



STK A3: Prenosna i distributivna oprema

Čanović Stevan, Spec. Sci
Crnogorski elektoprenosni sistem¹
stevan.canovic@cges.me

Aleksa Knežević, Spec.Sci
Crnogorski elektoprenosni sistem
aleksa.knezevic@cges.me

**Primjena uređaja za kontrolisano uključanje i uticaj na produženje
životnog vijeka prekidača**

Kratak sadržaj:

U mrežama visokog i veoma visokog napona česte su pojave sklopnih prenapona koji mogu izazvati velike probleme u elektroenergetskom sistemu. Problemi su naročito izraženi prilikom uključanja energetskih transformatora, kao i kompenzacionih uređaja (šant reaktori). Zabilježeni su slučajevi gdje je prilikom uključanja prekidača u transformatorskim poljima došlo do ispada kompletne transformatorske stanice sa izrazitim finansijskim posljedicama. U cilju sprječavanja takvih pojava u čvorovima sistema koji su prepoznati po pojavama sklopnih prenapona, javlja se potreba ugradnje uređaja za kontrolisano uključanje prekidača, čime se snižava, ili u potpunosti eliminiše pojava prenapona koji ugrožavaju izolaciju visokonaponske opreme u transformatorskim stanicama.

Ključne riječi: kontrolisano uključanje, sklopni prenaponi, životni vijek VN opreme

**Application of controlled switching devices and impact on life extension of
circuit breakers**

Summary:

In high voltage and very high voltage networks, there are frequent occurrences of switching overvoltages that can cause major problems in the electrical power system. Problems are particularly emphasized during switching of power transformers as well as compensation devices (shunt reactors). There have been cases when switching of circuit breakers in transformer bays resulted in complete shutdown in the substation, with distinct financial consequences. In order to prevent such occurrences in the nodes of systems recognized by the appearance of switching overvoltages, there is a need to install a device for controlled switching of circuit breakers, thereby reducing or completely

¹ Bulevar Svetog Petra Cetinjskog 18

eliminating the appearance of overvoltages that threaten the insulation of high voltage equipment within substations.

Key words: controlled switching, switching overvoltages, lifetime of HV equipment

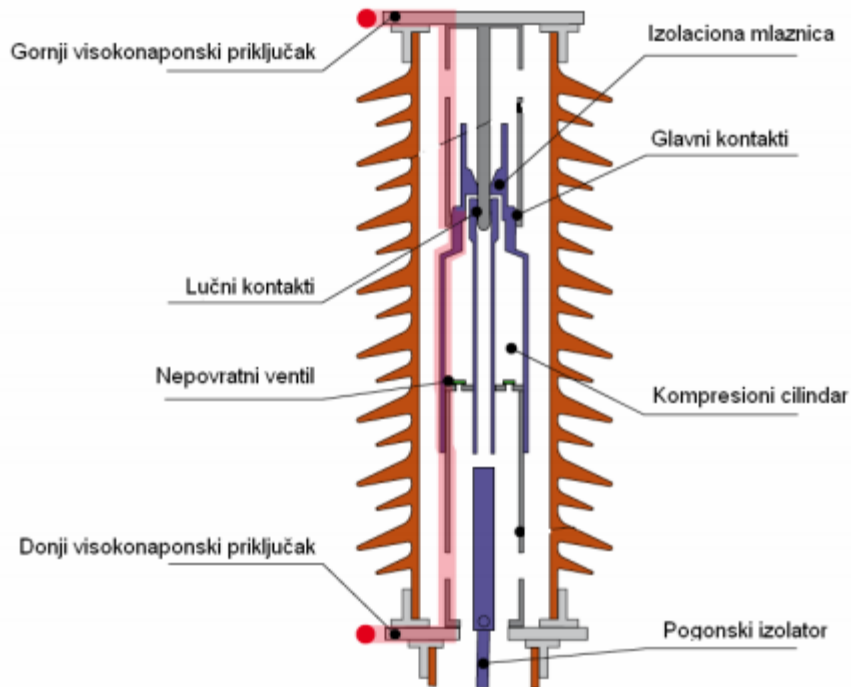
1. Uvod

Potreba za električnom energijom konstatno raste na globalnom nivou. Rast je očekivan obzirom na sve izraženiji tehnološki napredak uz težnju da se smanji potrošnja fosilnih goriva usljed štetnih djelovanja na polju ekologije. Svjedoci smo da je sve veći broj električnih automobila u upotrebi sa očekivanjem da će u budućnosti samo biti u upotrebi automobili na električni pogon. Pored toga sve je veći upliv interminantnih obnovljivih izvora energije sa kojima se nastoje zamijeniti elektrane koji za proizvodnju električne energije koriste uglj ili naftu. Da bi se takva proizvodnja mogla nadomjestiti potrebno je i do 40 % više instaliranih kapaciteta obnovljivih izvora (vjetroelektrane i fotonaponske elektrane) usljed njihovog promjenjivog rada. U cilju priključenja novoizgrađenih proizvodnih objekata neophodno je izgraditi i infrastrukturu za njihovo priključenje, što znači izgradnju novih dalekovoda i transformatorskih stanica. Kako je već naglašen promjenjiv pogon vjetroelektrana kao i fotonaponskih elektrana mogu se očekivati česte manipulacije sa prekidačkom opremom (isključenja u periodima bez vjetera ili sunca). Kod velikih vjetroparkova je čest slučaj priključenje fiksnog šant reaktora u cilju kompenzovanja reaktivne energije. Prključenje šant reaktora ali i česte manipulacije sa prekidačkom opremom (dani bez vjetera ili sunca u slučaju fotonaponske elektrane) pred prekidače postavljaju značajne izazove koje je potrebno savladati. Česta pojava sklopnih prenapona uz niz drugih štetnih pojava je ono što napreže prekidačku opremu. Ta naprezanja su izraženija i veća ukoliko se za voljne manipulacije ne koristi uređaji za kontrolisani uklop.

2. Prekidači snage

Element elektroenergetskog sistema koji se koristi za prekidanje struje u redovnom pogonu, ili uslovima kvara, kao i pri ponovnom uključenju elemenata sistema na mrežu jeste prekidač snage. Da bi se izgasio luk nastao prekidanjem struje neophodno je korištenje određenog izolacionog medija. U današnje vrijeme dominantno u upotrebi su prekidači sa SF6 tehnikom gdje se za prekidanje luka koristi SF6 gas. U mnogo manjoj mjeri i dalje se u upotrebi mogu naći prekidači koji za izolacioni medijum imaju ulje. Prednosti SF6 prekidača u odnosu na malouljne prekidače su mnogostruki, a ogledaju se prije svega kroz duže periode eksploatacije bez revizije, ili remonta prekidača.

Kako se pred prekidače postavljaju različiti zahtjevi u pogledu eksploatacije, što prije svega zavisi od mjesta ugradnje i prilika u sistemu, tako se za ugradnju mogu odabrati prekidači sa pojačanim karakteristikama. Za slučaj očekivanog čestog rada odabira se prekidač klase M2 koji omogućava 10.000 garantovanih mehaničkih operacija, za slučaj pojave kapacitivnih struja prekidač klase C2, dok se za slučaj pojačanih električnih naprezanja bira prekidač sa karakteristikom E2 [1]. Odabir karakteristika prekidača je bitan zbog mjesta ugradnje i naveden je samo dio specifikacije o kojoj je neophodno voditi računa kako bi se dobio odgovarajući vijek trajanja prekidača snage uzimajući u obzir uslove u kojima će prekidač funkcionisati. Na slici 1 je prikazan presjek aktivnog dijela (dijela u kom dolazi do prekidanja struje) jednog SF6 prekidača koji je danas najčešće u upotrebi.



Slika 1. Presjek aktivnog dijela SF6 prekidača

Prilikom prekidanja struje stvara se luk koji je neophodno ugasiti prilikom prvog prolaska struje kroz nulu. Tokom svakog isključenja dolazi do pojave luka na lučnom kontaktu prekidača, a veliko naprezanje trpi i teflonska mlaznica koja ima ulogu usmjeravanja SF6 gasa na luk u cilju bržeg gašenja luka. Najveća naprezanja nastaju pri prekidanju struja kratkog spoja, ali taj dio nije od interesa za primjenu uređaja za kontrolisani uklop/isklop, jer u tom slučaju komanda isklopa zaobilazi uređaj.

U najvećem broju operacija prekidač će prekinuti struju, za šta je i konstruisan. Problem nastaje u onim djelovima sistema gdje se očekuje pojava induktivnih i kapacitivnih struja što se može očekivati u transformatorskim stanicama u okviru kojih su ugrađeni šant reaktori ili kondenzatorske baterije. Takođe, u praksi problemi uočeni i prilikom uključanja energetskih transformatora koji imaju u jezgru zaostalog magnetizma, a izuzetak nijesu ni vodovi sa niskim opterećenjem (koji se ponašaju kao generatori reaktivne energije). Pri uklapanju, ili isklapanju pomenutih elemenata sa mreže zabilježeni su slučajevi sa povratnim prenaponima (TRV ovima - transient recovery voltage) koji dosežu nivo dovoljan za ponovno uspostavljanje električnog luka gdje prekidač, ali i element sistema koji se uklapa ili isklapa sa mreže trpi velika naprezanja, a samim tim dolazi i do smanjenja životnog vijeka elementa. Kod uključanja transformatora ili šant raktora dodatno je uočen problem velikih polaznih struja (inrush current) koji može dovesti do isklapanja elementa sa mreže usljed mogućeg pogrešnog djelovanja zaštite, a samim tim i do reagovanja prekidača.

3. Sklopni prenaponi – nastanak povratnog napona na prekidaču

Sklopni, ili komutacioni prenaponi su prenaponi koji nastaju pri sklopnim operacijama tj. prilikom uklapanja, ili isklapanja elemenata sistema. Visina sklopnog prenapona zavisi od više faktora, ali i od toga

da li je nastao prilikom isklapanja kvara, ili je pak posljedica redovnog isklapanja, ili uklapanja elemenata sistema koji mogu dovesti do pojave nastanka sklopnog prenapona. Od interesa u radu su prenaponi nastali pri redovnim sklopnim operacijama. Dužeg su trajanja, ali manje amplitude u odnosu na atmosferske prenapone koji su po pravilu prenaponi sa najvećom vrijednosti. Visina prenapona se izražava pomoću koeficijenta prenapona koji pokazuje koliko je nastali prenapon veći u odnosu na maksimalnu vrijednost napona.

Nastajanju sklopnih prenapona predstoji stvaranje električnog luka. Poznavanje karakteristika luka koji se pojavljuje prilikom uklapanja i isklapanja prekidača u mnogome određuje konstrukciju prekidača snage. Prilikom sklopnih manipulacija usljed nastanka električnog luka i prekidanju stanja ravnoteže, tj. stacionarnog stanja usljed postojanja reaktivnih elemenata u sistemu (induktivnost i kapacitivnost) dolazi do povećanja napona i struja, usljed težnje sistema da se prilagodi novom stanju. Naponi nastali na ovakav način predstavljaju povratne napone koji se bilježe na krajevima prekidača i koji u znatnoj mjeri dielektrično naprežu izolaciju. Zabilježeni su i slučajevi sa eksplozijom aktivnog dijela prekidača usljed ponovnog uspostavljanja luka i nemogućnosti njegovog hlađenja i gašenja.

Najčešći sklopni prenaponi koji se susreću u sistemu pri redovnim sklopnim operacijama nastaju u slučajevima [2]:

- Isklapanja trofaznog opterećenog voda
- Uklapanja neopterećenog voda preko transformatora
- Uklapanje neopterećenog voda preko većeg broja drugih kablova ili vodova
- Isklapanje malih kapacitivnih struja (isklapanje dugih neoperećenih vodova, kondenzatorskih baterija)
- Isklapanje malih induktivnih struja (isklapanje prigušnica ili transformatora u praznom hodu)

U svim navedenim slučajevima su zabilježeni slučajevi sa prenaponima koji su značajno veći od najvišeg napona mreže. Kako bi se smanjilo naprezanje opreme u ovakvim situacijama potrebno je omogućiti kontrolisani uklop i isklop elemenata sistema.

4. Uređaji za kontrolisani uklop/isklop

U cilju sprječavanja visokih povratnih prenapona na kontaktima prekidača, kao i sprječavanja velikih polaznih struja kod elemenata kao što su energetske transformator, ili šant reaktor, primjenjuju se uređaji za kontrolisani uklop/isklop prekidača (CSD – control switching devices). Primjenom ovih uređaja uz adekvatan odabir i instalaciju odvodnika prenapona značajno se smanjuju dinamička i električna naprezanja opreme koja se uklapa na sistem, ili isklapa sa sistema, uz značajno manji stres samog prekidača. Primjenom kontrolisanog uklopa se značajno povećava period u kome je potrebno odraditi kontrolu kontaktnog sistema prekidača, kao i provjeru stanja mlaznice koja ima ulogu smjeravanja medija za gašenje ka električnom luku.

Princip funkcionisanja uređaja se zasniva na mehaničkoj kontroli uklopa/isklopa prekidača u odnosu na napone i struje tj. stanje sistema gdje se odabira najpovoljniji trenutak za manipulaciju. Odabir optimalnog trenutka uključivanja/isključivanja u mnogome zavisi od mehaničkih (brzina uklopa, brzina isklopa) i dielektričnih karakteristika prekidača [3] (faktor prvog pola, stepen izolacije, brzina uspostavljanja dielektrične čvrstoće u aktivnom dijelu prilikom otvaranja kontakata, smanjenje dielektrične čvrstoće prilikom zatvaranja kontakata). Vrijeme za izdavanje komande uklopa/isklopa se određuje prema izrazu 1[3].

$$T_{djelovanja} = T_{nominalno} + \Delta T_{predviđeno} + \Delta T_{statističko} \quad (1)$$

$$\Delta T_{predviđeno} = \Delta T_{proračunato} + \Delta T_{klizno} \quad (2)$$

gdje je :

T_{djelovanja} – vrijeme predviđeno za djelovanje upotrebom kontrolera a prethodi izdavanju komande
T_{nominalno} – srednje vrijeme trajanja uklopa/isklopa u normalnom pogonu (dobijeno od strane proizvođača prekidača)

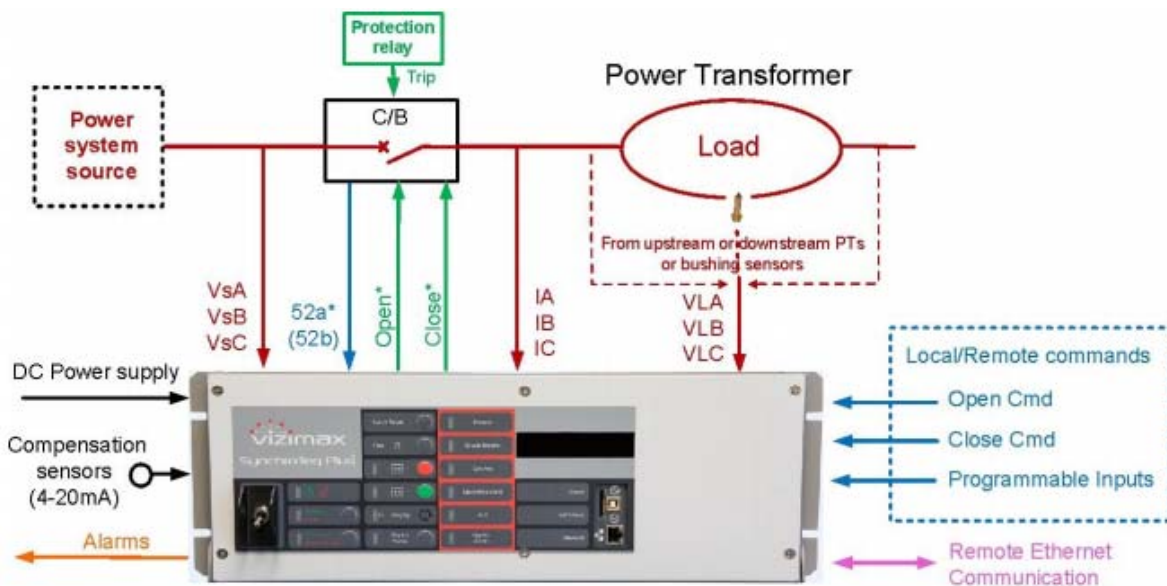
ΔT_{predviđeno} – u vezi sa nominalnim vremenom uklopa/isklopa (dobijeno od strane proizvođača)

ΔT_{statističko} – čisto statistička veličina i predstavlja vrijeme koje kontroler ne može predvidjeti (rasipanje u odnosu na nominalno vrijeme uklopa/isklopa)

ΔT_{klizno} - vrijeme potrebno za adaptaciju kontrolera na uslove (temperatura, vrijednost kontrolnog napona itd.)

Prilikom kontrolisanog uklopa u obzir pored parametara dobijenih pri fabričkom ispitivanju koji su u opsegu predviđenom od strane proizvođača (brzine uklopa i isklopa) uzimaju se i ostali parametri koji mogu uticati na brzinu uklopa/isklopa kao što je temperatura i vrijednost upravljačkog napona. Poznato je da što je manja vrijednost tih parametara veće je i vrijeme trajanja operacija uklopa i isklopa. U trenutku kada se izda nalog za uklop, ili isklon prekidača, uređaj za kontrolisani uklop/isklop uzima u obzir sve parametre koji mogu uticati na brzinu izvršenja naredbe i bira optimalni trenutak za djelovanje. Cilj je da se na osnovu odabira trenutka izdavanja komande uz poznavanje rada prekidača (vrijeme reagovanja kalemova uklopa i isklopa) uklop, ili isklon desi u trenutku najmanjih električnih naprezanja. Zavisno od mjesta primjene bira se trenutak prolaska napona ili struje kroz nulu, što je uslovljeno parametrom koji se želi minimizovati. Potpuna minimizacija jednog štetnog uticaja (smanjenje velikih polaznih struja) može dovesti do većeg izražaja druge štetne pojave (velika vrijednost napona na kontaktima prekidača).

Da bi uređaj za kontrolisani uklop/isklop funkcionisao kako treba neophodno je na njega dovesti stanje napona sa obje strane prekidača (sabirnice i sa elementa koji se uklapa, ili isklapa ako je primjenljivo) kao i izvod sa strujnog transformatora. Na ovaj način se izbjegavaju mogući problemi pri manipulisanju sa prekidačkom opremom. Princip funkcionisanja jednog takvog uređaja je prikazan na slici 2 gdje se vidi koje parametre je potrebno uzeti u obzir.



Slika 2. šematski prikaz djelovanja jednog uređaja za kontrolisani uklop/isklop prekidača

Pozitivan efekat ugradnje ovakvih kontrolera na životni vijek opreme se ogleda i kroz mogućnost stalnog monitoringa stanja opreme. Novije generacije uređaja pružaju mogućnost daljinskog očitavanja broja manipulacija, a daju i pregled o energiji koja je generisana na prekidaču kako pri voljnom djelovanju tako i pri reagovanju zaštitnog releja. Na taj način se koristeći uputstva dobijena od strane prekidača može na osnovu stvarnih potreba planirati remont prekidača, ili njegova kontrola.

5. Primjeri upotrebe uređaja za kontrolisani uklop

U zavisnosti od karakteristika elemenata koji uklapa, ili isklapa na mrežu, zavisi i podešenje uređaja za kontrolisani uklop. Tako se za različite elemente sistema odabira drugačiji moment uklopa, ili isklopa što u mnogome određuje pojava koja se želi izbjeći, ili minimizirati, a koja ima uticaj na životni vijek kako elementa sistema tako i prekidača snage koji se koristi za uklop/isklop, jer se na taj način smanjuje naprezanje i samog prekidača snage. Podešenje kontrolera zavisi od samog mjesta primjene kao što je navedeno. Dalje je navedeno par primjera gdje je neophodno primjeniti kontrolisani uklop. Za takve slučajeve je poželjno odraditi zasebne studije tranzijentnih procesa.

5.1 Uklop/isklop šant reaktora

Pri uklopu, ili isklupu šant reaktora može doći do pojave velikih polaznih struja pri uklopu, ili do pojave visokih napona pri isklapanju šant reaktora sa mreže. U oba navedena slučaja su evidentni štetni efekti kako za sami element koji je veoma vrijedan tako i za pripadajući prekidač kojim se vrši uklop tj. Isklop elementa sa mreže.

Problem isklapanja šant reaktora sa mreže se ogleda u prekidanju malih induktivnih struja, čije prekidanje može uzrokovati visoke napone sa posljedicama ponovnog paljenja luka između kontakata prekidača. Prenaponi nastali na ovaj način u mnogome zavise od parametara same mreže (kapaciteta i induktiviteta

mreže najviše) i teško je odrediti tačan nivo prenapona. U cilju proračuna mogućeg prenapona standard IEC /TR 61233 i dalje predviđa korišćenje propisanih vrijednosti kapaciteta i induktiviteta sabirnica koji se koriste u simulacijama, a koje će u obzir uzeti parametere same transformatorske stanice kao i karakteristike prekidača dobijene pri ispitivanju u laboratoriji [3]. U slučaju da se ne koristi uređaj za kontrolisani isklon može doći do značajno bržeg stradanja prekidača, naročito u slučaju da prekidač nije predviđen za takve uslove rade. Na slikama 3 i 4 su prikazane mlaznica prekidača sa kojim nije vršena kontrolisana manipulacija kao i prekidača na kojem je ugrađen kontroler uklopa/isklopa, a koji je primjenjivan za uklop/isklop šant raktora.



Slika 3. Stanje mlaznice pri nekontrolisanog isklopu (lijevo) I kontrolisanom uklopu (desno)



Slika 4. Stanje mlaznice pri nekontrolisanog isklopu (lijevo) I kontrolisanom uklopu (desno)

Stanje sa slike je jasno shvatljivo ako se uzme da su u simulacijama rađenim za ugradnju jednog varijabilnog šant reaktora snage 150 MVar naznačenog napona 420 kV dobijene vrijednosti polaznih struja u intervalu od 2.16 do 4.27 puta većih od nominalne pri nekontrolisanom uklopu dok su vrijednosti prelaznih napona na prekidaču dobijeni pri isklapanju reaktora sa mreže bili u intervali od 791.6 kV pri isklapanju reaktora sa snagom od 150 Mvar do 923.7 kV za slučaj isklapanja sa snagom od 80 MVar. Ove vrijednosti su nešto manje u slučaju primjene odvodnika prenapona što je svakako praksa [4]. U slučaju primjene uređaja za kontrolisani uklop/isklop polazne struje se ograničavaju u konkretnom slučaju na nivo 1.21 put veći od nominalne struje pa je samim tim pri operaciji uklopa jasan benefit ugradnje. Prilikom operacije isklopa nivo prelaznih napona na prekidaču, a samim tim i na šant reaktoru je značajno smanjen [4].

5.2 Uklop/isklop energetskih transformatora

Prilikom uklapanja/isklapanja energetskog transformatora sa mreže potrebno je u obzir uzeti niz faktora kako bi se izbjegle neželjene posljedice i mogući prekidi u napajanju. Posebna pažnja se mora obratiti prilikom uključivanja transformatora koji radi u paraleli sa još jednom ili više jedinica.

Prilikom isklapanja energetskog transformatora sa mreže opšte poznato je da u trafou ostaje dio zarobljenog magnetog toka tkz, zaostali magnetizam koji prilikom ponovnog uklapanja energetskog transformatora na mrežu može dovesti do problema. Usljed postojanja zaostalog magnetizma i činjenice da svi polovi prekidača ne uključuju istovremeno potencijalno može doći do nesimetričnog toka fluksa kod namotaja koji su prije priključeni na mrežu, a samim tim može doći i do pojave uslaska energetskog transformatora u stanje zasićenja (stanje prelaska koljena krive magnećenja) pri čemu dolazi do pojave velikih polaznih struja. Velike polazne struje nastale na ovaj način sadrže nesimetrične komponente od kojih prednjače drugi, treći i četvrti harmonik koji mogu prouzrokovati privremene prenapone u mreži, što zavisi od parametara sistema.

Velike polazne struje mogu dovesti do pogrešnog djelovanja zaštite pa samim tim i do nepotrebnog djelovanja prekidača. Iako su navedene polazne struje manje od struja kratkog spoja jednako mogu prouzrokovati dinamičke sile koje naprežu namotaje energetskog transformatora. Kako su evidentne štetne posljedice po sami energetski transformator jasno je i da je situacija slična i sa samim prekidačem, koji usljed potencijalnog pogrešnog djelovanja zaštitnog releja mora prekinuti velike polazne struje.

Potencijalni problem ali rijetko moguć se dešava prilikom isklapanja energetskog transformatora koji radi u stanju praznog hoda kada prekidač prekida male induktivne struje kada dolazi do pojave visokih napona na kontaktima prekidača. Današnji prekidači najčešće bez problema izvršavaju navedenu operaciju.

Upotrebom uređaja za kontrolisani uklop/isklop u obzir se uzima remanenti magnetizam. Uređaj proračunama remanentni magnetizam na osnovu napona koji se očitaju na mjernim uređajima prilikom isklapanja energetskog transformatora [3] I samim tim odabira pravi trenutak uključivanja prekidača. Na taj način se uspješno izbjegavaju opisani problemi, a ujedno smanjuju opterećenja elemenata sistema.

Zaključak

Rad je imao za cilj da prikaže benefite uređaja za kontrolisani uklop/isklop prekidača snage, čijom primjenom bi se značajno smanjila naprezanja prekidača snage i time značajno produžio životni vijek što je veoma značajno za funkcionisanje elektorenergetskog sistema u cjelini. Pored produženja životnog vijeka prekidača snage potrebno je naglasiti da se značajno produžava životni vijek opreme koja se nalazi u pripadajućem polju prekidača (najznačajniji elementi energetske transformatori, naročito velike jedinice, kao i šant reaktori). Rad je namijenjen kao uvod za dalju razradu teme i bolju analizu obzirom da je se u okviru Crnogorskog elektroprenosnog sistema prepoznata potreba za ugradnjim varijabilnog šant reaktora a koja je i predviđena planovima razvoja. Prilikom ugradnje varijabilnog šant reaktora neophodno je primijeniti uređaj za kontrolisani uklop/isklop prekidača snage, a neophodno je odraditi i studiju tranzijentnih procesa kako bi se odredili nivoi polaznih struja i napona koji mogu nastati u slučaju kada se kontroleri ne primjenjuju na osnovu koje će se izvršiti podešenje samom uređaja.

Literatura

- 1, IEC standard 62271-100
2. Stojkov Marinko, Baus Zoran, Barukčić Marinko, Provči Igor : „Električni sklopni aparati“ , Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu ,Slavonski Brod, 2015. godina
3. Cigre : „Guidelines for best practices for the commissioning and operation of controlled switching projects“, A3 transmission and distribution system, 2019.
4. Alan Župan, Božidar Grčić- Filipović, Dalibor Grčić- Filipović : “Transients caused by switching of 420 kV three-phase variable shunt reactor”, 2015.