elementa sa inverznim vremenom reagovanja i drugog sa definisanim vremenom reagovanja.

Podešenje praga reagovanja prekostrujnog elementa inverzne karakteristike se podešava na 20% vrednosti naznačene struje kondenzatorske baterije ili na minimalnu dozvoljenu vrednost zaštitnog uređaja, koja god od te dve vrednosti da je veća. Osetljivost podešenja se proverava prema struji jednofaznog kratkog spoja uz uvaženju marginu.

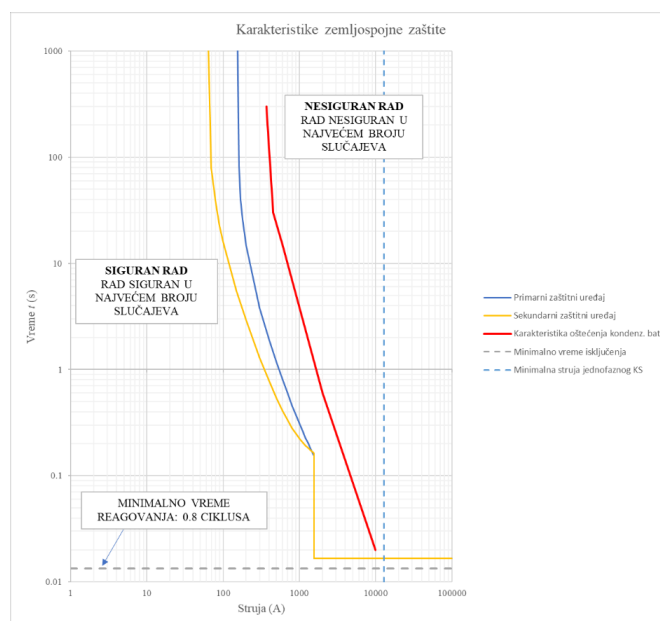
$$51G_{PU1(PRI)} = 0,2 \cdot 259,62A = 51,92 A, \text{ primarno} \quad (16)$$

$$51G_{pickup(SEC)} = 51,92A/600 = 0,09 A, \text{ sec, sekundarno} \quad (17)$$

Kako je ova vrednost manja od minimalno dozvoljenog podešenja u primarnom zaštitnom uređaju od 0,25 ampera sekundarno, proradna vrednost prekostrujnog člana zemljospojne zaštite u primarnom zaštitnom uređaju se podešava na 0,25 sekundarnih ampera, a u sekundarnom zaštitnom uređaju na vrednost izračunatu u (17). Tip karakteristike i vremenski multiplikator se biraju tako da karakteristika bude koordinisana sa zadatom krivom oštećenja kondenzatorske baterije, definisane od strane proizvođača opreme. Izabrani tip karakteristike je „IEEE Extremely Inverse“, dok je vremenski multiplikator u primarnom zaštitnom uređaju podešen na 0,4, a u sekundarnom na 1.

Prag reagovanja zemljospojnog elementa sa definisanim vremenom reagovanja se podešava na šestostruku vrednost naznačene struje kondenzatorske baterije i takođe se proverava prema struji kvara, tj. da li je manji od vrednosti minimalne struje jednofaznog kratkog spoja podeljene sa koeficijentom sigurnosti od 1,5, što je u konkretnom slučaju ispunjeno. Vreme odlaganja delovanja ovog stepena se podešava na 1 periodu.

Prikaz karakteristike reagovanja zemljospojne zaštite podešene u okviru primarnog i sekundarnog uređaja, minimalna struja jednofaznog kratkog spoja sa zemljom, kao i karakteristika oštećenja kondenzatorske baterije su dati na slici 4.



Slika 4: Prikaz podešenja zemljospojne zaštite i karakteristike oštećenja kondenzatorske baterije

4 ISPITIVANJE ZAŠTITNOG UREĐAJA POMOĆU SIMULATORA ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA U REALNOM VREMENU

4.1 Opis sistema za testiranje

Za zaštitu VN kondenzatorskih baterija, realizovana su dva sistema zaštite: primarni i sekundarni. Primarni sistem zaštite čine dva zaštitna uređaja, svaki sa po 6 naponskih ulaza. Naponska diferencijalna zaštita nije fabrički ugrađena funkcija u ovim uređajima, međutim, oba uređaja sistema primarne zaštite imaju mogućnost slobodnog konfigurisanja programabilne logike. Ta mogućnost je iskorišćena, pa je na taj način realizovana naponska diferencijalna zaštita prema uputstvima rada naponske diferencijalne zaštite u okviru diferencijalnog releja za zaštitu kondenzatorskih baterija istog proizvođača, iz iste serije, [7], [8]. Jedan od dva zaštitna uređaja primarnog sistema zaštite poredi napone na sabirnicama i tački odvajanja u jednoj grupi, dok drugi uređaj poredi napone na sabirnicama sa naponima u tački odvajanja u drugoj grupi. Zaštitni uređaj u sekundarnom sistemu zaštite ima fabrički realizovanu diferencijalnu naponsku zaštitu namenjenu za realizaciju zaštite kondenzatorskih baterija.

Pored programiranja naponske diferencijalne zaštite, programirana je i procedura za određivanje kompenzacionog faktora napona, koja se u praksi koristi kako bi se izbegla greška usled definisanih i stvarnih kapacitivnosti kondenzatora u okviru kondenzatorskih baterija. Kako naponska diferencijalna zaštita, kao što je navedeno, nije fabrički realizovana u sistemu primarne zaštite, a imajući u vidu i vrednost i značaj štice opreme, rad naponske diferencijalne zaštite u okviru zaštitnog uređaja je testiran pomoću RT-HIL platforme. Pored pomenute funkcije, koristeći RT-HIL platformu je moguće ispitati i rad preostalih aktiviranih zaštitnih funkcija (prekostrujne, zemljospojne, podnaponske i nadnaponske), međutim ta ispitivanja nisu predmet ovog rada.

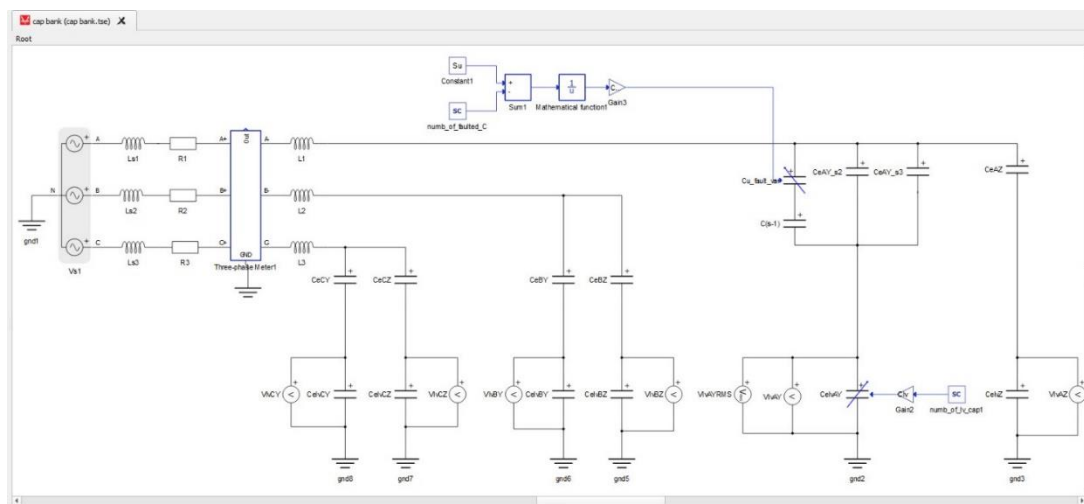
Laboratorijska postavka ispitivanja je uključivala zaštitni uređaj, digitalni simulator elektroenergetskog sistema u realnom vremenu, kao i pojačavač signala iz digitalnog simulatora, prikazane na slici 5.



Slika 5: Laboratorijska postavka ispitivanja: 1 - SEL-451 zaštitni uređaj, 2 – Typhoon HIL 604, 3 - HIL Connect)

4.2 Matematički model sistema

Matematički model VN kondenzatorskih baterija je realizovan u okviru softverskog paketa koji se koristi uz digitalni simulator elektroenergetskog sistema u realnom vremenu i prikazan je na Slici 6. Parametri modela odgovaraju karakteristikama VN kondenzatorskih baterija datih u poglavlju 2, a zbog preglednosti su korišćeni ekvivalenti za određene grupe kondenzatorskih elemenata.



Slika 6: Matematički model VN kondenzatorskih baterija

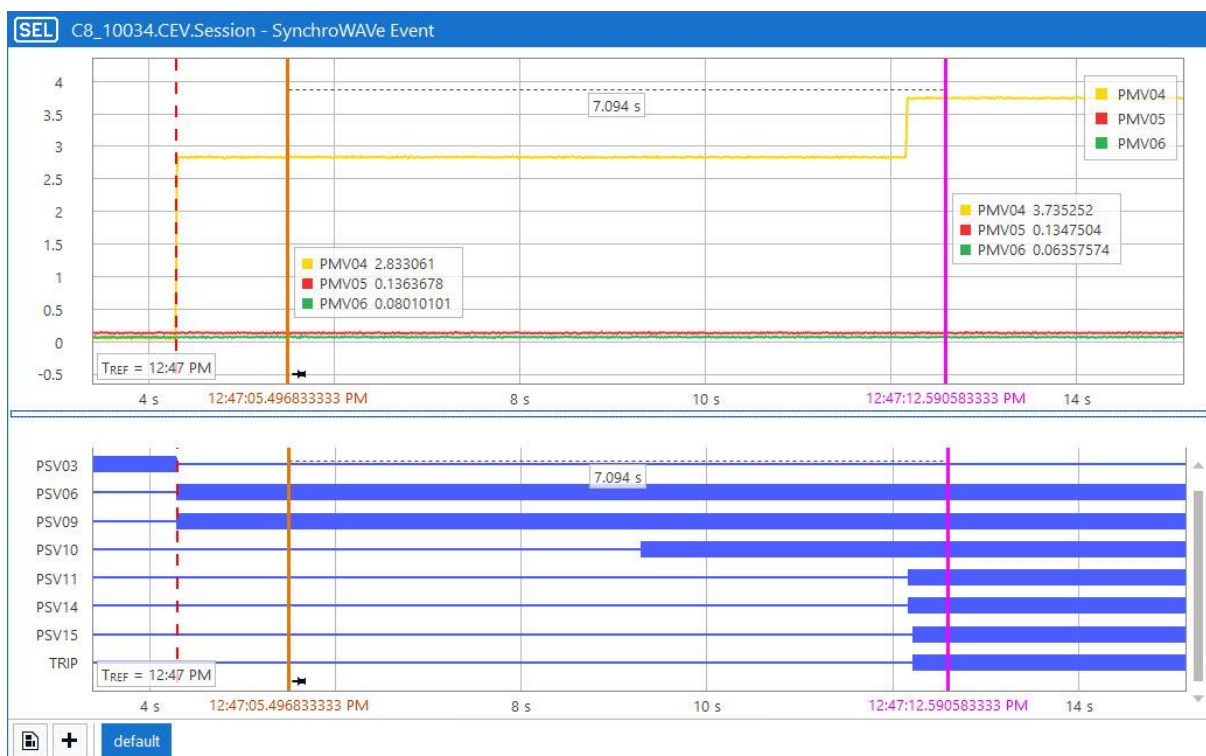
U okviru alata za grafičko modelovanje sistema, korišćeni su elementi promenljive kapacitivnosti. Time je ostavljena mogućnost da se kasnije kroz SCADA modul (grafički alat za interakciju i upravljanje samim radom simulatora i modela tokom rada simulacije) zadaje broj elemenata u jednom nizu kondenzatorskih jedinica koji su u kvaru. Takođe je ostavljena mogućnost iniciranja kvara NN kondenzatora u toku rada simulacije.

4.3 Rezultati testiranja zaštitnog uređaja

Kroz mogućnost slobodnog konfigurisanja programabilnih jednačina za funkcije zaštite, definisana su po tri stepena naponske diferencijalne zaštite za detekciju kvarova iznad (kada je diferencijalni napon negativan) i ispod tačke odvajanja (kada je diferencijalni napon pozitivan), i to odvojeno za sve tri faze. Za detekciju kvarova iznad tačke odvajanja, prvi stepen je korišćen kao alarmni i podešen je da signalizira ukoliko je broj elemenata u kvaru veći od 6, sa vremenom odlaganja delovanja od 5 sekundi. Drugi i treći stepen naponske diferencijalne zaštite se koriste za isključenje. Prvi stepen isključenja je podešen da reaguje ukoliko je broj elemenata u kvaru veći od 8, sa vremenskim odlaganjem delovanja od 3 periode, dok je drugi stepen isključenja podešen da reaguje ukoliko je broj elemenata u kvaru veći od 10 (čime naponska opterećenja preostalih elemenata prelaze 110% naznačenih), a vreme odlaganja delovanja u tom slučaju je 1 perioda.

Kako bi bio potvrđen rad naponske diferencijalne zaštite, urađeni su testovi korišćenjem HIL platforme. U okviru jednog testa je proveravan rad alarma i prvog stepena isključenja. Sekvenca testiranja je uključivala tri različita režima. U prvoj sekvenci je zadat režim bez kvara, potom je u drugoj sekvenci zadat kvar 7 kondenzatorskih elemenata u fazi A gde je očekivana pobuda alarma, dok je u trećoj sekvenci zadat kvar 9 elemenata u fazi A gde je očekivan rad sporijeg stepena za isključenje. Na slici 7 je prikazan snimak iz zaštitnog uređaja tokom zadatog događaja.

Na gornjem delu prikaza događaja iz zaštitnog uređaja su prikazane vrednosti matematičkih varijabli za zaštitu (engl. Protection Math Variable, PMV) – PMV04, PMV05 i PMV06. Vrednosti ovih varijabli su definisane kao apsolutne vrednosti diferencijalnog napona dV_{ϕ} u fazama A, B i C, respektivno. Na donjem delu prikaza su izdvojene vrednosti zaštitnih varijabli (engl. Protection SELogic Variable, PSV) koje su od interesa za praćenje rada naponske diferencijalne zaštite. Prva promenljiva, PSV03, je varijabla koja uzima vrednost 0 ukoliko je detektovan kvar u fazi A, u delu iznad tačke odvajanja. Varijabla PSV06 uzima vrednost 1 ukoliko je došlo do pobude alarma zbog kvara u fazi A, dok varijabla PSV09 predstavlja „zbirnu“ pobudu alarma, tj. uzima vrednost 1 ukoliko je došlo do pobude alarma bilo u fazi A, B ili C. Varijabla PSV10, je izlaz iz alarmne funkcije nakon isteka podešenog vremena odlaganja delovanja, što je u ovom slučaju 5 sekundi. Dodatan set varijabli je prikazan i za proveru rada sporijeg stepena za isključenje. Varijabla PSV11, analogno varijabli PSV06, predstavlja pobudu sporijeg stepena isključenja za kvar u fazi A, PSV14 „zbirnu“ pobudu, a PSV15 izlaz nakon isteka vremena odlaganja delovanja. Dodatno je prikazan i bit za isključenje, TRIP, koji je aktivan od istog trenutka kao i varijabla PSV15. Najčešće se, prilikom ispitivanja sistema zaštite pomoću HIL platforme, binarni izlaz zaštitnog uređaja koji se koristi za isključenje prekidača (TRIP signal) fizički povezuje sa digitalnim simulatorom tako da isključuje odgovarajući prekidač u okviru modela. Kako je fokus ovog ispitivanja bila potvrda ispravnog rada programirane naponske diferencijalne zaštite, a ne funkcionalnost uređaja u celini, nije realizovano prosleđivanje signala ka digitalnom simulatoru i iz tog razloga je i nakon izdavanja signala za isključenje vrednost PMV04 ostala nepromenjena.



Slika 7: Izveštaj iz zaštitnog uređaja prilikom ispitivanja

5 ZAKLJUČAK

Prilikom podešavanja uređaja za zaštitu, neophodno je jasno definisati kriterijume i prema njima, a na osnovu modela sistema, proračunati konkretna podešenja. Dodatno, postoji mogućnost da se neki delovi podešenja dodatno ispituju koristeći RT-HIL okruženje.

U radu je predstavljen postupak kreiranja podešenja zaštitnog uređaja kondenzatorskih baterija definisanih karakteristika, od postavljanja kriterijuma i proračuna, do testiranja podešenja u HIL okruženju. Stoga, rad može poslužiti kao konkretno uputstvo za podešavanje uređaja za zaštitu kondenzatorskih baterija, ali i kao uvid u jednu od mogućnosti za testiranje zaštitnih uređaja u HIL okruženju.

6 LITERATURA

- [1] Goran Levačić, Ivo Uglešić, Alan Župan, Božidar Filipović-Grčić, „Problematika ugradnje kompenzacijskih uređaja u prijenosnoj elektroenergetskoj mreži“, 13. savjetovanje HRO CIGRE, Šibenik, 2017.
- [2] Satish Samineni, Casper Labuschagne, and Jeff Pope, „Principles of Shunt Capacitor Bank Application and Protection“, 64th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, Atlanta, Georgia, 2010
- [3] Roy Moxley, Jeff Pope, and Jordan Allen, „Capacitor Bank Protection for Simple and Complex Configurations“, 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, Texas, 2012
- [4] Gustavo Brunello, Bogdan Kasztenny, Craig Wester, „Shunt Capacitor Bank Fundamentals and Protection“, 2003 Conference for Protective Relay Engineers - Texas A&M University, College Station (TX), 2003
- [5] Ariana Amberg and Jason Young, „Protecting a Grounded Fuseless Capacitor Bank With the SEL-487V“, SEL Application Guide, Volume IV, AG2010-08
- [6] "IEEE Guide for the Protection of Shunt Capacitor Banks," in IEEE Std C37.99-2012 (Revision of IEEE Std C37.99-2000) , vol., no., pp.1-151, 8 March 2013, doi: 10.1109/IEEESTD.2013.6482148.
- [7] SEL-451 Protection, Automation, and Bay Control System, Instruction Manual, Schweitzer Engineering Laboratories, 20250214
- [8] SEL-487V Capacitor Bank Protection, Automation, and Control, Instruction Manual, Schweitzer Engineering Laboratories, 20250214