

UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Mr Avni Alidemaj

**Uticaj karakteristika visokonaponskih
prekidača sa gasom SF6 na proces
isključenja iz mreže generatora velike
snage**

- DOKTORSKA DISERTACIJA -

Podgorica, 2021 godine

UNIVERSITY OF MONTENEGRO
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Avni Alidemaj, MSc

**Influence of characteristics of high
voltage circuit breakers with SF6 gas on
disconnection of large generators from
network**

- PhD thesis -

Podgorica, 2021

DOKTORAND:

Ime i prezime: Avni Alidemaj

Datum i mesto rođenja: 16.10.1967 god. Kernina, Istog, Kosovo.

Naziv završenog postdiplomskog studijskog programa i godina završetka: Magistarske studije, Elektrotehnički fakultet Priština, 2008 god.

MENTOR:

Prof. dr Sreten Škuletić, ETF Podgorica, Crna Gora.

ČLANOVI KOMISIJE:

Prof. dr Vladan Radulović, vanredni profesor, Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet.

Prof. dr Sreten Škuletić, redovni profesor, Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet.

Akademik Prof. dr Isuf Krasniqi, redovni član akademije nauka i umjetnosti, profesor, Univerzitet u Prištini, Elektrotehnički fakultet.

DATUM ODBRANE: 09.07.2021

Posvećujem

Svojim roditeljima,

za njihovu ljubav, podršku i razumevanje.

Zahvalnost

Najsrdačnije zahvaljujem mentoru prof. dr Sreten Škuletiću i Prof. dr Vladan Raduloviću na pruženoj pomoći, stalnoj saradnji i podršci u toku izrade ove disertacije.

Zahvaljujem i svim kolegama sa KOSTT_a i KEDS_a, posebno Prof. Dr, Akademiku Isuf Krasnići na iskazanom interesovanju i podsticanju tokom rada.

NAZIV DOKTORSKIH STUDIJA:

Doktorske studije elektrotehnike

NASLOV DOKTORSKE DISERTACIJE:

Uticaj karakteristika visokonaponskih prekidača sa gasom SF₆ na proces isključenja iz mreže generatora velike snage

REZIME:

Nesinhronizovano uključenje generatora na mrežu je pojava koja za posledicu ima niz negativnih efekata kako za sami generator, tako i za elemente postrojenja kojima se vrši priključenje generatora. Iz toga razloga, za zaštitu od ovakvih pojava razvijeni su različiti električni sistemi relejne zaštite. Međutim, kvarovi su u praksi mogući i u ovim sistemima, što može, između ostalog, dovesti do nesinhronizovanog uključjenja generatora na mrežu.

Intenzitet i težina posledica nesinhronizovanog uključjenja generatora na mrežu zavise od velikog broja uticajnih parametara. Najdominantniji uticaj predstavlja vrednost ugla između rotora generatora i magnetnih osa pojedinih faza statora pri kome dolazi do priključenja. Ovaj ugao određuje vrednost cirkulacione struje koja sadrži jednosmernu komponentu. S obzirom da se generator i elementi postrojenja moraju zaštititi od izuzetno velikih struja pri ovoj pojavi, potrebno je da prekidači u postrojenju što prije prekinu ukupnu struju kvara.

Prisutnost komponente jednosmjerne struje u toku isključenja kvara predstavlja izazov za prekidače. Izuzetna naprezanja prekidača koja se javljaju tom prilikom mogu da izazovu nemogućnost prekidanja struje kratkog spoja, usled čega dolazi do njegovog oštećenja. Ako posle komande za isključenje struja ne prolazi kroz nulu nema prekidanja luka, koji stvara visoku temperaturu i visok pritisak koji oštećuje kontakte, a može doći i do eksplozije prekidača.

Osnovni problemi sa kojima se suočava elektroenergetski sistem (EES) Kosovo su: zastarelost trafostanica, dalekovoda, prekidača, prateće opreme i sl. Ne funkcionisanje ovih elemenata rezultat je njihovog dugotrajnog rada i prekoračenja životne dobi, što u

značajnoj meri smanjuje pouzdanost rada sistema. EES je u stalnom takozvanom “stresu”, jer se uvek mogu pojaviti neočekivani novi kvarovi elemenata u sistemu.

Smanjenje pouzdanosti sistema je rezultat velikog broja delovanja prekidača, u normalnom operativnom radu, kao i čestih kvarova koji utiču na njihova sistematska oštećenja i prevremenu zastarelost. Zbog zastarelosti i neodgovarajućeg održavanja, veoma često ostaju u položaju da ne mogu uključiti niti isključiti električni krug, što predstavlja veliki problem za funkcionalnost EES Kosovo.

U radu je data sveobuhvatna analiza pojave nesinhronizovanog uključenja generatora na mrežu i posledica na reagovanje prekidača u razmatranom slučaju. Za ove potrebe razmatran je dio EES kojim se obuhvataju svi mogući uticaju na posmatranu pojavu.

U cilju analize ove pojave u radu je analizirana situacija slučajnog uključenja nesinhroniziranog generatora preko 400 kV prekidača u elektroenergetskom sistemu Kosovo što je dovelo do značajnih oštećenja prekidača. Ovaj događaj se dogodio u Kosovskom energetskom sistemu dana 23.08.2011., konkretnije u termoelektrani (TE) “Kosovo B”.

Rad se bazira na slučaju akcidentnog uključenja prekidača snage generatora bez sinhronizacije sa mrežom koji se desio zbog nekih problema na komandnim krugovima.

U momentu kad je problem nastao nije bilo kratkog spoja ili isključenja pod opterećenjem, kvar je bio slučajan. Pre navedenog slučaja generator je radio pod normalnim uslovima.

U radu su analizirane mnoge publikacije koje su rađene na ovu temu, gde se uzima kao osnova realan slučaj sličan onom koji se desio u EES Kosovo, na osnovu čega je moguće izvući određene zaključke i preporuke.

Korišćenjem razvijenih modela elemenata sistema primjenom poznatih specijalizovanih kompjuterskih softvera simulirani su različiti radni režimi i pojave koji su od interesa za slučaj naprežanja prekidača u blizini generatora.

Rezultati dobijeni simulacijama poređeni su sa rezultatima snimljenim u toku realnog događaja nesinhronizovanog uključenja koji se dogodio u EES Kosovo.

Dobijeni rezultati daju mogućnost za formiranje određenih smjernica za predlaganje konkretnih mjera za izbor najpovoljnijih prekidača, podešavanje relejne zaštite i

izbjegavanje eventualnih dodatnih problema koji se u datim konkretnim uslovima mogu pojaviti.

KLJUČNE REČI: Visokonaponski prekidači sa gasom SF₆, isključenje generatora, nesinhronizirano uključanje, kvarovi prekidača.

NAUČNA OBLAST: Elektroenergetika

UŽA NAUČNA OBLAST: Elektroenergetski sistemi

PhD STUDIES:

PhD studies of electrotechnique

PhD THESIS:

Influence of characteristics of high voltage circuit breakers with SF6 gas on disconnection of large generators from network

ABSTRACT:

The non-synchronized switching of the generator on the network is a phenomenon that results in a number of negative effects both for the generator itself and for the elements of the equipment that are connected to the generator. For this reason, various electrical relay protection systems, for protection of this kind of phenomenon have been developed. However, failures in the practice are also possible in these systems, which in practice, among other things, can lead to a non-synchronized switching of the generator to the network.

The intensity and severity of the consequences of the non-synchronized switching of the generator to the network depend on a large number of influencing parameters. The most dominant influence is the value of the angle between the generator rotor and the magnetic axes of the individual stator phases in which the connection occurs.

This angle determines the value of the circulation current containing the DC component. Since the generator and equipment components must be protected against extremely high currents during this phenomenon, it is necessary that the breakers in the equipment stop the total fault current as soon as possible.

The presence of a DC current component during switch-off is a challenge for the switches. Excessive stresses of the switches occurring on that occasion may cause inability to break short circuit current, resulting in damage to it. If the short circuit current does not go through the zero after the switch-off command, there is not breakdown of electric arc, which creates a high temperature and high pressure that damages the contacts, and can come to an explosion of the switch.

Basic problems faced by Kosovo's electricity system are: the obsolescence of substations, power lines, switches, supporting equipment, etc. Not functioning of these elements is the result of their long-lasting work and over-life, which to a significant extent

reduces the reliability of the system. The electric power system is in the so-called "stress" because unexpected new faults in the system may always appear.

Reduction of system reliability is the result of a large number of switch-on & switch-off by normal operation, and frequent faults that affect their systematic damage and premature obsolescence. Due to obsolescence and inadequate maintenance, very often they remain in a position not to turn-on or turn-off the electric circuit, which is a major problem for the functionality of the Kosovo electricity system.

The paper provides a comprehensive analysis of the occurrence of non-synchronized switching of the generator on the network and the consequence of the response of the switches in the case under consideration. For these purposes, a part of the electricity system has been considered, encompassing all possible impacts on the observed phenomenon.

In order to analyze this phenomenon, the paper analyzes the situation of accidental switching of a non-synchronized generator over 400 kV switches in the electric power system of Kosovo, which caused significant damages to the switch. This event took place in the Kosovo Energy System on August 23, 2011, more specifically in the thermal power plant (TPP) "Kosovo B".

The work is based on a case of accidental switching of the power generator switch without synchronization with the network which happened because of some problems on command circuits. At the moment when the problem arose, there was no short circuit or disconnection under load, the malfunction was accidental. Prior to this case, the generator worked under normal conditions.

This paper analyzes many publications that have been developed on this topic, where the real case similar to that determined in the Kosovo electricity system is taken as the basis on the basis of which it is possible to draw certain conclusions and recommendations.

Using the developed models of system elements, using well-known specialized computer software, different operating modes and phenomena are simulated that are of interest for the case of occurrence stressors to the switches near the generator.

The results obtained by the simulations are compared with the results recorded during the real event, the non-synchronized switch-on that occurred in the Kosovo power system.

The obtained results provide the possibility for the formation of certain guidelines for proposing concrete measures for selecting the most favorable switches, setting relay protection and avoiding any additional problems that may arise in the particular circumstances.

KEY WORDS: High voltage circuit breakers with SF6 gas, generator disconnection, nonsinhronized connection, breaker failures.

SCIENTIFIC AREA: Power systems and automatics

NARROW SCIENTIFIC AREA: Power systems

UDK broj:

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| 1. UVOD | 14 |
| 2. VISOKINAPONSKI PREKIDAČI | 20 |
| 2.1. Opšte | 20 |
| 2.2. Klasifikacija prekidača | 22 |
| 2.3. Osnovni delovi prekidača | 25 |
| 2.4. Opis konstrukcije i princip rada prekidača | 28 |
| 2.5. Nazivne karakteristike | 32 |
| 2.6. Izbor visokonaponskih prekidača | 33 |
| 2.7. Rutinsko ispitivanje prekidača | 35 |
| 2.8. Prednosti i nedostaci raznih tipova prekidača | 37 |
| 2.8.1. Zračni (vazdušni) prekidači | 37 |
| 2.8.2. Prekidači s magnetskim delovanjem | 37 |
| 2.8.3. Uljni prekidači | 38 |
| 2.8.4. Malouljni prekidači | 39 |
| 2.8.5. Vakumski prekidači | 41 |
| 2.8.6. Hidromatski prekidači | 41 |
| 2.8.7. Pneumatski prekidači | 42 |
| 2.8.8. Prekidači sa gasom SF ₆ | 43 |
| 3. PREKIDAČI SA GASOM SF₆ | 45 |
| 3.1. Opšte | 45 |
| 3.2. Osnovni delovi i princip rada prekidača sa gasom SF ₆ | 48 |
| 3.2.1. Prekidna jedinica prekidača | 48 |
| 3.2.2. Pogonski mehanizam prekidača | 51 |
| 3.2.3. Električne šeme delovanja, komandovanja i signalizacije prekidača | 52 |
| 3.3. Tipovi prekidača sa gasom SF ₆ | 55 |
| 3.3.1. Dvopritisni prekidači sa gasom SF ₆ | 56 |
| 3.3.2. Jednopritisni prekidači sa gasom SF ₆ na potisnom principu | 57 |
| 3.3.3. SF ₆ prekidači sa samooduvavanjem luka | 58 |
| 3.3.4. SF ₆ prekidači sa magnetnom rotacijom luka | 59 |
| 3.4. Ispitivanje SF ₆ gasa | 60 |
| 3.5. Izbor prekidača na bazi IEC standarda | 62 |

| | |
|--|------------|
| 3.5.1. Uputstvo za izbor prekidača..... | 62 |
| 4. ELEKTROENERGETSKI SISTEM KOSOVO..... | 69 |
| 4.1. Operator Sistema, Prenosa i Tržišta A.D..... | 70 |
| 4.2. Kapaciteti za proizvodnju električne energije..... | 72 |
| 4.2.1. Termoelektrana Kosovo A..... | 72 |
| 4.2.2. Termoelektrana Kosovo B..... | 74 |
| 4.2.3. Hidroelektrane na Kosovu..... | 75 |
| 4.3. Osnovni problemi EES Kosovo..... | 76 |
| 4.4. Prekidači u prenosnom sistemu Kosovo..... | 77 |
| 5. ANALIZA POSMATRANOG DOGAĐAJA..... | 80 |
| 5.1. Opis događaja..... | 80 |
| 5.2. Merenja u toku događaja..... | 86 |
| 5.3. Iskustva iz poznate prakse..... | 100 |
| 6. MATEMATIČKI MODEL..... | 103 |
| 6.1. Opšte..... | 103 |
| 6.2. Sinhronizacija..... | 104 |
| 6.3. Elektrodinamički procesi tokom kvara elektroenergetskog sistema i sinhronizacije... .. | 105 |
| 6.3.1. Prelazna stabilnost..... | 106 |
| 6.3.2. Trofazni kvarovi..... | 108 |
| 6.4. Kratak spoj u mreži i njegovo isključenje..... | 112 |
| 7. PROGRAMSKI PAKETI ZA POTREBNE PRORAČUNE..... | 116 |
| 8. SIMULACIJE UKLJUČENJA NESINHRONIZIRANOG GENERATORA NA MREŽI POD RAZNIM UGLOVIMA..... | 123 |
| 9. EKSPERIMENT I REZULTATI SIMULACIJA..... | 131 |
| 10. ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA..... | 137 |
| 11. ZAKLJUČCI..... | 144 |
| 12. LITERATURA..... | 152 |
| 13. BIOGRAFIJA AUTORA..... | 158 |

1. UVOD

Nesinhronizovano uključanje generatora na mrežu je pojava koja za posledicu ima niz negativnih efekata kako za sami generator, tako i za elemente postrojenja kojima se vrši priključenje generatora.

Prisutnost komponente jednosmerne struje u toku isključenja kvara predstavlja izazov za prekidače. Izuzetna naprezanja prekidača koja se javljaju tom prilikom mogu da izazovu nemogućnost prekidanja struje kratkog spoja, usled čega može doći do njegovog oštećenja. Ako posle komande za isključenje struja ne prolazi kroz nulu nema prekidanja luka, koji stvara visoku temperaturu i visok pritisak koji oštećuje kontakte, a može dovesti i do eksplozije prekidača.

Jačina i vreme trajanja komponente jednosmerne struje zavise od vrste kvara. Ona se javlja i u toku uključanja generatora na mrežu bez ispunjenog kriterijuma sinhronizacije. Performanse prekidača visokog napona određuju se bazirajući se na specifičnostima koje zavise od okolnosti koje vladaju i koje se dešavaju u sistemu. Zato je potrebno da se radi odvojena analiza za svaku vrstu generatora. U praksi su poznati mnogi slučajevi otkazivanja generatorskih prekidača visokog napona u slučajevima kvara zbog njihovog neadekvatnog dimenzioniranja. U objašnjenjima ovih pojava obično se u literaturi ne uzimaju u obzir bitne specifičnosti koje daju ove pojave [1], [2].

Povećane struje koje se javljaju moraju se isključiti kako ne bi došlo do termičkog i mehaničkog oštećenja generatora i opreme u postrojenju. Ovu ulogu isključenja obavljaju prekidači. Zbog pojave jednosmerne komponente struje naprezanja prekidača se znatno povećavaju. U pojedinim slučajevima to može dovesti do nemogućnosti prekidača da isključe struju kvara koja se pojavljuje pri pojavi nesinhronizovanog uključanja. U cilju razmatranja mogućnosti prekidača u pogledu prekidanja struja, u radu je dat detaljan pregled i opis rada osnovnih vrsta prekidača. Analiza prekidača je posebno naglašena jer se problem nadovezuje na izbor odgovarajućih parametara prekidača zbog posebnih uslova koje zahtevaju prekidači generatora.

Posebna pažnja je posvećena prekidačima sa gasom SF₆ koji se dominantno danas koriste na visokim naponima i koji su uglavnom ugrađeni u elektroenergetski sistem (EES) Kosova.

U radu je data sveobuhvatna analiza pojava koje prate proces pojave nesinhronizovanog uključenja generatora na mrežu sa aspekta strujnih i naponskih prilika koje se javljaju. Analiza je izvršena na dijelu elektroenergetskog sistema na kome se sve prateće pojave mogu obuhvatiti i analizirati.

Posebno je analiziran događaj koji se dogodio u elektroenergetskom sistemu Kosova na dan 23.08.2011, konkretnije u termoelektrani (TE) "Kosovo B".

U cilju analize ovog slučaja, u radu je analizirana situacija slučajnog uključenja nesinhroniziranog generatora preko 400 kV prekidača u elektroenergetskom sistemu Kosova što je dovelo do značajnih oštećenja prekidača.

Elektroenergetski sistem Kosova karakteriše se sa snažnom interkonektivnom vezom sa 400 kV regionalnom mrežom. Ova čvrsta veza prenosne mreže sa okolnim mrežama uvrštava elektroenergetski sistem Kosova u jedan od važnih elektroenergetskih čvorova u regionu i šire.

Funkcionisanje elektroenergetskog sistema Kosova suočava se sa mnogo problema.

Osnovni problemi sa kojima se suočava elektroenergetski sistem Kosovo su; zastarelost trafostanica, dalekovoda, prekidača, prateće opreme itd. Nefunkcionisanje ovih elemenata rezultat je njihovog dugotrajnog rada i prekoračenja životne dobi, što smanjuje pouzdanost rada sistema. Elektroenergetski sistem je u stalnom takozvanom "stresu" jer se uvek mogu očekivati neočekivani novi kvarovi elemenata u sistemu.

Smanjenje pouzdanosti ovih postrojenja je rezultat velikog broja delovanja prekidača, u normalnom operativnom radu, kao i zbog čestih kvarova koji utiču na njihova značajna oštećenja i prevremenu zastarelost. Zbog zastarelosti i neodgovarajućeg održavanja, ostaju u položaju da ne mogu uključiti niti isključiti električni krug, što predstavlja veliki problem za funkcionalnost elektroenergetskog sistema Kosovo.

Posmatrani kvar se desio u komandnim krugovima generatorskog prekidača, kod opterećenja sistema od 1050 MW. Snimanje je vršeno na zaštitnim relejima tipa Siemens 7SA612 i 7SJ612, u generatorskom polju u trafostanici (TS) 400/220 kV pored termoelektrane (TE) "Kosovo B".

Rad se bazira na slučaju akcidentnog uključenja prekidača snage generatora bez sinhronizacije sa mrežom zbog nekih problema na komandnim krugovima. U momentu kad je problem nastao nije bilo kratkog spoja ili isključenja pod opterećenjem, kvar je bio

slučajan. Pre navedenog slučaja generator je radio pod normalnim uslovima. U konkretnom slučaju analiziran je generator snage 339 MVA, 24 kV.

U postojećoj literaturi postoji više opisa sličnih problema i pristupa analizi problema koji nastaju prilikom uključanja nesinhroniziranog generatora. Dio radova koji tretiraju sličan fenomen su dati u spisku literature [1], [2], [3] i [4] i slično.

U okviru ovih istraživanja u početku su date neke važne reference za razmatranje ovog problema. U radovima su analizirana kašnjenja prolaska struje kroz nulu zbog raznih razloga. Analizirana je sličnost sa kašnjenjima struja koja prolaze kroz nulu, i koje se javljaju pri kvarovima na terminalima generatora na strani visokog napona. Ubrzanje rotora zbog gubitka sinhronizacije pod uglom $\delta=0$ rezultira sa malom izmeničnom strujom (AC komponenta) i sa dominacijom jednosmerne struje (DC komponenta) [1], [2], [3] i [4].

Postoje razni parametri koji utiču na kašnjenje prolaska struja kvara kroz nulu.

Parametar sa najvećim uticajem na DC komponentu je početni ugao $\delta=0$. Drugi važni parametri su konstanta inercije turbo grupe i početna devijacija od sinhronne brzine.

Prema navedinim radovima [1], [2], [3] i [4], zavisno od podataka, generator u trenutku pojave kvara u blizini terminala generatora, prati i komponenta jednosmerne struje koja ima veliku vrednost i koja čini da komponenta izmenične struje kasni u prolazu kroz nulu. U ovom slučaju tokom trofaznog kratkog spoja, maksimalna nesimetrija je u jednoj fazi [1], [2], [3], [4].

Ovo je pojava koja se u praksi retko dešava, ali se može pojaviti kao rezultat raznih kvarova u signalnim i komandnim strujnim krugovima. Kao rezultat ovakvih uključanja, posledice mogu biti različite, u zavisnosti od momenta kada se to nesinhrono uključanje desilo [1], [2], [3] i [4].

U ovom radu su analizirane mnoge publikacije koje su objavljene na ovu temu, gde se uzima kao osnova realan slučaj sličan onom koji se desio u elektroenergetskom sistemu Kosova.

Koristeći prethodno, biće formirani matematički modeli pojedinih elemenata elektroenergetskog sistema koji imaju dominantan uticaj na pojave jednosmerne komponente struje kvara u raznim havarijskim režimima u sistemu. Poseban akcenat biće dat detaljnom proučavanju, analizi i modeliranju prekidača i električnog luka. U cilju

verifikacije rezultata dobijenih u prethodnim koracima biće sprovedena analiza pojedinih simuliranih slučajeva u delu realnog elektroenergetskog sistema.

Simulacije će se realizovati u EES Kosova, u TS 400/220 kV u blizini TE “Kosovo B” [5], [6].

Simulacije će se sprovoditi za različite uglove između mreže i proizvodnje/elektrane, uključujući ugao od 114° .

Ugao od 114° je ugao pod kojim se incident dogodio, dok se drugi uglovi uzimaju kao proizvoljni uglovi samo za potrebe analize.

Simulacije su realizovane u programskom paketu ATP/EMTP. Model će biti provjeren poređenjem simulacionih rezultata sa snimljenim rezultatima tokom događaja nesinhronizovanog uključanja generatora na konkretnu mrežu u EES Kosovo.

Primjenom simulacionog modela biće izvršena analiza pojave nesinhronizovanog uključanja za široki opseg najuticajnih parametara. Kao dominantan parametar, razmatran je uticaj ugla između rotora i magnetnih osa pojedinih faza namotaja statora. Razmatrane analize omogućavaju određivanje kritičnih situacije koje mogu dovesti do najvećih naprezanja prekidača [6], [7].

Korišćenjem razvijenih modela elemenata sistema u specijalizovanim kompjuterskim softverima biće simulirani različiti radni režimi koji su od interesa za pojavu naprezanja prekidača u blizini generatora.

U cilju dobijanja tačnijih rezultata simulacije će se sprovesti pomoću nekoliko programa, kao što su program elektromagnetnih tranzicija (EMTP/ATP), simulatora snage sistema za inženjering (PSS/E) i MATLAB [6].

Služeći se sa programom EMTP/ATP biće modeliran jednostavan slučaj u sistemu gde je jedan deo mreže zamenjen ekvivalentnim izvorom, dok je generator modeliran sa parametrima koji odgovaraju subtranzijentnom (predprelaznom) i tranzijentnom (prelaznom) periodu.

Na osnovu analize dobijenih rezultata razmatraće se mogućnosti sprječavanja posljedica neželjenog slučaja nesinhronizovanog uključanja, kako bi se smanjili troškovi usljed nastalih šteta. U tom smislu će se dati preporuke za izbor prekidača i podešavanje relejne zaštite kako bi se negativni efekti smanjili na najmanju moguću mjeru [8], [9], [10], [11].

Rad je podeljen na 12 poglavlja.

- U prvom poglavlju “Uvod”, date su uvodne napomene o razmatranoj problematici u radu, problemi došadasnjih istraživanja, metodologija koja će se koristiti i očekivani rezultati.
- U drugom poglavlju “Visokonaponski prekidači”, na uopšten način su prikazani prekidači, njihova uloga i značaj u elektroenergetskom sistemu. Prikazani su osnovni delovi prekidača, njihov princip rada, karakteristike, kao i njihova podela i način izbora sa aspekta mesta ugradnje i uloge u sistemu. Na kraju opisa svakog tipa prekidača date su njihove prednosti i mane.
- U trećem poglavlju “Prekidači sa gasom SF₆”, analiziran je prekidač sa gasom SF₆, 400 kV, zato što pojava koja je analizirana u radu se upravo odnosi na ovakav tip prekidača. Detaljno su dati njegovi glavni delovi, princip delovanja, kao i njihova podela u podtipove. Data su pravila i postupci za izbor osnovnih karakteristika prekidača s obzirom na njihovu namenu i mesto ugradnje prema IEC standardima.
- U četvrtom poglavlju “Elektroenergetski sistem Kosova”, opisan je ovaj sistem i analizirano njegovo funkcionisanje i problemi sa kojima se suočava, kao i njegova veza sa sistemima u susednim zemljama. Navedene su jedinice na koje se bazira proizvodnja električne energije na Kosovo. Prikazani su i prekidači koji su ugrađeni u elektroenergetskom sistemu Kosova.
- U petom poglavlju “Analiza posmatranog događaja”, je prikazan konkretan problem (analiziran u radu), koji se je dogodio u elektroenergetskom sistemu Kosova, kad i gde se dogodio problem, njegove posledice kao i kako se sve to odrazio na rad sistema.
- U šestom poglavlju “Matematički model”, predstavljen je matematički model koji opisuje ponašanje električnih veličina (napon i struja) u toku prelaznih pojava (pre, u toku i posle događaja), i vrednosti koje se mogu upotrebiti za različita simuliranja.
- U sedmom poglavlju “Programski paketi za potrebne proračune” su predstavljeni softverski paketi koji su korišćeni za analizu pojava koje se javljaju u elektroenergetskom sistemu Kosova. To su tri u literaturi najčešće korišćena

softvera: PSS/E, EMTP/ATP i MATLAB, od kojih jedan (PSS/E) je pogodan za računanje kratkih spojeva u složenim elektroenergetskim sistemima, dok je drugi (EMTP/ATP) pogodan za analizu prelaznih pojava u elektroenergetskim sistemima, gde se traži visoka tačnost u prikazivanju prelaznih pojava koje se javljaju u sistemu, treći MATLAB u našem slučaju se koristi za izračunavanje efektivne vrijednosti struja (I_{RMS}).

- U osmom poglavlju “Simulacije uključenja nesinhroniziranog generatora na mreži pod raznim uglovima”, provedene su simulacije pojedinih slučajeva u delu realnog elektroenergetskog sistema. Simulacije su realizovane u elektroenergetskom sistemu Kosovo, u TS 400/220 kV u blizini TE “Kosovo B”.
- U devetom poglavlju “Eksperimenat i rezultati simulacija”, dati su rezultati simulacija pri istim vrednostima ulaznih podataka kao u realnom slučaju.
- U desetom poglavlju “Analiza dobijenih rezultata”, urađena je uporedna analiza snimljenih (realnih u toku događaja), sa onima dobijenim simuliranjem sa različitim softverima.
- U jedanestom poglavlju “Zaključci”, su sažeto prezentirane, analiza konkretnog slučaja, kao i posledice kao rezultat uključenja prekidača iako nisu bili ispunjeni uslovi sinhronizacije. Analiza raznih tipova prekidača, njihove prednosti i mane. Simulacije sa različitim softverima. Upoređivanje snimljenih podataka (realni) sa onim dobijenih simulacijama, i na kraju, na bazi dobijenih rezultata u toku istraživanja, smernice za predlaganje konkretnih mera za izbor prekidača, podešavanje relejne zaštite, preporuke za preuzimanje dodatnih mera za sprečavanje pojave ovakvih slučajeva, kao i predloge za rešenja za eventualne probleme koji se u datim uslovima mogu pojaviti.
- U dvanestom poglavlju “Literatura” dat je spisak korišćenih referenci prilikom izrade teze.

2. VISOKONAPONSKI PREKIDAČI

2.1. Opšte

Prekidači su mehanički sklopni aparati koji uklapaju, trajno provode i prekidaju struje u normalnim pogonskim uslovima i koji uklapaju, kratkotrajno podnose i prekidaju nazivnu vrednost struje kratkog spoja.

Prekidači u visokonaponskim razvodnim postrojenima su uređaji koji služe za uključenje i isključenje strujnih krugova u normalnom pogonu, kao i za isključenje strujnih krugova u havarijskim režimima [9]. Njihov glavni zadatak je povećanje razmaka među kontaktima, intenzivno produženje luka delovanjem magnetskog polja, strujanjem plinova ili tekućina, uzdužno ili poprečno na luk, bilo da je strujanje posledica delovanja samog luka, bilo da se to ostvaruje pomoću nezavisnog izvora energije, dodir luka s dielektrikom u uskim rasporima ili podela luka na više kratkih lukova.

Jedan od važnih delova energetskeg sistema je prekidač snage, koji štiti energetske mreže (njene elemente) od posledica svih poremećaja u mreži.

Sigurnost delovanja prekidača je važan faktor jer od toga zavisi rad i sigurnost elemenata energetske mreže.

Visokonaponski prekidači moraju podneti određena električna, toplotna i mehanička naprezanja koja se javljaju pri raznim radnim i havarijskim režimima. Nivo ovih naprezanja određuje performanse koje prekidači moraju zadovoljiti kako bi se njihovom upotrebom dobili željeni rezultati [9]. Zbog pojave električnog luka, posebno prilikom isključenja, prekidači moraju biti sposobni da uspešno i veoma brzo ugase električni luk.

Gašenje luka je kompliciran proces na koji utiču električne, magnetske, hemijske, termodinamičke i hidrodinamičke pojave. Koja će od tih pojava prevladati i preuzeti glavni uticaj na gašenje luka zavisi o vrsti prekidača i o medijumu za gašenje luka. U svim slučajevima za gašenje luka potrebno je:

- a) Vrlo brzo povećati razmak među kontaktima, kako bi se čim pre postigla udaljenost na kojoj će se luk ugasi i koja će biti dovoljna da spreči njegovo ponovno palenje.
- b) Smanjiti presek luka, kako bi se povećao njegov pad napona i
- c) Pri tome osigurati intenzivno odvođenje toplote.

Gašenje luka izmenične struje olakšano je činjenicom da napon mreže i struja luka nakon svake polovine periode prolaze kroz vrednost nula. U trenutku kad struja prolazi kroz vrednost nula luk se gasi, a ponovno će se pojaviti ako je napon potreban za ponovno paljenje luka manji od napona mreže, odnosno ako je napon mreže dovoljan da savlada električnu čvrstoću razmaka među kontaktima.

Ako je električna čvrstoća nakon gašenja luka stalno veća od napona mreže, luk se neće ponovo upaliti. Međutim, ako u jednom trenutku napon mreže postane veći od električne čvrstoće, luk će se ponovo upaliti do ponovnog prolaza struje kroz nulu.

Visokonaponski prekidači su uređaji koji omogućavaju pouzdan rad elektroenergetskog sistema, veoma kompleksnog sistema koji daje veliki doprinos razvoju moderne civilizacije i savremenog društva, sistema koji omogućava kontinuirano napajanje električnom energijom svake tačke na zemljinoj kugli, bez čega bi današnji kvalitet života ljudi bio nezamisliv [10].

Električna energija se ne može akumulirati u većim količinama. Uz pomoć elektroenergetskog sistema ona se neprestano proizvodi, prenosi i distribuira pri čemu je najvažniji zadatak održati integritet i dinamičku stabilnost sistema [11]. Prema tome, može se reći da je prekidač sklopni aparat koji može odgovoriti na najveći broj zahteva i zadataka u elektroenergetskom sistemu.

Strogo gledajući, elektroenergetski sistem nikada nije u stacionarnom stanju.

Potrošači se neprestano uključuju i isključuju. Neizbežni su i kratki spojevi koji se moraju brzo eliminisati isključivanjem dela sistema u kvaru. Stalna pojava su i vanjski uticaji i smetnje kao što su atmosferska pražnjenja od kojih se mora zaštititi sistem. Sve ove odgovorne zadatke u elektroenergetskom sistemu obavljaju razne vrste sklopnih aparata, od kojih najodgovorniju ulogu ima prekidač [12], [13].

Većina sklopnih aparata koji se rade za prekidanje struje spadaju u skupinu mehaničkih sklopnih aparata, odnosno do prekidanja strujnog kruga dolazi mehaničkim razdvajanjem kontakata.

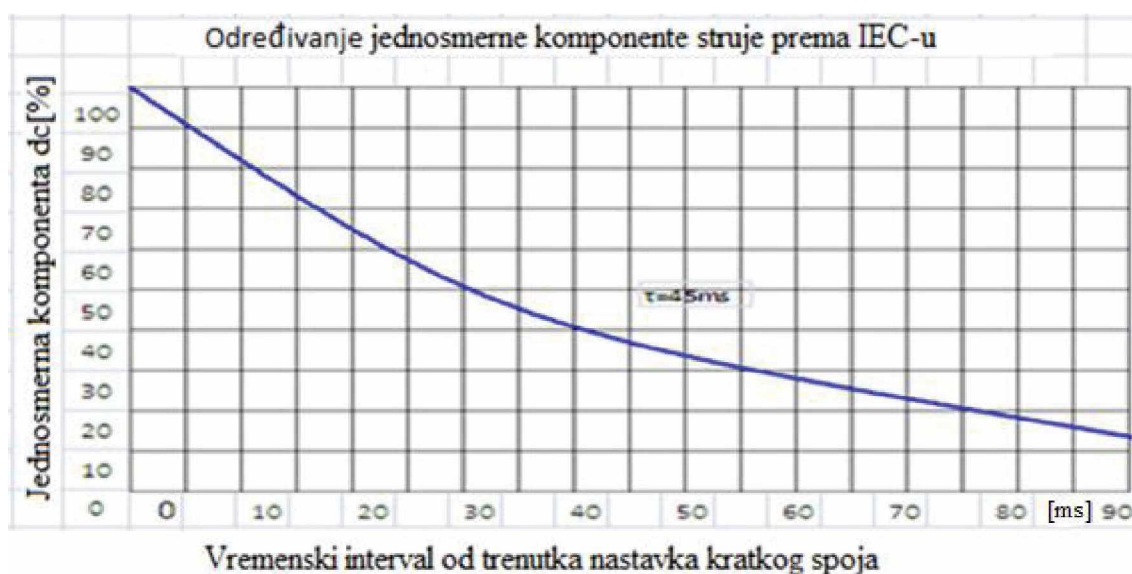
Prilikom razdvajanja kontakata između njih se uvek pali električni luk, način gašenja električnog luka jednosmerne i izmenične struje bitno se razlikuje [14].

Ukoliko se radi o izmeničnom strujnom krugu, upravo električni luk osigurava da se struja ne prekine trenutno (što bi izazvalo velike prenapone u krugu), nego da prirodno po sinusoidi dođe na nulu [15].

Prekidna snaga prekidača je najveća vrednost prekidne struje I_p koju on može prekidati, bez oštećenja, uz određeni napon i pod datim pogonskim uslovima, a izražava se također u kA [13]. Prekidna snaga predstavlja osnovnu karakteristiku prekidača.

Prekidač mora biti sposoban da isključi bilo koju struju kratkog spoja sa simetričnom komponentom manjom od prekidne snage prekidača, i jednosmernom komponentom manjom od vrednosti određene prema krivulji na slici 1 [16].

Ova karakteristika je važna zato što prekidač treba delovati i prekidati ne samo struje u toku normalnog rada, već i struje u slučaju bilo kakvog kvara u sistemu, tako da izoluje mesto kvara i spreći rasprostiranje kvara u sistemu.



Slika 1. Određivanje jednosmerne komponente struje prema IEC_u.

2.2. Klasifikacija prekidača

Prema izvedbi razlikuju se sledeći tipovi prekidača: zračni prekidači, prekidači s magnetskim delovanjem, uljni prekidači, malouljni prekidači, hidromatski prekidači, pneumatski prekidači i prekidači sa gasom SF₆. U njima se koristi jedno ili istovremeno više media za gašenje luka.

Historiski gledano, prvi visokonaponski prekidači bili su zračni (vazdušni).

Početkom dvadesetog veka oni su mogli odgovoriti skromnim zahtevima u pogledu prekidne snage. Uljni i malouljni prekidači i danas ispunjavaju svoj zadatak u mnogim

delovima elektroenergetskog sistema širom sveta. Međutim, oni su već odavno napustili scenu razvoja sklopne tehnike [17], [18].

Prekidači su opisani u smislu evolucije i tehnologije izolacionih materiala-mediuma.

Kao medium za gašenje električnog luka od 1950 do 1970 je dominiralo ulje.

Tokom 1970-ih, SF₆ tehnologija je počela da zamenjuje maloljne i tehnologiju sa komprimiranim vazduhom. U poslednjih dvadeset i pet godina, značajan napredak je u povećanju pouzdanosti i smanjenim zahtevima kod održavanja SF₆ prekidača [12].

Klasifikacija prekidača može se izvršiti prema mnogo različitih kriterija, kao što su [19]:

- Napon za koji su namenjeni.
- Mesto montaže.
- Konstruktivne karakteristike i
- Princip i medium za gašenje električnog luka i slično.

Osnovna podela prekidača odnosi se na naponski nivo za koji su prekidači namenjeni.

Po ovoj klasifikaciji prekidači se dele u dve osnovne grupe [11]:

1. Niskonaponski prekidači, čiji je nazivni napon do 1000 V i
2. Visokonaponski prekidači, nazivnog napona preko 1000 V.

Obe grupe se dalje mogu deliti u podgrupe. Što se tiče visokonaponskih prekidača najčešća je podela na prekidače nazivnih napona od 123 kV i više, te prekidače nazivnih napona 72.5 kV i niže. Prvi se odnose na prenosne sisteme, a drugi na distributivne, odnosno srednjenaponske sisteme. Ovakvu klasifikaciju prekidača po naponima sadrže IEC (International Electrotechnical Commission) i ANSI (American National Standards Institute) propisi [11].

Visokonaponski prekidači mogu biti namenjeni za unutrašnju i vanjsku montažu.

Prekidači za unutrašnju montažu predviđeni su za ugradnju u zgradama i kućistima otpornim na dejstvo atmosferskih uslova. Kada je reč o srednjenaponskim prekidačima, oni su uglavnom dizajnirani za upotrebu u metalno oklopljenim, zrakom izolovanim postrojenjima [11], [15].

U mnogim slučajevima sklopni elementi i pogonski mehanizmi isti i kod prekidača za unutrašnju i kod prekidača za vanjsku montažu, što im obezbeđuje identične ili vrlo slične nazivne performanse.

Prekidači vanjske montaže rade se u dve osnovne izvedbe:

- Prekidači sa uzemljenim kućištem i
- Prekidači sa izolovanim kućištem.

Prekidači sa uzemljenim kućištem se redovno upotrebljavaju na područjima gde se primenjuju ANSI standardi, posebno u SAD. Rade se u jednopolno i trolno oklopljenoj izvedbi.

Izvedba prekidača sa uzemljenim kućištem ima sledeće prednosti u odnosu na prekidače sa izolovanim kućištem [12]:

- Omogućena je ugradnja više niskonaponskih mernih transformatora sa obe strane prekidača.
- Prekidač ima nižu siluetu, otporniju na zemljotres i
- Isporučuju se kompletno montirani i podešeni u tvornici.

S druge strane i prekidači sa izolovanim kućištem imaju određene prednosti nad prekidačima sa uzemljenim kućištem:

- Niža cena (računato bez mernog transformatora).
- Manji prostor za montažu i
- Koriste znatno manju količinu gasa.

Ova izvedba prekidača je uobičajena na područjima gde se primenjuju IEC standardi [11], [12].

Možda najvažnija podela prekidača odnosi se na medium za izolaciju i gašenje luka, a u vezi s tim i na princip gašenja luka.

Evolucija sklopne tehnike je upravo vezana sa razvojem tehnologije savremenih medija (materiala) za izolaciju i gašenje električnog luka. Tokom prve polovine prošlog veka koristili su se zrak i ulje. Razvijene su vrlo pouzdane konstrukcije, od kojih su neke još i danas u eksploataciji.

Novije tehnologije, vakumska i gas SF₆, pojavile su se otprilike zajedno, početkom druge polovine prošlog veka. Danas su one potpuno preuzele dominaciju, vakum na srednjem, a gas SF₆ na visokom naponu [12], [14]. Podela visokonaponskih prekidača vrši se i prema broju pogonskih mehanizama po prekidaču.

Razlikuju se prekidači sa jednopolnim i trolnim komandovanjem.

Prekidači sa jednopolnim komandovanjem imaju tri pogonska mehanizma po prekidaču i koriste se na mestima gde se zahteva jednopolno automatsko ponovno uključenje. Na naponima iznad 245 kV redovno se koristi ovakav tip prekidača.

Prekidači sa trolnim komandovanjem imaju jedan pogonski mehanizam zajednički za sva tri pola.

Ovakav tip prekidača, zbog mehaničke veze sva tri pola, osigurava manji asinhronizam kod uključanja/isključanja. Na srednjem naponu redovno se koristi ovakav tip prekidača [11], [12], [19].

Prema vrsti mediuma koji učestvuje na gašenju luka, prekidači se dele na:

- Zračne (vazdušne).
- S magnetskim delovanjem.
- Uljne.
- Malouljne.
- Vakumske.
- Pneumatske.
- Sa gasom SF₆ i slično.

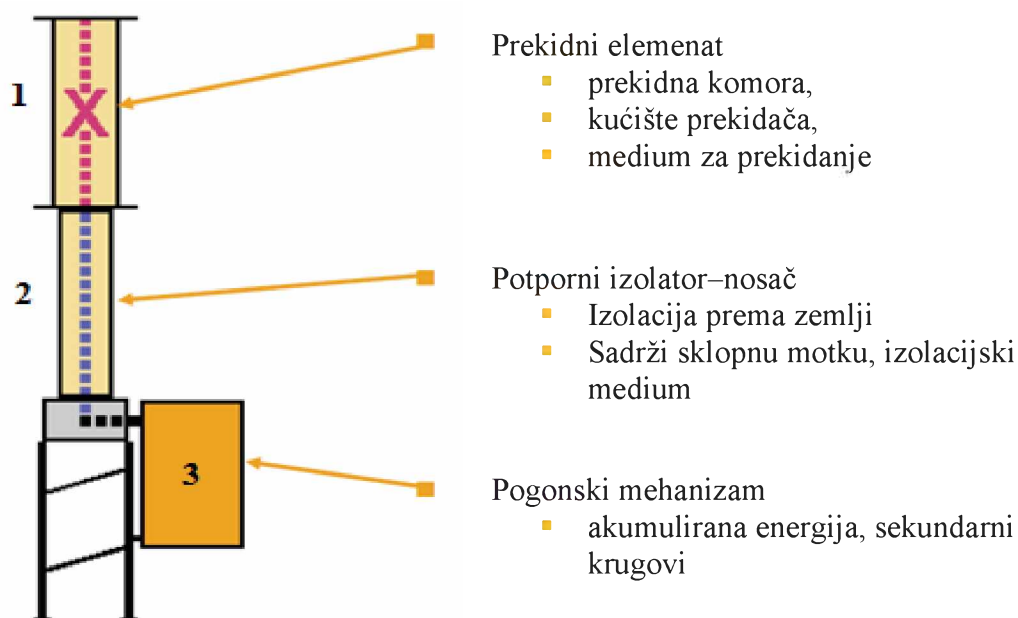
2.3. Osnovni delovi prekidača

Prekidači su uređaji za otvaranje/zatvaranje strujnog kruga, idealni vodiči u zatvorenom položaju, idealni izolatori u otvorenom položaju [19].

Osnovni elementi savremenih prekidača su (slika 2):

- Prekidni element.
- Potporni izolator-nosač i
- Pogonski mehanizam.

Na slici 2 prikazani su osnovni elementi savremenih prekidača.



Slika 2. Osnovni elementi savremenih prekidača.

Da se osigura visoka pouzdanost, svaki tip prekidača mora proći mnogo testova uključenja/isključenja, tako da su ti kvarovi u praksi retkost. Prekidna komora je autokompresijskog tipa s izoliranom mlaznicom i dvostepenskim kompresijskim cilindrom. Toplotnu energiju luka koristi za dodatnu kompresiju potrebnu za prekidanje struje kratkog spoja. Izolaciju između primarnih priključaka prekidača stvara komora koja je smeštena u telu keramičnog izolatora.

Izolaciju unutar komore obezbeđuje medium za prekidanje električnog luka, a isti i gasi električni luk [12], [19].

Potporni izolator, služi da izoluje delove prekidača pod naponom od konstrukcije i ostalih uzemljenih delova. Moraju imati odgovarajuća izolaciona svojstva u pogledu probojnog i preskočnog napona po površini izolatora. Takođe, obezbeđuju mehaničku stabilnost jer se na njih prenose elektrodinamičke sile koje se javljaju prilikom prolaska struje kroz prekidač.

Osnovni zadatak pogonskog mehanizma je da obezbedi pogonsku energiju potrebnu za otvaranje i zatvaranje kontakata prekidača. Na prvi pogled to je jednostavan zadatak.

Međutim, ako se ima u vidu da prekidač u eksploataciji može ostati godinama u stanju mirovanja, u uključenom ili isključenom položaju, a da u svakom trenutku mora

brzo i pouzdano, bez kašnjenja ili usporenja isključi ili uključi strujno kolo, onda postaje jasno da prekidač nije tako jednostavan uređaj kako to izgleda na prvi pogled [11], [12], [19].

Posebnu pažnju treba posvetiti izboru sredstava za podmazivanje, maksimalno dozvoljenim naprezanjima zapinjača, ležaja i celog sistema, a posebno obezbeđenju nivoa izlazne energije pogonskog mehanizma koji je neophodan za normalan rad prekidača.

Osnovni zahtevi koji se postavljaju pred prekidače ugrađenim u elektroenergetski sistem, mogu se ukratko definisati kao:

1. Uključen prekidač mora biti idealan provodnik ($Z_L = 0$).
2. Isključen prekidač mora biti idealan izolator ($Z_L = \infty$) i
3. Kada je prekidač uključen, on mora biti u stanju da prekine brzo i u bilo kom trenutku određenu struju a da:
 - a. Pri tome ne bude oštećen i
 - b. Ne izazove pojavu opasnih prenapona.
4. Kada je prekidač isključen on mora biti u stanju da uključi brzo i u bilo kom trenutku, nekad pod uslovima kratkog spoja a da:
 - a. Pri tome ne bude oštećen i
 - b. Ne izazove pojavu opasnih prenapona.

Mada se u realnim prekidačima ne može očekivati potpuno ispunjenje zahtjeva 1 i 2, ipak se postiže da provodnost međukontaktnog prostora kod prekidanja opadne za 13-15 redova veličine tokom veoma kratkog vremenskog intervala (10^{-5} - 10^{-6} s).

Sposobnost ovako nagle promene provodnosti ispoljava za sada samo plazma luka, kada se ostvari potrebna promena temperature samo za 1 do 2 reda veličine.

U slučaju ispunjavanja trećeg zahteva prekidač treba da pređe iz stanja idealnog vodiča u stanje idealnog izolatora, dok je u slučaju četvrtog zahtjeva, put obrnut [16], [19].

Najstrožiji zahtevi u pogledu prekidne struje i napona koji se mora izolovati, postavljaju se pred visokonaponske prekidače u prenosnim mrežama. Oni moraju:

- Trajno provoditi struju i od 4.000 A (generatorski prekidači u nuklearnim elektranama čak i 40.000 A).
- Kratkotrajno (do 3 s) provoditi i do 100 kA.

- Prekidati struje u dijapazonu od nekoliko ampera do 100 kA na naponima i do 1.050 kV i
- Imati vreme prekidanja kraće od 2 do 3 ciklusa (max. 60 ms), da bi se osigurala stabilnost mreže.

Prekidači su često locirani u vanjskim postrojenjima i izloženi svim vrstama atmosferskih uslova kao što su ekstremne hladnoće, ekstremne vrućine i ekstremna vlažnost, mogu biti izloženi i ekstremnom zagađenju [15], [19].

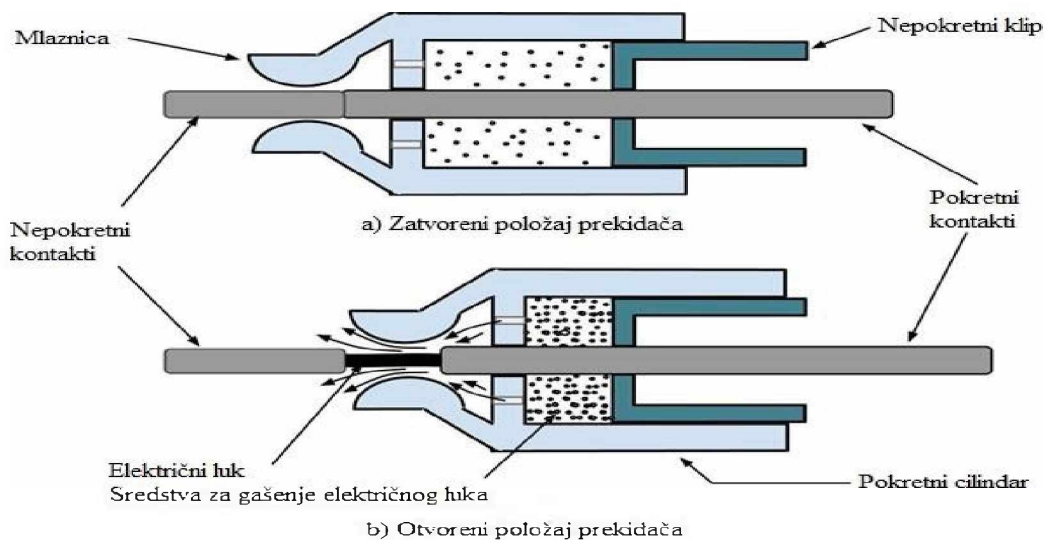
Moraju delovati trenutno kada dobiju nalog za bilo koju operaciju, često nakon dugog perioda mirovanja (čak i nekoliko godina).

Pošto je prekidač poslednja karika u lancu zaštitne opreme, njegova pouzdanost je od presudnog značaja za pouzdanost celog elektroenergetskog sistema [11].

2.4. Opis konstrukcije i princip rada prekidača

Visokonaponski prekidač se sastoji od dve elektrode (slika 3), jedna je fiksirana a druga se kreće. Krug će biti zatvoren ako su dva kontakta u dodiru a biće otvoren kada su ova dva razdvojena. Ovo se zasniva na zahtevu operatora da li se kolo treba zatvoriti ili otvoriti u početnom slučaju.

Na slici 3 prikazan je princip rada visokonaponskog prekidača.



Slika 3. Princip rada visokonaponskog prekidača.

Cela familija prekidača sa višestrukim prekidnim elementima bazira se na modularnom principu konstrukcije, tako da su svi prekidači skoro identični u konstrukciji i principu rada.

Pretpostavlja se da ako je prekidač u početku zatvoren, krug je zatvoren, ukoliko se pojavi bilo kakva greška u krugu ili ako je operator želeo da ga otvori onda logični signal napaja relej za isključenje koji razdvaja dva kontakta pomeranjem pokretnog kalema.

Ovo izgleda lako operativno, ali stvarna prepreka je tu samo kada se dva kontakta razdvajaju, tu će biti velika prelazna razlika potencijala između kontakata koja omogućava ogroman elektronski skok od visokog potencijala prema niskom potencijalu.

Međutim, prelazna razdaljina između dva kontakta u tom momentu deluje kao dielektrik da bi sprečio prelazak elektrona sa jedne elektrode na drugu elektrodu.

Ako je potencijalna razlika veća od dielektrične čvrstoće razdaljine među elektrodama, onda elektroni pokušavaju proći na drugu elektrodu koja jonizuje dielektrični medijum i dovodi do visoke iskre između elektroda. Ta varnica se zove "luk" između elektroda.

Ako luk traje više mikrosekundi, onda zbog visoke toplote koju razvija, dolazi do eksplozije kućišta izolacije i komponenti u njemu. Da bi se izbeglo oštećenje prekidača, jačina luka mora se smanjiti povećanjem dielektrične čvrstoće između dve elektrode, tako da kada se one razdvajaju razvijeni luk se odmah gasi, pre nego što ošteti prekidač [12].

Prekidači se podvrgavaju svim tipskim ispitivanjima prema važećim propisima.

Izvršena ispitivanja pokazuju da su prekidači sa višestrukim prekidanjem pogodni za sve vrste primene i sve klimatske uslove. Struje kratkog spoja, sve do 100 % naznačene struje kratkog spoja, kao i male induktivne struje (na primer struje magnetiziranja transformatora u praznom hodu), uspešno se prekidaju pri najvišim frekvencijama i povratnim naponima koji se mogu pojaviti u praksi [12].

Kapacitivne struje neopterećenih dugih vazdušnih vodova ili kablovskih vodova do nekoliko stotina ampera mogu se prekidati bez ponovnih proboja i skoro bez ikakvog prenapona. Bliski kratki spojevi i evolutivni kvarovi takođe se uspešno savlađuju ovim prekidačima [11].

Kod prekidača sa višestrukim prekidnim elementima, dva prekidna elementa se kombinuju u obliku slova V, čineći tako dvostruki prekidni element. Broj serijski spojenih elemenata po fazi zavisi uglavnom od napona sistema.

Podjednaka raspodela napona po prekidnom mestu, za vreme operacije prekidanja i dok je prekidač u isključenom položaju, obezbeđuje se montažom kondenzatora za raspodelu napona paralelno svakom prekidnom mestu [19].

Sredstva poput vazduha, ulja, vakuma i gasa SF₆ (Sumpor hexa fluoride) koriste se kao medijumi za gašenje luka, koji pružaju visoku dielektričnu čvrstoću, kao i gašenje luka u što kraće mogućem vremenu.

Električni luk koji se pojavi između razdvojenih kontakata utiče na povišenje pritiska u okolnom prostoru, što izaziva strujno zavisani tok ulja, gasa itd., kroz komoru za gašenje luka, koji hladi luk i gasi ga prilikom prolaska struje kroz nulu. Pri prekidanju malih kapacitivnih ili induktivnih struja dejstvo gašenja luka postiže se kontaktnom pumpom koja izaziva tok ulja, gasa i slično nezavisni od veličine struje. Dvostruki prekidni elementi su postavljeni na porcelanske potporne izolatore sa punim jezgrom [20]. Energija za pokretanje pokretnih kontakata prenosi se pomoću keramičkih obrtnih izolatora velike čvrstoće sa punim jezgrom. Obe vrste izolatora su apsolutno neprobojne i pouzdane u radu. Potporni izolatori su zavrtnjima pričvršćeni za samonoseću šasiju, na koju se takođe montira i pogonski mehanizam.

Mehanička energija se prenosi od pogonskog mehanizma na obrtne izolatore i dalje na pojedine pokretne kontakte, pomoću mehničkog polužja. Opruge za isključenje su povezane sa ovim polužjem i obrtnim izolatorima, a smeštene su takođe unutar šasije.

Ispitivanje sinhronizacije, kao i sva druga podešavanja, obavljaju se pre fabričkog ispitivanja prekidača. Nikakva naknadna podešavanja nisu potrebna za vreme radnog veka prekidača. Varijacije klimatskih uslova imaju mali ili nikakav uticaj na sinhronizaciju rada prekidača. Odstupanje sinhronizacije po fazi prekidača manje je od jedne milisekunde [21].

Pogonski mehanizmi koji se primenjuju kod prekidača sa višestrukim prekidanjem, osim ostalih delova, sadrže po jednu ili dve opruge za uključanje. Prilikom izvršenja svake operacije zatvaranja, natežu se opruge za isključenje. Impuls za otvaranje aktivira kočnicu za isključenje u pogonskom mehanizmu.

Energija smeštena u oprugama za isključenje prenosi se mehanički preko obrtnih izolatora i polužnog ekscentričnog sistema na kontaktne šipke, koje se kreću na dole velikom brzinom [21]. Za vreme operacije zatvaranja, čitav proces odvija se obrnutim redom. Operacija zatvaranja ne može se izvršiti sve dok opruga za uključanje nije potpuno navijena. Posle svakog izvršenog navijanja opruge prekidač je spreman za izvršenje ciklusa zatvaranja-otvaranja. Na taj način, potpuni ciklus automatskog ponovnog uključanja moguć je bez ponovnog navijanja opruge [22]. Na višim naponskim nivoima efekat povećanja pouzdanosti se postepeno gubi, jer kritičan elemenat postaje komora za gašenje luka.

Viši naponi zahtevaju veće hodove, brzine i međukontaktne razmake što je teško postići sa niskoenergetskim pogonima, pa proizvođači koriste rešenja sa povećanim dielektričnim naprezanjima materijala i komplikovanijim dizajnom komora, što samo po sebi može bitno ugroziti pouzdanost prekidača, povećavajući verovatnoću puno ozbiljnijih kvarova od otkaza pogonskog mehanizma [23]. Već na naponu 245 kV dilema je sasvim opravdana, te se na ovom i višim naponima danas još uvek češće koristi klasični potisni princip na mesto samooduvavanja. Međutim, razvoj prekidača je veoma intenzivan i u skoroj budućnosti se može očekivati dominacija tipova prekidača sa samooduvavanjem luka u gasu SF₆.

Svaki pojedini prekidač ili pol prekidača može se daljinski ili neposredno uključivati i isključivati i mehanički i električno. Održavanje prekidača ograničeno je uglavnom na periodične provere nivoa na pokazivaču nivoa ulja, gasa, itd [11], [24].

Na primer, revizija posle velikog broja prekidanja struja kratkog spoja (najčešće tek posle cca 10 godina), može se lako izvršiti na mestu ugradnje. Za izvršenje tog posla nisu potrebna specijalna oprema niti specijalno obučeno osoblje [25].

Svi delovi kontakata podložni eroziji usled dejstva luka i komore za gašenje luka, veoma su pristupačni i lako zamenljivi [14].

Prekidači uopšteno zahtevaju vrlo malo održavanje. Bitne veličine koje utiču na stanje prekidača su [26], [27], [28]:

- Broj isključenja struja kratkog spoja.
- Učestalost sklapanja i
- Ukupno vreme u pogonu.

Radovi kontrole i održavanja obično se dele na:

- Rutinska kontrola.
- Mala revizija i
- Velika revizija.

2.5. Nazivne karakteristike

Prema standardu IEC 62271-100 nazivne karakteristike prekidača su [29], [30], [31]:

- Nazivni napon.
- Nazivni izolacijski nivo.
- Nazivna frekvenca.
- Nazivna trajna struja.
- Nazivna kratkotrajno podnosiva struja.
- Nazivna vršna vrednost kratkotrajne struje.
- Nazivno trajanje kratkog spoja.
- Nazivni napon upravljačkih i pomoćnih krugova.
- Nazivna frekvenca upravljačkih i pomoćnih krugova.
- Nazivni pritisak komprimiranog gasa za pogon i prekidanje.
- Nazivna prekidna snaga.
- Nazivni povratni napon za kratki spoj na stezaljkama aparata.
- Nazivna uklopna snaga i
- Nazivni sklopni ciklus.

Na specijalan zahtev korisnika prekidač može imati i sledeće karakteristike [30], [31]:

- Nazivna prekidna struja kod opozicije faza.
- Nazivna kapacitivna struja kabela.
- Nazivna kapacitivna struja jedinstvene kondenzatorske baterije.
- Nazivna kapacitivna struja složene kondenzatorske baterije.
- Nazivna potezna struja kondenzatorske baterije i
- Nazivna mala induktivna struja.

Prilikom odabiranja prekidača potrebno je još uzeti u obzir i sledeće parametre [15], [22]:

- Lokalne atmosferske i klimatske uslove.
- Nadmorska visina.
- Vremena otvaranja i
- Učestalost sklapanja.

2.6. Izbor visokonaponskih prekidača

Izbor prekidača obično se vrši s obzirom na prekidnu snagu. Izračuna se struja kratkog spoja (odnosno prekidna snaga) na mestu ugradnje prekidača, te se iz kataloga proizvođača odabere odgovarajući prekidač. Prekidači namenjeni za određeni nazivni napon mogu se upotrebiti i za niži nazivni napon, ali sa manjom prekidnom snagom. Za viši nazivni napon prekidač se ne sme upotrebiti bez obzira na prekidnu snagu.

Međunarodni standardi daju pravila i postupke kako za izbor osnovnih karakteristika prekidača s obzirom na njihovu namenu, tako i za vrste i nivo ispitivanja pogodnih za praćenje stanja prekidača, na primer: pogonske uslove, karakteristika mreže, rad tokom kratkih spojeva, ekološki aspekt itd [11], [19]. Izbor tipa prekidača nekada je bio mnogo delikatniji zadatak nego što je to danas, jer sedamdesetih godina prošlog veka u svetu su se istovremeno proizvodili i ugrađivali, bezmalo, svi do danas komercijalizirani tipovi prekidača: uljni, malouljni, pneumatski, vakuumski i sa gasom SF₆.

Prvi korak u izboru prekidača je pravilno određivanje njegovih nazivnih karakteristika. Za konkretne pogonske uslove treba uzeti u obzir, kako normalne pogonske uslove, tako i uslove tokom kratkih spojeva. Naprezanja u uslovima kvara treba odrediti na osnovu proračuna struja kratkog spoja na mestu ugradnje prekidača, koristeći se nekim od priznatih metoda. Pri određivanju nazivnih vrednosti treba voditi računa, kako o trenutnim karakteristikama mreže, tako i planiranom razvoju elektroenergetskog sistema, kako bi prekidač zadovoljio i buduće zahteve. Nazivne vrednosti treba izabrati između vrednosti specificiranih odgovarajućim standardima [12], [24], [25].

Pravilan izbor visokonaponskih prekidača treba da obezbedi njegov dugotrajan rad, pri kojem se neće ugroziti bezbednost osoblja koje njime rukuju, niti smanjiti pouzdanost rada mreže i potrošača.

Vakumski prekidači, naprimer, imaju veoma dug vek bez potrebe bilo kakvog održavanja, što je velika prednost ove tehnologije [19].

S druge strane, veliku manu vakumskih prekidača predstavlja visok nivo rezane struje što uzrokuje značajne prenapone koji ugrožavaju ostalu opremu. Zbog toga se u slučaju sklapanja transformatora i rotacionih mašina preporučuje upotreba odvodnika prenapona ili drugih mera za ograničavanje i snižavanje sklopnih prenapona [22].

Na mestima gde se očekuje veliki broj sklapanja pod opterećenjem i u uslovima kvara, kao i na mestima gde je strmina prelaznog povratnog napona jako velika, kao što je to slučaj kod sklapanja reaktora, vakumski prekidači su bolji izbor od prekidača sa gasom SF₆.

Međutim, kod sklapanja kapacitivnih opterećenja, kao i kod sklapanja transformatora, bolji izbor predstavljaju prekidači sa gasom SF₆ [11], [19].

Pored tehničkog aspekta, u poslednje vreme se sve više kao kriterium izbora nameće i ekološki aspekt upotrebe gasa SF₆ zbog njegovog velikog potencijala globalnog zagađivanja atmosfere. U budućnosti su vrlo verovatne ozbiljnije restrikcije, pogotovo na srednjem naponu, gde postoji valjana alternativna tehnologija.

Na visokom naponu jednopritisni prekidači sa gasom SF₆ još uvek nemaju valjanu alternativu. Međutim, ipak se otvara dilema da li izabrati klasični potisni princip ili princip sa samooduvavanjem u gasu SF₆. U poslednje vreme se prednost pri izboru prekidača za nazivne napone do 170 kV daje samooduvavanju zbog mogućnosti primene niskoenergetskih motornoopružnih pogona koji po pravilu imaju veoma veliku pouzdanost, dokazanu na brojnim prekidačima srednjeg napona, gde su već decenijama u upotrebi [12].

2.7. Rutinsko ispitivanje prekidača

Rutinsko ispitivanje prekidača je strogo kontrolisani dio procesa proizvodnje. Sva testiranja strogo slede protokole, što predstavlja visoko automatizirani proces, da bi se osigurala tačnost primenjenih nivoa testiranja i merenja rezultata, u skladu s međunarodnim standardima [26], [27], [28].

Glavna ispitivanja su:

- Tipska ispitivanja.
- Rutinska (komadna) ispitivanja.
- Ispitivanja na terenu i
- Razvojna ispitivanja.

Tipiska ispitivanja provode se na prototipu sklopnog aparata kako bi se potvrdile nazivne karakteristike aparata, te karakteristike njegovih upravljačkih i pomoćnih uredaja.

Rutinska ispitivanja provode se na svakom proizvedenom sklopnom aparatu kako bi se otkrile eventualne nepravilnosti i greške u materijalu ili konstrukciji.

Dogovorom između proizvođača i korisnika bilo koje rutinsko ispitivanje može se provesti i na terenu neposredno pre puštanja u pogon [11].

Ispitivanja na terenu provode se obično na kompletno montiranoj sklopnoj i/ili upravljačkoj aparaturi kako bi se potvrdila ispravnost montaže i funkcionisanje aparature, te dielektrička čvrstoća izolacije.

Razvojna ispitivanja provode se na modelima, elementima ili prototipovima sklopnih aparata kako bi se proverile, u toku istraživanja i razvoja teoretske pretpostavke i granične sposobnosti nove konstrukcije.

Ova ispitivanja nisu propisana nikakvim standardima, a provode se prema potrebama i mogućnostima proizvođača sklopne opreme u fazi razvoja odnosno usavršavanja [29].

Prema internacionalnom standardu IEC 62271-100 [31], dijagnostička ispitivanja predstavljaju ispitivanja karakterističnih parametara prekidača u cilju potvrđivanja ispravnosti njihovih funkcija [12]. Izvode se merenjem jednog ili više parametara, a rezultati ovih ispitivanja mogu uticati na odluku o remontu prekidača [11], [30], [31].

Cilj upotrebe dijagnostičkih metoda je promena filozofije održavanja

visokonaponskih prekidača od vremenski baziranog održavanja na održavanje prema stvarnom stanju prekidača.

Dobitak za korisnika je: pouzdaniji i ekonomičniji rad i eksploatacija celog elektroenergetskog postrojenja i ušteda u održavanju.

Glavni rutinski koraci testa u odnosu na IEC, ANSI i tvorničke standarde prikazani su kako sledi [32], [33], [34], [35]:

- Tipska pločica i provera dizajna.
- Provera funcionisanja pomoćnih i kontrolnih krugova.
- Testovi za podešavanje mehanizma.
- Test mehaničkih operacija.
- Test motora za navijanje opruge.
- Merenje otpornosti (Glavni krugovi).
- Dielektrična ispitivanja (Pomoćnih i upravljačkih krugova).
- Nadpritisak test, test propuštanja gasa.
- Dielektrična ispitivanja (Glavni krugovi).
- Prenos na odelenje za pakiranje.
- Merenje operacionih vremena glavnih kontakata.
- Merenje jednovremenosti prekidnih mesta jednog pola.
- Merenje jednovremenosti glavnih kontakata između polova.
- Merenje jednovremenosti signalnih i glavnih kontakata.
- Snimanje hodograma glavnih kontakata.
- Snimanje hodograma prigušnog mehanizma.
- Ispitivanje električnih parametara prekidača.
- Snimanje dinamičkog otpora glavnih kontakata.
- Merenje prelaznog otpora glavnih kontakata.
- Snimanje struje kalemova za uključenje i isključenje i
- Snimanje struje motora pogonskog mehanizma.

2.8. Prednosti i nedostaci raznih tipova prekidača

Zbog velikog broja raznih prekidača potrebno je pri njihovom izboru dobro poznavati njihove prednosti i mane. U narednom tekstu su analizirane prednosti i mane raznih tipova prekidača (zračni, prekidači s magnetskim delovanjem, uljni, malouljni, vakumski, hidromatski, pneumatski i sa gasom SF₆). Analizirajući prednosti i mane, može se lakše i sigurnije izvršiti izbor prekidača za konkretne uslove korišćenja.

2.8.1. Zračni (vazdušni) prekidači

Luk koji gori u atmosferi, produžava se i menja svoj položaj radi delovanja magnetskog polja koje se stvara oko njega, i radi uzgona toplim zrakom koji se ugrijava lukom. Zbog toga su u zračnim prekidačima (sklopkama) potrebni znatni razmaci između kontakata i uzemljenih delova, da ne bi za vreme trajanja luka došlo do kratkih spojeva bilo neposredno među fazama, bilo preko metalnih delova kućišta.

Gašenje luka vrši se produžavanjem razmaka među rogovima. Prekidna snaga takvih ‘rastavljača’ na stubu vrlo je mala. Rasklopna struja ne smije biti veća od:

$$I = \frac{60}{U} A \quad (1)$$

gde je:

U-nazivni napon mreže u kV.

Prema tome ‘rastavljač’ na stubu može se upotrebiti za prekidanje struja praznog hoda transformatora i za isklapanje neopterećenih vodova.

Radi toga se za visoke napone izvode zračni prekidači samo kao ‘rastavljači na stubu’, za napone 6 do najviše 30 kV [11], [19].

2.8.2. Prekidači s magnetskim delovanjem

Struja koju treba prekinuti prolazi kroz navoj, na taj način ta struja proizvodi magnetski tok koji se zatvara preko polova N-S, među kojima se nalaze kontakti sklopke.

Magnetsko polje deluje silom F na električni luk, te ga potiskuje na rogove kontakta i tako ga produžava. Veća dužina luka izaziva pojačano hlađenje i dejonizaciju. Vrlo važnu ulogu u ovom procesu treba pripisati brzom kretanju luka kroz miran zrak, što je analogno delovanju na nepomičan luk [11], [19].

Znatno poboljšanje se postiže ako se luk delovanjem magnetskog polja dovede u uski raspor između ploča od izolacionog materijala, to poboljšanje posledica je neposrednog dodira s hladnim izolacionim materijalom.

Prekidači s magnetskim delovanjem izvode se za napone do 24 kV.

2.8.3. Uljni prekidači

Uljni prekidač je jedan od najstarijih tipova prekidača i danas se uglavnom koristi u SAD_u i Engleskoj. U trenutku razdvajanja kontakata stvara se električni luk koji oko sebe stvara mehur koji ekspandira. Ulje u kotlu vrši pritisak na strane kotla i pošto se ne može više širiti, ono probija mehur i ulazi u jezgro luka. Postoje dve izvedbe ovog prekidača, jednopolna i dvopolna. Kod ovih prekidača ulje služi za gašenje luka, izolaciju između kotla i međufaznu izolaciju [11], [12].

Prednosti:

- Gas koji se formira koji je uglavnom vodonik, ima visoku vrednost difuzije i visoku absorpciju toplote u toku prelaska sa diatomske u monoatomske stanje i zato daje dobre mogućnosti hlađenja.
- Ulje ima visoku dielektričnu čvrstoću i obezbeđuje izolaciju između kontakata posle potpunog gašenja luka.
- Ulje za hlađenje predstavlja hladnu površinu u neposrednoj blizini luka.
- Ulje koje se koristi (kao što je transformatorsko ulje) je veoma dobra izolacija i omogućava kraću sigurnosnu daljinu između “živih” kontakata i uzemljenih komponenata i slično.

Nedostaci:

- Ulje može biti zapaljivo i može da prouzrokuje požar i oštećenja ako prekidač zataji i zbog pritiska može izazvati eksploziju.
- Postoji rizik formiranja eksplozivne mešavine sa vazduhom.
- Zbog raspada ulja u luku, ulje postaje zagađeno sa karbonskim česticama koja reducira dielektričnu čvrstoću ulja, zato je potrebno periodično prečišćavanje i zamena ulja.
- Velika količina ulja i slično [30].

2.8.4. Malouljni prekidači

U Evropi su se, zbog oskudice i visoke cene ulja, razvili prekidači koji su koristili vrlo male količine ulja, po čemu su i dobili naziv malouljni prekidači. Glavna razlika između uljnih i malouljnih prekidača je u tome što uljni prekidači koriste ulje i kao izolaciju i kao medij za gašenje luka, dok malouljni prekidači koriste ulje samo kao medij za gašenje luka, dok za izolaciju koriste čvrste dielektrike [11], [12], [19].

Prema tome, za razliku od uljnih prekidača, malouljni prekidači spadaju u grupu prekidača sa izolovanim kućistem. Odvajanjem kućista sa sklopnim elementom od zemlje postiže se drastično smanjenje potrebne količine ulja.

Dugo vremena, sve do sedamdesetih godina, malouljni prekidači su bili vodeća tehnologija u oblasti sklopne tehnike, pogotovo na naponima do 145 kV, gde im je dovoljno samo jedno prekidno mesto po polu. Porcelan kod ovih prekidača služi za izolaciju kontakata od posude a ulje za gašenje luka. To im osigurava jednostavnost, malu težinu, niske cene i lako održavanje.

Prednosti:

Malouljni prekidači imaju sledeće prednosti u poređenju sa uljnim prekidačima:

- Zahtevaju manju količinu ulja (10 do 20 %).
- Zahtevaju manji prostor.
- Manja je opasnost od požara.
- Smanjeni su problemi održavanja.
- Cena.

Nedostaci:

Malouljni prekidači imaju sledeće mane u odnosu na uljne prekidače:

- Zbog manje količine ulja stepen karbonizacije se povećava.
- Teško je izbacivanje na vreme gasova od kontaktne komore.
- Dielektrična čvrstoća ulja se drastično pogoršava zbog visokog stepena karbonizacije.

2.8.5. Vakumski prekidači

Vakumski prekidači se koriste za srednje napone. Kod luka vakumskog prekidača glavni nositelji struje su elektroni, a ne joni kao što je to slučaj na primer kod vazduha ili gasa SF₆. Glavna karakteristika električnog luka u vakumu su katodne mrlje koje se kreću vrlo brzo po površini katode.

Vakumski prekidači se koriste za prekidanje na strani visokog napona. Životni vek vakumskog prekidača je mnogo duži nego drugih vrsta prekidača i gotovo da nema potrebe za održavanje.

Vakumski prekidači su veoma povoljni za većinu zadataka koji se javljaju u tipičnim električnim mrežama ili u industriskoj upotrebi.

Vakum je superiorni dielektrični medium. On je bolji od bilo kojih ostalih izolacijskih media osim vazduha i gasa SF₆ koji se generalno upotrebljava pod visokim pritiskom. Kada se razdvoje kontakti u vakumu, dielektrična čvrstoća među kontaktima se povećava do reda 1000 puta više nego što mogu imati ostali prekidači.

Vakumski prekidači su efikasniji, manji i jeftiniji, zbog navedenih svojstava.

Oni imaju neke prednosti u poređenje sa drugih vrsta prekidačima [11], [12], [19].

Prednosti:

- Vakumski prekidači ne zahtevaju punjenje sa nekim gasom ili uljem. Oni ne traže pomoćni vazdušni sistem, upotrebu ulja i ne zahtevaju održavanje.
- Brzo uspostavljanje veoma visoke dielektrične čvrstoće kod prekidanja struje tako da samo pola ciklusa ili manji luk uzrokuju uredno razdvajanje kontakata.
- Ne emitiraju gasove tako da nema zagađenja.

- Prekidanje struje nastaje kod prvog prolaza struje kroz nulu posle razdvajanja kontakata bez ponovne pojave luka, čineći to posebno dobrim za kapacitivna isključenja kablova i puštanja u rad dugih vodova.
- Vrlo visoka frekvencija i udarni podnosivi napon sa malim prostorom kontakata omogućava lako i brzo delovanje.
- Prekidna jedinica je kompaktna i samoodržavajuća. Može se montirati za bilo koji smer.
- Nema raspada gasnih produkata u vakumu i zato hermetični zatvoreni vakumski prekidači drže sa strane sve efekte sredine na prekidaču.
- Upotrebljiv za svaki nivo napona do 230 kV i više gde se traži veći životni vek i operacije bez održavanja.
- Povoljni za ponovna uključenja.
- U vakumu kontakti ne mogu oksidirati zato njihova mala otpornost se održava tokom njihovog životnog veka.

Nedostaci:

- Gubljenje vakuma kao razlog prolaznog kvara ili greške čine prekidač ne upotrebljivim i to se ne može popraviti na licu mesta, na mestu montaže.
- Vakumski prekidači nisu ekonomični iznad 36 kV, prekidači sa gasom SF₆ su za iste osobine ekonomičniji, zato se u energetske sisteme (naponi preko 230 kV) upotrebljavaju prekidači sa gasom SF₆.
- Nije ekonomično proizvoditi vakumske prekidače u malim količinama [10], [31], [36].

2.8.6. Hidromatski prekidači

Hidromatski prekidači u principu su malouljni prekidači s elastičnom komorom u kojima je medium za gašenje luka, voda na mesto ulja. Vodi se dodaje u malom postotku sredstvo za sprečavanje smrzavanja (glikol), koje osim toga povećava količinu pare za vreme trajanja luka, što povoljno utiče na njegovo gašenje. Hidromatski prekidači za

napone iznad 10 kV izvode se s posebnim uređajem za dovođenje vode u komoru samo za vreme isklapanja.

U uklopljenom stanju pomični kontakt pritiskuje klip za dovođenje vode u komoru za gašenje luka. Prilikom isklapanja pomični kontakt naglo kreće, a s njim i do tada pritisnuti štap, koji će ubaciti vodu u komoru za gašenje luka.

Hidromatski prekidači se izvode za napone do 60 kV.

2.8.7. Pneumatski prekidači

Prvi princip prekidanja struje u vazduhu bio je trivijalan, kontakti se jednostavno rastave i luk se izdužuje dok se ne ugasi. Naravno da su aparati na ovom principu imali vrlo ograničenu prekidnu snagu. U pneumatskim prekidačima sa komprimiranim vazduhom luk se gasi pomoću jake struje vazduha koja se usmerava poprečno ili uzdužno u odnosu na osu luka iz rezervoara pod visokim pritiskom.

Komprimirani vazduh potreban za gašenje luka se proizvodi posebnim kompresorskim uređajem koji može biti autonomni ili centralni [11], [19].

Prednosti:

- Sa pneumatskim prekidačima je dostignuta velika prekidna snaga.
- Veoma su brzi i pouzdani.
- Posebno su pogodni za prekidanje vrlo velikih struja kratkog spoja.

Nedostaci:

- Ipak, znatno veća cena u odnosu na druge tehnologije, ograničava upotrebu pneumatskih prekidača na specialnim mestima gde se zahteva izuzetno velika prekidna snaga.
- Tokom rada pneumatski prekidači proizvode jako veliku buku, posebno u slučaju kada se luk oduvava u atmosferu.

2.8.8. Prekidači sa gasom SF6

Svojstva koje ima gas SF6 stvaraju od njega odličan medij za gašenje električnog luka.

Zato se u ovim prekidačima upotrebljava gas SF6 koji ima dobre osobine za gašenje električnog luka jer ima 15 % veću probojnu čvrstoću u odnosu na ulje.

Zbog superiornih svojstava gašenja električnog luka sa gasom SF6, ovi prekidači imaju mnoge prednosti nad uljnim ili vazdušnim prekidačima.

Gas SF6 ima široku upotrebu u industriju visokog napona zbog toga što je izvanredan dielektrik i ima veoma dobre karakteristike gašenja luka [9], [10].

Prednosti:

- Zbog superiornih svojstava gašenja luka, prekidači sa gasom SF6 imaju mnoge prednosti nad uljnim ili vazdušnim prekidačima.
- Dielektrična čvrstoća gasa SF6 je 2 do 3 puta veća od vazduha, takvi prekidači mogu prekidati dosta veću struju.
- Zbog superiornog svojstva gasa SF6 za gašenje luka, ovi prekidači imaju vrlo kratko vreme trajanja luka.
- Prekidači sa gasom SF6 su tihi u toku operacije zbog svog zatvorenog kruga gasa i ne-ispuštanja u atmosferi za razliku od zračnog veoma bučnog prekidača.
- Zatvorena gasna komora održava unutrašnjost suhu tako da nema problem vlage.
- Nema rizika od vatre kod tih prekidača jer gas SF6 nije zapaljiv.
- Ne postoji taloženje karbona tako da su prateći i izolacijski problemi eliminisani.
- Prekidači sa gasom SF6 imaju nisku cenu održavanja, laku podlogu i minimalni pomoćne uređaje.
- Savremeni prekidači sa gasom SF6 su kompletno blindirani i zatvoreni od atmosfere.

Nedostaci:

- Prekidači sa gasom SF6 su skupi zbog skupog gasa SF6.
- Pošto gas SF6 mora da se obnovi posle svake operacije prekidača, potreban je dodatni uređaj za ovu svrhu [11], [12], [19], [37], [38].

Pouzdanost prekidača je veoma važna jer od nje zavisi i rad visokonaponskih (VN) postrojenja, koje on čuva od oštećenja. Zbog toga je potrebno redovno vršiti nadgledanje i planirano održavanje u toku čitavog životnog veka, i bez pojave kvara [12], [19], [25].

Analizirajući prednosti i mane svih razmatranih prekidača, to jest koji prekidač ima više prednosti nego mana i u kojim uslovima i okolnostima, može se zaključiti da prekidači sa gasom SF₆ imaju znatnu prednost od ostalih prekidača i sve više se upotrebljavaju u praksi [11], [12], [19].

Takodje, imajući u obzir pojavu koja će se analizirati u ovom radu (poglavlje 5) a koja se odnosi na prekidač sa gasom SF₆, u nastavku će biti detaljno analizirani prekidači sa gasom SF₆, princip rada, vrste prekidača sa gasom SF₆, itd.

3. PREKIDAČI SA GASOM SF₆

3.1. Opšte

Zbog izuzetnih dielektričnih karakteristika i performansi pri gašenju električnog luka danas se u razvodnim postrojenjima visokih napona najčešće koriste prekidači sa gasom SF₆, dok se za srednje napone koriste i vakumski prekidači. Zbog njihovog sigurnog i vrlo brzog delovanja, efikasnosti u otklanjanju kvarova, itd, prekidači sa gasom SF₆ ugrađeni su skoro u svim prenosnim sistemima. Prekidanje struje u ovim prekidačima se vrši razdvajanjem kontakata u gasu SF₆, koji ima odlična dielektrična svojstva i dobre osobine za gašenje električnog luka [39]. U ovim prekidačima se nalazi gas SF₆ koji ima dobre osobine za gašenje električnog luka jer ima 15% veću probojnu čvrstoću u odnosu na ulje.

I pored izvanrednih svojstava gasa SF₆, njegova upotreba stvara sigurnosni i rizik za ekologiju.

Pogotovo opasan je SF₆ gas koji je usled gorenja električnog luka bio izložen visokoj temperaturi. Zato se sa velikom pažnjom vrše kontrole i analize gasa SF₆.

Zbog superiornih svojstava gašenja električnog luka, sa gasom SF₆, ovi prekidači imaju mnoge prednosti nad uljnim ili vazdušnim prekidačima [11], [12].

Njihov dug vek trajanja i malo potrebe za preventivno održavanje, čine da se prekidač sa gasom SF₆ masovno primenjuje u sadašnjim VN prenosnim mrežama.

Stari koncept održavanja prekidača zasnovan na kriterium vreme je odbačen, sada se primenjuje koncept zasnovan na procenu stanja prekidača. Prema standardu IEC 62271-100 vrši se ispitivanje karakterističnih parametara prekidača, da bi se potvrdila isprovnost njegovih osnovnih funkcija [30].

U VN mrežama ugrađuju se kompresioni prekidači sa SF₆ gasom tako konstruisani da sigurno prekidaju struju kratkog spoja u vreme prolaska kroz nulu, na taj način se izbegava stvaranje prenapona u toku gašenja luka. Za procenu stanja prekidača potrebno je da se zna princip rada, te kako mereni parametri koji su predmet kontrole, utiču na delovanje prekidača. Isto tako u radu su prikazane i praktične metode i instrumenti za diagnostificiranje stanja prekidača.

Za svaki parameter i metodu kojom je meren, dokazano je zašto je upravo on uzet da pokaže stanje prekidača. Isto tako prikazani su i praktični kriteriumi procene rezultata merenja, a dati su i realni rezultati izvršenih merenja [11], [12], [25].

Dobre osobine prekidača sa gasom SF₆ su:

- Zbog superiornih svojstava gašenja luka, prekidači sa gasom SF₆ imaju mnoge prednosti nad uljnim ili vazдушnim prekidačima.
- Dielektrična čvrstoća gasa SF₆ je 2 do 3 puta veća od vazduha, takvi prekidači mogu prekidati dosta veću struju.
- Zbog superiornog svojstva gasa SF₆ za gašenje luka, ovi prekidači imaju vrlo kratko vreme trajanja luka.
- Prekidači sa gasom SF₆ su tihi u toku operacije zbog svog zatvorenog kruga gasa i ne-ispuštanja u atmosferi za razliku od zračnog veoma bučnog prekidača.
- Zatvorena gasna komora održava unutrašnjost suvu tako da nema problem vlage.
- Nema rizika od vatre kod tih prekidača jer gas SF₆ nije zapaljiv.
- Ne postoji taloženje karbona tako da su prateći i izolacijski problemi eliminisani.
- Prekidači sa gasom SF₆ imaju nisku cenu održavanja, laku podlogu i minimalni pomoćne uređaje.
- Savremeni prekidači sa gasom SF₆ su kompletno blindirani i zatvoreni od atmosfere.

Osnovne loše osobine prekidača sa gasom SF₆ su:

- Prekidači sa gasom SF₆ su skupi zbog skupog gasa SF₆.
- Pošto gas SF₆ mora da se obnovi posle svake operacije prekidača, potreban je dodatni uređaj za ovu svrhu [11], [12], [19], [37], [38].

Sedamdesete i osamdesete godine (XX vjeka) obeležila je velika evolucija prekidača sa gasom SF₆.

Ovaj period predstavlja vrhunac razvoja prekidača sa gasom SF₆, koji je doveo do značajnog povećanja naponskog nivoa po prekidnom elementu i smanjenja energije koja se koristi za pogonske mehanizme [18], [40].

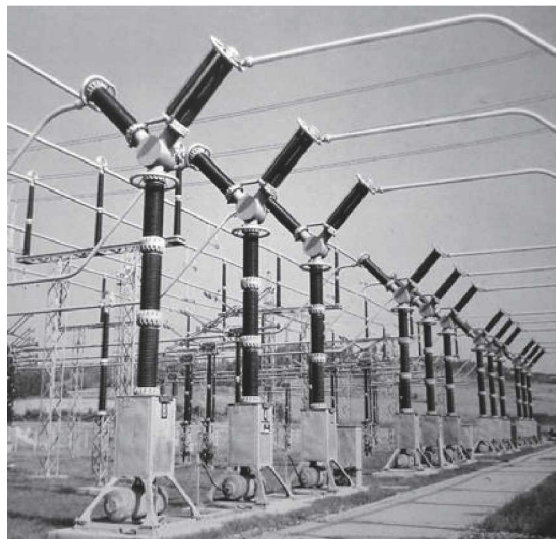
U ovom periodu su proizvedene dve generacije visokonaponskih prekidača sa gasom SF₆ na potisnom principu sa izolacionom mlaznicom i parcijalnim dvostranim

oduvavanjem. Prva generacija je imala četiri sklopna elementa vezana u seriju po polu na 420 kV i 40 kA (slika 4) a druga samo dva na 550 kV i 50 kA (slika 5) [41].

Već 1980 godine razvijen je prekidač 245 kV, 40 kA sa samo jednim sklopnim elementom po polu [12].



Slika 4. Prva generacija SF6 prekidača.



Slika 5. Druga generacija SF6 prekidača.

Blizu velikih generatora ugrađuju se prekidači sa većim vremenskim konstantama, i sa većom komponentom jednosmerne struje kratkog spoja, odnosno prekidač sa velikom prekidnom snagom.

Za ove primere Standard IEC 62271-100 daje ove vremenske konstante [12], [19], [25], [30], [31]:

- $\tau = 120$ ms za nominalne napone do i 52 kV,
- $\tau = 60$ ms za nominalne napone od 72, 5 kV do i 420 kV i
- $\tau = 75$ ms za nominalne napone veće od 550 kV.

Visokonaponski prekidači moraju podneti određena električna, toplotna i mehanička naprezanja koja se javljaju pri raznim radnim i havarijskim režimima. Nivo ovih naprezanja određuje performanse koje prekidači moraju zadovoljiti kako bi se njihovom upotrebom dobili željeni rezultati [42].

3.2. Osnovni delovi i princip rada prekidača sa gasom SF6

Broj prekida struja kratkog spoja u glavnom određuje životni vek prekidača, i može se približno odrediti kao suma proizvoda broj prekida i vrednosti struja kratkog spoja.

$$\Sigma n \cdot I_2 \leq 20000 \quad (2)$$

gde je:

n - broj prekida struje,

I - struja kratkog spoja u kA.

Osnovni elementi savremenih prekidača sa gasom SF6 su:

- Izolovana komora za gašenje luka koja čini prekidnu jedinicu.
- Pogonski mehanizam, mehanizam koji svojom akumuliranom energijom pokreće kontakte za uključivanje i isključivanje i
- Upravljačko-signalni orman u kojem su smešteni elementi za signalizaciju položaja prekidača, zaštitni releji koji osiguravaju pouzdan rad prekidača [12], [25], [30].

3.2.1. Prekidna jedinica prekidača

Sklop od pokretnih i nepokretnih kontaktata koji se nalaze u komori u kojoj se gasi luk čine prekidnu jedinicu prekidača. Ista je ugrađena u kućište keramičnog izolatora, koji istovremeno osigurava izolacijsku razdaljinu među primarnim priključcima prekidača. Zavisno od naponskog nivoa postrojenja u kojem se ugrađuju, imamo prekidače sa jednim (naponski nivo 110kV, i 220 kV), i modularni prekidači (za naponski nivo 400kV) sa dva prekidna mesta od 220 kV, redno vezanih. Modularno rešenje sa dva prekidna mesta po polu je praktičnije i ima bolju performansu što se tiče prekidnih struja.

Uspostavljanje električne čvrstoće je dvostruko brže kod prekidača sa dva prekidna mesta nego kod prekidača sa jednim prekidnim mestom sa dvostruko većim

razmakom među kontaktima. Gas SF₆ određenog pritiska stvara izolaciju u komori, a istovremeno gasi i hladi električni luk.

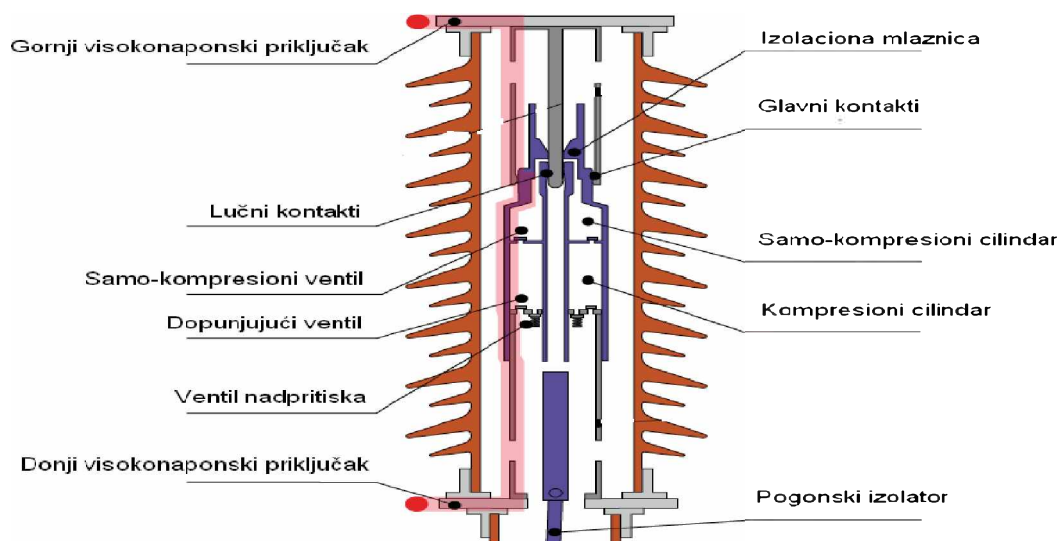
Energiju za kompresiju gas SF₆ stvara motorno-opružni pogon prekidača koji povlači naniže pokretne kontakte kod isključenja prekidača [25], [43].

Na slici 6 je dat poprečni presek prekidača sa gasom SF₆.

Osnovni delovi komore su:

- Nepokretni kontakt.
- Pokretni kontakt.
- Mlaznica za usmeravanje SF₆ gasa i
- Nepovratni ventili.

Nepokretni kontakt je pričvršćen na gornji primarni priključak prekidača, a ima glavni i lučni kontakt. Kod prekidanja struje na lučnom kontaktu se događa gorenje luka, dok glavni kontak provodi struju u položaju uključenog prekidača [44]. Glavni kontakt je cilindričnog oblika, a u njemu je koncentrično smešten u obliku pina lučni kontakt. Nepokretni (glavni i lučni) kontakti jednake su dužine.



Slika 6. Poprečni presek prekidne jedinice autokompresionog visokonaponskog prekidača sa gasom SF₆.

Pokretni kontakt je istovremeno i kompresioni cilindar gde se vrši kompresija SF₆ gasa kod isključenja prekidača. On se konusno sužava tako da kod uljučenja prekidača ulazi u glavni nepokretni kontakt. I lučni pokretni kontakt je smešten unutar glavnog kontakta koncentrično, jer je i on u obliku cilindra pa u njega ulazi nepokretni lučni

kontakt kod uključenja prekidača [12]. Pokretni lučni kontakt je duži od glavnog pokretnog kontakta.

U komori su dve mlaznice:

Teflonska izolaciona mlaznica se nalazi na vrhu glavnog pokretnog kontakta i usmerava SF₆ Gas pod pritiskom prema nepokretnom lučnom kontaktu. Ona se nalazi u vrhu glavnog pokretnog kontakta tako da električni luk gori u njoj.

Druga, metalna mlaznica koja je smeštena na vrhu pokretnog lučnog kontakta usmerava SF₆ Gas unutar pokretnog lučnog kontakta [45], i tako se postiže gašenje luka sa dve strane. Zavisno od pritiska ispred i iza nepovratnog ventila, isti se zatvara ili otvara. On se otvara kada je pritisak iza njega veći od pritiska ispred njega, i obrnuto, zatvara kada je pritisak ispred njega veći od pritiska iza njega.

Na taj način se realizuje mehanizam kompresije gasa SF₆ u cilindru za kompresiju (pokretan kontakt) kod isključenja prekidača, i ponovno punjenje cilindra za kompresiju novim, svežim gasom kod uključenja prekidača [11], [12].

Autokompresioni prekidači naponskog nivoa 420 kV i više, dizajnirani su tako da im se oba lučna kontakta pokreću (razdvajaju) kod isključenja prekidača.

Takvi se prekidači zovu “double-motion“ prekidači. Po gašenju luka kod njih se brzo uspostavlja dielektrična čvrstoća u međukontaktном prostoru. Ovakvi prekidači se rade za naponski nivo 420 kV, do prekidne snage od 50 kA [12], [19].

Iz svega navedenog može se reći da su VN prekidači sa gasom SF₆ konstruisani tako da prekidaju struju pri njenom prirodnom prolasku kroz nulu jer se u tom momentu stvara najveća kompresija gasa SF₆ pa se ima i najveća snaga gašenja električnog luka.

Ukoliko se po razdvajanju lučnog kontakta, i prolaska struje kroz nulu, luk se ne ugasi, struja se neće prekinuti pošto je kompresija gasa prošla maksimum i dalje ne može da raste [11], [12], [25], [46].

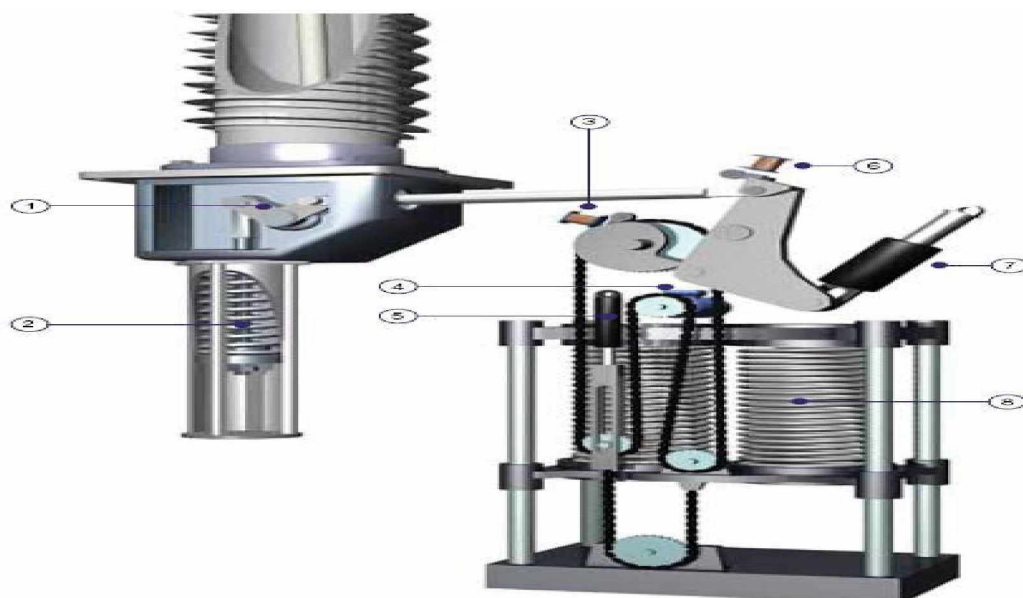
3.2.2. Pogonski mehanizam prekidača

Pogonski mehanizam VN prekidača sa gasom SF₆ koji se primenjuju u elektroenergetski sistem je motorno opružnog tipa. Veza između prekidne jedinice i pogonskog mehanizma prekidača je ostvarena preko horizontalnog pogonskog vratila i bregastih pogonskih osovina, koje se u toku transporta isporučuju odvojeno, te se na mestu ugradnje montiraju u celinu [9].

Osnovni zadatak motorno opružnog pogona je da u oprugama akumulira dovoljno energije da prekidač može izvršiti ciklus: isključenje-0,3s uključanje-isključenje tzv. OCO ciklus (OPEN-0,3s-CLOSE-OPEN) bez ponovnog navijanja opruge i da obezbedi prenos energije iz opruga na kontakte da bi se oni otvarali i zatvarali u deklarisanom vremenu tj. prema dizajniranim brzinama [12], [47], [48].

Na slici 7 je dat prikaz motorno opružni pogonski mehanizam prekidača sa osnovnim elementima:

1. Bregasta pogonska osovina.
2. Opruga za isključenje.
3. Kalem za uključanje.
4. Električni motor.
5. Amortizer pri uključanju.
6. Kalem za isključenje.
7. Amortizer pri isključenju i
8. Opruga za uključanje.



Slika 7. Motorno opružni pogon prekidača sa torzionom spiralnom oprugom.

Motor za navijanje opruge je električni DC motor ili asinhroni monofazni motor, njegov zadatak je da posredstvom zubčanika i lanaca sabije oprugu za uključenje.

Upravljanje motorom vrši signalna sklopka opruge za uključenje. Automatski startuje kada je opruga razmotana i automatski se zaustavlja kada je opruga namotana.

Dakle električni motor posredstvom mehaničkog sklopa električnu energiju prenosi u potencijalnu energiju akumuliranu u opruzi za uključenje.

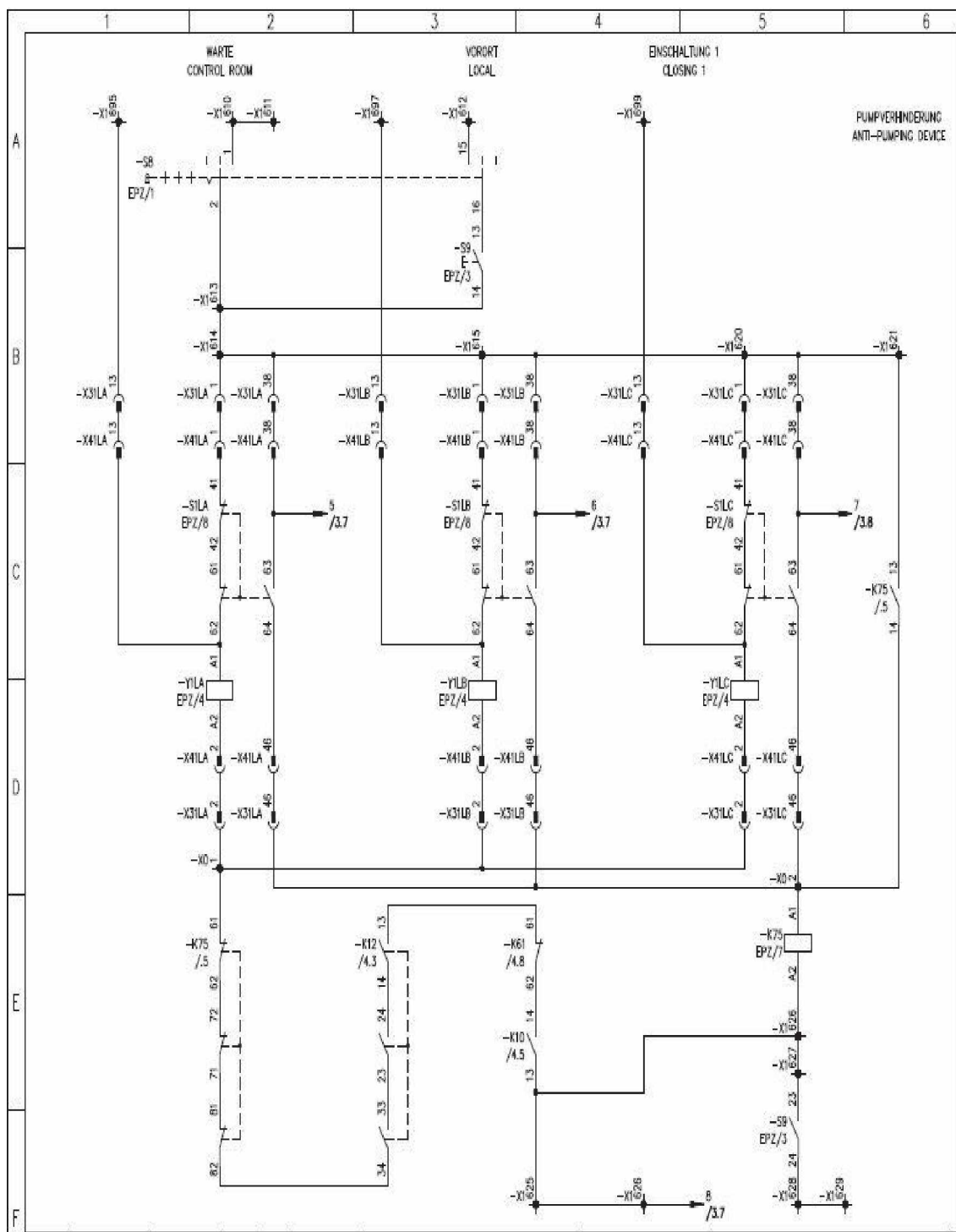
Opruga za uključenje akumulira energiju za uključenje prekidača i za sabijanje opruge za isključenje. Zato je opruga za uključenje veća od opruge za isključenje [12], [25], [49].

3.2.3. Električne šeme delovanja, komandovanja i signalizacije prekidača

Osnovni strujni krugovi upravljanja radom prekidača su:

- Komanda uključanja prekidača.
- Komanda isključenja prekidača od prvog kalema.
- Komanda isključenja prekidača od drugog kalema.
- Kontrola pritiska SF6 gasa prekidača i nesimetrije polova i
- Komanda motorom za navijanje opruge.

Na slici 8 je data šema delovanja komande uključenja prekidača.



Slika 8. Šema delovanja strujno kolo komande uključenja prekidača.

Y1LA, Y1LB I Y1LC su oznake kalemova za uključenje polova faza A, B i C. Komanda je uvek trofazna, što znači da svi polovi istovremeno dobiju komanda za

uključenje, nezavisno od toga dali je prekidač trolepolan ili jednopolan. Za pobudu kalemova za uključenje treba da se ispune određeni uslovi [12], [25], [50]:

Prekidač da bude isključen, odnosno da pomoćni kontakti u sve tri faze: SILA, SILB i SILC budu zatvoreni (sl.8, u kolonama broj 2, 3 i 5). Da su namotane opruge za uključenje prekidača kako bi relej zatvorio svoje kontakte (na slici 8 u koloni broj 3).

- Da pritisak gasa SF6 bude ispod kritične vrednosti kako bi relej zatvorio svoj kontakt (na slici 8 u koloni broj 4) i
- Da zaštita od nesimetrije polova prekidača ne bude aktivirana tako da ne pobudi relej i otvori njegov kontakt (na slici 8 u koloni broj 4).

Funkcija releja je da ne dođe do ponovnog (višestrukog) uključenja prekidača na kvar.

Na dalekovodnim poljima za razliku od generatorskih i transformatorskih polja, komanda za isključenje je jednopolna. Pritisak gasa SF6 ne sme da bude ispod kritične vrednosti, da se ne bi razbudio relej K10, koji u razbudnom stanju otvara svoj kontakt i sprečava pobudu kalemova za isključenje. Kad se prekidač isključi, pomoćni kontakti prekidača se otvaraju i na taj način štite kalemove za isključenje od trajne pobude [12], [15], [32].

Relej K10 koji kontroliše pritisak gasa SF6, u slučaju porasta pritiska iznad kritičnog će se pobuditi u sva tri pola.

Relej K16, štiti od dvopolnog uključenja odnosno isključenja zbog mehaničkog razloga. Ako se kod uključenja jedan pol ne uključi, njegov pomoćni kontakt se neće otvoriti a u ostala dva pola kontakti će se zatvoriti i releji će se pobuditi. Dok kod isključenja ako se jedan pol ne isključi, njegov pomoćni kontakt se neće otvoriti a druga dva pola će ostati zatvoreni kontakti, te će relej K16 opet pobuditi. Nakon pobude releja K16, isti odbrojiti 500 ms do 2 sek, i poslati nalog za isključenje i I i II kalemu prekidača.

Zbog važnosti strujnog kola, napajanje je sa dva izvora, odnosno sa dve nezavisne baterije za sigurnosno napajanje [25], [50].

3.3. Tipovi prekidača sa gasom SF₆

Izuzetne dielektrične karakteristike gasa SF₆ bile su otkrivene četrdesetak godina pre nego što su 1953 godine proizvedeni i pušteni pod napon prvi sklopni aparati koji su koristili gas SF₆ kao medium za gašenje luka. Bile su to učinske sklopke koje su na naponima 15 do 161 kV prekidale struju od 600 A. Prvi visokonaponski prekidač sa gasom SF₆ realizovao je "Westinghouse" 1956 godine. Njegova prekidna struja bila je ograničena na samo 5 kA pri 115 kV. Aparat je imao šest sklopnih elemenata vezanih u seriju po polu.

Ovaj prvi prekidač sa gasom SF₆ radio je na kombinovanom potisnom principu sa samooduvavanjem [12], [19], [51].

Već 1959 godine pojavili su se dvopritisni prekidači sa gasom SF₆ koji su imali znatno veću prekidnu snagu. "Westinghouse" je proizveo prvi dvopritisni prekidač sa gasom SF₆ koji je mogao prekidati velike struje od 41.8 kA pri 138 kV i 37.6 kA pri 230 kV. Taj trolni prekidač sa uzemljenim kućištem (dead tank tip) imao je tri sklopna elementa vezana u seriju po polu i koristio je gas SF₆ pod pritiskom od 13.5 bara za oduvavanje luka i 3 bara za izolaciju [11].

Sedamdesete i osamdesete godine obeležile su veliku evoluciju prekidači sa gasom SF₆.

Ovaj period predstavlja vrhunac razvoja prekidača sa gasom SF₆ na potisnom principu, koji je doveo do značajnog povećanja naponskog nivoa po prekidnom elementu i smanjenja energije koja se koristi za pogonske mehanizme [12], [15].

U ovom periodu su proizvedene dve generacije visokonaponskih prekidača sa gasom SF₆ na potisnom principu sa izolacionom mlaznicom i parcijalnim dvostranim oduvavanjem.

Prva generacija je imala četiri sklopna elementa vezana u seriju po polu na 420 kV i 40 kA, a druga samo dva na 550 kV i 50 kA. Već 1980 godine razvijen je prekidač 245 kV, 40 kA sa samo jednim sklopnim elementom po polu [12], [19].

Poznata su četiri tipa prekidača sa gasom SF₆ [12]:

- Dvopritisni prekidači sa gasom SF₆.
- Jednopritisni prekidači sa gasom SF₆ na potisnom principu.

- Prekidači sa gasom SF₆ sa samooduvavanjem i
- Prekidači sa gasom SF₆ sa magnetnom rotacijom luka.

3.3.1. Dvopritisni prekidač sa gasom SF₆

Dvopritisni prekidači sa gasom SF₆ su nasledili princip rada od pneumatskih prekidača sa komprimiranim vazduhom. Pošto pri visokom pritisku gas SF₆ prelazi u tečnu fazu pri temperaturama u opsegu radnih temperatura prekidača, neophodna je ugradnja grijača u rezervoar sa visokim pritiskom tokom procesa prekidanja struje, luk se hladi komprimiranim gasom SF₆ iz posebnog rezervuara gasa pod visokim pritiskom.

Strujanje gasa je sinhronizirano sa razdvajanjem kontakata i prestaje čim kontakti dostignu krajni položaj (kontakti su smešteni unutar kućišta napunjenog gasom SF₆) [11], [12].

Osim što je velika potrošnja energije na grijačima za sprečavanje utečnjavanja gasa SF₆, oni predstavljaju dodatni elemenat rizika od otkaza prekidača jer kad ne rade grijači, ne može raditi ni prekidač [11], [12], [19].

Brojni su nedostaci dvopritisnih prekidača sa gasom SF₆ od kojih su najznačajnije:

- Velika mehanička kompleksnost.
- Veoma su glomazni.
- Potrebna im je veoma velika količina gasa SF₆.
- Moraju biti opremljeni dodatnim kompresorskim sistemom za održavanje visokog pritiska i
- Velika potrošnja energije na grijačima za sprečavanje utečnjavanja gasa SF₆.

Zbog toga su dvopritisni prekidači bili vrlo brzo potisnuti sa tržišta [11].

3.3.2. Jednopritisni prekidači sa gasom SF₆ na potisnom principu

Najznačajnija prednost prekidača na potisnom principu je izuzetna jednostavnost sklopnog elementa. To im obezbeđuje veliku pouzdanost i mehaničku trajnost.

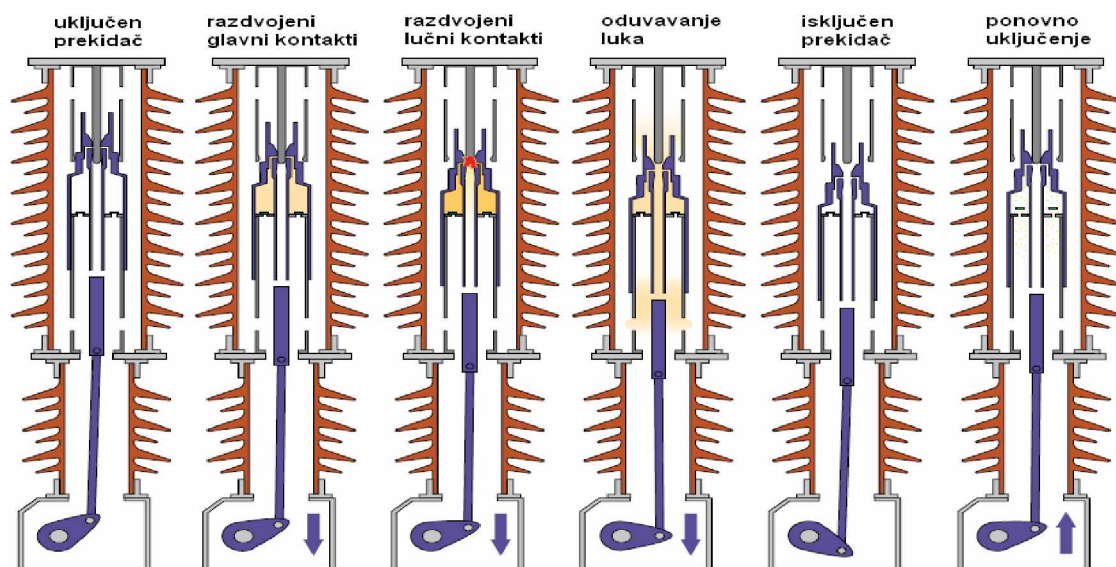
Povećanju pouzdanosti na najvišim naponima doprinosi i mali broj sklopnih elemenata po polu. Naime, izuzetne izolacione karakteristike gasa SF₆ omogućavaju postizanje jako visokih nazivnih napona po sklopnom elementu. Danas se na nazivnom naponu od 245 kV redovno koriste prekidači sa jednim sklopnim elementom po polu, na 550 kV sa dva, dok na naponima preko 800 kV dovoljna su samo četiri sklopna elementa po polu. Posebno treba istaknuti i veliku električnu trajnost prekidača sa gasom SF₆, koja je i preko deset puta veća od električne trajnosti maloujnih prekidača [12], [52].

Sve navedene prednosti prekidača na potisnom principu posebno dolaze do izražaja u metalom oklopljenim, gasom SF₆ izolovanim postrojenjima jer pružaju izuzetne mogućnosti u smislu smanjenja dimenzija i veliku sigurnost u pogonu.

Osnovni nedostatak prekidača na potisnom principu je relativno dug hod sa velikim pogonskim silama, koje mogu obezbediti samo pogonski mehanizmi sa velikom akumuliranom energijom. Jaki i pouzdani pogonski mehanizmi su veoma skupi što se direktno odražava na ukupnu cenu prekidača [12], [15], [53].

Na slici 9 je prikazan mehanizam kompresije gasa SF₆ i gašenje luka kod prekidača na potisnom principu. Tokom razdvajanja kontakata lučni nepokretni kontakt zatvara mlaznicu a time i kompresioni cilindar sa gornje strane. Sa donje strane, kompresioni cilindar zatvaraju nepovratni ventili, jer oni imaju fiksni položaj. Nakon razdvajanja lučnih kontakata dolazi do paljenja električnog luka. Gorenje električnog luka takođe zatvara izolacionu mlaznicu. Pritisak u kompresionom cilindru raste od momenta pokretanja kontakata pa sve dok struja električnog luka prirodno ne prelazi kroz nulu.

U tom momentu prečnik luka se smanjuje, mlaznica se otpušta i gas SF₆ pod pritiskom struji preko luka hladeći ga. Na taj način je omogućeno da gašenje luka traje dokle god električni luk postoji i da je maksimalna kompresija gasa SF₆ postignuta u momentu kada je luk najlakše ugasiti, pri prirodnom prolasku struje kroz nulu [11], [12].



Slika 9. Kompresija gasa SF₆ kod prekidača na potisnom principu pri gašenju luka.

U slučaju prekidanja velikih struja kratkog spoja pod dejstvom električnog luka dolazi do kompresije koja stvara i više od četiri puta veći pritisak gasa SF₆ od nominalnog pritiska punjenja prekidača.

Snaga gašenja luka će biti veća ukoliko je veća struja koja se prekida. Zato ovi prekidači mogu da prekinu struju i do 80 kA na naponskom nivou od 220 kV [12], [54].

Pri prekidanju malih struja, reda nekoliko stotina ampera električni luk ne može da stvori dovoljno dodatnu kompresiju gasa SF₆.

U tom slučaju snaga gašenja luka slična je kao pri isključenju prekidača bez opterećenja, jer energiju za gašenje luka dominantno stvara mehanička kompresija pod dejstvom motorno-opružnog pogona.

Mana ovih prekidača je što trpe velika mehanička naprezanja pri zaustavljanju kontakata jer motorno-opružni pogon koji ih pokreće ima veliku energiju [11], [25], [55].

3.3.3. SF₆ prekidač sa samooduvavanjem luka

U grupu jednopritisnih prekidača sa gasom SF₆, pored prekidača na potisnom principu, spadaju i prekidači koji koriste toplotnu energiju luka u procesu njegovog gašenja.

Ovaj princip gašenja luka obično se naziva samooduvavanje luka u gasu SF₆.

Može se čak utvrditi da svaki jednopritisni prekidač pripada porodici prekidača sa samooduvavanjem, jer i kod prekidača na potisnom principu luk svojom toplotnom energijom delimično učestvuje u porastu pritiska u kompresionom prostoru [18].

Bitna razlika je u tome što kod prekidača na potisnom principu postoji povratna sprega između kompresionog prostora i pogonskog mehanizma, koji mora imati dovoljnu energiju da nastavi kretanje i kompresiju prostora i u slučaju kada u njemu već vlada povišeni pritisak, dok kod prekidača sa samooduvavanjem ova sprega ne postoji ili je znatno reducirana [11], [12], [19].

Eksplotaciona iskustva pokazuju da su otkazi prekidača zbog nedovoljne prekidne moći veoma redak slučaj. Većina otkaza prekidača su mehaničke prirode.

Logično je, dakle, da se povećanjem pouzdanosti pogonskih mehanizama može bitno povećati pouzdanost prekidača, što je jedan od najvažnijih zadataka u razvoju sklopne tehnike na visokom naponu u poslednjih dvadesetak godina.

Zbog činjenice da prekidači sa gasom SF₆ na potisnom principu zahtevaju veliku energiju pogonskih mehanizama, proizvođači su prisiljeni koristiti hidrauličke ili pneumatske pogone [25]. U slučaju korišćenja opružnih pogona oni su bili izloženi velikim mehaničkim naprezanjima.

Kod sklopnih elemenata na principu samooduvavanja u gasu SF₆ postiže se znatno smanjenje kompresionog cilindra, što dalje omogućava upotrebu porcelanskog kučista manjeg prečnika, čime se zapremina gasa na zone smanjuje i do 40 %, to ima kako ekonomski, tako i ekološki značaj [12], [15].

3.3.4. SF₆ prekidač sa magnetnom rotacijom luka

Kod svih ostalih prekidača sa gasom SF₆ hlađenje luka se ostvaruje strujanjem gasa, jedino se kod prekidača sa gasom SF₆ sa magnetnom rotacijom luka, umesto strujanja gasa oko luka, ostvaruje se kretanje (rotacija) luka kroz miran gas. Krajni efekat je u principu isti, tako da se i na ovaj način može ostvariti efikasno hlađenje i uspešno gašenje luka, ukoliko je magnetno polje, koje proizvodi struja koja se prekida, dovoljno jako [11], [12].

Velika prednost magnetne rotacije luka je u tome što ovaj princip zahteva veoma malu energiju pogonskog mehanizma. To je razlog što se decenijama radi na istraživanju ovog principa gašenja luka. Nažalost, do danas nije dostignuta efikasnost kao kod drugih principa gašenja luka u gasu SF₆. U najvećem broju slučajeva bilo je potrebno dodatno oduvavanje luka da bi se rešio problem prekidanja manjih struja.

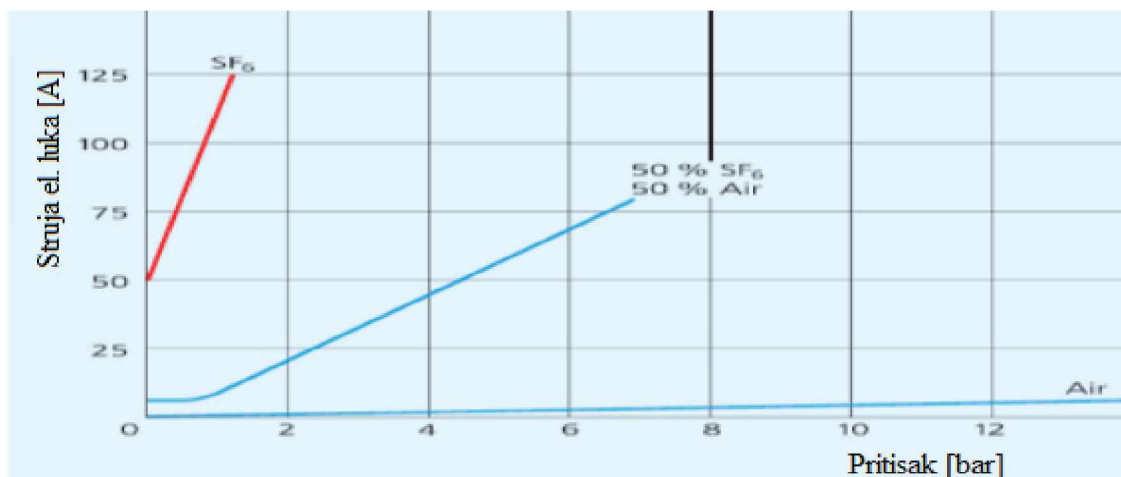
Dakle, izvedbe prekidača sa rotacijom luka u gasu SF₆ do sada nisu imale uspeha jer nije bilo moguće efikasno i sigurno gasiti manje struje kada je vlastito magnetno polje nedovoljno za efikasno oduvavanje luka. Veliko je pitanje da li je uopšte moguće rešiti ovaj problem. Tako magnetna rotacija luka u gasu SF₆ ostaje kao trajni izazov [12], [19].

3.4. Ispitivanje SF₆ gasa

U VN prekidačima gas SF₆ ima dve uloge:

- Prva je da uspešno ugasi električni luk i
- Druga je da stvara potrebnu dielektričnu čvrstoću u međukontaktном prostoru.

Da bi prekidač sa gasom SF₆ kao medium za gašenje luka mogao da prekine struju kratkog spoja u komori za gašenje luka, gas SF₆ treba da poseduje odgovarajući pritisak i odgovarajući hemijsko-fizički kvalitet [12]. Niži pritisak SF₆ gasa u komori dovodi do smanjenja prekidne snage prekidača (slika 10).



Slika 10. Zavisnost prekidne snage SF₆ prekidača od pritiska gasa.

Niži pritisak dovodi do lošeg hlađenja električnog luka što otežava prekidanje struje. Ako sekundarni luk razvija veću toplotnu energiju posle prolaza struje kroz nulu od toplotne energije hlađenja luka, onda se luk neće ugasi jer će sekundarni luk prerastati u primarni [11], [12].

Upotreba gasa SF₆ stvara sigurnosne kao i rizik za ekologiju. Pogotvo je opasana upotreba gasa SF₆ koji je bio izložen visokoj temperaturi, zbog gorenja električnog luka.

Zato se posvećuje posebna pažnja kontroli i analizi gasa SF₆ pre puštanja u pogon prekidača a i u toku preventivnog održavanja, isto tako potreban je poseban nadzor na mogućnost curenja gasa.

Glavni rutinski koraci testa gasa SF₆ u odnosu na IEC, ANSI i tvorničke standarde prikazani su kako sledi [11], [25], [33], [39]:

- Karakteristike SF₆ gasa.
- Rukovanje SF₆ gasom.
- Kontrola pritiska.
- Detekcija curenja.
- Kontrola fizičko-hemijskih karakteristika SF₆ gasa.
- Ispitivanje čistoće (odnos SF₆/N₂).
- Ispitivanje vlažnosti.
- Ispitivanje korozivnosti.
- Toksičnost SF₆ gasa u kome je goreo električni luk i
- Ocena kvaliteta gasa SF₆ za upotrebu u prekidačima.

Stanje gasa SF₆ je potrebno stalno kontrolisati, jer prekidač može da zadovolji sve testove u pogledu mehaničkih i električnih karakteristika a da ne reaguje u slučaju potrebe zbog neodgovarajućih fizičko-hemiskog kvaliteta gasa SF₆, što može da uzrokuje veću štetu.

3.5. Izbor prekidača na bazi IEC standarda

Međunarodni standardi (IEC) daju pravila i postupke za izbor osnovnih karakteristika prekidača s obzirom na njihovu namenu i mesto ugradnje.

U Standardu IEC 62271-100, po prvi put je uveden eksplicitni koncept prekidača koji je u stanju da se bavi odnosima X/R ili vremenskim konstantama drugačijim od standardne vremenske konstante od 45 ms.

Stopa prigušenja DC komponente je obično izraženo kao vremenska konstanta, koja se definiše kao efektivni odnos X/R na mestu kvara. U stvarnosti tokom kvara će biti smanjene AC i DC komponente, međutim u testovima standarda IEC 62271-100, smanjenje AC struje se zanemaruje [30].

Treba napomenuti da efikasni odnos X/R nije jednostavan odnos $R-jX$ tipično dobijen kratkim spojem za redukciju mreže. Iskustvo je pokazalo da se korišćenjem R i X vrednosti, dobijenih pomoću programa redukcije tipičnog kratkog spoja mreže, daju tačnu struju kratkog spoja. Međutim, DC vremenska konstanta zasnovana na odnosu ovih vrednosti će generalno biti manja od realne vrednosti.

IEC 62271-100 specificira dodatne "specijalne vremenske konstante" od 60, 75 i 120 ms [30], [31].

- 120 ms za nazivne napone do i uključujući 52 kV,
- 60 ms za nazivne napone od 72,5 kV do i uključujući 420 kV,
- 75 ms za naznačene napone 550 kV i više.

3.5.1. Uputstvo za izbor prekidača

Za procenu efekta različitih DC vremenskih konstanti mogu se izvesti neka opšta zapažanja. Za slučajeve u kojima je stvarna struja kratkog spoja manja ali DC vremenska konstanta veća, di/dt struje i amplituda male petlje će biti manja od nominalne vrednosti.

Razmatranje energije luka koja predstavlja površinu glavne petlje struje verovatno je jedna od najvažnijih razmatranja. Amplituda i trajanje glavne petlje struje su direktno povezani za DC vremensku konstantu. Značajna je i ukupna energija luka prikazana ukupnom površinom merenom od tačke razdvajanja kontakata u polovima prekidača do definitivnog gašenja luka.

U nastojanju da se proceni efekat različitih DC vremenskih konstanti ispitane su standardna vremenska konstanta od 45 ms, i produžene vremenske konstante od 60, 75,

90 i 120 ms. Dodatak od 90 ms je napravljen kako bi se obezbedio ravnomerno širenje podataka koje treba razviti za upoređivanje [30].

Metodologija za procenu efekta različitih vremenskih konstanti je sledeća:

a) Rešiti jednačinu 3 za ukupnu struju pod pretpostavkom da nema smanjenja (prigušenja) AC komponente u periodu vremena (t) dovoljno za razmatrani period.

$$i_{\text{total}} = \left(e^{-\frac{2\pi ft}{\tau}} - \cos(2\pi ft) \right) \sqrt{2} \cdot i \quad (3)$$

gde je:

τ - DC vremenska konstanta sistema.

b) Koristeći jednačinu 3, odredit će se vrednosti i_{total} za svaku od odabranih vremenskih konstanti. Niže su navedeni približni odnosi X/R za ove vremenske konstante za 50 Hz (tabela 1).

Tabela 1. Odnos između vremenske konstante i X/R vrednosti.

| Vremenska konstanta ms | X/R 50 Hz |
|---------------------------|--------------|
| 45 | 14.1 |
| 60 | 18.8 |
| 75 | 23.6 |
| 90 | 28.3 |
| 120 | 37.7 |

Na primer, da bi se dobila vremenska konstanta od 45 ms u gornjoj jednačini, proizvod od $\frac{\omega}{\tau} \cdot 0.045 = 1$ sa $f \omega = 2\pi f$. Ako se vrednost 17 koristi za X/R u 60 Hz izračunavanju, ona daje vremensku konstantu od 45 ms. Iz ovoga je očigledno da se odnos X/R mora promijeniti proporcionalno promenama u frekvenci da bi konstanta vremena bila ista za sistem od 50 Hz [30], [31].

c) Nakon rešenja jednačine za kontinuirane vrednosti, sledeći korak je da se odluči gde će prekid uslediti. Događaji u toku rada prekidača koji uvek prethode stvarnom prekidu i utvrđuju vreme potrebno za prekid su: relejno vreme, minimalno vreme otvaranja kontakata prekidača (minimalno vreme otvaranja plus vreme releja), minimalno vreme trajanja električnog luka. Sledeći prolazak struje kroz nulu nakon zbira navedenih vremena je najranije vreme kada prekidač može prekinuti strujni krug.

To znači da će se to pojaviti u svim situacijama i kod svih vrsta prekidača. To je razumna pretpostavka za savremene SF6 ili vakuumske prekidače.

Korisnik mora da odredi stvarno očekivanu struju kvara uključujući AC i DC prigušenje na interesnoj tački sistema gde se očekuje ugradnja definisanog prekidača [30].

U nekim slučajevima AC prigušenje može biti značajno i može eliminisati potrebu za više dimenzionisanje prekidača bazirano samo na zahtevu za DC komponentu.

Neke pretpostavke prema IEC 62271-100:

a) Napon luka je konstantan u vreme dok traje električni luk. Ovo omogućuje da energija luka bude predstavljena sa I_{xt} površinom ispod krivulje struje. Manja ukupna struja sa dužim DC vremenskom konstantom (u poređenju sa nazivnom strujom kratkog spoja i standardnom vremenskom konstantom) ima veću DC komponentu, di/dt će uvek biti manje, a prekidač bi mogao da prekine strujni krug kod prvog normalnog prolaska struje kroz nulu ako su ispunjeni svi ostali kriterijumi.

b) Ako je energija koju predstavlja površina I_{xt} ispod krivulje struje manja od vrednosti standardnog talasa, prekid će biti uspešan.

c) Ako je energija koju predstavlja površina I_{xt} ispod krivulje struje (iz literature [30]) jednaka ili veća od vrednosti standardnog prekida, prekid će biti neuspešan. Ovo će možda biti potrebno primeniti na glavnu petlju posebno, kao i na ukupan period.

I_{xt} i površina X ispod krivulje struje mogu se dobiti rešavanjem jednačine 4:

$$X = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt \quad (4)$$

gde je:

$f(t)$ - ukupna struja i_{total} kao što je data u jednačini 3

t_1 - vreme kontakta, minimalno vreme otvaranja kontakta plus vreme releja

t_2 - vreme kada struja prolazi kroz nulu kada bi se mogao desiti prekid. Ova integracija se možda mora izvršiti u delovima.

I - potrebna vršna vrednost struje poslednje petlje kratkog spoja i

t - traženo trajanje poslednje petlje kratkog spoja, koje radi povećanja tolerancije može biti između 81% i 121% od traženih vrednosti.

Ovom jednačinom se računa energija luka (koja se menja u zavisnosti od vrednosti DC komponente) ona je veća što je veća DC komponente, te se preko te energije računa da li je prekidač sposoban prekinuti struju sa većom DC komponentom [30], [31].

Pretpostavke koje su ranije date, biće potvrđene kroz sledeći primer:

Automatski prekidač 63 kA, 50 Hz.

- Vreme releja 10 ms.
- Vreme razdvajanja kontakata 26 ms.
- Minimalno vreme vraćanja (prekid nakon manje petlje) 8 ms.
- Vremenska konstanta 45 ms.

Tabela 2. Poređenje postojećih zona petlje nakon razdvajanja kontakta.

| Red | Nazivna struja [kA] | Vremenska konstanta [ms] | Površina 1. ve velike petlje [kAs] | Površina 1. ve minim. petlje [kAs] | Površina 2. ge glavne petlje [kAs] | Ukupna površina [kAs] |
|-----|---------------------|--------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| 1 | 63 | 45 | 0.003 | 0.25 | 0.893 | 1.146 |
| 2 | 50 | 60 | 0.007 | 0.148 | 0.802 | 0.957 |
| 3 | 50 | 75 | 0.012 | 0.115 | 0.875 | 1.002 |
| 4 | 50 | 90 | 0.016 | 0.093 | 0.933 | 1.043 |
| 5 | 50 | 120 | 0.023 | 0.065 | 1.019 | 1.108 |
| 6 | 50 | 80 | 0.013 | 0.107 | 0.896 | 1.016 |
| 7 | 40 | 120 | 0.019 | 0.052 | 0.815 | 0.886 |

Posebne tačke tabele 2:

- a) Red 1 u tabeli 2 sadrži referentne vrednosti za 50 Hz, 63 kA.
- b) U redovima 2 i 3 može se videti da će redukcija jednog koraka u seriji R 10 (tabela 3) obuhvatiti sve slučajeve za $t = 60 - 75$ ms.
- c) Red 4 pokazuje da za $t = 90$ ms vrednost za drugu glavnu petlju premašuje referentnu vrednost od 1.
- d) U redu 5, ocena je i dalje 50 kA, ali je vremenska konstanta dodatno povećana na 120 ms. Površina glavne petlje je još više poraslo.
- e) Rezultat slučaja koji se razmatra u redu 6 je nešto drugačiji od slučaja 60 Hz u tome što površina glavne petlje malo prelazi referentnu vrednost 1. Ova razlika od 0,3 % pokazuje da je $t=80$ ms možda vrlo blizu graničnih performansi prekidača sa smanjenjem od jednog koraka u seriji R 10.
- f) Slučaj koji se razmatra u redu 7 pokazuje da redukcija za dva koraka u seriji R 10 (tabela 3) od referentnog prekidača lako pokriva zahteve sistema sa vremenskom konstantom od 120 ms.

g) Slučaj 1 se takođe primenjuje ovde.

IEC62271-308 preporučuje jednostavan način ocenjivanja. Predlaže umnožavanje amplituda glavne petlje u toku trajanja petlje da bi se dobilo reprezentativna površina za upoređivanje. Tabela 3 daje rezultate izračunavanja za različite 50 Hz ne karakteristike za prekid na kraju velike petlje.

Pretpostavka je da se prekid pojavljuje na kraju velike petlje struje. Ako je prekoračena površina glavne petlje, verovatnoća neuspešnog prekida je velika.

Ponovna procena prekidača za 1 stepen niže u seriji R10 sa jednim povećanjem nivoa vremenske konstante bi bilo zadovoljavajuće [30], [31].

Tabela 3. 50 Hz upoređivanje integralne metode sa metodom IEC 62271-100.

| Red | Nominalna struja kA | Vremenska konstanta ms | Površina velike petlje | Pik velike petlje I kA | Trajanje petlje ms | Ixt kAs | Nom. površina velike petlje | Nominalna površina Ixt | Integralna razlika u % |
|-----|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|---------|-----------------------------|------------------------|------------------------|
| [1] | [2] | [3] | [4] | [5] | [6] | [7] | [8] | [9] | [10] |
| 1 | 63 | 45 | 0.8932 | 118.45 | 12.17 | 1.441 | 1 | 1 | - |
| 2 | 50 | 60 | 0.8020 | 101.46 | 12.89 | 1.307 | 0.897 | 0.907 | 1.04 |
| 3 | 50 | 75 | 0.8752 | 107.03 | 13.46 | 1.440 | 0.979 | 0.999 | 2.00 |
| 4 | 50 | 90 | 0.9333 | 111.29 | 13.92 | 1.549 | 1.044 | 1.074 | 2.85 |
| 5 | 50 | 120 | 1.0192 | 117.33 | 14.61 | 1.714 | 1.141 | 1.189 | 4.22 |
| 6 | 50 | 80 | 0.8960 | 108.57 | 13.54 | 1.470 | 1.003 | 1.019 | 1.66 |
| 7 | 40 | 120 | 0.8153 | 93.86 | 14.61 | 1.371 | 0.912 | 0.951 | 4.22 |

U IEC-u 62271-100 postoje tablice gdje je dana vrednost DC komponente za različite vremenske konstante. Ovdje se spominju DC konstante od 60 ms za prekidače do 420 kV i 75 ms za prekidače 550 kV i viši napon. Po ovim tablicama a tako i jeste DC komponenta opada s vremenom. U IEC-u 62271-100 se mogu pogledati vrednosti DC komponente u skladu sa minimalno vreme delovanja prekidača (minimum clearance timeom) [30], [31].

Minimalno vreme delovanja prekidača je, suma minimalnog vremena otvaranja kontakta prekidača, minimalno vreme delovanja releja (0,5 ciklusa) i minimalno vreme

trajanja električnog luka, i to vreme na osnovu dosadašnjih saznanja je 35-40 ms (vreme releja 10 ms + vreme isključenja 19-20 ms + najkraće vreme luka).

Minimalno vreme delovanja prekidača je drukčije za svaki prekidač (zavisi od proizvođača). Vreme releja je pola ciklusa od 20 ms (10 ms) definirano IEC_om, vreme najkraćeg isključenja je ono koje proizvođač deklarira za svoj prekidač (najkraće vreme otvaranja, je vreme otkad relej pošalje signal do kad se lučni kontakti u komori ne razdvoje). Vreme najkraćeg luka se dobija iz tabela sa ispitivanja (IEC 62271-100), bazirano na 100 postotnu asimetričnu struju kratkog spoja [30].

Praktično to je za pojedini prekidač najmanje vreme od pojave kvara do potpunog isključenja. Ako se uzme da je kod pojave kvara, struja kratkog spoja maksimalna, vreme delovanja govori koliko je ta DC komponenta opala u tih 40 ms, vrednosti su drukčije za pojedine vremenske konstante a i za drukčije vreme delovanja prekidača (što je duže vreme delovanja prekidača DC komponenta se više prigušuje i opada).

IEC standardi pokazuju da prekidač sa većom prekidnom snagom može zameniti prekidač sa manjom prekidnom snagom ali većom DC vremenskom konstantom.

Bazirano na testna ispitivanja za IEC standard (IEC 62271-100), u tabeli 2 data energija u velikoj i maloj petlji, pokazuju kad prekidač od 63 kA ispitan za standardnu vremensku konstantu 45 ms, može ili ne može zameniti prekidač sa manjom prekidnom snagom ali većom DC vremenskom konstantom.

Iz svega navedenog, može se zaključiti da se zavisno od mesta ugradnje prekidača, isti odabira na osnovu maksimalne struje kvara koja se može pojaviti u mreži na mestu ugradnje, i vremenske konstante, koja definiše prigušenje DC komponente struje kvara u momentu delovanja prekidača.

Prema testovima izvršenih IEC standardima, mogu se zameniti prekidači niže nazivne prekidne struje za jedan korak, uz produženje vremenske konstante za jedan korak, i obrnuto tamo gde se zahteva kraća vremenska konstanta za jedan korak, može se uzeti prekidač za jedan korak višom nazivnom prekidnom strujom [30], [31].

Analizirajući literaturu, može se reći da:

Prekidač sa gasom SF₆ ima takve karakteristike da ga čine odličnim uređajem za gašenje električnog luka. Njihov dug vek trajanja i malo potrebe za preventivno održavanje, čine da se prekidač sa gasom SF₆ masovno primenjuje u sadašnjim VN prenosnim mrežama. Zbog njihovog sigurnog i vrlo brzog delovanja, efikasnosti u otklanjanju kvarova, itd, prekidači sa gasom SF₆ ugrađeni su skoro u svim prenosnim sistemima [11], [12], [31].

Pouzdanost prekidača sa gasom SF₆ je važna jer rad VN opreme, koju on štiti zavisi od njegovog pouzdanog delovanja. Zbog toga je potrebno da se vrši redovno nadgledanje i preventivno održavanje u toku životne dobi.

Stari koncept održavanja prekidača zasnovan na kriterijum vreme je odbačen, sada se primenjuje koncept zasnovan na procenu stanja prekidača. Prema standardu IEC 62271-100 vrši se ispitivanje karakterističnih parametara prekidača, da bi se potvrdila isprobnost njegovih osnovnih funkcija [30]

IEC standardi daju pravila i postupke za izbor osnovnih karakteristika prekidača s obzirom na njihovu namenu i mesto ugradnje [19], [25], [30], [31].

4. ELEKTROENERGETSKI SISTEM KOSOVA

U ovom poglavlju biće prikazano stanje Kosovskog elektroenergetskog sistema, njegovo funkcionisanje, problemi sa kojima se suočava, oprema (elementi) sa posebnim naglaskom na vrste prekidača koji su u upotrebu.

Elektroenergetski sistem Kosova se sastoji od sektora:

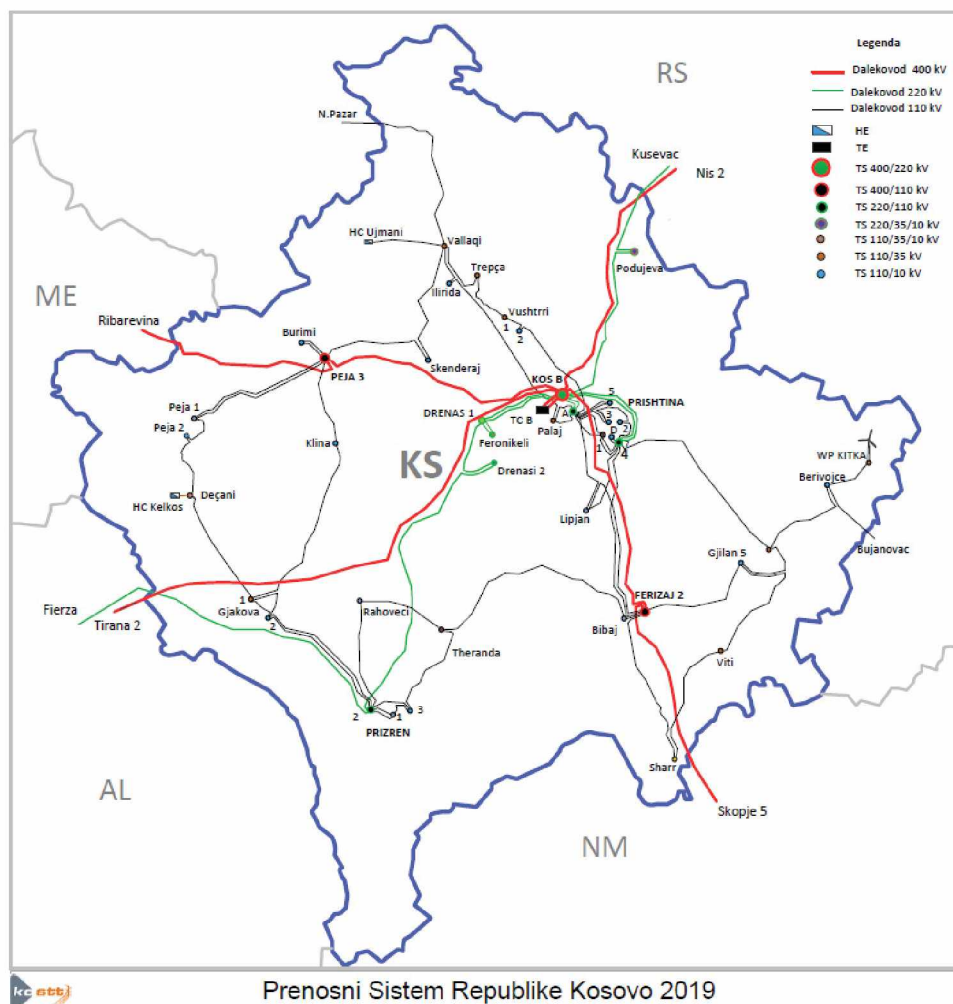
- Za prenos električne energije (KOSTT).
- Za proizvodnju električne energije (termoelektrane Kosovo A i B kao i hidroelektrane) i
- Za distribuciju i snabdevanje električne energije (KEDS koja je privatizovana tokom 2013 godine).

Elektroenergetski sistem Kosova je povezan sa međunarodnim dalekovodima sa susednim zemljama: Albanijom, Crnom Gorom, Makedonijom i Srbijom pomoću visokonaponskih dalekovoda većih prenosnih kapaciteta 400 kV, 220 kV i 110 kV.

EES Kosova se karakteriše snažnom interkonektivnom vezom 400 kV na regionalnu mrežu. Ova čvrsta veza prenosne mreže sa okolnim mrežama uvrštava EES Kosova u jedan od važnih elektroenergetskih čvorova u regionu i šire.

Stalno povećanje potrošnje električne energije u zemlji i regionu povećava fluks energije u domaćim kao i u interkonektivnim linijama. Ovo povećanje tokova energije uvek sužava marginu sigurnosti stabilnosti EES Kosova kao i drugih sistema koji su povezani sa Kosovskim sistemom [56], [57].

Na slici 11 je data mapa elektroenergetskog sistema Kosovo.



Slika 11. Elektroenergetski sistem Kosovo.

4.1. Operator sistema, prenosa i tržišta A.D.

Operator Sistema, Prenosa i Tržišta A.D. (KOSTT), je kompanija pod nadzorom vlade Kosova i koja ima u vlasništvo dalekovode 110 kV, 220 kV i 400 kV kao i trafostanice 110, 220 i 400 kV.

Prenosna mreža na Kosovu sastoji se od dalekovoda i trafostanica visokog napona 400 kV, 220 kV i 110 kV, prekidača kao i ostale opreme za nadzor, komandovanje i upravljanje prenosnim sistemom.

Prenosni sistem Kosovo na nivou države ima instalirani kapacitet od 2000 MW, dok je maksimalno opterećenje za 2017 godinu bilo 1160 MW [6]. U nastavku prikazan je kratak opis i starost opreme i dužine linija.

Dužine linija prenosa su prikazane u tabeli 4, dok u tabeli 5 prikazana je starost linija prema nivou napona [56], [57].

Tabela 4. Dužina prenosnih linija.

| Vazdušne linije 2016 | Totalna dužina [km] |
|----------------------|---------------------|
| 400 kV | 188.497 |
| 220 kV | 231.882 |
| 110 kV | 791.3 |

Tabela 5. Starost linija prema nivou napona.

| Starost (Godine) | Nivo napona 400 kV | Nivo napona 220 kV | Nivo napona 110 kV |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0-25 | 0 | 0 | 18% |
| 25-35 | 28% | 77% | 22% |
| 35-50 | 72% | 23% | 52% |

Kapaciteti transformisanja (autotransformatori), broj (Br) trafostanice (TS), broj transformatora (TR) prenosnog nivoa 400/220 kV, 400/110 kV i 220/110 kV, 110/35/10 kV i 110/10 kV za godinu 2016 prikazani su u tabeli 6.

Tabela 6. Kapaciteti transformisanja (autotransformatori) prenosne mreže operatora sistema prenosa i tržišta A.D. (KOSTT_a).

| Transformacija kV | Vlasnik | Br. TS | Br. TR | Sinst [MVA] |
|-------------------|---------|--------|--------|-------------|
| 400/220 | KOSTT | 1 | 3 | 1,200 |
| 400/110 | KOSTT | 2 | 2 | 600 |
| 220/110 | KOSTT | 3 | 8 | 1,200 |
| 220/35/10(20) | KOSTT | 1 | 1 | 40 |
| 220/10(20) | KOSTT | - | 1 | 40 |
| 110/35/10(20) | KOSTT | 3 | 4 | 158 |
| 110/10(20) | KOSTT | 15 | 19 | 678 |
| 110/35 | KOSTT | 10 | 19 | 638 |
| 110/10 | KOSTT | 8 | 11 | 347 |

4.2. Kapaciteti za proizvodnju električne energije

Proizvodni kapaciteti električne energije Kosovo se pretežno baziraju na dve relativno velike termoelektrane (TE) i to TE “Kosovo A” i TE “Kosovo B”. Obe TE koriste ugalj-lignit kao gorivo. Lignit se uzima iz dva površinska kopa, Bardhi Madh i Sibovci koji obuhvataju površinu od oko 9 km². Ostali deo proizvodnje je iz hidroelektrane, HE Gazivode.

Postoje i četiri male hidroelektrane priključene na distributivnu mrežu [56], [57].

4.2.1. Termoelektrana “Kosovo A”

TE “Kosovo A” sastoji se od pet jedinica: A1, A2, A3, A4 i A5. Jedinica A1 ove TE puštena je u pogon 1962 godine, snage 65 MW, A2, 1965 godine snage 125 MW, A3, 1970 godine snage 200 MW, A4, 1971 godine snage 200 MW i A5, 1975 godine snage 210 MW. Jedinica A1 je bila priključena na napon 110 kV a ostale četiri jedinice A2, A3, A4 i A5 na napon 220 kV [56]. U tabeli 7 prikazani su tehnički podaci ovih termoelektrana.

Na slici 12 dat je pogled na TE “Kosovo A” u doba kada su bile u pogonu svih 5 jedinica. U tabeli 8 su dati podaci o proizvodnji TE “Kosovo A” za 2017. Jedinice A1 i A2 su van pogona, bez definisanog statusa, a po aktuelnim planovima one će ostati tako do kraja, kada se očekuje zatvaranje (dekomisioniranje) zajedno sa ostalim jedinicama.

Zatvaranje ovih jedinica predviđeno je bilo da se desi 2017 godine, ali, pošto još nije počela izgradnja TE “Kosovo e Re” (Novo Kosovo) njihovo zatvaranje je odgođeno, po svemu sudeći, do trenutka puštanja u pogon TE “Kosovo e Re” što se očekuje negde 2023 godine. Jedinice A3, A4 i A5 su u funkciji [56].

Tabela 7. Tehnički podaci generatorskih jedinica TE “Kosovo A”.

| Jedinica | Godina instaliranja | Bruto instalirani kapaciteti (MW) | Neto instalirani kapaciteti (MW) | Tehnički minimum (MW) | Specifična potrošnja lignita kJ/kg |
|----------|---------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| A1 | 1962 | 65 | 55 | 34 | 2.1 |
| A2 | 1964 | 125 | 99 | 72 | 2 |
| A3 | 1970 | 200 | 153 | 115 | 1.85 |
| A4 | 1971 | 200 | 153 | 115 | 1.85 |
| A5 | 1975 | 210 | 157 | 118 | 1.85 |



Slika 12. Pogled na TE “Kosovo A”.

Tabela 8. Proizvodnja električne energije tokom 2017 u TE “Kosovo A”.

| Proizvodnje električne energije 2017 | | Ukupno | Januar | Februar | Mart | Aprill | Maj | Juni | Juli | Agusht | Septemb | Oktob | Novem | Decemb |
|--------------------------------------|----|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| Termoelektrana - Kosovo A | | | | | | | | | | | | | | |
| Bruto energija TC A: | MW | 2,084,002 | 184,163 | 169,053 | 215,511 | 202,002 | 201,508 | 192,528 | 215,393 | 208,261 | 188,230 | 139,273 | 104,909 | 63,172 |
| Jedinica A3 | | 458,139 | 0 | 66,295 | 0 | 0 | 52,483 | 86,443 | 107,834 | 72,966 | 4,152 | 67,966 | 0 | 0 |
| Jedinica A4 | | 824,240 | 78,033 | 66,152 | 103,730 | 96,498 | 47,713 | 104,957 | 107,559 | 45,560 | 81,302 | 0 | 29,563 | 63,172 |
| Jedinica A5 | | 801,622 | 106,129 | 36,606 | 111,781 | 105,504 | 101,313 | 1,127 | 0 | 89,735 | 102,775 | 71,307 | 75,346 | 0 |
| Potrošnja - Unutrašnja šema | MW | -149,942 | -14,134 | -13,003 | -15,437 | -14,776 | -16,141 | -14,744 | -16,078 | -15,744 | -12,578 | -9,961 | -2,954 | -4,392 |
| Jedinica A3 | | -37,613 | 0 | -5,459 | 0 | 0 | -4,675 | -7,500 | -9,227 | -6,298 | -5 | -4,448 | 0 | 0 |
| Jedinica A4 | | -55,448 | -5,762 | -4,749 | -7,037 | -6,703 | -3,247 | -7,144 | -6,851 | -2,733 | -4,805 | 0 | -2,025 | -4,392 |
| Jedinica A5 | | -56,882 | -8,372 | -2,795 | -8,400 | -8,073 | -8,219 | -100 | 0 | -6,714 | -7,768 | -5,513 | -929 | 0 |
| NET energija | MW | 1,934,059 | 170,029 | 156,051 | 200,074 | 187,226 | 185,367 | 177,783 | 199,315 | 192,517 | 175,652 | 129,312 | 101,955 | 58,779 |
| Jedinica A3 | | 420,526 | 0 | 60,835 | 0 | 0 | 47,808 | 78,943 | 98,607 | 66,667 | 4,147 | 63,518 | 0 | 0 |
| Jedinica A4 | | 768,792 | 72,271 | 61,403 | 96,692 | 89,795 | 44,466 | 97,814 | 100,708 | 42,827 | 76,498 | 0 | 27,539 | 58,779 |
| Jedinica A5 | | 744,741 | 97,757 | 33,812 | 103,381 | 97,431 | 93,094 | 1,027 | 0 | 83,022 | 95,007 | 65,794 | 74,416 | 0 |
| Sopstvena potrošnja - KOSTT | | -107,169 | -11,468 | -8,656 | -10,002 | -9,630 | -9,845 | -7,445 | -7,679 | -9,360 | -9,788 | -8,243 | -11,095 | -3,959 |
| Energija NET | MW | 1,826,890 | 158,561 | 147,395 | 190,072 | 177,596 | 175,522 | 170,339 | 191,636 | 183,157 | 165,863 | 121,068 | 90,860 | 54,821 |

4.2.2. Termoelektrana “Kosovo B”

TE “Kosovo B” sastoji se od dve jedinice poznate kao B1 i B2. Prva jedinica (B1) ove TE puštena je u pogon 1983 godine sa snagom od 339 MW, dok druga jedinica (B2) 1984 godine sa snagom 339 MW. Obe jedinice su u funkciji i obe su u dobrom stanju.

Tehnički podaci jedinica dati su u tabeli 9. Na slici 13 dat je pogled na TE “Kosovo B”. U tabeli 10 su podaci o proizvodnji TE “Kosovo B” za 2017 [57].

Tabela 9. Tehnički podaci generatorskih jedinica TE “Kosovo B”.

| Jedinica | Godina instaliranja | Bruto instalirani kapacitet (MW) | Neto instalirani kapaciteti (MW) | Tehnčki minimumi (MW) | Specifična potrošnja lignita kJ/kg |
|----------|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| B1 | 1983 | 339 | 309 | 170 | 1.41 |
| B2 | 1984 | 339 | 309 | 170 | 1.41 |



Slika 13. Pogled na TE “Kosovo B”.

Tabela 10. Proizvodnja električne energije tokom 2017 u TE “Kosovo B”.

| Proizvodnje električne energije 2017 | | Ukupno | Januar | Februar | Mart | April | Maj | Juni | Juli | Agust | Septemb | Okto | Novem | Decem |
|--------------------------------------|----|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Termoelektrana - Kosovo B | | | | | | | | | | | | | | |
| | MW | 3,641,961 | 401,525 | 313,861 | 394,310 | 255,882 | 369,992 | 377,235 | 228,515 | 202,646 | 273,741 | 387,109 | 204,990 | 232,156 |
| Jedinica B1 | | 1,857,690 | 194,595 | 132,152 | 191,261 | 141,834 | 181,991 | 186,332 | 187,346 | 64,634 | 91,907 | 203,352 | 141,522 | 140,765 |
| Jedinica B2 | | 1,784,271 | 206,930 | 181,709 | 203,049 | 114,048 | 188,001 | 190,903 | 41,169 | 138,012 | 181,835 | 183,757 | 63,467 | 91,391 |
| | MW | -320,045 | -34,295 | -28,325 | -36,239 | -23,154 | -32,398 | -33,013 | -20,539 | -17,803 | -23,447 | -33,392 | -17,117 | -20,324 |
| Jedinica B1 | | -168,735 | -17,575 | -12,255 | -18,821 | -13,169 | -16,534 | -16,764 | -16,871 | -5,970 | -7,955 | -17,657 | -12,450 | -12,715 |
| Jedinica B2 | | -151,310 | -16,720 | -16,070 | -17,418 | -9,985 | -15,864 | -16,249 | -3,668 | -11,833 | -15,492 | -15,735 | -4,667 | -7,609 |
| | MW | 3,321,916 | 367,230 | 285,536 | 358,071 | 232,728 | 337,594 | 344,222 | 207,976 | 184,843 | 250,294 | 353,717 | 187,872 | 211,832 |
| Jedinica B1 | | 1,688,954 | 177,020 | 119,897 | 172,439 | 128,665 | 165,456 | 169,568 | 170,475 | 58,664 | 83,952 | 185,695 | 129,072 | 128,050 |
| Jedinica B2 | | 1,632,961 | 190,210 | 165,639 | 185,631 | 104,063 | 172,137 | 174,654 | 37,501 | 126,179 | 166,343 | 168,022 | 58,800 | 83,782 |
| Sopstvena potrošnja - KOSTT | | -27,740 | -3,672 | -2,352 | -496 | -2,275 | -2,149 | -2,135 | -1,939 | -1,714 | -1,899 | -2,142 | -3,032 | -3,934 |
| NETNET | MW | 3,294,176 | 363,558 | 283,184 | 357,574 | 230,453 | 335,444 | 342,087 | 206,038 | 183,129 | 248,395 | 351,574 | 184,840 | 207,898 |

4.2.3. Hidroelektrane na Kosovu

Hidroelektrana (HE) Gazivode predstavlja jedinu hidroelektranu (tipa Francis) priključenu na prenosnu mrežu. Ova hidroelektrana ne radi celo vreme nego to zavisi od hidroloških uslova. Obično radi u vreme kad je povećana potrošnja električne energije.

Godišnja proizvodnja električne energije u HE Gazivode je približno 80-90 GWh, koja odgovara godišnjoj pouzdanosti akumulacije bazena do 70 %. Osim HE Gazivode koja je priključena na prenosnu mrežu EES Kosova, postoje i četiri male hidroelektrane priključene na distributivnu mrežu.

U tabeli 11 su prikazane godina instaliranja i instalirani kapacitet postojećih hidroelektrana, dok u tabeli 12 su podaci o proizvodnji hidroelektrana za 2017 [56], [57].

Tabela 11. Tehnički podaci hidroelektrana.

| Hidroelektrana | Godina instaliranja | Generatorska jedinica | Instalirani kapacitet | Radni status |
|----------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| Gazivode | 1981 | U1 | 17.5 | Aktivna |
| | 1981 | U2 | 17.5 | Aktivna |
| Lumbardhi | 1957 | G1 | 4 | Aktivna |
| | 1957 | G2 | 4 | Aktivna |
| Radavci | 1934 | G1 | 0.14 | Aktivna |
| | 1934 | G2 | 0.14 | Aktivna |
| Burimi | 1948 | G1 | 0.3 | Aktivna |
| | 1948 | G2 | 0.1 | Aktivna |
| Dikanci | 1957 | G1 | 0.75 | Aktivna |
| | 1957 | G2 | 0.75 | Aktivna |

Tabela 12. Proizvodnja hidroelektrana za 2017 godine.

| Hidroelektrane | Proizvodnja (MWh) za 2017 |
|----------------|---------------------------|
| Gazivode | 89,411.717 |
| Lumbardhi | 49,060.648 |
| Radavci | 3,350.413 |
| Burimi | 940.610 |
| Dikanci | 8,020.546 |

4.3. Osnovni problemi EES Kosova

Problemi sa kojima se suočava EES Kosovo je zastarelost trafostanica, dalekovoda, prekidača, prateće opreme itd. Kao posledica toga napajanje sa električnom energijom nije stabilno, bilo je čestih ispada jedinica TE, prenosnih linija, linija distribucije kao i često čitavih TS 35, 110, čak i 400 kV, kao posledica nefunkcionisanja uređaja kao što su prekidači, transformatori itd.

Ne funkcionisanje ovih elemenata je posledica njihovog dugog rada i prekoračenja životne dobi, tako da u toku rada gube sigurnost delovanja, sistem je u stalnom takozvanom “stresu” jer se uvek očekuju neočekivani novi kvarovi u sistemu.

Otklanjanje kvarova predstavlja privremeno regulisanje sistema. Pad spremnosti za delovanje ovih postrojenja je rezultat velikog broja delovanja, kako u normalnom operativnom radu, tako i zbog čestih kvarova koji utiču na njihovom sistematskom oštećenju i prevremenoj zastarelosti. Otklanjanje kvarova ovih elemenata

elektroenergetskog sistema nije dugotrajno rešenje jer se traži investiranje i u drugim postrojenjima mreže da bi se smanjio broj kvarova i rad u nenormalnim uslovima.

Veliki problemi se javljaju u slučajevima uključenja i isključenja prekidača, zbog zastarelosti i neodgovarajućeg održavanja oni blokiraju, ostaju u položaju da ne mogu uključiti niti isključiti električni krug, što predstavlja veliki problem na funkcionalnost elektroenergetskog sistema Kosova.

Ovi česti ispadi uzrokovali su vrlo velike probleme u snabdevanju potrošača sa električnom energijom, naročito komercijalnih potrošača zbog velikih oštećenja koja su preterpeli.

Nezadovoljstvo potrošača često je izraženo protestima ispred zgrade snabdevača električnom energijom kao i ispred vladine zgrade. Ovo je pre svega posledica nedovoljnog investiranja u ovom sektoru [8].

4.4. Prekidači u prenosnom sistemu Kosovo

Ranije su spomenuti problemi sa kojima se suočava EES Kosovo zbog zastarelosti postrojenja i problema koji su uzrokovani zbog čestih ispada sistema. Jedan od elemenata koji predstavlja veliki problem u redovnom radu EES su prekidači.

U nastavku su date vrste prekidača u EES Kosova, vrste dielektričnog mediuma za gašenje luka. Analiza prekidača je posebno naglašena, jer rad analizira slučaj otkazivanja prekidača u isključenju generatora iz mreže, problem se nadovezuje sa analizom i izborom odgovarajućih prekidača posebno za generatore [7], [8].

U prenosnom sistemu postojećih trafostanica KOSTT_a instalisani su različiti prekidači snage u pogledu proizvođača. Dok u pogledu vrste dielektričnog mediuma za gašenje električnog luka instalirani su dve vrste prekidača [7], [8]:

- Sa uljem i
- Sa gasom SF₆.

Starija generacija prekidača obično su koristili ulje za dielektrični medium za gašenje luka, dok nova generacija prekidača koji su instalirani na EES Kosova koristi gas SF₆ sa mnogo boljim dielektričnim karakteristikama i izdržljivošću.

Svakako, ova vrsta prekidača kao što je navedeno u prethodnim poglavljima ima ukupne karakteristike mnogo bolje od prekidača sa uljem, u pogledu elektromehaničke izdržljivosti tokom normalnih uključenja i isključenja, ili pri pojavi struje kvara.

KOSTT na sistematski način vrši zamenu uljanih prekidača sa novim prekidačima sa gasom SF₆ u okviru projekta za revitalizaciju postojećih trafostanica. Kapaciteti isključenja prekidača snaga su različiti počevši od 16.5 kA, 18.3 kA, 23 kA, 31.5 kA i 40 kA.

Imajući u obzir struje kvarova u dugoročnom vremenskom periodu koje se mogu pojaviti u svim trafostanicama i upoređujući sa nivoom kapaciteta isključenja prekidača, određuju se granice sigurnosti prekidača i ostale opreme visokog napona [7], [8], [11].

Prekidači snage 400 kV, 220 kV i 110 kV instalirani u prenosnoj mreži imaju dovoljne granice sigurnosti (> 20 %) [11]. Njihov kapacitet isključenja u zavisnosti od struja kvara je u dozvoljenim granicama sa standardima IEC za opremu za isključenje visokog napona [32].

U toku poslednjih godina, elektroenergetska industrija u mnogim zemljama prolazila je kroz fundamentalne promene zbog liberalizacije tržišta električne energije [9]. Praćenje i kontrola napona u realnom vremenu je jedna od mera koja utiče na smanjenje velikih ispada u sistemu, posledice velikih ispada u sistemu praćene su velikim tehničkim i finansijskim gubicima [9].

U tabeli 13 dati su podaci za tip prekidača koji je instaliran u TS “Kosovo B”, na kome se dogodio problem i koji će biti razmatran u daljem postupku [7], [8].

Tabela 13. Podaci VN prekidača koji su instalirani u TS “Kosovo B” 400 kV [56], [57].

| Lokacija | Strana | Polje | Dalekovod | Pozicija | Tip | Serijski Br Faza 0 | Serijski Br Faza 4 | Serijski Br Faza 8 | Godina proizvodnje | Proizvođač |
|-------------|--------|-------|-----------|--------------|--------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------|
| TS Kosovo B | 400 kV | C03 | DV 445/1 | KOS-B-C03-Q0 | GL 316 | 78975 102/0 | 78975 102/4 | 78975 102/8 | 2009 | Areva/France |
| TS Kosovo B | 400 kV | C06 | DV 445/2 | KOS-B-C06-Q0 | GL 316 | 78975 101/0 | 78975 101/4 | 78975 101/8 | 2009 | Areva/France |

| Nominalni napon | Nominalna struja | Očekivani isključni impulzivni napon | Očekivani impulzivni napon groma | Struja K.S. | Ulje/Gas | Učestanost | Ukupna težina | Vođenje |
|-----------------|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------|----------|------------|---------------|------------------|
| 420 kV | 3150 A | 1050 kV | 1425kV | 40 kA/3sec. | SF6 | 50 Hz | 5390 kg | Motor tip. FK3-4 |
| 420 kV | 3150 A | 1050 kV | 1425kV | 40 kA/3sec. | SF6 | 50 Hz | 5390 kg | Motor tip. FK3-4 |

Vrednovanje stanja sistema i porast stepena praćenja rukovanja sistemom je neizbežno. Znači, praćenje treba da bude u realnom vremenu i vrednosti koje opisuju stanje sistema kao što su: napon, struja, ugao napona, aktivna i reaktivna snaga.

Generatorski prekidači imaju važan zadatak zaštite generatora njegovim isključenjem u slučaju pojave problema na komandnim krugovima (kvara u upravljačkim kolima generatorskog prekidača), kratkog spoja itd. u što kraćem vremenu [7], [8], [11].

Pored kratkih spojeva, uzročnik nastanka jednosmerne komponente struje može biti uključanje generatora na mrežu bez prethodno ispunjenih, dobro poznatih, uslova sinhronizacije. Uključanje generatora bez respektovanja ovih uslova smatra se kao havarija koja je praćena sa prelaznim pojavama. Postojanje značajne vrednosti jednosmerne komponente struje kratkog spoja je karakteristično za kvarove u relativnoj blizini generatora.

U tim uslovima dolazi do velikih naprezanja generatora, blok-transformatora, turbine, prekidača i ostale opreme, zbog oscilacija aktivne i reaktivne energije, a kao posledica i oscilacija struja u ovom slučaju [1], [2], [3], [4], [6].

Konkretni slučaj, kada se pokušava uključanje generatora na sistem bez ispunjavanja uslova sinhronizacije i poteškoćama tokom procesa isključenja, biće tema razmatranja u sledećem poglavlju.

5. ANALIZA POSMATRANOG DOGAĐAJA

5.1. Opis događaja

Razmatrani pogonski događaj se dogodio dana 23.08.2011, tokom slučajnog i nedozvoljenog (nesinhroniziranog) uključanja generatora na 400 kV strani blok-transformatora, pri čemu je nakon nekontrolisanog uključanja prekidača došlo do reagovanja pojedinih sistema zaštite i naredbe za isključenje prekidača blok-transformatora na 400 kV strani.

Ovaj događaj se dogodio u Kosovskom energetsom sistemu, konkretno u TE “Kosovo B”. Kvar se desio u komandnim krugovima generatorskog prekidača, kad je opterećenje sistema bilo 1050 MW. Snimanje (vreme kada se slučaj dogodio) je vršeno na zaštitnim relejima tipa Siemens 7SA612 i 7SJ612, u generatorskom polju u TS 400/220 kV pored TE “Kosovo B”.

Razmatrani slučaj je posledica akcidentalnog uključanja prekidača snage bez sinhronizacije generatora sa mrežom zbog nekih problema na komandnim krugovima (kvara u upravljačkim kolima generatorskog prekidača), i efekta jednosmerne komponente struje prilikom isključenja prekidača i poteškoćama tokom procesa isključenja.

U cilju preduzimanja potrebnih aktivnosti da u buduće do ovakvih slučajeva ne dolazi, u narednom tekstu je dat kratak opis razmatranog slučaja. Njegov detaljan opis je dat u literaturi [6].

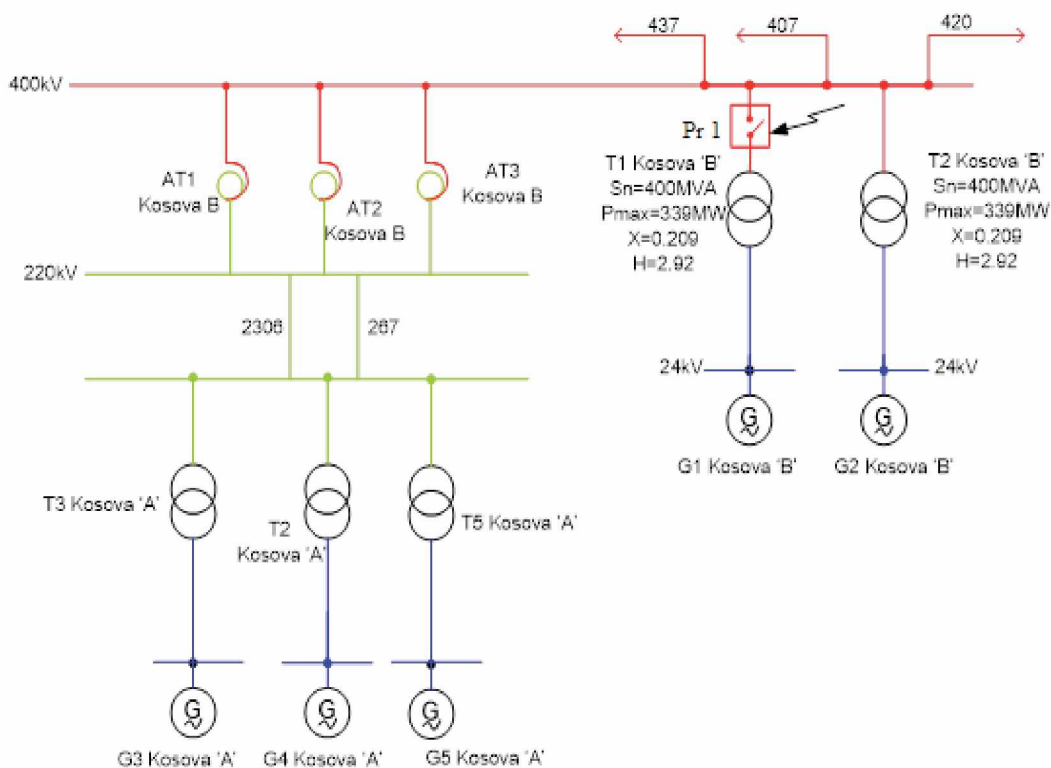
U momentu kad je nastao problem nije bilo kratkog spoja ili isključenja pod opterećenjem, kvar je bio slučajan.

U nastavku su prikazane sve karakteristike sistema u mestu gde se desio kvar, režim rada kao i opterećenje generatora. Pre slučaja generator je radio pod normalnim uslovima.

Kvar se desio u komandnim krugovima generatorskog prekidača (strelica pokazuje kritični prekidač “Pr1”, slika 14). TE “Kosovo B” sa dve jedinice (G1 i G2) priključena je sa 400 kV dalekovodom na trofostanici TS 400/220 kV “Kosovo B”.

Prekidači na 400 kV visokonaponskoj strani svakog bloka smešteni su u 400 kV poljima TS 400/220 kV “Kosovo B” [6], [58].

Na slici 14 data je pojednostavljena jednopolna šema gde su priključene glavne jedinice generatora u TE “Kosovo A i B”. Takođe je prikazan kritični prekidač na kojem se desio posmatrani događaj.



Slika 14. Pojednostavljena jednopolna šema sistema gde su priključene glavne generatorske jedinice Kosova (TE “Kosovo A i B”).

Sinhronizacija generatora sa električnom mrežom (elektroenergetski sistem) može se obaviti ili preko prekidača generatora na naponskom nivou od 24 kV ili preko prekidača blok-transformatora na naponskom nivou od 400 kV (slika 15).

Upravljanje visokonaponskim 400 kV prekidačima, vrši se iz TE “Kosovo B”.

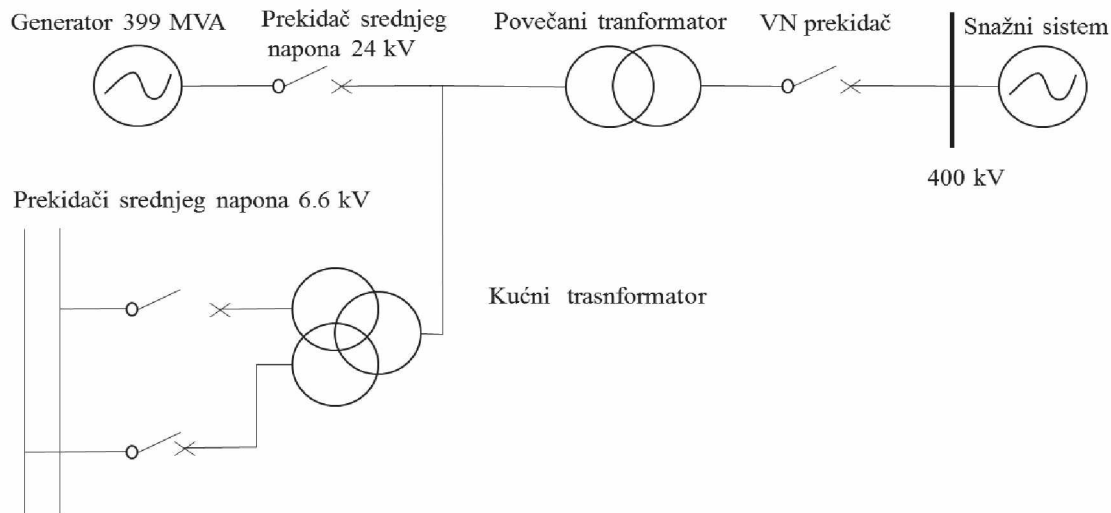
Za međusobno povezivanje upravljačkih, signalnih i zaštitnih uređaja služi telekomunikacijski kabal položen od TE “Kosovo B” do rasklopnog postrojenja na “TS 400/220 kV, Kosovo B” [6], [58].

Na slici 15, je prikazana realna jednopolna šema blok generatora-step up transformatora (400 kV strana TS Kosooa B) sa potrebnim podacima:

Generator: $U_n = 24 \text{ kV}$, $S_n = 399 \text{ MVA}$, $\cos\varphi = 0.85$,

Step up transformer: $24/400 \text{ kV/kV}$, $U_k = 11\%$, $S_n = 400 \text{ MVA}$,

Kućni transformator: $S_n = 40/20/20 \text{ MVA}$, $24 \text{ kV}/6.6/6.6 \text{ kV}$.

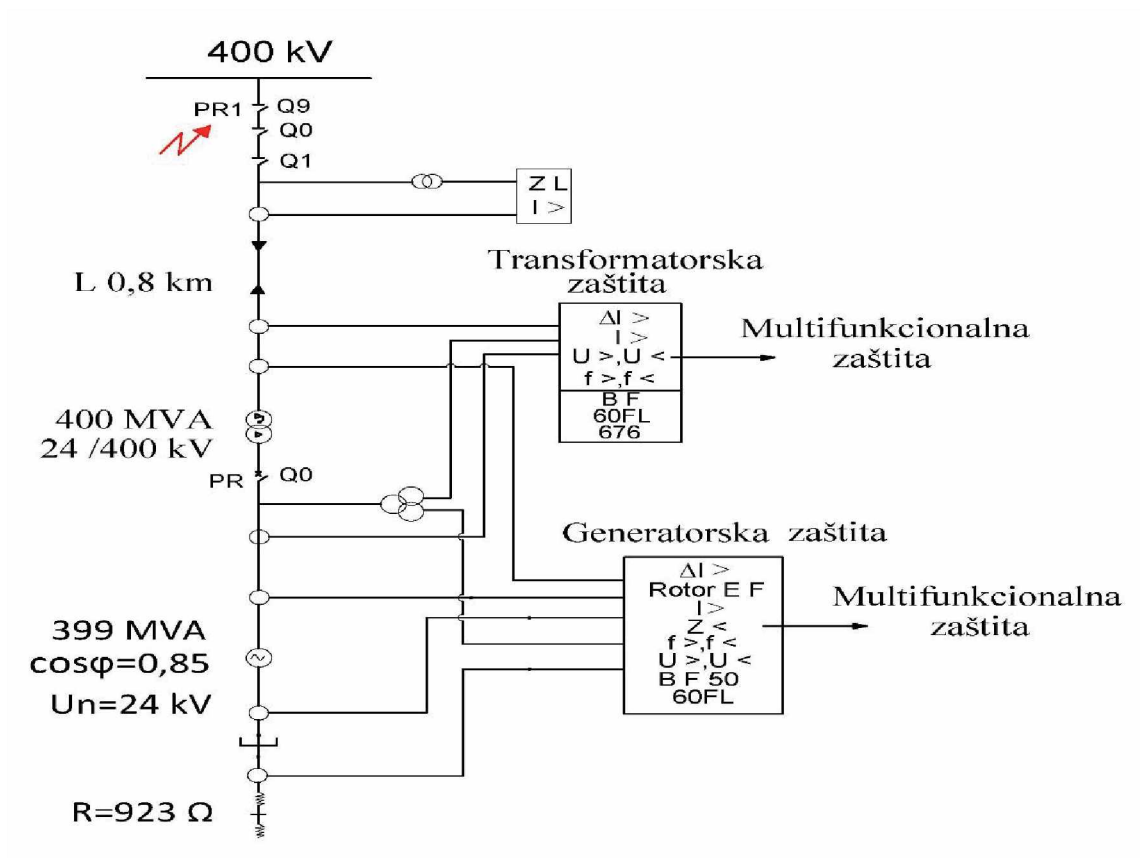


Slika 15. Jednopolna šema blok generatora-step up transformatora.

Pre posmatranog slučaja, generator je radio pod normalnim uslovima. Zbog oštećenja komandnih kablova generator se je isključio i opet odmah se priključio na mrežu bez ispunjenja uslova sinhronizacije.

Vreme koje je proteklo od nesinhroniziranog uključjenja do isključenja prekidača je 150 ms.

Na slici 16 je prikazana pojednostavljena jednopolna šema od bloka generator-transformator sa relejnom zaštitom [6], [58].



Slika 16. Jednopolna šema blok generator-transformatora sa relejnom zaštitom.

U tabelama 14 i 15 su dati podaci za generatore u TE “Kosovo A i B” koji su neophodni za dinamične simulacije.

Tabela 14. Dinamični parametri generatora u TE “Kosovo A”, jedinica A3, A4 i A5.

| S_{baze} | $Z_g(p.u)$ | $T'D_0$ | $T''D_0$ | $T'Q_0$ | $T''Q_0$ | H | Bm | XD | XQ |
|------------|----------------|---------|----------|---------|----------|------|----|------|------|
| 240 | $0.005+j0.188$ | 6.8 | 0.15 | 0.032 | 0.032 | 2.98 | 1 | 1.93 | 1.62 |
| $X'D$ | $X'Q$ | $X''D$ | XL | S(1.0) | S(1.2) | | | | |
| 0.31 | 0.47 | 0.188 | 0.15 | 0.03 | 0.4 | | | | |

Tabela 15. Dinamični parametri turbo generatora 399 MVA, 24 kV u TE “Kosovo B”.

| S_{baze} | $Z_g(p.u)$ | $T'D_0$ | $T''D_0$ | $T'Q_0$ | $T''Q_0$ | H | Bm | XD | XQ |
|------------|----------------|---------|----------|---------|----------|------|----|-------|-------|
| 400 | $0.005+j0.209$ | 6.5 | 0.041 | 0.27 | 0.032 | 2.92 | 1 | 2.214 | 2.093 |
| $X'D$ | $X'Q$ | $X''D$ | XL | S(1.0) | S(1.2) | | | | |
| 0.356 | 0.54 | 0.209 | 0.13 | 0.03 | 0.4 | | | | |

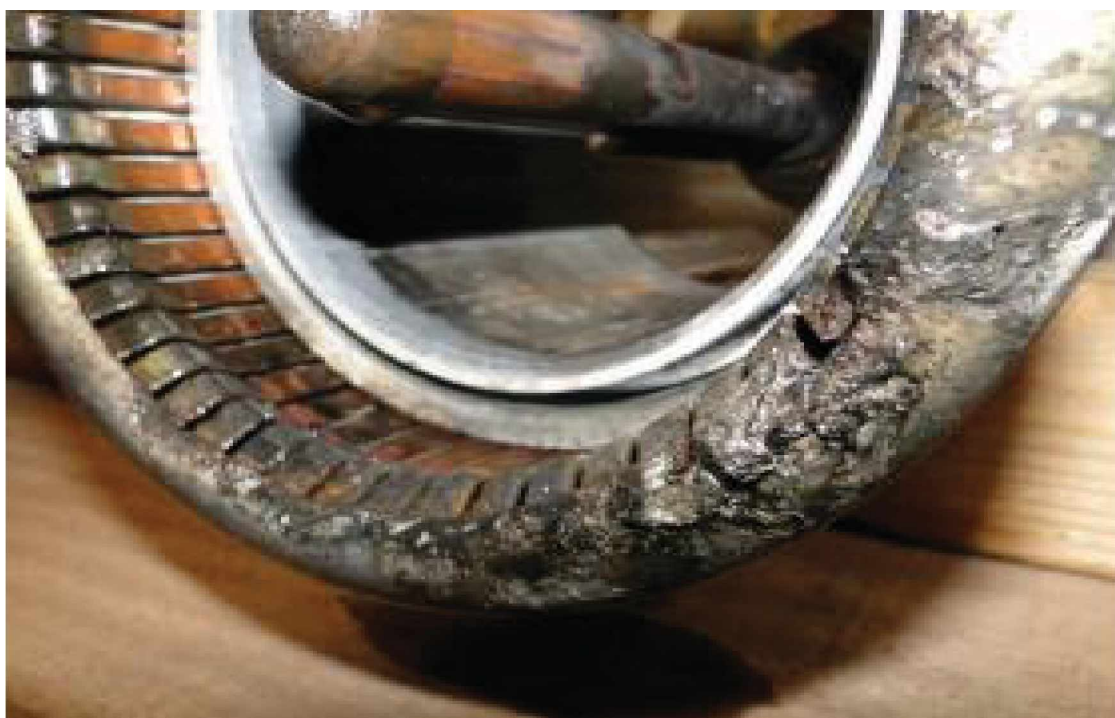
Zbog oštećenja komandnih kablova, došlo je do reagovanja prekidača i blok generator-transformator je isključen iz sistema i ponovo uključen. Pošto nisu bili ispunjeni uslovi sinhronizacije došlo je do nesinhronog uključenja pri velikom naponskom uglu između generatora i energetskog sistema, usljed čega su se pojavile ekstremno velike tranzientne struje.

Prekidanje struje, u ovom slučaju, u vremenu kraćem od 50 ms pod visokim naponom bez da struja prolazi kroz nulu, može dovesti do oštećenja prekidača u koliko nisu dimenzionirani za prekidanje ovakvih kvarova [6], [59], [60].

U postmatranom slučaju prekidač sa vremenskom konstantom od 45 ms bio je oštećen.

Prikaz oštećenje glavnih kontakata u jednoj komori 400 kV prekidača kao posledica nesinhroniziranog uključenja dat je na slici 17.

Izolacija jednog pola prekidača je uništena kao posledica pojave luka svakih 400 do 600 ms. Slike 18 i 19 pokazuju oštećenja kondenzatora na polu novog prekidača u polju T1 [6], [58].



Slika 17. Oštećenje aktivnog dela kontakata zbog električnog luka.



Slika 18. Oštećenje kondenzatora na polu LB, polje T1.



Slika 19. Oštećenje kondenzatora, polje T2.

Eksplוזija se desila na polju prekidača T1 na polu LB na kondenzatoru, slika 18.

Na polje T2 bilo je oštećenje dva različita pola prekidača, na kondenzatoru na polu LA i na zateznom izolatoru na polu LB, slika 19. Na polje T3 bilo je oštećenje na zateznom izolatoru na polu LB, kao na slici 20 [6], [58], [61].



Slika 20. Oštećenje kondenzatora na polu LB i potpornom izolatoru na fazi LB polje T3.

Zbog otkazivanja ovog prekidača da ugasi električni luk došlo je do eksplozije prekidača koji je prouzrokovao i velike štete u okolini na susednim postrojenjima trafostanice.

Kao rezultat ovog kvara i eksplozije prekidača desila su se ova oštećenja:

- Ispad generatora iz pogona za 8 sati.
- Oštećenje glavnih kontakata u jednoj komori 400 kV prekidača.
- Oštećenje tri potporna izolatora prekidača na susednim transformatorskim poljima i
- Smanjenje sigurnosti operacije trafostanice zbog upotrebe zadnje rezerve za rad generatora.

5.2. Merenja u toku događaja

U toku razmatranog slučaja vršena su merenja u realnom vremenu struja i napona prilikom uključenja generatora na mrežu, kao i jednosmerne komponente struje prilikom isključenja prekidača.

Merenja su vršena preko releja, u kojima su snimljene električne veličine kao što su napon, struja i snaga tokom uključenja nesinhroniziranog generatora na mrežu.

Merni uređaji koji su korišćeni u ovom slučaju su numerički releji za zaštitu linije koja povezuje generator sa prenosnom mrežom.

Merni releji su distantni releji tipa siemens (7SA612) i prekostrujni relej (7SJ612) - slika 21 (ovi releji su instalirani u generatorskom polju u trafostanici 400/220 kV Kosovo B) [6].

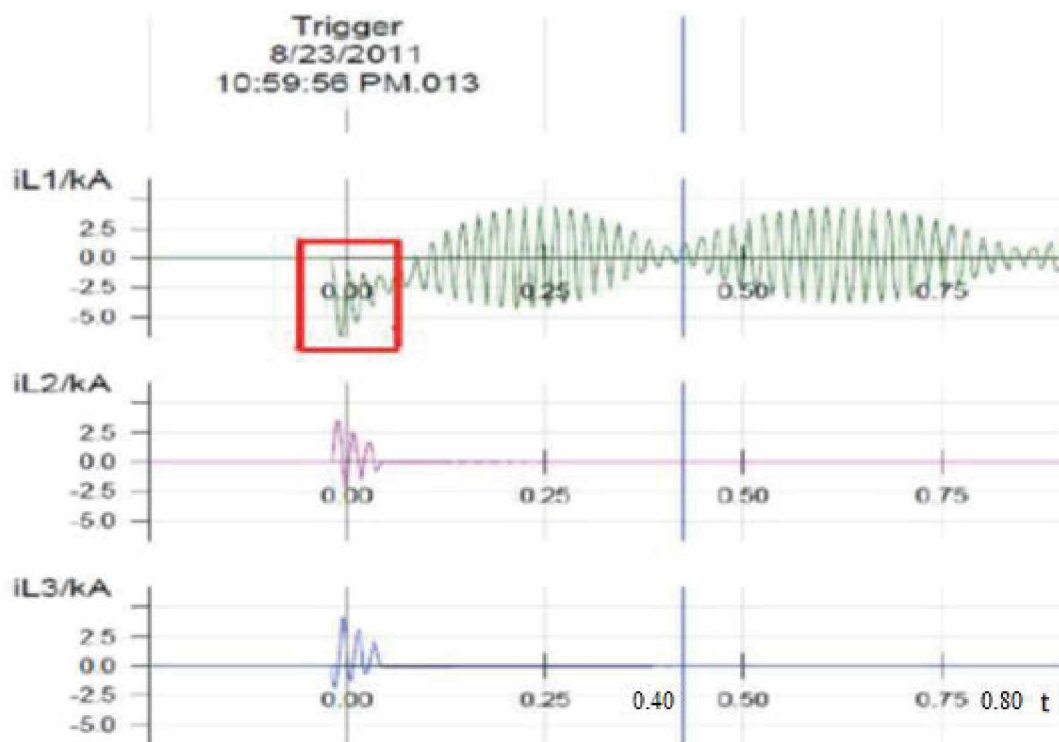


Slika 21. a) Merni releji (distantni) tipa siemens 7SA612, b). Merni releji (prekostrujni) tipa siemens 7SJ612.

Mereni podaci su pokazali asimetriju, koja je nastala kao uzrok pojavljivanja komponente jednosmerne struje u svakoj fazi.

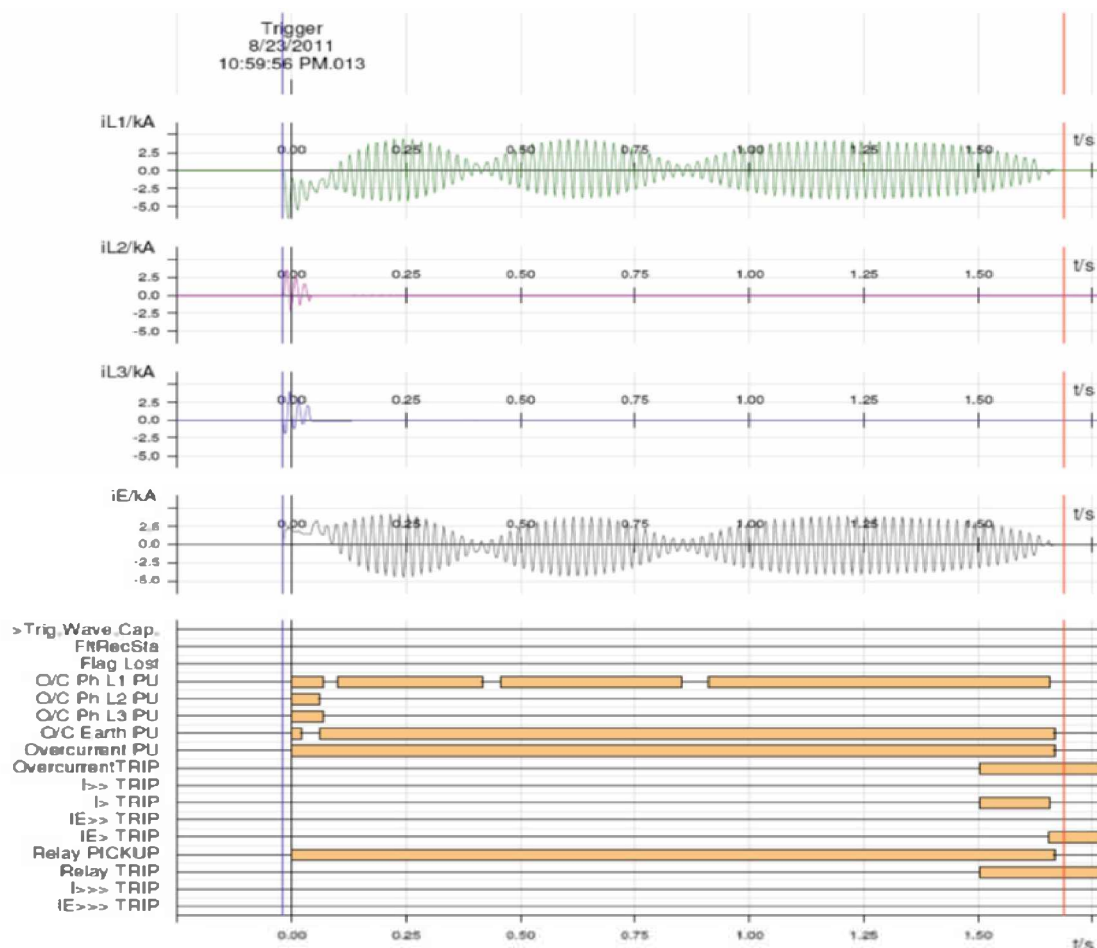
U fazi L1 (slika 22, okružena crvenom kvadratom), jednosmerna komponenta je veoma velika i kao posledicu prouzrokuje pomeranje izmenične komponente iznad x ose.

Zato, zbog prisustva visoke vrednosti jednosmerne komponente, struja u fazi L1 ne prolazi kroz nulu za otprilike 100 ms (DC komponenta i njeno gašenje zavise od vremenske konstante kruga u momentu pojave kvara, odnosno njeno gašenje zavisi od parametara R/L koji se stvara u tom slučaju). Iz slike 22 se može videti da je bilo uspešno isključenje prekidača preko releja u fazama L2 i L3 (crvena i plava krivulja). Vrednost DC komponente zavisi od vrste i uslova pod kojim je nastao kvar [6], [58], [61].



Slika 22. Oscillogram struja na visokom naponu 400 kV generatora-blok transformatora tokom uključenja-isključenja prekidača (u toku događaja).

Na slici 23, u fazi L1, zbog prisustva velike vrednosti jednosmerne komponente struja u fazi L1 ne prolazi kroz nulu za otprilike 100 ms, i kao posledica javlja se pomeranje izmenične komponente iznad x ose (slike 22 i 23 su iste, samo što je slika 22 smanjena, dok je u slici 23 povećano vreme snimanja kao i prikazana komponenta u "neuter-u", oba dve slike su dobijene iz releja).



Slika 23. Prikaz zapisa prekostrujnog releja (u toku događaja).

Talasni oblik struja u odgovarajućim fazama L1, L2, L3 javlja se povodom nesinhroniziranog uključanja i posle isključenja prekidača od strane zaštite. U fazi L1 isključenje je bilo neuspešno zbog prisustva komponente jednosmerne struje i zato je došlo do oštećenja prekidača [58].

U većini slučajeva, isključivanje ovih fenomena je prilično problematično. U nekim slučajevima u nekim elektranama, nalog za isključivanje prekidača se daje sa određenim vremenskim zatezanjem kako bi se izbegao ovaj fenomen.

Na slikama 24, 25, 26 i 27, prikazana su snimanja na releju distantne i prekostrujne zaštite za pomenuti slučaj (slučaj nesinhronog uključanja).

Snimanje je vršeno na zaštitnim relejima u TS 400/220 kV pored TE "Kosovo B" u generatorskom polju pomoću takozvanih "intelligent electronic devices" (IED) to jest zaštitnih releja tipa Siemens 7SA612 i 7SJ612 (slika 21). Zahvaljujući relejima data su

neka dodatna objašnjenja pomoću nekoliko slika (slike 24, 25, 26 i 27) koje su izvučene iz njih nakon ovog događaja [6], [58].

Slike 24, 25, 26 i 27, prikazuju oscilacije struje u trećoj fazi zbog nemogućnosti isključenja sa strane prekidača, efektivne vrednosti struja u određenim fazama povodom oštećenja izolacije u jednoj komori prekidača, oscilacije struje i napona u sve tri faze tokom procesa kvara i efektivne vrednosti napona u svakoj fazi tokom procesa nesinhroniziranog uključenja prekidača [6], [58].

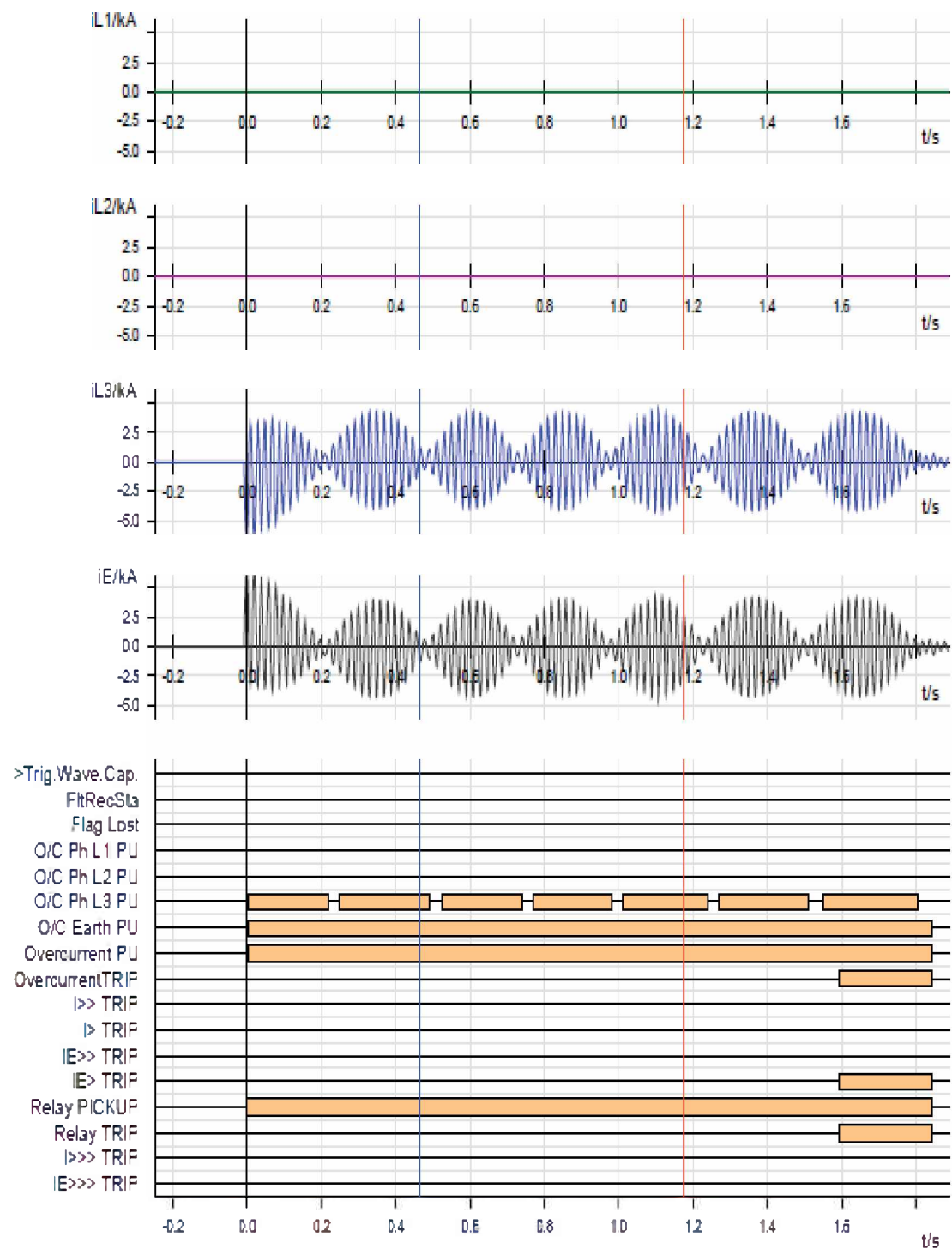
Kvar se desio zbog uključenja generatora na mreži bez ispunjenih uslova sinhronizacije [6].

Aktivna energija generatora je oscilirala zbog njihanja i ne balansiranja električne i mehaničke snage generatora. Kao posledica toga u radu smo se fokusirali na poteškoće koje se javljaju u prekidaču snage a koje se povezuju sa uspešnim isključenjem generatora sa mreže zbog pojavljivanja komponente jednosmerne struje.

Posle uključenja prekidača 400 kV u mrežu, zabeležene su oscilacije struja i napona do momenta isključenja.

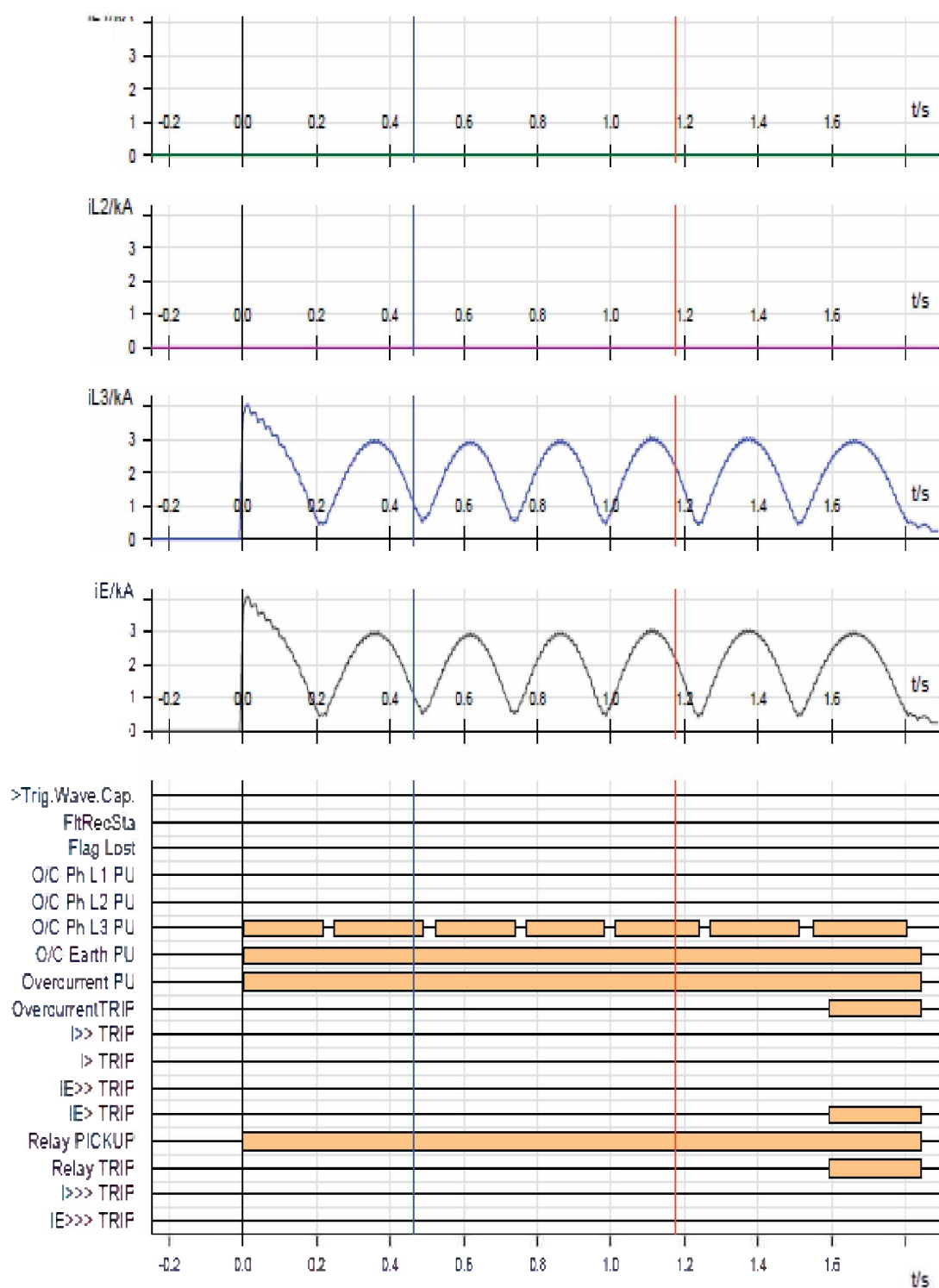
Na slici 24 su prikazane oscilacije struje u trećoj fazi zbog nemogućnosti isključenja sa strane prekidača, odnosno na jednu komoru.

Oštećenje jednog dela prekidača se desilo zbog prisutnosti komponente jednosmerne struje, slučaj pojavljivanja luka u jednom polu prekidača povodom oštećenja izolacije u fazi L3, ovo snimanje pokazuje efekat kvara izolacije i jednoj komori prekidača 400 kV na dalekovodu, ovaj slučaj ne pripada nesinhronom uključenju [6].



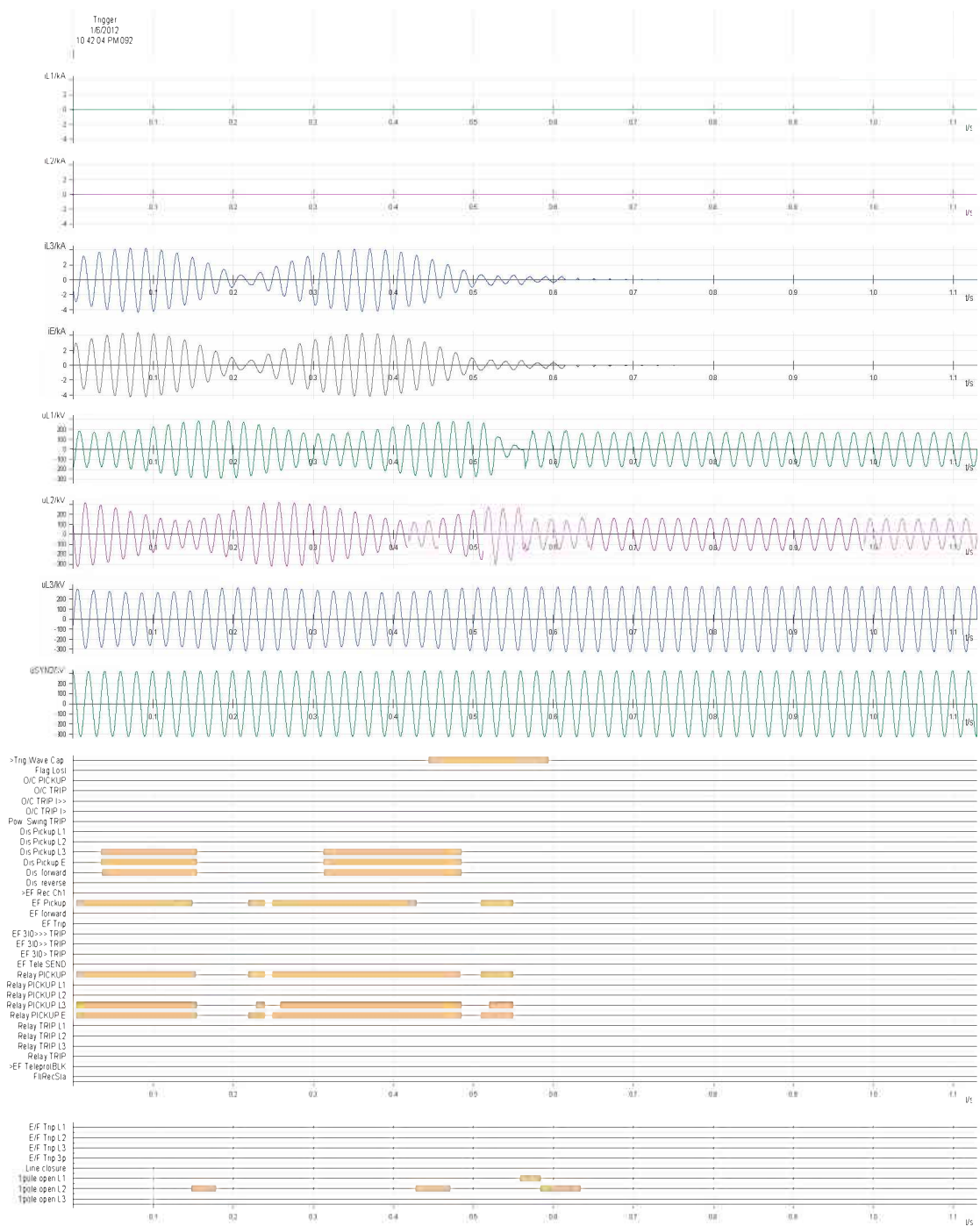
Slika 24. Oscilacije struje u trećoj fazi zbog nemogućnosti isključenja sa strane prekidača.

Na slici 25 prikazana su snimljene efektivne vrednosti kvara. Događaj je isti, ali su prikazane samo efektivne vrednosti. Na slici su prikazane efektivne vrednosti struja u određenim fazama povodom oštećenja izolacije u jednoj komori prekidača [6].



Slika 25. Efektivne vrednosti struja u određenim fazama povodom oštećenja izolacije u jednoj komori prekidača.

Na slici 26 su prikazane oscilacije struje i napona snimljene na zaštitni relej distantne zaštite u sve tri faze tokom procesa kvara [6].

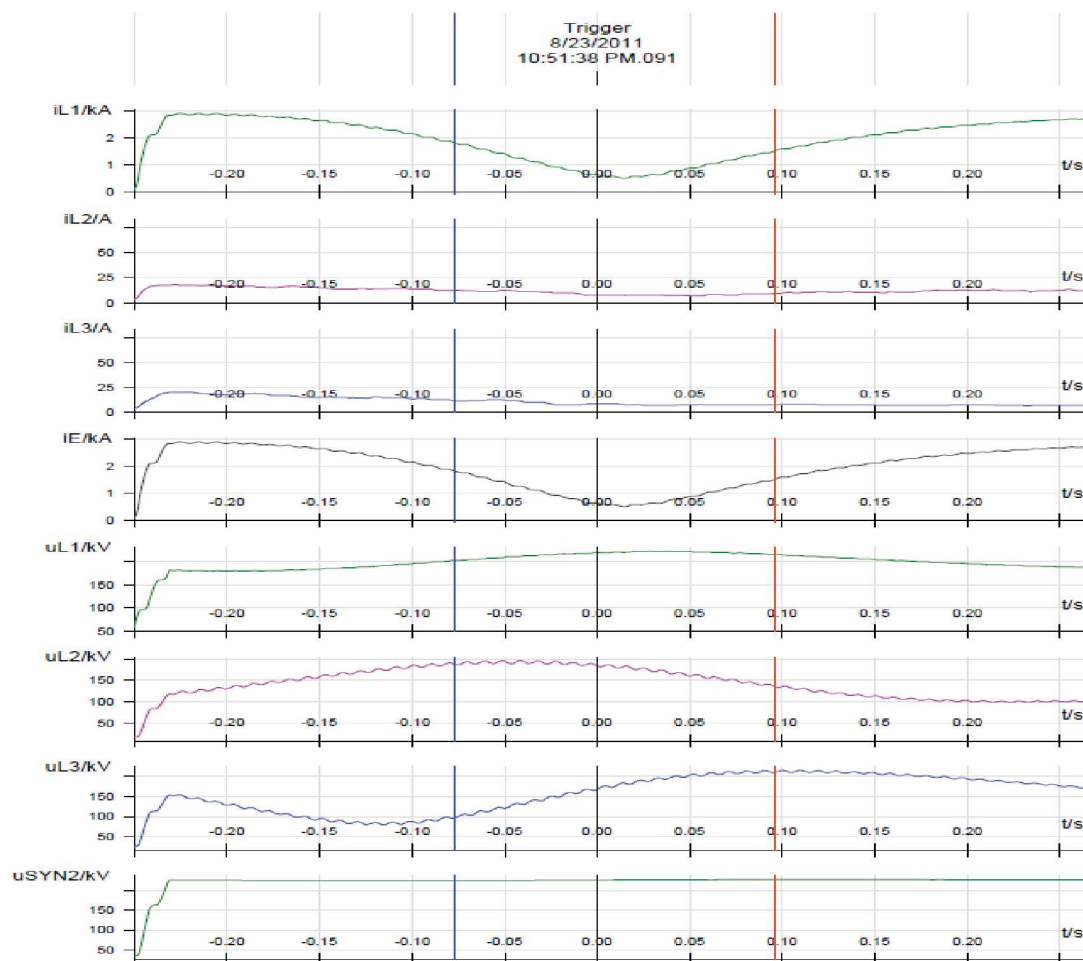


Slika 26. Oscilacije struje i napona u sve tri faze tokom procesa kvara.

Bazirajući se na spomenutim snimanjima, desio se prolazak struje u jednom polu pošto prekidač nije isključen na vreme, ova nenormalna pojava oštetila je prekidač do eksplozije [6].

Na slici 27 prikazane su efektivne vrednosti napona u svakoj fazi tokom procesa uključenja nesinhroniziranog prekidača dalekovoda generatora na strani 400 kV sa strane generatora.

Napon U_{syn2} je napon srednje faze sabirnica trafostanice koji se koristi kao referentni napon za sinhronizaciju generatora sa mrežom [6].



Slika 27. Efektivne vrednosti napona u svakoj fazi tokom procesa asinhronog uključenja prekidača.

Oslanjajući se na snimljene rezultate može se izvući zaključak da je uključenje generatora u mrežu vršeno u trenutku širokog ugla odprilike 114° . Kao rezultat toga došlo je do njihanja struje i oscilacije aktivne i reaktivne snage između generatora i mreže kao što je prikazano na slici 22 odnosno 28.

Prema faznom dijagramu na slici 28, očito je da je ugao između naponskog fazora mreže i generatora blizu ugla 120° (pre uključenja generatora u mreži).

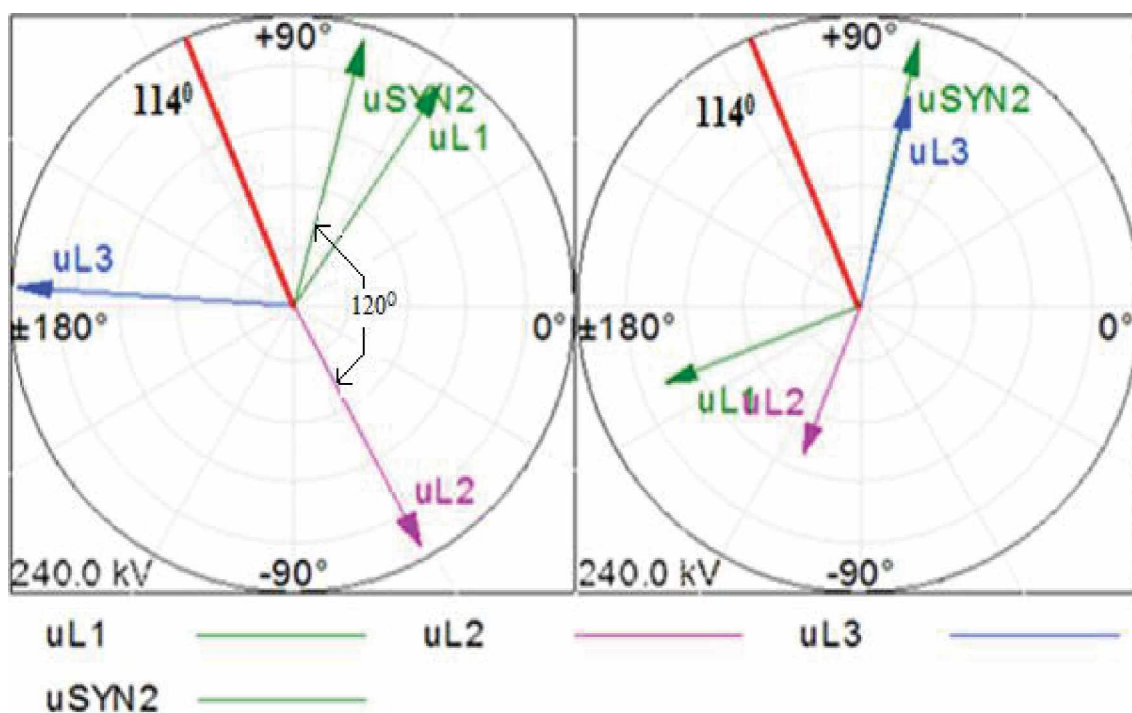
Fazori U_{L1} , U_{L2} , U_{L3} predstavljaju napone generatora a naponski fazor U_{syn2} predstavlja referentni napon mreže koji se koristi za sinhronizaciju generatora.

Vrednost klizanja frekvencije u vreme sinhronizacije je nepoznata.

Kao rezultat razlike u uglovima napona mreže i generatora, pojavljuju se značajni prelazni procesi praćeni oscilacijama struja i napona koje su date na slici 28 (što je dovelo do toga da je generator radio u generatorskom i u motornom režimu rada).

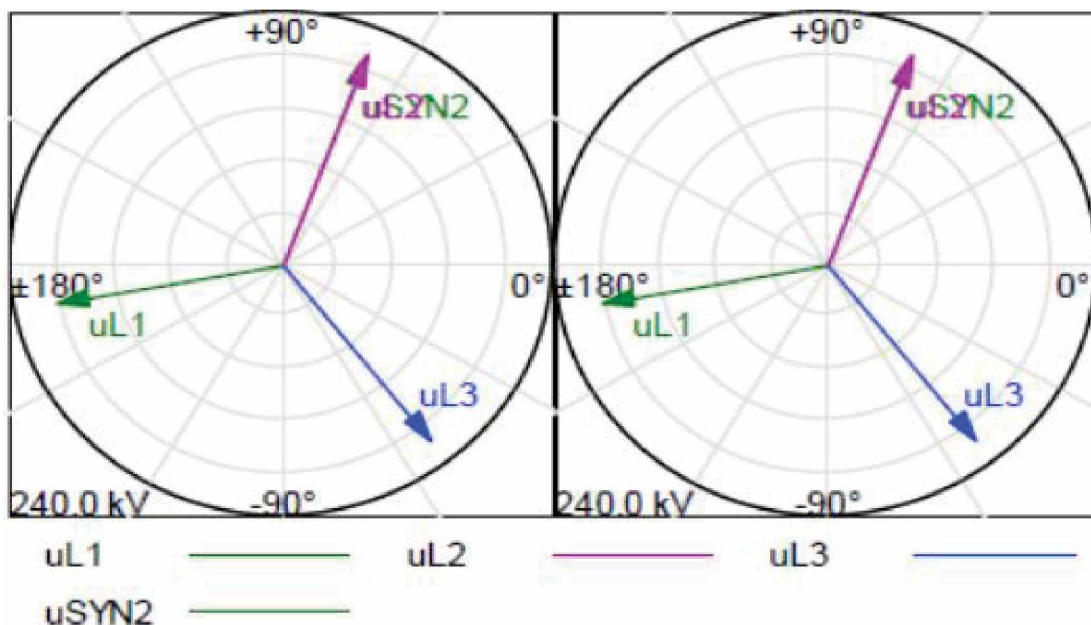
Na osnovu snimljenih rezultata, rezultira da je generator sinhroniziran sa mrežom sa razlikom u uglovima napona između mreže i generatora od $\delta = 114^\circ$.

Na slici 28 prikazani su naponi u mreži i na generatoru nekoliko ms pre uključenja generatora u mreži [6].



Slika 28. Fazni diagram napona u momentu uključenja prekidača generatora u mrežu.

Dok je na slici 29, 50 ms kasnije, kada se uključuje generator (to predstavlja slučaj akcidentalnog uključenja generatora kao posledica neispunjenih uslova sinhronizacije generatora sa mrežom) u mreži.



Slika 29. Fazor generatora i mreže posle uključenja generatora u viskonaponsku mrežu.

Pošto je generator priključen u snažnom sistemu, polazne struje statora su bile do sedam puta veće od nominalne struje generatora i blok transformatora [6]. Rezultirajuća struja posle nepažljivog uključenja generatora u mrežu, ima jednu izmjeničnu komponentu i jednu jednosmernu komponentu. Vrednost jednosmerne komponente je različita u svakoj fazi u odnosu sa fazom L1, koja ima najveću vrednost [58], [61].

Vrednost ove jednosmerne komponente zavisi od trenutka kad je kvar nastao i relativnog pomeranja fazora generatora i mreže prilikom sinhronizacije. Jedinica transformatorske zaštite kao i zaštita voda, kao odgovor na ove struje, su se pobudile i isključile prekidač. Tako da za vreme od 100 ms komponenta jednosmerne struje faze L1 imala je veoma visoku vrednost [60].

Kao posledica toga, ukupna struja, tj. DC i AC komponente se tokom tog vremena superponiraju i stoga struja ne prolazi kroz nulu, što je neophodan uslov da bi se ugasio električni luk [6].

Napon kroz otvorene kontakte je dovoljno velik da prouzrokuje pojavu luka između kontakata generatorskog prekidača. Takođe napon “post-luka” je veći od nominalnog izdržljivog napona pa kao posledica luk se ponovo aktivira za 400 do 600 ms.

Pojava struje kao posljedica akcidentalnog uključanja sastoji se od dve komponente: periodične i aperiodične. Aperiodična komponenta (jednosmerna) ima visoku vrednost a naročito je istaknuta u fazi L1.

Vrednost aperiodične komponente u fazama L1, L2, L3 tokom ovog procesa zavisi od pozicije vektorskih veličina između faza mreže i generatora u momentu sinhronizacije.

Struja kvara je detektirana od strane releja i dat je nalog za isključenje prekidača, tako da je za vreme od 100 ms u fazi L1 postojala veoma velika jednosmerna komponenta koja je pomerila iznad periodičnu komponentu struje (izmenična), prodžavajući vreme prolaza periodične komponente kroz nulu [6], [58], [62].

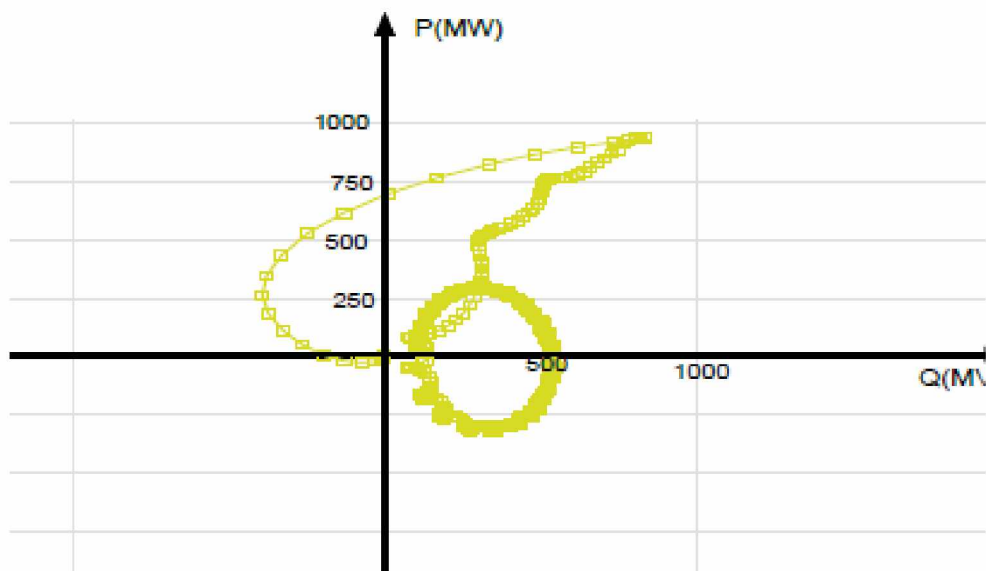
Zbog tog razloga se relejna zaštita podešava bez vremenske zadržke. Zbog potrebe za brzim reagovanjem prekidača, može se desiti da jednosmerna komponenta struje bude značajno veća u odnosu na izmeničnu komponentu struje kratkog spoja, usled čega se može desiti da ni relativno duže vreme nakon početka razdvajanja kontakata prekidača ukupna struja kratkog spoja ne prođe kroz nultu vrednost.

Struja kvara nije prolazila kroz nulu u toku od 100 ms, (slika 22) i to je prouzrokovalo da se prekidač sa gasom SF₆ ošteti. Posle oštećenja jednog dela prekidača dešava se ponovno paljenje luka sa frekvencom od 1.5-2 Hz [6], [63].

Na osnovu merenja, indikativno je da maksimalna vrednost snage nakon uključivanja prekidača zbog oscilacija generatora i elektroenergetskog sistema, bude 940 MW.

Generator tokom ovog vremena radi u generatorskom i motornom režimu.

Oscilacije aktivne i reaktivne snage generatora prikazane su na slici 30, u momentu pojave događaja (kvara) koji je snimljen preko releja, kojom prilikom se vide oscilacije generator-mreža i mreža-generator [6].



Slika 30. Oscilacija aktivne i reaktivne snage generatora.

Kao rezultat sinhronizacije rotorski povećavajući ugao zaostaje i pada, stane (na primer $f_{\text{gen}} = f_{\text{sis}}$), menja smer ($f_{\text{gen}} > f_{\text{sis}}$ i $P_{\text{električna snaga}} > P_{\text{mehanička snaga}}$) i onda počinje da se povećava na vodeći smer, sužavajući pomeranje između jedinica i vektora referentnog sistema [64].

Sinhrona tačka ravnoteže je definisana kao stanje kod koje ugao rotorske jedinice dodiruje ugao sistema i kad nema razmene energije (na primer $P=0$, osim energije da pokriva generatorske gubitke) [6], [65].

Jednosmerna komponenta struje pada eksponencijalno sa vremenskom konstantom koja u ovom slučaju je otprilike 72 ms. Kad asimetrična struja ne prolazi kroz nulu uspešno gašenje luka se teško postiže [66], [67].

U tabeli 16, date su vrednosti jednosmerne (I_{dc}) i izmenične (I_{ac}) komponente tokom prvih 120 ms (ove vrednosti su snimljeni preko releja u toku događaja) [6], [58], [61].

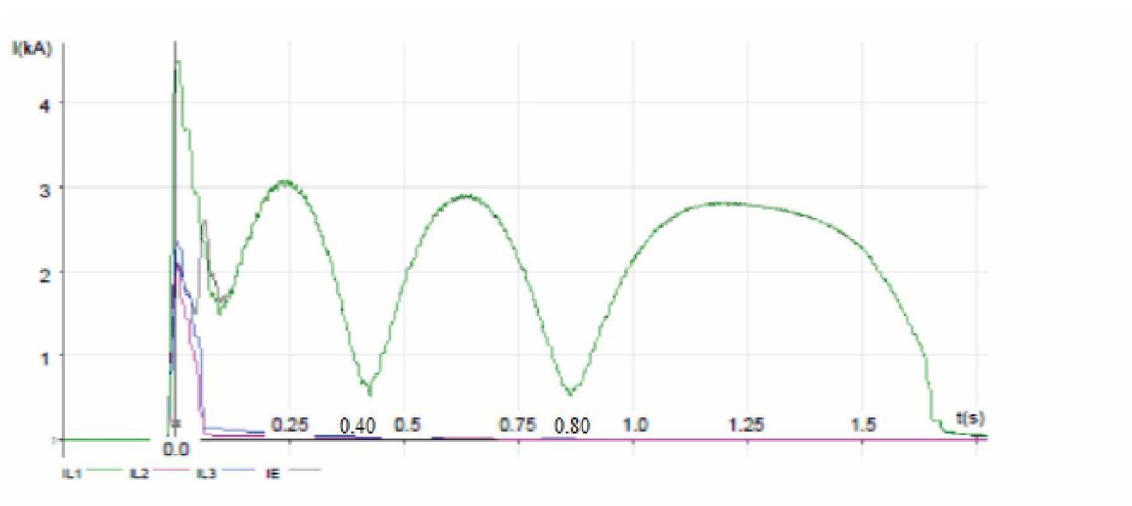
Tabela 16. Vrednosti efektivne, jednosmerne i izmenične komponente struje u zavisnosti od vremena.

| Efektivna, jednosmerna i izmenična komponenta struje u zavisnosti od vremena | | | | |
|--|----------------|---------------|--------|---------------|
| T(ms) | I_{rms} (kA) | I_{dc} (kA) | dc (%) | I_{ac} (kA) |
| -20 | 0.44 | 0.15 | 72 | 0.21 |
| -10 | 3.9 | 2.81 | 110.9 | 2.54 |
| 0 | 4.18 | 3.6 | 169 | 2.13 |
| 10 | 3.49 | 3.11 | 198.3 | 1.57 |
| 20 | 3.41 | 3.07 | 205.9 | 1.49 |
| 30 | 2.8 | 2.61 | 260 | 1.0 |
| 40 | 2.76 | 2.6 | 278 | 0.93 |
| 50 | 2.28 | 2.21 | 406 | 0.54 |
| 60 | 2.21 | 2.12 | 359.3 | 0.59 |
| 70 | 1.62 | 1.56 | 384.5 | 0.41 |
| 80 | 1.58 | 1.47 | 259.4 | 0.57 |
| 90 | 1.39 | 1.04 | 114.4 | 0.91 |

Gde je:

T: vreme trajanja kvara, I_{rms} : efektivna vrednost struje, dc%: vrednost jednosmerne struje u procentima.

Na slici 31 prikazano je efektivna vrednost struja u toku događaja, mereno preko releja (dato je za sve tri faze u različitim bojama).

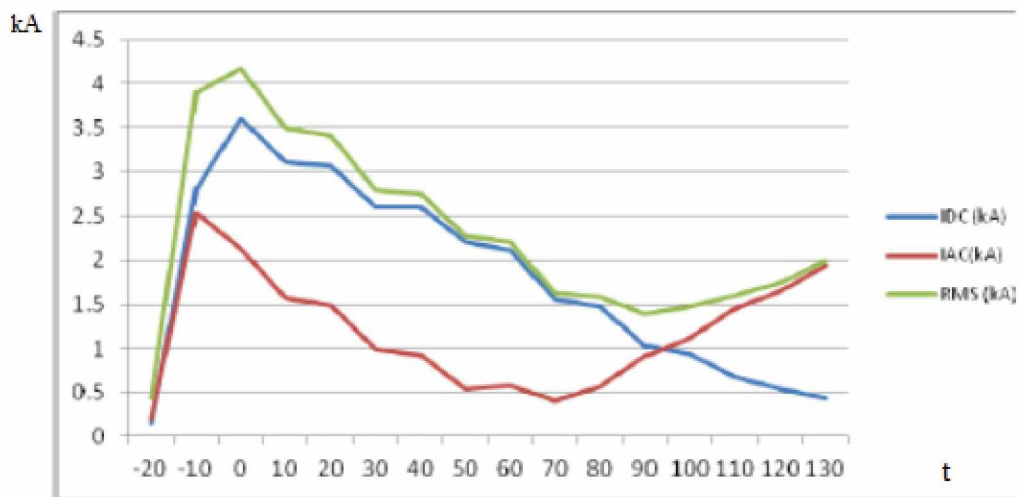


Slika 31. Efektivna vrednost struja.

Od trenutka kad se kontakti prekidača sklope, jednosmerna komponenta se povećava do maksimuma od $I_{dmax}=3.11$ kA za 30 ms.

Posle 110 ms, vrednost jednosmerne struje pada do 47.2% izmenične komponente (slika 32) i kao posledica izmenična struja prolazi kroz nulu po prvi put.

Slika 32, prikazuje odgovarajuće izmene jednosmerne i izmenične komponente struje kao i ukupnu struju koja prolazi kroz prekidač.



Slika 32. Izmene jednosmerne i izmenične komponente struje.

Po IEC standardu [31], prekidač visokog napona je dizajniran da ugasi luk za vreme od 15 ± 5 ms, ali struja mora proći kroz nulu posle jednog ciklusa (posle svakih 10 ms) kod frekvencije 50 Hz. Električni luk će se ugasi u trenutku kad struja prolazi kroz nulu [31], [68].

Kako se vidi na oscilogramu (slika 22), struja u fazi L1 nije prošla kroz nulu za 100 ms [6]. Prolongiranje električnog luka prouzrokovalo je oštećenje jedne komore prekidača sa gasom SF6 (slika 17).

Zbog nedozvoljenog uključenja prekidača 400 kV i nesinhroniziranog uključenja bloka na VN mrežu, nastalo je prelazno stanje i prelazna pojava sa izraženim asimetričnim faznim uključnim strujama.

Delovanjem sistema relejne zaštite bloka, 400 kV prekidač u polju bloka dobija nalog za isključenje, isključuje i prekida struju “kvara” u dve faze, dok u fazi L1, prekidanje struje izostaje jer prvi prolaz struje kroz nulu sledi nakon završetka operacije isključenja i pokušaja gašenja luka [6], [58], [61].

U cilju objašnjenja događaja (razmotrani događaj), izvedenim simulacijama događaja na pojednostavljenom simulacionom modelu, prikazan je nastanak, razvoj i priroda celokupne pojave.

Sobzirom na tip prekidača, veličinu struje i valnog oblika struje u trenutku pokušaja prekidanja, pol prekidača faze L1 nije mogao prekinuti struju, a zbog termičkog delovanja električnog luka na otvorenim kontaktima pola tokom trajanja celokupne pojave dolazi do oštećenja polova (koje su prikazane na slikama 17, 18, 19 i 20) te je prekidač stavljen van pogona. Kasnijim pregledom i izvedenim delimičnim ispitivanjima na polu prekidača, konstatirana je neispravnost istog za dalji pogon [6].

5.3. Iskustva iz poznate prakse

U radu je analizirana pojava slučajnog i nedozvoljenog (nesinhroniziranog) uključenja generatora na 400 kV strani blok-transformatora, pri čemu je nakon nekontrolisanog uključenja prekidača došlo do reagovanja pojedinih sistema zaštite i naredbe za isključenje prekidača blok-transformatora na 400 kV strani.

Ovo je pojava se u praksi retko dešava, ali se može pojaviti kao rezultat raznih kvarova u signalnim i komandnim strujnim krugovima.

U postojećoj literaturi postoji više opisa sličnih problema i pristupa analizi problema koji nastaju prilikom uključenja nesinhroniziranog generatora na mrežu. Dio radova koji tretiraju sličan fenomen je dat u spisku literature ([1], [2], [3] i [4]). Oni obrađuju ovu temu, analizirajući slučajeve koji su slični slučaju koji se desio u EES Kosova.

U okviru ovih istraživanja u početku su date neke važne reference za razmatranje ovog problema. U ovim radovima su analizirana kašnjenja prolaska struje kroz nulu zbog raznih razloga. Isto tako analizirana je sličnost sa kašnjenjima prolaska struja kroz nulu, koje se javljaju pri kvarovima na terminalima generatora na strani visokog napona.

Ubrzanje rotora zbog gubitka sinhronizacije pod uglom $\delta=0$ rezultira sa malom izmeničnom strujom (AC komponentom) i sa dominacijom jednosmerne struje (DC komponenta).

Postoje razni parametri koji utiču na kašnjenje prolaska DC komponente kroz nulu [1], [2]:

Parametar sa najvećim uticajem na DC komponentu je početni ugao $\delta=0$.

Drugi važni parametri su konstanta inercije turbo grupe i početna devijacija od sinhronne brzine.

Prema navedenim radovima ([1], [2], [3] i [4]), zavisno od podataka o generatoru u trenutku pojave kvara, kvarovi koji su u blizini terminala generatora, prati i komponenta jednosmerne struje koja ima veliku vrednost i koja kasni da prolazi kroz nulu. U ovom slučaju tokom trofaznog kratkog spoja, maksimalna asimetrija je u jednoj fazi.

Kao rezultat ovakvih uključenja, posledice mogu biti različite, u zavisnosti od toga kako i u koje vreme se desilo nesinhronizirano uključenje [1], [2], [3], [4].

U dostupnoj literaturi dokumentovan je veći broj zatajivanja (nereagovanja), između ostalih, generatorskih prekidača visokog napona u slučajevima kvara, bilo zbog neadekvatnog dimenzioniranja i/ili zbog specifičnosti koje prate pojavu kvara u blizini generatora.

Pomenuti kvarovi su se najčešće odnosili ili na kratke spojeve ili na pojave eventualne sinhronizacije generatora sa mrežom bez ispunjenja uslova sinhronizacije zbog raznih razloga.

U svim slučajevima javlja se jednosmerna komponenta struje, za koju se, uz karakteristike relejne zaštite, pretpostavlja da je bila uzrok oštećenja prekidača, zbog njihove nemogućnosti da istu, u datim okolnostima, prekinu [3], [4].

Jednosmerna komponenta struje javlja se kao posledica elektromehaničkih prelaznih procesa u sinhronim generatorima, pri raznim havarijskim stanjima. Intenzitet, dužina trajanja i mera opadanja jednosmerne komponente struje kratkog spoja zavise od velikog broja faktora kao što su: konstrukcija generatora, izvedba namotaja, udaljenost mesta kratkog spoja od generatora, položaj rotora u odnosu na stator u trenutku nastanka kratkog spoja i slično. [3], [4].

U trenutku kada struja prolazi kroz nulu, električni luk se sam gasi i potrebno je osigurati da se ponovo ne upali.

Nasuport tome jednosmerna struja nikada sama ne dolazi na nulu, pa je za uspešno gašenje luka potrebno stalno povećavati otpor luka kako bi se struja u krugu smanjila ispod nekog minimalnog iznosa potrebnog za održavanje stabilnog luka [1], [2], [3] i [4].

Zbog svih ovih uticajnih faktora, jednosmerna komponenta struje može značajno uticati na ukupnu vrednost struje kratkog spoja. Kod ovih velikih kvarova, javljaju se

velike struje a sa tim i veliki momenat, tako da je potrebna vrlo brza intervencija kako bi se sačuvala stabilnost sistema [1], [2], [3] i [4].

Svrha analize ovih radova bila je da se pokaže koliko je obrađena ova pojava uzimajući u obzir i stvarne događaje (kao što je posmatrani slučaj) kao i proširiti ovo polje novim analizama.

Sprovedenim merenjima je pokazano činjenično stanje koja se može koristiti za dalju analizu ove pojave. Postoji mnogo radova koji obrađuju ove pojave baziranih na realnim i simuliranim slučajevima.

Fenomen sinhronizacije generatora u mreži karakteriše se elektromagnetnim i elektrodinamičnim efektima, koji su razjašnjeni u narednom poglavlju, uključujući i matematički model.

Da bi se posmatrani slučaj analizirao, biće urađeni matematički modeli pojedinih elemenata EES koji imaju dominantan uticaj na pojave jednosmerne komponente struje kvara u raznim havarijskim režimima u sistemu.

6. MATEMATIČKI MODEL

6.1. Opšte

U narednom tekstu su analizirani fenomeni i pojave koje se mogu pojaviti u sistemu kako bi se stekla saznanja o određenim mogućim slučajevima koji se mogu pojaviti u stvarnosti.

Isto tako je opisan matematički model za analizu stabilnosti sistema u toku sinhronizacije, elektrodinamički procesi tokom kvara elektroenergetskog sistema, kratkih spojeva u sistemu itd.

Nakon razvijanja konceptualnog fizičkog modela sistema, prirodno je razviti i matematički model koji omogućava izračunavanje vrednosti i određivanje ponašanja električnih veličina u sistemu tokom prelaznih pojava.

Rezultati dobijeni matematičkim modelom se mogu uporediti sa izmerenim rezultatima sistema što potvrđuje tačnost modela (ili netačanost) i da se može (ne može) koristiti za dalje kalkulacije i simulacije različitih događaja u sistemu.

Stabilnost sistema može biti ugrožena u zavisnosti od načina na koji sistem reaguje na velike kvarove, kao što su kratki spojevi ili isključenja opterećenih linija (opterećenih dalekovoda), uključenja nesinhroniziranih generatora u mreži i slično [44].

Kada dođe do kvara, javljaju se velike struje i veliki obrtni momenti tako da često treba preduzeti brzu akciju kako bi se održala stabilnost sistema. Pretpostavlja se da pre nego što se dogodi kvar, energetski sistem radi u mirnom stabilnom stanju.

Problem prelazne stabilnosti EES utvrđuje se procenom da li će sistem posle kvara uspeti da se vrati u miran-stabilan rad u vrlo kratkom vremenu.

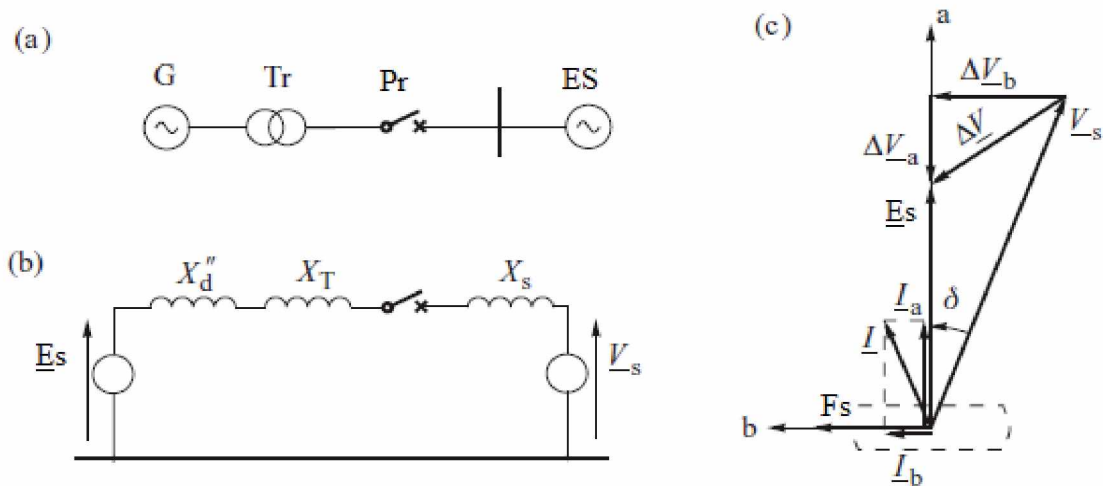
Pošto je subtranzientni period obično vrlo kratak u odnosu na period oscilacije rotora, efekat subtranzientnog fenomena na elektromehaničku dinamiku može se zanemariti.

Ovo omogućava da se klasični model generatora koristi za proučavanje problema stabilnosti sistema [44].

6.2. Sinhronizacija

Budući da se rad bavi problemom nesinhroniziranog uključanja generatora u mreži, neophodno je prvo analizirati sam proces sinhronizacije.

U ovom odeljku se opisuje elektromagnetna dinamika koja se javlja u toku sinhronizacije generatora u EES. Sinhronizacija je naziv dat procesu uključanja uzbuđenog generatora, na energetski sistem. Takav proces sinhronizacije je šematski prikazan na slici 33, gde se energetski sistem zamenjuje beskonačnom sabirnicom napona \underline{V}_s iza ekvivalentne reaktance sistema X_s . Pretpostavlja se da neposredno pre nego što je prekidač zatvoren, generator rotira sa brzinom ω blizu sinhronne brzine ω_s i da njegova uzbuđa proizvodi na priključku, napon praznog hoda E_s približan naponu sistema V_s [44].



Slika 33. Sinhronizacija: a) šematski diagram; b) ekvivalentni krug u prelaznom stanju; c) vektorski fazni dijagram.

gde je:

G-generator, Tr-transformator, ES-energetski sistem, Pr-prekidač, X_s -ekvivalentna reaktanca sistema, X_d'' -prelazna reaktanca generatora, X_T -reaktanca transformatora, E_s -inducirana elektromotorna sila, V_s -napon sistema, ω -brzina generatora, ω_s -sinhrona brzina generatora, F_s -magnetna motorna sila.

Idealna sinhronizacija se dešava kada je $\omega = \omega_s$, $\underline{E}_s = \underline{V}_s$ i $\delta = 0$, što znači da kada se prekidač za sinhronizaciju zatvori, nema strujnog toka. Normalno se generator priključuje na energetski sistem kada su ti uslovi skoro, ali ne i potpuno ispunjeni, zato

zatvaranje prekidača za sinhronizaciju rezultira protokom struje izjednačavanja koja sadrži AC i DC komponentu. Ako se pretpostavlja da generator nema lokalnog opterećenja pre sinhronizacije, onda se može prikazati na ekvivalentnom strujnom krugu prelaznog stanja uz pomoć inducirane elektromotorne sila (ems) E_s iza prelazne reaktance X''_d . Struja izjednačavanja se zatim može proceniti pomoću Teveninove teoreme zasnovane na naponu ΔV preko prekidača za sinhronizaciju i impedancije kao što se vidi na priključnim kontaktima prekidača [12], [44].

Kada je prekidač za sinhronizaciju zatvoren, odgovarajući elektromagnetni obrtni moment pokušaće da uvuče rotor u sinhronizaciju sa energetske sistemom usporavanjem ili ubrzavanjem rotora dok generator ne dostigne ravnotežan položaj definisan stečenim uglom rotora $\delta_s = 0$ i brzinom rotora $\omega = \omega_s$. Da bi se analizirale ove dinamike rotora, biće uzeta u obzir samo prelazna aperioidična komponenta momenta zato što je početni prelazni interval obično prekratak da bi imao značajan uticaj na njihanje rotora.

Radi resinhronizacije sa sistemom, generator mora ispuniti normalne zahteve za sinhronizaciju, a to su da odstupanja brzine i ugao snage moraju biti mali [11], [44].

6.3. Elektrodinamički procesi tokom kvara elektroenergetskog sistema i sinhronizacije

Svrha analize elektrodinamičkih procesa je da se utvrdi ponašanje električnih veličina tokom elektrodinamičkog procesa i radi poređenja sa drugim slučajevima prelaznih procesa.

Tokom procesa uključivanja nesinhroniziranog generatora, on je podvrgnut elektrodinamičnom procesu i stoga je predmet ove analize.

Elektroenergetski sistem drugačije se ponaša kod pojave malih kvarova, isto tako drugačije se određuju neophodne radnje (akcije) da bi sistem ostao stabilan kada je podvrgnut takvim kvarovima.

Mnogo dramatičniji, sa stanovišta stabilnosti, je način na koji sistem reaguje na velike kvarove kao što su oštećenja komandnih kablova, kratki spojevi, uključenje

nesinhroniziranog generatora i slično. Kada dođe do takvih kvarova, stvaraju se velike induktivne struje.

Da bi se održala stabilnost sistema moraju se preduzeti hitne radnje za prekidanje tih struja u najkraće vremenu [44]. U ovom odeljku se obrađuje problem stabilnosti sistema kod pojava velikih kvarova kao i njihov efekat na ponašanje sistema.

6.3.1. Prelazna stabilnost

Cilj analize prelazne stabilnosti je utvrđivanje ponašanja električnih veličina tokom ovog procesa i granica stabilnosti. Tokom uključenja nesinhroniziranog generatora javlja se problem stabilnosti u generatoru i zato je to važno za analizu.

Problem prelazne stabilnosti elektroenergetskog sistema se definiše kao procena da li će ili ne sistem doći do prihvatljive radne tačke normalnog rada u sigurnom stabilnom stanju, nakon otklanjanja kvara.

Ovo omogućava korišćenje klasičnog modela generatora za proučavanje problema prelazne stabilnosti. Prenos energije među generatorima će prouzrokovati oscilacije između odgovarajućih rotora [44].

Obično postoje tri stanja koje prate kvarove, sa tri generalno drugačije vrednosti x'_d :

- stanje prekvara kada je reaktanca $x'_d = x'_{dPRE}$,
- stanje kvara kada je $x'_d = x'_{dF}$ i
- stanje posle kvara kada je $x'_d = x'_{dPOST}$.

gde je:

$X'_d = X'_{dPRE}$ - ekvivalentna reaktanca pre kvara,

$X'_d = X'_{dF}$ - ekvivalentna reaktanca u toku kvara,

$X'_d = X'_{dPOST}$ - ekvivalentna reaktanca posle kvara.

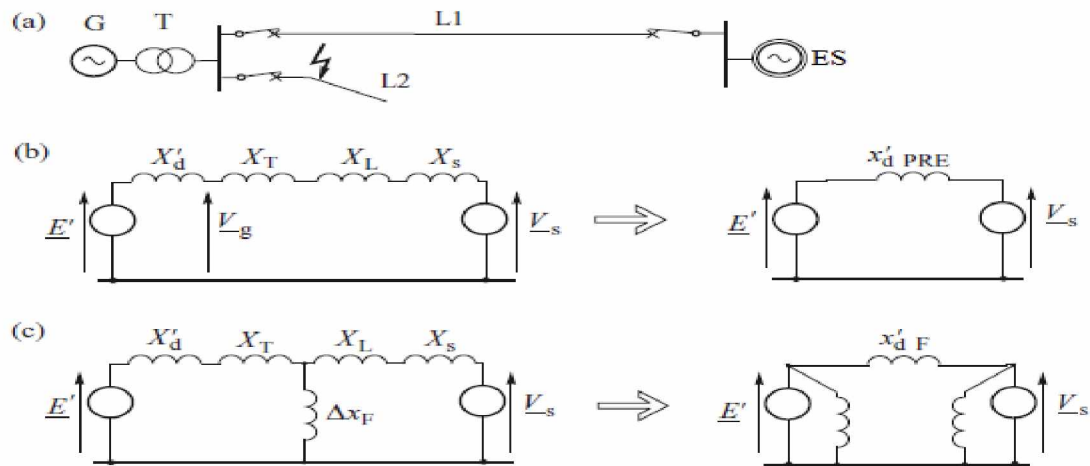
Na početku se razmatra slučaj greške koja se eliminiše bez ikakve promene u konfiguraciji razmatrane mreže.

U ovom slučaju: $x'_{dPOST} = x'_{dPRE}$

Slika 34 prikazuje primer kvara koji se otklanja uklanjanjem neispravnog elementa, ali bez promene ekvivalentne mrežne impedance. Pretpostavlja se da je napajana samo

linija L1 kod dvostruke veze sa linijom L2, koja je u upotrebi ali nije povezana na kraju sistema.

Ukoliko dođe do kvara na ne uključenoj liniji L2, te se isti otkloni otvaranjem prekidača na kraju linije sa strane generatora, impedancije pre i posle kvara između generatora i energetskog sistema su jednake.



Slika 34. Primer kvara sa istom impedancijom pre i posle otklonjenog kvara: (a) šematski diagram; (b) ekvivalentni krug za stanje pre i posle kvara; (c) ekvivalentni krug u toku kvara.

gde je:

G - generator, T - transformator, $X'_{d\text{ PRE}}$ - ekvivalentna reaktanca pre kvara, X_T , X_L - reaktance na transformatoru i liniji, V_s - konstantni napon iza ekvivalentne reaktance X_s , E' - napon, X_d - prelazna reaktanca, ES - energetski sistem, X_F - reaktanca šanta.

Ekvivalentni krug za energetski sistem je prikazan na slici 34 b [44]. Generator je predstavljen kao klasični model sa konstantnom prelaznom ems E iza prelazne reaktance X_d jer je sistem predstavljen sa konstantnim naponom V_s iza ekvivalentne reaktance X_s .

Ekvivalentna reaktanca pre kvara X_{PRE} cele prenosne linije je:

$$X'_{d\text{ PRE}} = X'_d + X_T + X_L + X_s \quad (5)$$

gde je:

X_T i X_L - reaktance na transformatoru i liniji

K_{s1} , K_{s2} i K_{s0} , odnosno pozitivni, negativni i nulti niz Thevenina ekvivalentne reaktance što proizilaze iz vrste kvara.

Upotreba simetričnih komponenti omogućava da bilo kakve vrste kvarova budu predstavljene u pozitivnom nizu mreže pomoću reaktance šunta X_F povezane između tačke greške i neutralne tačke, kao što je prikazano na slici 34 c, vrednosti variabala zavise od tipa kvara.

Koristeći transformaciju zvezda-trougao, mreža sa kvarom može se transformisati kao što je prikazano na slici 34 c tako da su naponi E' i V_s direktno povezani pomoću ekvivalentne reaktance kvara [44].

$$x'_{dF} = x'_d + X_T + X_L + X_s + \frac{(x'_d + X_T)(X_L + X_s)}{\Delta x_F} \quad (6)$$

Vrednost ove reaktance je u velikoj meri zavisna od vrednosti reaktance šanta Δx_F .

Kada se kvar otkloni, otvaranjem prekidača u liniji L2, ekvivalentno kolo je isto kao u periodu pre kvara tako da je $x_{dPOST}^* = x_{dPRE}^*$.

Diagram kruga u toku kvara (slika 34 c) odgovara mreži pozitivne sekvence tako da reaktanca data u jednačini (6) koristi se samo u karakteristici faznog ugla snage. Uticaj negativnih i nultih sekvenci kvarova i momenata kvara zanemaren je iz daljih razmatranja u ovom poglavlju.

6.3.2. Trofazni kvarovi

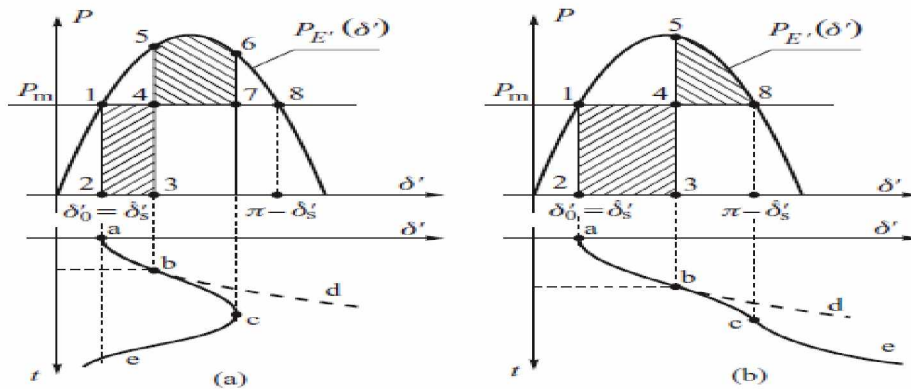
Predmet analize trofaznog kratkog spoja je da se utvrdi ponašanje električnih veličina tokom ovog prolaznog procesa i radi poređenja sa drugim slučajevima prelaznih procesa.

Za trofazni kvar $X_F = 0$, $x_{dF} = \infty$. Zbog trofaznog kvara prenos energije od agregata do sistema je potpuno blokiran zato što je struja kvara čisto induktivna. Tokom kvara električna energija pada sa svoje vrednosti pre kvara na nulu kao što se vidi linijom 1-2 na slici 35 i ostaje na nuli sve dok se greška ne otkloni otvaranjem prekidača. Tokom ovog vremena ubrzanje rotora ϵ može se dobiti iz jednačine oscilacije [44].

$$\varepsilon = \frac{d^2 \delta'}{dt^2} = \frac{P_m}{M} = \text{konstant} \quad (7)$$

Integracija jednačine (7) dva puta sa početnim uslovima $\delta' (t=0)=\delta'_0$ i $\Delta\omega (t=0)=0$, predstavlja krivulju snage kao:

$$\delta' = \delta'_0 + \frac{\varepsilon t^2}{2} \quad \text{ili} \quad \Delta\delta' = \delta' - \delta'_0 = \frac{\varepsilon t^2}{2} \quad (8)$$



Slika 35. Područje ubrzanja i usporavanja: (a) kratko vreme otklanjaja kvara; (b) dugo vreme otklanjaja kvara.

gde je:

$P_{E'}(\delta')$ - snaga faznog ugla, P_m - mehanička snaga, δ'_s - vrednost prelaznog faznog ugla rotora, δ'_0 - početni ugao, X'_{df} - ekvivalentna reaktanca kvara, ε ubrzanje rotora.

Ovo odgovara paraboli a-b-d na slici 35 a. Pre nego što se kvar otkloni, rotor se pomera od tačke 2 na tačku 3 na diagramu snage i stiče kinetičku energiju proporcionalnu zasenčenoj površini 1-2-3-4.

Kada kvar traje, kod $t = t_1$ otvaranjem prekidača, rotor ponovo prati karakteristiku faznog ugla snage $P_{E'}(\delta')$ koja odgovara reaktanci datoj jednačinom (5) tako da radna tačka prelazi iz tačke 3 u tačku 5. Rotor sada dostiže obrtni moment, veličine proporcionalno dužini linije 4-5, i počinje da usporava. Međutim, zbog tog zamaha, rotor nastavlja da povećava svoj ugao sve dok se rad ne prekine usled usporavanja, površina 4-5-6-7 jednaka je kinetičkoj energiji dobijenoj tokom usporavanja, dok površina 1-2-3-4

je jednaka kinetičkoj energiji dobijenoj u toku ubrzavanja. Rotor dostiže sinhronu brzinu tek u tački 6 kada se ove dve površine izjednače [12], [44].

$$\text{Površina 4-5-6-7} = \text{Površini 1-2-3-4} \quad (9)$$

U odsustvu prigušenja ciklus se ponavlja i rotor osciluje oko tačke 1 izvođenjem sinkronih oscilacija. Generator ne gubi sinhronizaciju i sistem je stabilan.

Slika 35 b pokazuje sličnu situaciju, ali sa značajno dužim vremenom trajanja kvara $t = t_2$, kada je kinetička energija dobijena tokom ubrzanja znatno veća od one dobijene prigušenjem.

Kao rezultat, rad izveden tokom usporavanja, proporcionalan površini 4-5-8, ne može da apsorbuje celokupnu kinetičku energiju dobijenu tokom ubrzanja tako da razlika brzina nije jednaka nuli pre nego što rotor dostigne tačku 8. Nakon prolaska tačke 8 električna snaga $P_{E'}(\delta')$, je manja od mehaničke snage P_m tako da taj obrtni moment čini da rotor dodatno povećava svoj ugao. Rotor vrši asinhronu rotaciju tako da gubi sinhronizaciju sa sistemom. Dva važna zaključka proizlaze iz ovog razmatranja:

Prvo je da generator gubi stabilnost ako tokom jednog od njihanja operativna tačka prelazi tačku 8 na karakteristici. Ova tačka odgovara prelaznom faznom uglu rotora kod $\pi - \delta'_s$ gde je δ'_s vrednost prelaznog faznog ugla rotora kod stabilne ravnoteže.

Zato područje 4-5-8 predstavlja dostupno područje usporavanja koja zaustavlja njihanje rotora generatora. Odgovarajući uslov prelazne stabilnosti je da raspoloživi prostor za usporavanje bude veći od područja ubrzanja uzrokovan kvarom.

Ovaj kriterijum je:

$$\text{površina 1-2-3-4} < \text{površina 4-5-8} \quad (10)$$

Pošto generator nije koristio celu raspoloživu usporavajuću površinu, preostala površina 6-7-8, deljena sa raspoloživom površinom usporavanja, može se koristiti za definisanje margine prelazne stabilnosti [44].

$$K_{\text{površina}} = \frac{\text{površina 6-7-8}}{\text{površina 4-5-8}} \quad (11)$$

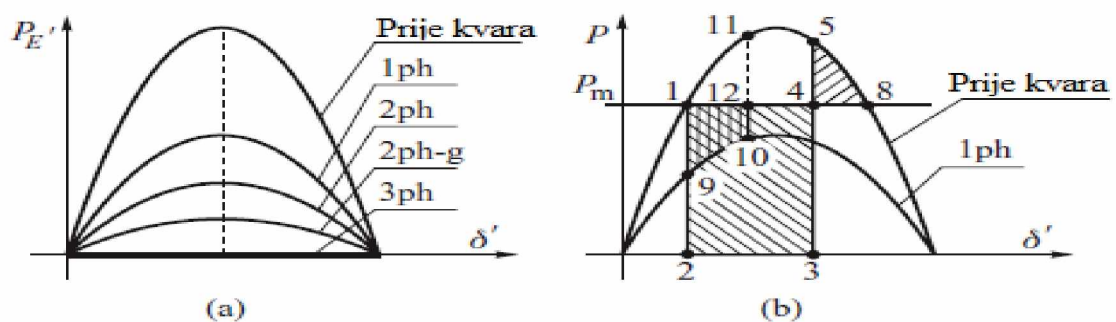
Drugi važan zaključak je, da je vreme za otklanjanje kvara glavni faktor u određivanju stabilnosti generatora. Ovo se potvrđuje jednačinom (8) gde je područje ubrzanja 1-2-3-4 proporcionalno kvadratu vremena otklanjanja kvara. Najduže vreme otklanjanja kvara kod kojeg će generator ostati sinhronizovan, označeno je kao kritično vreme otklanjanja kvara [44]. Razlika između kritičnog vremena i trenutnog vremena otklanjanja kvara može se koristiti za određivanje drugih mera za prelazne margine stabilnosti:

$$K_{\text{vreme}} = \frac{t_{kr} - t_a}{t_{kr}} \quad (12)$$

gde je:

t_{kr} i t_a kritično i aktualno vreme otklanjanja kvara.

Odgovarajuće krivulje faznog ugla napajanja tokom kvara prikazane su na slici 36 a. Efekat nesimetričnog kvara na stabilnost sistema se ispituje uzimajući u obzir najgori slučaj, jednofazni kvar. Pretpostavlja se da je vreme otklanjanja kvara nešto duže od kritičnog vremena za trofazni kvar. Površine ubrzanja i usporavanja su prikazane na slici 36 b [44].



Slika 36. Efekat nesimetričnih kvarova: (a) upoređivanje karakteristika ugla-snage; (b) područje ubrzanja i usporavanja u toku trofaznog i monofaznog kvara.

gde je:

P_m -mehanička snaga

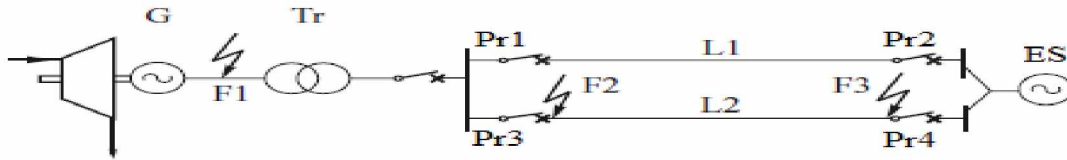
P_E' -električna snaga

6.4. Kratak spoj u mreži i njegovo isključenje

Analiza kratkih spojeva služi da se utvrdi ponašanje električnih veličina tokom ovog prolaznog procesa i radi poređenja sa drugim slučajevima prelaznih pojava.

Slika 37 prikazuje opšti slučaj gde je generator priključen na energetska sistema preko transformatora i dva paralelna dalekovoda. Kada se na početku jedne od linija pojavljuje kvar, trofazni spoj sa zemljom, tačka F2, tada se kvar može tretirati kao kratak spoj generatora. U tom slučaju da bi se uključio efekat transformatora trebaju se modificirati neke od reaktanci kao i vreme delovanja [44]. Prvo, reaktanca transformatora X_T mora se dodati seriji reaktanci X''_d , X'_d i X_d da bi se stvorila rezultirajuća reaktanca.

$$x''_d = X''_d + X_T, \quad x'_d = X'_d + X_T, \quad x_d = X_d + X_T \quad (13)$$



Slika 37. Šematski dijagram fragmenta energetskog sistema sa primerima kratkog spoja tačkama F1, F2 i F3.

gde je:

G-generator, Tr.-transformator, ES-energetski sistem, Pr-prekidač, X_T -reaktanca transformatora.

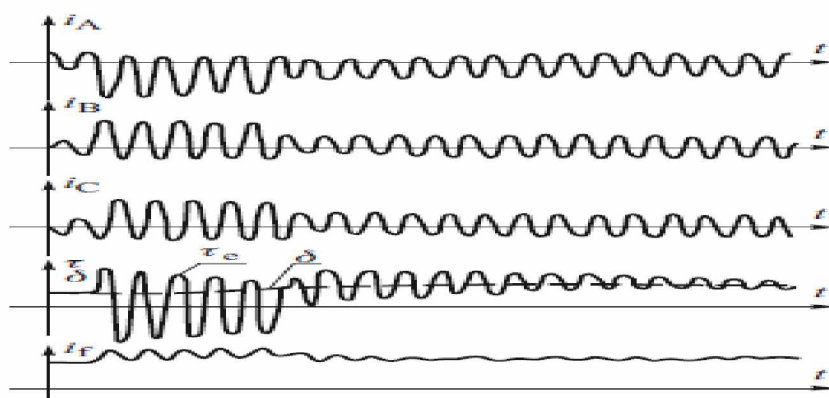
Ovo ima uticaj na smanjenja veličine struja i elektromagnetnog obrtnog momenta koji sadrži periodičnu i neperiodičnu komponentu. Drugo, otpornost transformatora R_T povećava brzinu kojom se magnetna energija raspršuje tako da se DC komponenta struje kratkog spoja brže prigušuje. Vremenski rokovi se moraju modifikovati, kao u jednačini [44]:

$$T''_{d(mreža)} = T''_d \left(\frac{X'_d}{X''_d} \right) \left(\frac{X''_d + X_T}{X'_d + X_T} \right), \quad T'_{d(mreža)} = T'_d \left(\frac{X_d}{X'_d} \right) \left(\frac{X'_d + X_T}{X_d + X_T} \right) \quad (14)$$

Kao posledica povećanja vremenskih konstanti, trenutna vrednost struje kratkog spoja može proći kroz nulu čak i u prvom ciklusu. Oblici struja i obrtnog momenta tokom

kratkog spoja i sledećeg otklanjanja kvara prikazani su na slici 38. Tokom kratkog spoja, velike struje teku u sve tri faze i obrtni moment oscilira oko prosečnih vrednosti blizu nule. Pošto je vreme otklanjanja kvara obično kratko, ugao rotora, prikazan isprekidanom linijom na dijagramu obrtnog momenta, povećava se samo malo [11], [44].

Kada se kvar otkloni, promene u obrtnom momentu i strujama su slične onima koje se javljaju tokom sinhronizacije kada se ugao rotora prvo povećava, a zatim smanjuje, ali obrtni momenat oscilira oko prosečne vrednosti. Slika 38 prikazuje kako se kriterijum jednake površine, može koristiti za analizu efekta trofaznog kvara na stabilnost sistema [44].



Slika 38. Trofazni kvar i njegovo otklanjanje u liniji koja povezuje generator sa sistemom.

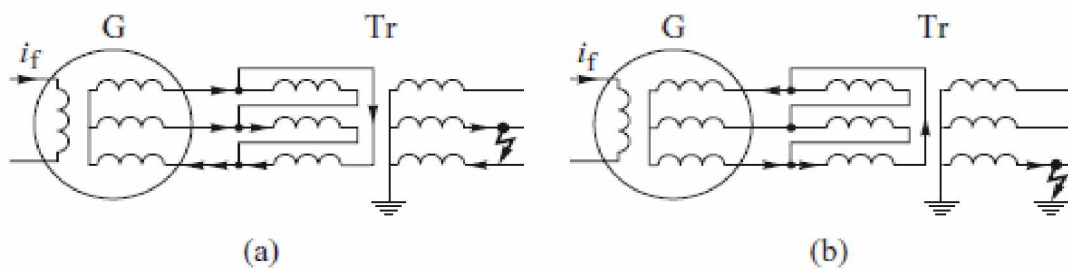
gde je:

i_A, i_B, i_C fazne struje; τ_e , elektromagnetni moment; i_f uzbudna struja; δ ugao rotora.

U slučaju kvarova (kratkih spojeva) u transformatoru, dolazi do dodatnih izobličenja struja generatora. Ovaj slučaj je ilustrovan na slici 39 pod pretpostavkom da je transformator sprege zvezda-trougao i da se dogodio međufazni kratak spoj na sekundaru transformatora, kao što se vidi u slici 39 a, što se odražava kao trofazna asimetrična struja na primaru transformatora.

U slučaju jednofaznog kratkog spoja na sekundaru transformatora, slika 39 b, to se odražava na primarnoj strani kao dvofazni kvar.

Takav nesimetričan kvar stvara struje negativnog usmerenja. Kao posledica toga elektromagnetni obrtni moment sadrži komponentu dvostruke frekvence [44].

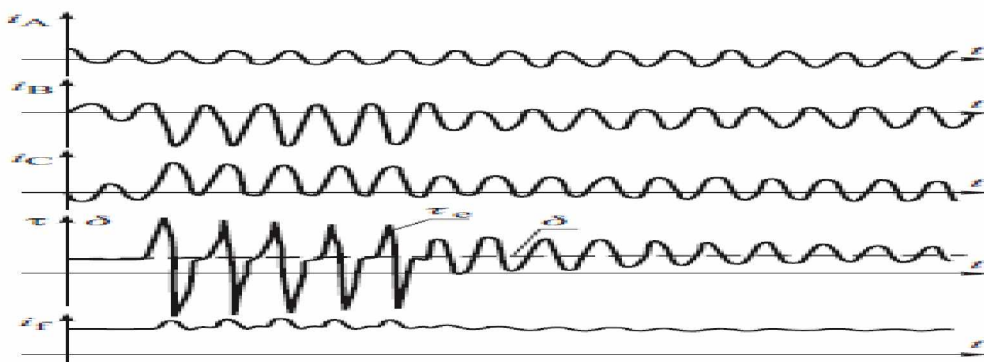


Slika 39. Transformacija struje kratkog spoja u zvezda-trougao spojnom transformatoru: (a) među-fazni kratak spoj; (b) jednofazni spoj sa zemljom.

gde je:

G-generator, Tr-trasnformator, i_f - uzbudna struja.

Slika 40 prikazuje vremensku oscilaciju faznih struja, obrtnog momenta i uzbudne struje tokom i nakon otklanjanja kratkog spoja između faze B i C u liniji koja povezuje generator sa energetskeim sistemom [44].



Slika 40. Među-fazni kratak spoj i njegovo otklanjanje u liniji koja povezuje generator sa energetskeim sistemom.

gde je:

i_A , i_B , i_C , fazne struje; τ_e -elektromagnetni obrtni moment, i_f - uzbudna struja, δ -ugao rotora.

Kroz matematički model su date neophodne elektrodinamične jednačine, koje omogućavaju analizu pojava pri priključenju nesinhroniziranih generatora u mrežama.

Pošto je sistem nelinearan, za dublja istraživanja se koriste softverski paketi koji mogu visokom tačnošću simulirati elektromagnetne i elektrodinamičke procese u slučaju prelaznih pojava koje se javljaju pri priključenju nesinhroniziranih generatora u mrežama.

Matematički model omogućava izračunavanje ponašanja električnih veličina u sistemu tokom prelaznih pojava [44].

Korišćenjem razvijenih modela elemenata sistema u specijalizovanim kompjuterskim softverima biće simulirani različiti radni režimi koji su od interesa za pojavu naprežanja prekidača u blizini generatora.

U cilju dobijanja tačnijih rezultata simulacije će se sprovesti u nekoliko programa koji su najčešće u upotrebi kao što su EMTP/ATP, PSS/E i MATLAB [69], [70], [71], [72].

7. PROGRAMSKI PAKETI ZA POTREBNE PRORAČUNE

Korišćenjem matematičkih modela elemenata sistema pomoću specijalizovanih kompjuterskih softvera su simulirani različiti radni režimi koji su od interesa za pojavu naprežanja prekidača u blizini generatora.

Za simulacije i analize su korišćeni softverski paketi koji su najčešće u upotrebi za proračune i analize u elektroenergetskim sistemima: EMTP/ATP, PSS/E i MATLAB.

Osnovne karakteristike ovih softvera su navedene u narednom tekstu, dok su njihova detaljna objašnjenja i uputstva za rad data u [69], [70], [71], [72].

Za simulacije elektrodinamičkih prolaznih pojava poznat je softverski paket EMTP/ATP. Tranzijentni alternativni softver (The Alternative Transients Program, EMTP/ATP) je pogodan za analizu prelaznih pojava u EES, gde se traži visoka tačnost u prikazivanju prelaznih pojava koje se javljaju u sistemu.

Ovaj softver je dobar za tranzijentne elektromagnetne analize. Ipak sa ovim softverskim paketom se ne mogu simulirati veliki sistemi.

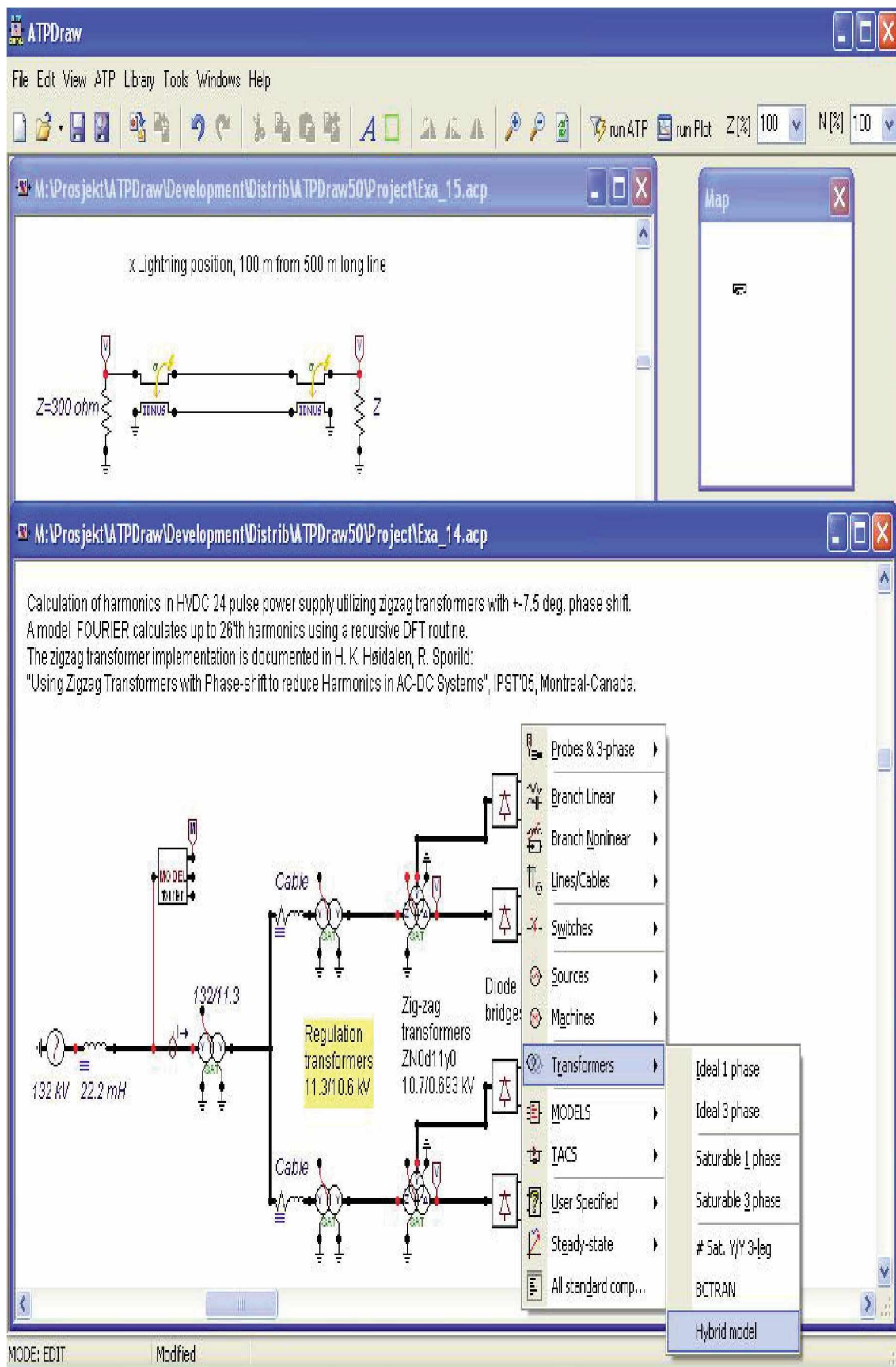
Sa EMTP/ATP “simulation tools” izvršeno je modelovanje slučaja koji se desio u EES Kosovo primenom šeme sa generatorom u kvaru tokom nesinhroniziranog uključanja, transformatora i prekidača.

Softver EMTP/ATP, upotrebljavan je i za simulacije kako se menjaju struje u sve tri faze generatora tokom uključanja nesinkroniziranog generatora na mreži.

Kako ovaj model pokazuje tačnost i za simuliranje ostalih slučajeva, isti se upotrebljava da se vide kritični slučajevi tokom uključanja nesinhroniziranog generatora u mreži.

EMTP/ATP smatra se kao univerzalni program koji se najšire upotrebljava za simuliranje tranzijentnih pojava elektromagnetne kao i elektromehaničke prirode u energetske sistemima.

Na slici 41 je dat prikaz glavnog prozora EMTP/ATP Draw_a. EMTP/ATP Draw podržava više dokumenta i nudi korisniku mogućnost da istovremeno radi na nekoliko krugova sa mogućnošću kopiranje informacija između krugova [69], [70].



Slika 41. Glavni prozor i meni za izbor komponenti.

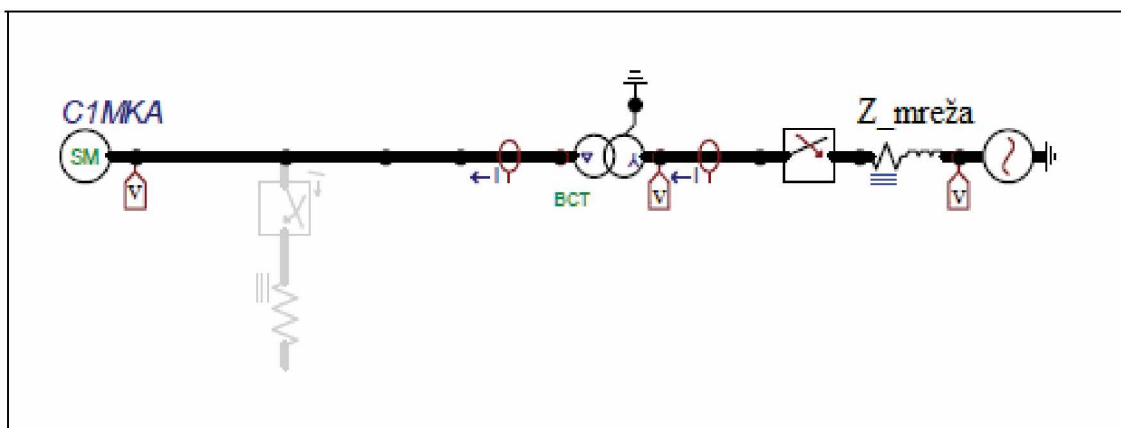
EMTP/ATP proračunava potrebne izlazne vrednosti veličina unutar elektroenergetskih mreža kao funkcije vremena, obično uslovljene nekim poremećajima.

Uglavnom, trapezoidno pravilo integracije koristi se za rešavanje diferencijalnih jednačina komponenti sastava u vremenskom intervalu. Inicijalna stanja koja nisu nula mogu se automatski odrediti stacionarnim faznim rešenjem ili ih korisnici mogu uneti za jednostavnije komponente [70].

EMTP/ATP sadrži mnogo modela, uključujući rotirajuće strojeve, transformatore, odvodnike prenapona, prenosne linije i kablove. Interakcije programskim modulima TACS (tranzijentna analiza kontrolnih sistema) i MODELS (simulacijski jezik) omogućava modeliranje upravljačkih sistema i komponenti sa nelinearnim karakteristikama kao što su lukovi i korone [69].

Harmonijska analiza frekvence u skladu s metodom ubrizgavanja inekcije struje (HARMONIC FREQUENCY SCAN) i izračunavanje frekvencijskog odziva phasor mreža pomoću funkcije FREQUENCY SCAN također je podržan ovim softverom [69], [70].

Na slici 42 je dat prikaz blok šema softverskih modela EMTP/ATP koji se koristi za matematičke analize uključenja nesinhroniziranog generatora u mreži [70].



Slika 42. Bloka šema softvera EMTP/ATP.

Dinamički sistemi bez električne mreže također se mogu simulirati ovim softverom pomoću modela upravljanja TACS i MODELS sistema. Dopusćeni su simetrični ili nesimetrični poremećaji, kao što su kvarovi, udari groma i nekoliko vrsta preklopnih operacija, uključujući komutaciju ventila [69], [70].

Sa ovim digitalnim programom mogu se simulirati kompleksne mreže kao i kontrolni sistemi proizvoljne strukture. EMTP/ATP ima ekstenzivne mogućnosti modeliranja kao i dodatne karakteristike pored tranzientnih računanja [6], [69].

Siemens PSS/E softverski paket je široko prepoznat kao jedan od najcelovitijih, vremenski testiranih i najboljih komercijalnih programa dostupnih za analizu energetskih sistema.

PSS/E koriste inženjeri operativci i planeri, konsultanti, univerziteti i istraživačke laboratorije širom sveta.

Softverski paket PSS/E je upotrebljen da bi se odredio nivo kratkog spoja na mestu kvara. PSS/E softver je pogodan za računanje kratkih spojeva u složenim EES.

Za simulacije u velikim sistemima, softverski paket PSS/E je pogodniji od EMTP/ATP.

Siemens PTI PSS®E softverski proizvod je integrirani program koji omogućuje proračun tokova snaga, kratkih spojeva i dinamičku simulaciju u integriranom okruženju, kao i bogato okruženje za automatizaciju korisnika bazirano na “Python” skriptiranju, čime se omogućuje kontrola korisnika i prilagođavanje rezultata [71].

Analitičke sposobnosti PSS/E uključuju:

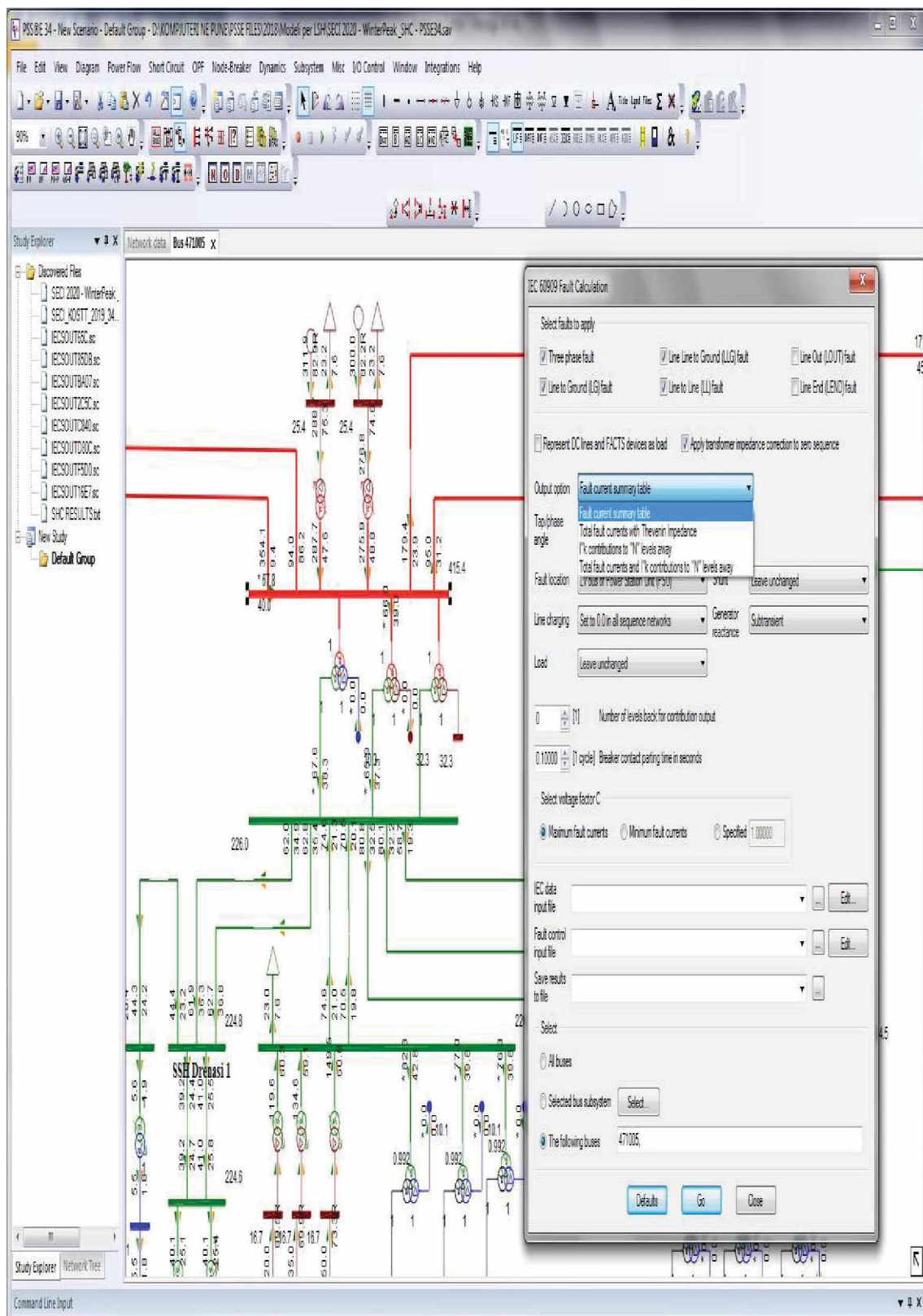
Širok spektar funkcionalnih analiza, uključujući protok snage, strujni tok, analizu slučajnosti, analizu nepredvidljivih situacija, stabilnost napona, dinamična simulacija (uključujući produženi pojam) i kratak spoj (uključujući IEC 60909) [32], [71], [72], [73].

Izborni moduli osiguravaju:

- Optimalni protok snage (OPF).
- Analiza male stabilnosti signala (NEVA).
- Grafički model graditelja (GMB) i
- Simulaciju prelazne stabilnosti i mnogo više.

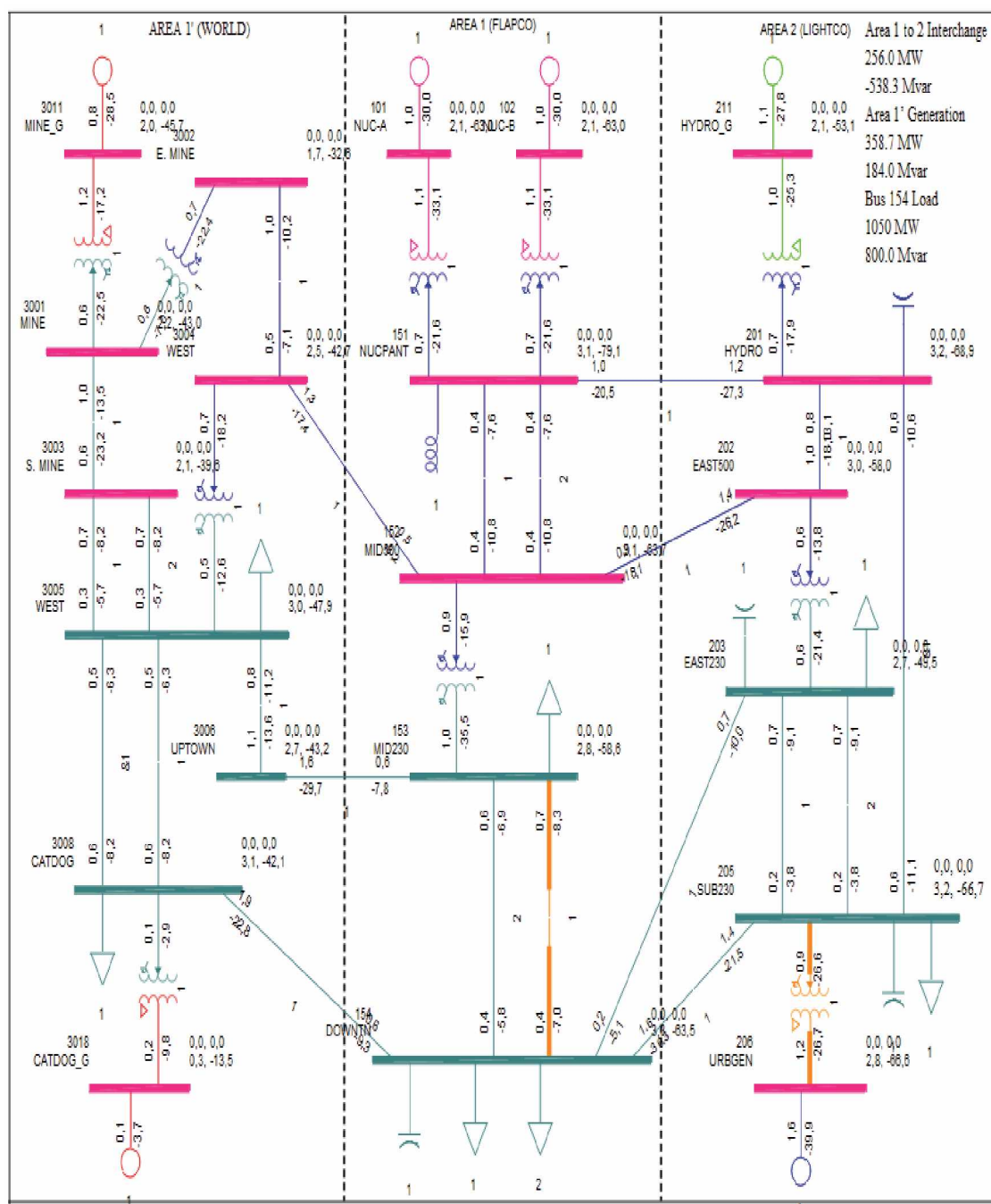
Slika 43 prikazuje glavni menu softvera PSS/E koji predstavlja način kalkulisanja kratkih spojeva u PSS/E.

U ovom slučaju prikazuje kratak spoj na 400 kV strani u TS 400/220 kV “Kosovo B”.



Slika 43. Glavni prozor i meni za kalkulisjanja kratkih spojeva.

Na slici 44 dat je blok šema softverskih modela PSS/E koji se koristi za analizu prelaznih pojava pri kratkim spojevima u mreži i proračunavanje istih [71].



Slika 44. Bloka šema softvera PSS/E za analizu dinamičkih procesa u slučaju kratkog spoja.

(Slike sa natpisima na engleskom rezultiraju iz softvera, tako da je nemoguća bilo kakva intervencija u njima).

Softver PSS/E se upotrebljava za planiranje sistema, za dinamične analize tokova snaga, optimizaciju tokova snaga (VOLT-VAR), i za proračune kratkih spojeva.

Aktuelno, kompanija za prenos (KOSTT) upotrebljava ovaj softver za planiranje sistema prenosa, poseduje regionalni model gde su uključene sve države jugoistočne Evrope za analize tokova snaga, model proračuna kratkih spojeva, i dinamičke procese [70].

U cilju simulacija ponašanja sistema tokom kvara, ekvivalentni sistem je proračunat pomoću PSS/E (slučaj kratkih spojeva), pomoću ovih simulacija proveren je kritični ugao nesinhroniziranog uključanja.

MATLAB je programski jezik visokih performansi za tehničko računanje. On integriše računanje, vizualizaciju i programiranje na lakši način, pri čemu se različiti problemi i rešenja mogu izraziti dobro poznatim matematičkim izrazima.

Neke tipične oblasti upotrebe MATLAB-a su:

- Matematika i različiti proračuni.
- Razvoj algoritma.
- Modeliranje, simulacija i prototipizacija.
- Analiza podataka, istraživanje i vizualizacija podataka.
- Naučna i inženjerska grafika.
- Razvoj aplikacije, uključujući izgradnju grafičkog sučelja interfejsa.

MATLAB se razvijao tokom godina doprinosom mnogih korisnika. U univerzitetskim sredinama to je standardno nastavno sredstvo za uvodne i napredne predmete u matematici, inženjerstvu i u drugim ekzaktnim naučnim predmetima. U industriji, MATLAB je nezamenjivo sredstvo za istraživanje, razvoj i analizu visoke produktivnosti.

U našem slučaju MATLAB se koristi za izračunavanje efektivne vrijednosti struje (RMS).

Efektivna vrijednost promenljivog napona ili struje naziva se vrijednost naizmeničnog signala koja može biti jednaka jednosmjernom naponu ili struje.

Na primer, ako mjerite napon multimetrom / voltmetrom u utičnici u našim domovima, on bi trebao biti od 220-230 volta, a na instrumentu je ta vrijednost nepromenjena iako smo svjesni da je napon AC - promenljiv i menja se 50 puta u sekundi [50] Hz [72].

Izračunavanje ove vrijednosti za neperiodični signal može biti veoma komplikovano bez softverskih programa kao što je MATLAB.

Efektivna vrijednost (RMS) se izračunava matematičkim izrazima na sledeći način:

$$x_{RMS}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(t)^2 dt} \quad (15)$$

gde je:

- T je perioda ulaznog signala,
- x (t) je vremenski promenljiv ulazni signal.

Ovim izrazom mogu se izračunati samo periodični signali.

U slučaju signala koji nisu periodični, poznati po imenu harmonični signali, oni se moraju izračunati pomoću izraza:

$$x_{k,RMS}(t) = G \left(\frac{2}{T} \right) \sqrt{\left(\int_{t-T}^t x(t) \sin \left(\frac{2\pi kt}{T} \right) dt \right)^2 + \left(\int_{t-T}^t x(t) \cos \left(\frac{2\pi kt}{T} \right) dt \right)^2} \quad (16)$$

gde je:

- G je jednak 0, 5 za jednosmjerne (DC) signale (gde je: k = 0) i $1/\sqrt{2}$ (kvadratni koren 2), za alternativne (AC) signale (gde je: k > 0).

Treba napomenuti da pretvaranje neperiodične funkcije u periodične funkcije treba da se vrši putem furie-vih serija.

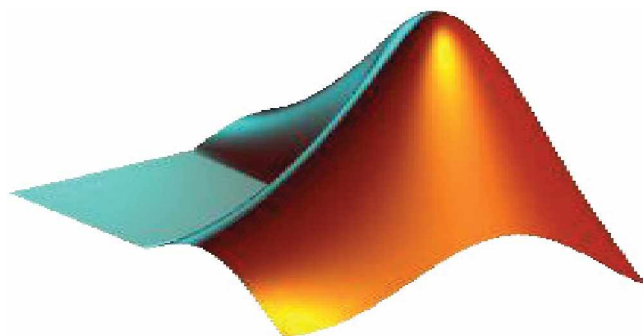
Svi ovi matematički izrazi su zamjenjeni simbolom kao što je navedeno u MATLAB-u (slika 45).



Slika 45. Simbol RMS

Gde je na ulazu smešten ulazni signal, u našem slučaju struja probijanja, dok u RMS izlazu dobijamo efektivnu vrijednost ove struje.

Svi gornji izrazi se izračunavaju putem programa i u najboljem slučaju dobijamo konačni graf ili matematičku funkciju [72]. Ikona softvera MATLABA prikazana je na slici 46.



Slika 46. Ikona MATLABA.

U ovom poglavlju su analizirani softverski paketi EMTP/ATP, PSS/E i MATLAB koji su najčešće u upotrebi. Prikazane su prednosti i mane ovih softvera u odnosu na postavljene zahteve.

Da bi prikazali ponašnje generatora u toku procesa sinhronizacije uključujući slučaj kad nisu ispunjeni zahtevi za sinhronizaciju, korišćenjem softvera EMTP/ATP i PSS/E u sledećem poglavlju biće urađene simulacije za različite uslove, odnosno različite fazne uglove između generatora i energetske mreže.

Poseban akcenat biće dat detaljnom proučavanju, analizi i modeliranju prekidača i električnog luka. U cilju verifikacije rezultata dobijenih u prethodnim koracima biće sprovedena analiza pojedinih simuliranih slučajeva u delu realnog EES.

Simuliraju se i slučajevi koji su snimljeni prilikom realnog događaja (poglavlje 5) [6], [58].

8. SIMULACIJE UKLJUČENJA NESINHRONIZIRANOG GENERATORA NA MREŽU POD RAZNIM UGLOVIMA

U narednom tekstu, u cilju dobijanja rezultata neophodnih za dalje analize i upoređivanje sa snimljenim podacima, simulacije su sprovedene sa programima koji su najčešće u upotrebi za proračune i analize u EES (EMTP/ATP, PSS/E i MATLAB).

Posmatran je model simuliranja realnog generatora na kojem se desio kvar, sa njegovim realnim parametrima. Simulacije ovih slučajeva su date na slikama (48, 49, 50, 51 i 52) prikazanim u ovom poglavlju. Na ovim slikama su prikazani rezultati simulacija sa EMTP/ATP softverom [58], [69].

Služeći se programom EMTP/ATP modelovan je jednostavan slučaj u sistemu gde je jedan dio mreže zamenjen ekvivalentnim izvorom, dok je generator modeliran sa parametrima koji odgovaraju subtranzijentnom i tranzijentnom periodu.

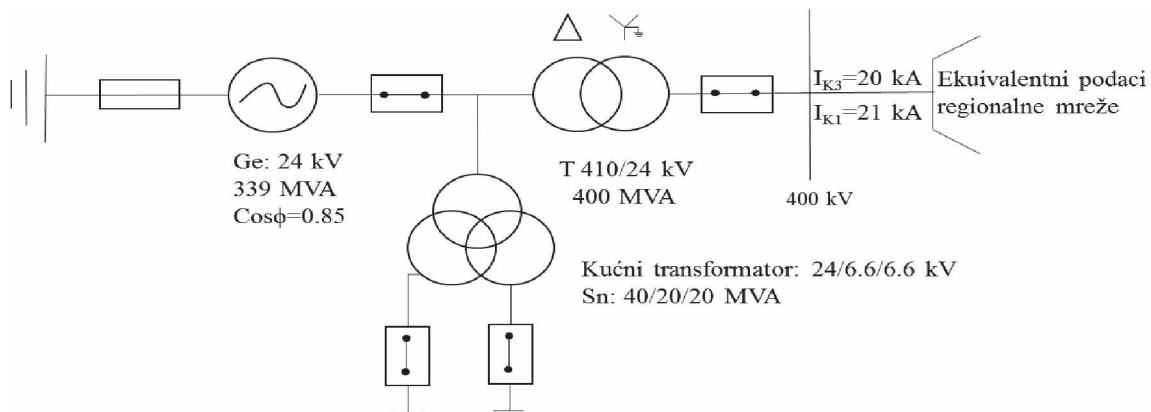
Simulacije su izvedene pod pretpostavkom da se generator uključuje u mrežu sa različitim razlikama uglova između generatora i mreže te su prezentirane oscilacije struja u generatoru tokom ovih uključenja.

Provereni su prenaponi koji se pojavljuju kod generatora i isključenih uređaja kao što je prekidač. Analiza je vršena kod problema koji se pojavljuju kod isključenja ovog kvara sa prekidačem visokog napona. Poteškoće koje se pojavljuju tokom isključenja kvara zbog prisutnosti komponente jednosmerne struje analizira se u potpunosti pomoću simulacija.

Softverskim paketom EMTP/ATP i PSS/E izgrađen je model za praćenje ponašanja generatora tokom uključenja nesinhroniziranog generatora u energetska mrežu pod različitim uglovima između generatora i mreže. Modeliran je generator sa svim parametrima a sa druge strane ekvivalentna mreža.

Softverskim paketom MATLAB su izračunate efektivne vrijednosti struje (RMS) [70], [71], [72].

Podaci modela za simulacije odnosno za ekvivalentnu mrežu (snaga kratkog spoja na sabirnicama 400 kV, $I_{k3}=20$ kA, $I_{k1}=21$ kA), uzete su od simulacije mreže slika 47 [6], [58].



Slika 47. Realna šema generatora na koji se desio kvar i na koji su vršene simulacije.

Slika 15 prikazuje realnu jednopolnu šemu blok generatora-step up transformatora (400 kV strana TS “Kosovo B”), dok slika 47 je ista kao jednopolna šema samo što su u njoj poznate ekuivalente vrednosti za mrežu i struje I_{k3} i I_{k1} . Ova će se šema upotrebiti za simulacije na sofverima EMTP/ATP i PSS/E, koja je ista sa modeliranom šemom na EMTP/ATP (slika 42).

Korišćenjem navedenog softvera urađene su simulacije posmatranog slučaja (dana 23.08.2011) kao i dodatne simulacije [6], [58].

Kod svih ostalih uglova (30° , 60° , 80° , 90° i 100°), prisutnost visoke vrednosti komponente jednosmerne struje u pojedinim fazama (slike 46 do 50 daju oscilacije za sve tri faze generatora za različite uglove, faze su date u boji, faza A crvena, faza B zelena i faza C plava) prouzrokuju kašnjenje prolaska faznih struja kroz nulu i do 200 ms, što sprečava gašenje luka u prekidaču, a pod nekim okolnostima dovodi i do oštećenja prekidača [6], [58].

Tokom kvarova kao rezultat kratkih spojeva, početna vrednost komponente jednosmerne struje je veća nego u slučajevima uključenja prekidača nesinhroniziranog generatora. Međutim, komponenta jednosmerne struje se gasi vrlo brzo i to omogućava da izmenična komponenta prolazi kroz nulu. U slučaju nesinhroniziranog uključenja vremensko zatezanje jednosmerne struje je znatno duže što prouzrokuje produženje vremena za prolazak izmenične komponente kroz nulu.

Simetrična komponenta i nesimetrična struja kvara pojavljuju se takođe tokom uključenja nesinhroniziranog generatora preko prekidača na viskonaponskoj strani mreže.

Ovo je slučaj koji se desio u TE “Kosovo B”.

Na slici 22 (poglavlje 5), vidi se kako su se mijenjali struje u generatoru tokom nesinhroniziranog uključanja na mrežu (u toku posmatranog događaja).

Ugao od 114° je ugao pod kojim se dogodio incident (realni događaj), dok ostali uglovi (30° , 60° , 80° , 90° , 100° i 0°), su uzeti proizvoljno da se pokaže šta se dešava u tim slučajevima (samo za potrebe analize) [6], [73], [74].

Na slici 48 data je simulacija koja prikazuje oscilacije generator-mreža tokom uključanja nesinhroniziranog generatora pod uglom od 114° .

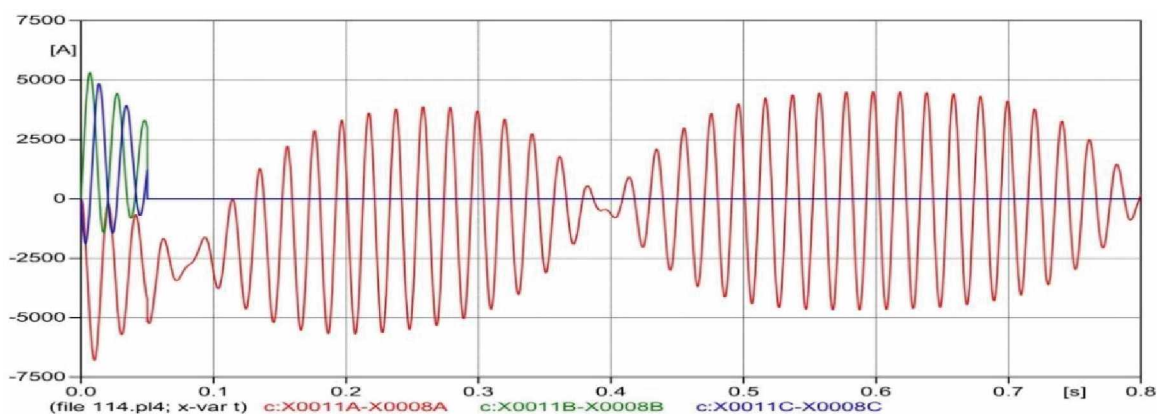
Potrebno je da se uzme u obzir da je generator bio povezan sa mrežom preko transformatora koji ima fazno pomeranje (faza razlika) od 150° (stepeni), između primara i sekundara.

Dakle, u vreme kada se je dogodilo nesinhronizirano uključanje, generator na 24 kV strani je imao ugao od -91° i bio priključen preko transformatora 24/400 kV sa faznim pomakom od 150° , što znači da je na naponskom nivou od 400 kV bio ugao od 59° ($150^\circ - 91^\circ = 59^\circ$) dok je u tom trenutku mreža imala fazni pomak od -55° .

U tom slučaju razlika između ugla -55° i ugla od 59° je 114° . Dakle prekidač na nivou od 400 kV je bio između ova dva vektora:

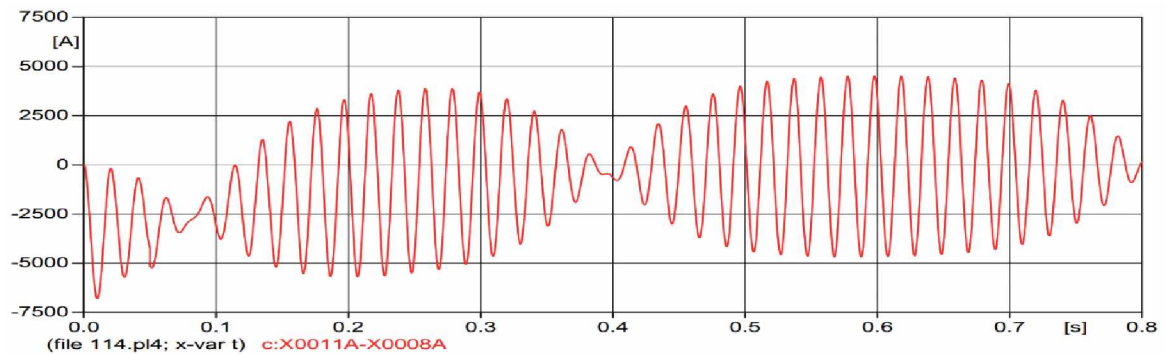
- -55° sa strane jake mreže i
- 59° sa strane generatora.

Što dovodi do ugla od 114° .

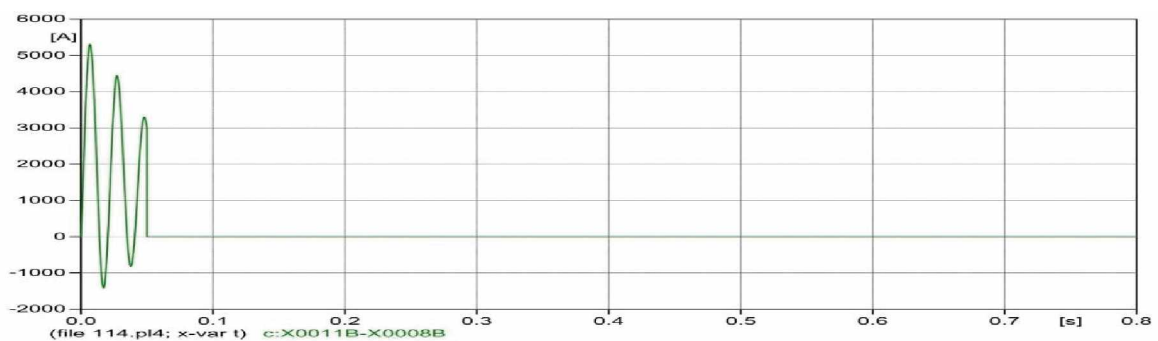


Slika 48. Simulacija sinhronizacije generatora u energetsom sistemu pod širim uglom 114° .

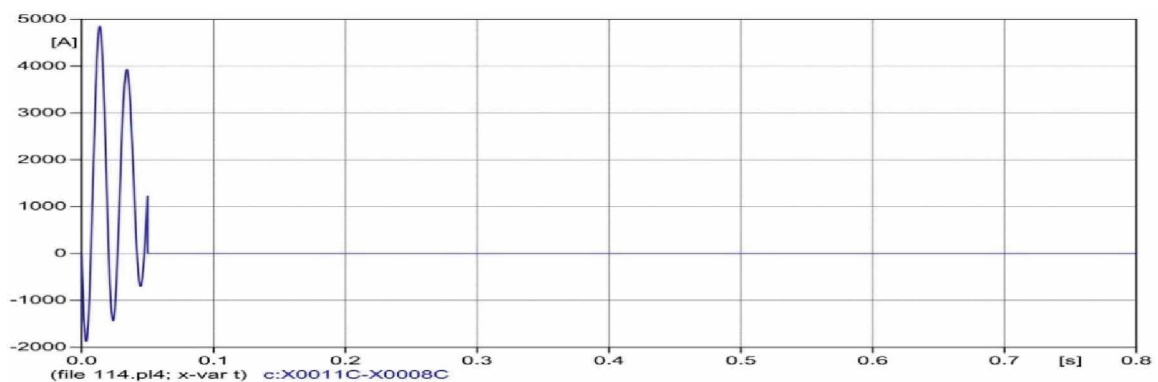
Na slikama 48 a, 48 b i 48 c data su simulacija koja prikazuje oscilacije generator-mreža tokom uključenja nesinhroniziranog generatora pod uglom od 114° odvojeni za svaku fazu.



Slika 48 a. Simulacija sinhronizacije generatora u energetsom sistemu pod širim uglom (faza A) 114° .



Slika 48 b. Simulacija sinhronizacije generatora u energetsom sistemu pod širim uglom (faza B) 114° .

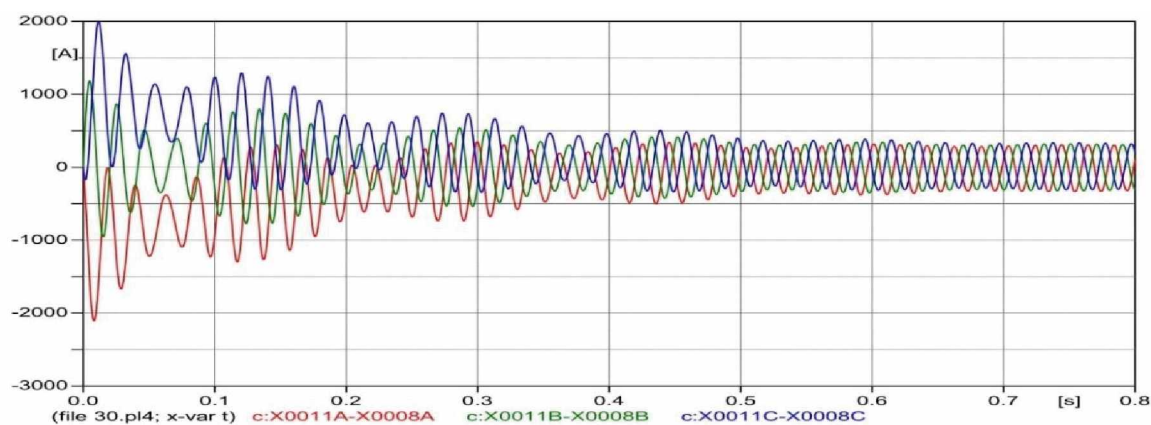


Slika 48 c. Simulacija sinhronizacije generatora u energetsom sistemu pod širim uglom (faza C) 114° .

Analizirajući krivulje na slici 48, može se videti da je trajanje osciliranja približno isto sa onom na slici 22, oblik krivulje je isti kao što je i jednosmerna komponenta (DC) ista, vrlo visoka u oba slučaja uključujući i vremensku konstantu.

Na slici 49 data je simulacija koja pokazuju oscilacije generator-mreža tokom uključjenja nesinhroniziranog generatora pod uglom od 30° .

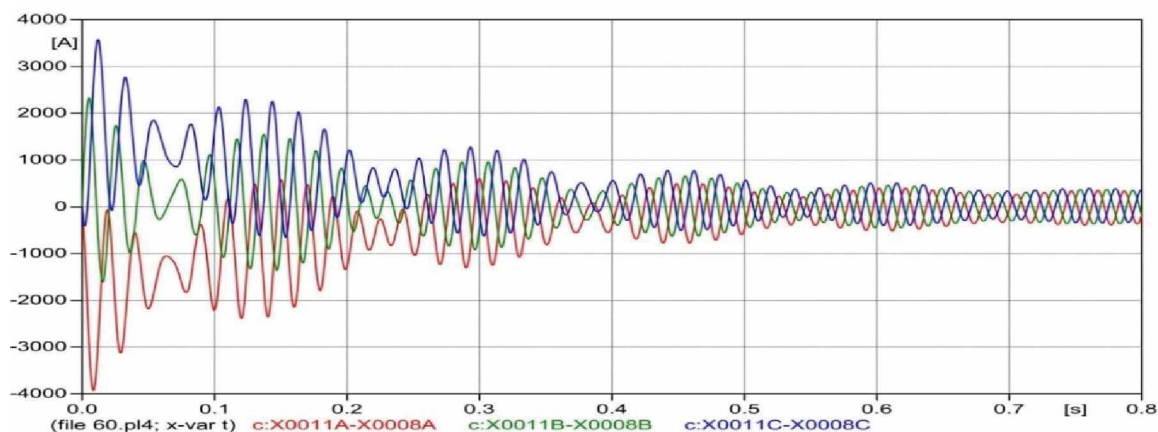
Sa slike se može videti da se za ugao 30° , negde nakon 50 ms, skoro sinhronizuje sa mrežom (tj. oscilovanje sa mrežom se stabilizira), ovde se vidi da struja u fazi A ne prolazi kroz nulu sve do vremena 0.1051 s [6], [58].



Slika 49. Simulacija sinhronizacije generatora u energetske sisteme pod uglom 30° .

Na slici 50 data je simulacija koja pokazuju oscilacije generator-mreža tokom uključjenja nesinhroniziranog generatora pod uglom od 60° .

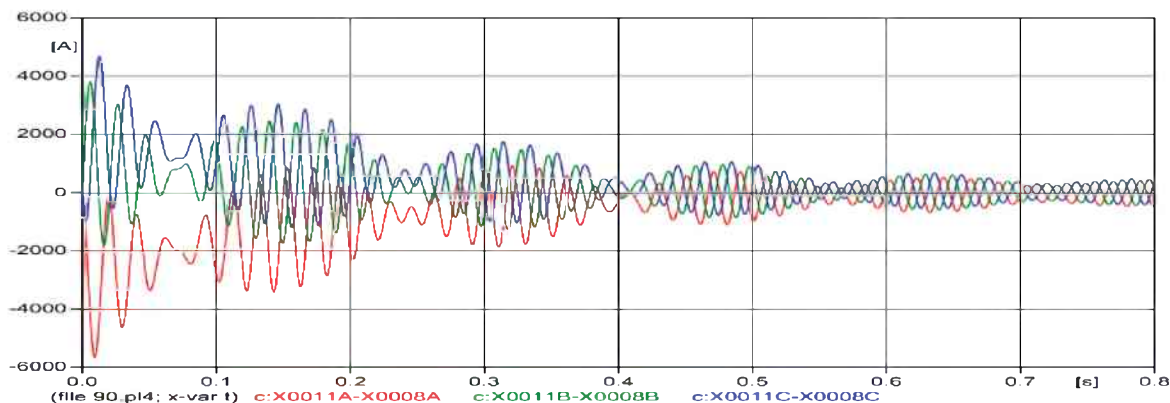
Sa slike se može videti da se za ugao 60° negde nakon 70 ms, skoro sinhronizuje sa mrežom (tj. oscilovanje sa mrežom se stabilizuje), ovde se vidi da struja u fazi A ne prolazi kroz nulu do vremena 0.1083 s.



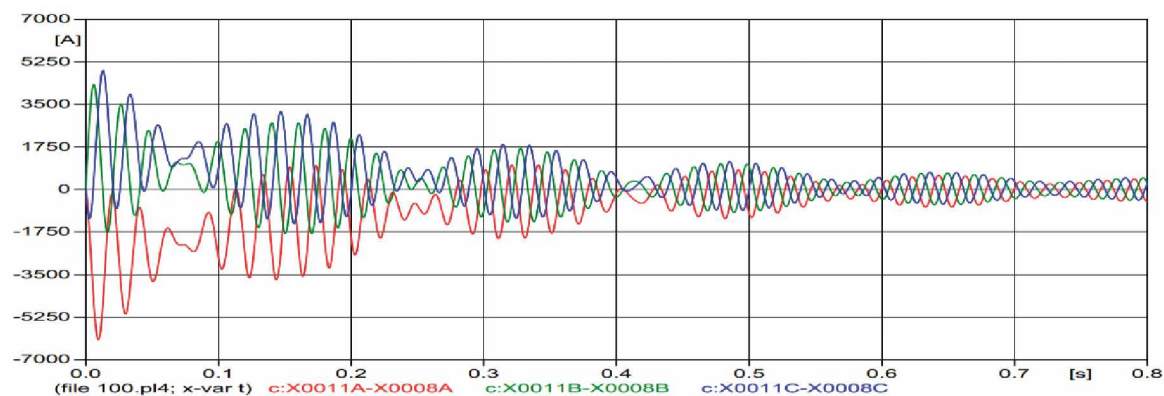
Slika 50. Simulacija sinhronizacije generatora u energetske sisteme pod uglom 60° .

Na slikama 51 i 52 su prikazane simulacije koje pokazuju oscilacije generator-mreža tokom uključanja nesinhroniziranog generatora pod uglovima 90° i 100° .

Sa slika se vidi da za ugao 90° i 100° čak i nakon 80 ms i dalje imaju oscilacije i nisu sinhronizovani sa mrežom, za ugao 90° se vidi da struja u fazi A ne prolazi kroz nulu do vremena 0.1114 s, dokle za ugao 100° , se vidi da struja u fazi A ne prolazi kroz nulu do vremena 0.1127 s.



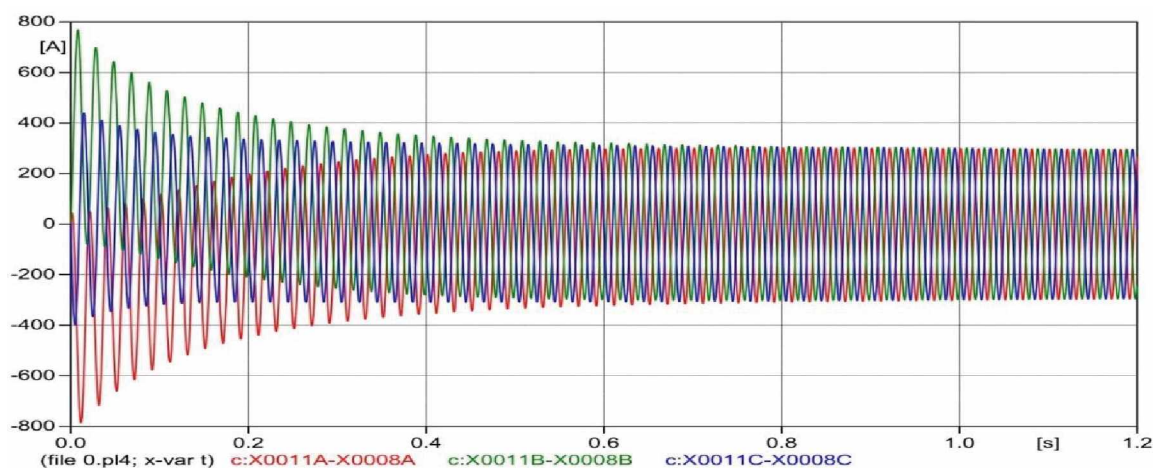
Slika 51. Simulacija sinhronizacije generatora u energetski sistem pod uglom 90° .



Slika 52. Simulacija sinhronizacije generatora u energetski sistem pod uglom 100° .

Sa slika (48, 49, 50, 51 i 52) se vidi da što je veći ugao, veće su struje, isto tako i vreme sinhronizacije generatora sa mrežom je duže.

Na slici 53 (simulacija za ugao 0° , uzeto kao primer uticaja ugla) vidi se da je jednosmerna komponenta struje mala i ima simetriju oscilacije struja. Vremenska konstanta je kratka, što podrazumeva da se DC komponenta brzo gasi (prigušuje).



Slika 53. Simulacija sinhronizacije generatora u energetske sistem pod uglom 0° .

U slučaju kada je ugao napona generatora i mreže nula (0°), jednosmerna komponenta struje se brzo gasi i sve tri fazne struje prolaze kroz nulu, što omogućuje brzo gašenje električnog luka.

Za ostale uglove je drugačije jer prisutnost komponente jednosmerne struje visoke vrednosti u pojedinim fazama, kasni prolazak kroz nulu do 200 ms i to prouzrokuje da se električni luk u prekidaču ne ugasi i tako u nekim okolnostima mogu nastati i njegova oštećenja [6], [58].

Analizirani su nekoliko slučajeva nesinhroniziranih uključanja (slike od 48 do 52) kako bi se utvrdile oscilacije napona, struje i snage u generatoru za različite uglove.

Dobijeni rezultati pokazuju da vremensko zatezanje ima uticaja na prolazak komponente izmenične struje kroz nulu.

Iz ovih simulacija može se videti da, zavisno o uglu u kojem je generator spojen na mrežu, struje se razlikuju po pojedinim fazama, kao i vrednost DC komponente. To ima uticaj na vremensko zatezanje prolazka kroz nulu komponente izmenične struje.

Vidi se da zbog komponente jednosmerne struje, struja ne prolazi kroz nulu u određenim fazama za nekoliko perioda, osim za slučaj kad je ugao nula. Simulacije su vršene za različite uglove između mreže i proizvodnje, uključujući ugao od 114° stepeni (ugao od 114° je ugao pod kojim se dogodio incident) [6], [58].

Kratak spoj je simuliran (sa softverom PSS/E) na sabirnice 400 kV kad je generator priključen. Rezultati struje kratkog spoja, maksimalna struja, snaga kratkog spoja i vrednost komponente jednosmerne struje su:

$$I_{k3} = 22,890 \text{ (kA)},$$

$$I_{dyn} = 56,619 \text{ (kA)},$$

$$S_{ks} = 15,858 \text{ (GVA)} \text{ i}$$

$$I_{dc} = 7,274 \text{ (kA)}.$$

Ovi podaci nam omogućavaju određivanje ekvivalentne mrežne impedance koja će se koristiti za simulacije sa EMTP/ATP softverom [6], [58].

Kroz ove simulacije (slike 48, 49, 50, 51 i 52) može se videti da su očigledne razlike oscilacija napona i struje zavino od ugla u momentu nesinhronog uključanja generatora.

Ove oscilacije se primećuju i po formi krivulja sa prisustvom visoke jednosmerne komponente struje, što utiče na vreme kašnjenja prelaza AC komponente kroz nulu [6], [58], [61].

Validnost modela za dalje analize biće proverena upoređenjem dobijenih rezultata simulacijom sa snimljenim rezultatima tokom posmatranog događaja.

U tom cilju u narednom poglavlju dati su rezultati simulacija pri istim vrednostima ulaznih podataka kao u realnom slučaju.

9. EKSPERIMENT I REZULTATI SIMULACIJA

Za analizu elektromagnetnih prelaznih pojava, koristi se EMTP/ATP softverski paket. U ovom paketu je kreiran model za dinamičku analizu generatora i ekvivalentne mreže za slučaj kada je priključen generator.

Rezultati nekoliko simulacija primenom urađenog modela se dobro slažu sa snimljenim rezultatima u toku razmatranog događaja u realnom vremenu.

Da bi se model validirao (potvrdio), korišćena je simulacija za isti ugao od 114° , pod kojim se dogodilo uključenje nesinhroniziranog generatora u mreži.

Za simulacije je upotrebljena šema softvera EMTP/ATP (slika 42, poglavlje 7) sa potrebnim podacima:

Generator: $U_n = 24 \text{ kV}$, $S_n = 399 \text{ MVA}$, $\cos\varphi = 0.85$,

Step up transformator: $24/400 \text{ kV/kV}$, $U_k = 11\%$, $S_n = 400 \text{ MVA}$ i

Kućni transformator: $S_n = 40/20/20 \text{ MVA}$, $24 \text{ kV}/6.6/6.6 \text{ kV}$ [6].

Takođe su uzete u obzir vrednosti određene softverom PSS/E (poglavlje 8), podaci koji omogućavaju određivanje ekvivalentne mrežne impedance koja će se koristiti za simulacije sa EMTP/ATP softverom.

Korišćenjem ovih podataka vršene su simulacije preko softvera MATLAB, odakle su određene i vrednosti I_{rms} (efektivna vrednost struje) vrednosti kojih su date u tabeli 17 [6], [58].

Tabela 17. Vrednosti I_{rms} (efektivna vrednost struje) određeno softverom MATLAB za ugao 114° .

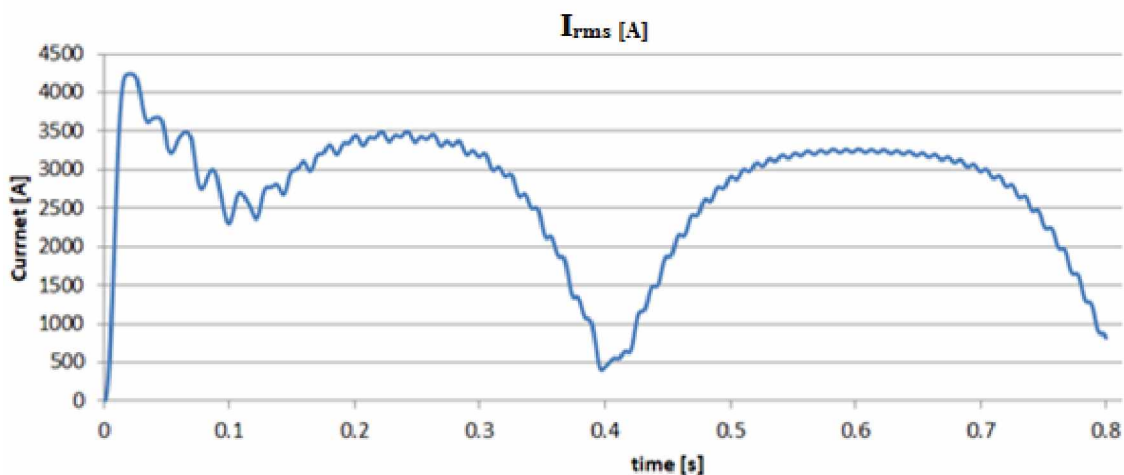
| T(ms) | I_{rms} (kA) |
|-------|----------------|
| -10 | 3.46 |
| 0 | 4.24 |
| 10 | 3.62 |
| 20 | 3.6 |
| 30 | 3.21 |
| 40 | 3.26 |

Na slici 54 prikazano je efektivna vrednost struja na fazi A, dobijena korišćenjem softvera MATLAB u toku simulacije.

Sa slike 54 vidi se da je maksimalna vrednost struje dostignuta za vrlo kratko vreme.

Naime, za vreme od 0.0101 s dostigne svoju maksimalnu vrednost od 4200.39 A, a zatim počinju oscilacije zbog nemogućnosti sinhronizacije sa mrežom i počinje da polako opada vrednost struje sve do isteka vremena od 0, 1 s.

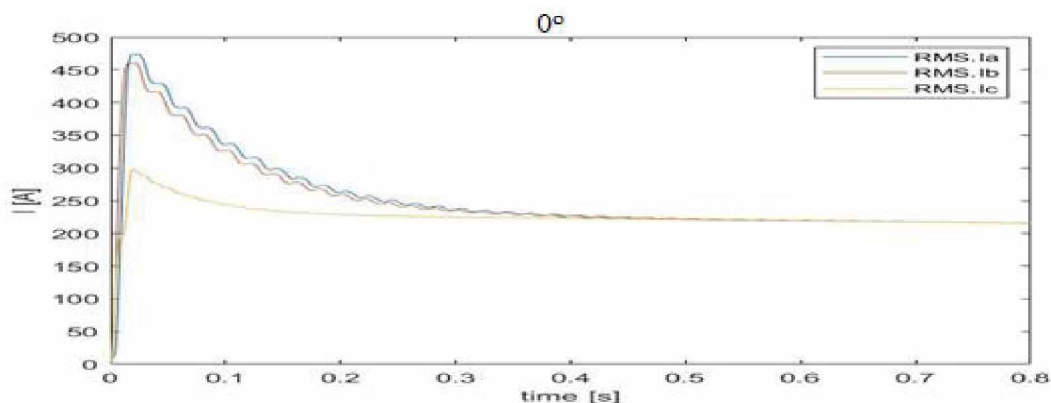
Pošto u tom vremenu ne uspeva isključenje faze A dok se faze B i C isključuju, onda nakon vremena od 0.1 s sve do 0.25 s ima se lagano povećanje vrednosti struje, i posle isteka vremena od 0.25 s ponovo počinje da struja opada, i u vremenu od 0.4 s dostigne minimalnu vrednost. Posle isteka vremena od 0.4 s, ponovo počinju da se ponavljaju oscilacije do momenta eksplozije prekidača zbog nemogućnosti isključenja faze A.



Slika 54. Efektivna vrednost struja za ugao 114° .

Takođe na slikama 55, 56, 57, 58 i 59 prikazano je efektivna vrednost struja zavisno od vremena za nekoliko uglova (slika 55 pokazuje simulacija za ugao 0° , uzeto kao primer uticaja ugla) uključenja nesinhroniziranog generatora na mrežu, i to za uglove od 30° , 60° , 90° i 100° (određeno preko softvera MATLAB u toku simulacije).

Dok se u tabelama 18, 19, 20, 21 i 22 date maksimalne i minimalne efektivne vrednosti struja za uglove od 30° , 60° , 90° , 100° , i 0° [6].

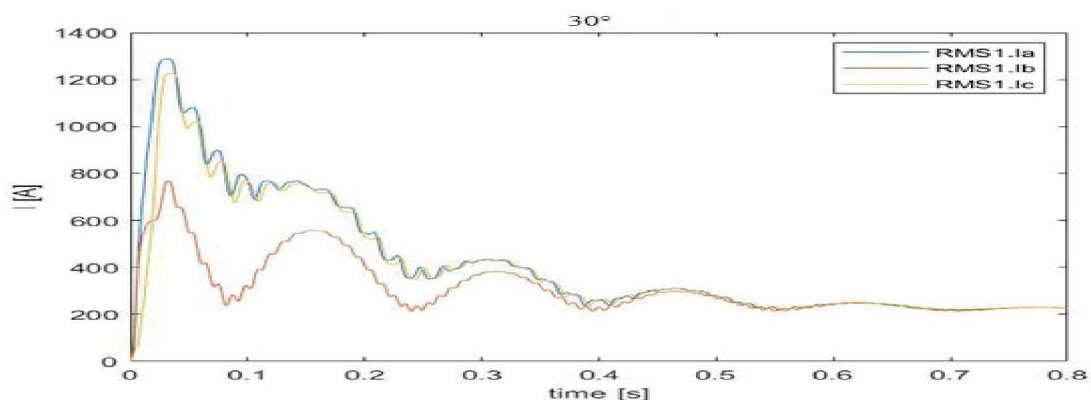


Slika 55. Efektivna vrednost struja za ugao 0° .

Tabela 18. Maksimalna i minimalna efektivne vrednosti struja za ugao od 0° .

| 0° | | | |
|-----------|--------|--------|--------|
| | Ia [A] | Ib [A] | Ic [A] |
| Irms max: | 473.48 | 460.56 | 297.79 |

Sa slike 55 se vidi da je maksimalna vrednost struje u fazi A, sa vrednošću $I_a = 473.48$ A, dok je minimalna vrednost struje u fazi C, sa vrednošću $I_c = 297.79$ A. Sa simulacija za ugao 0° , vidi se da ima simetriju oscilacije struja, jednosmerna komponenta struje se brzo gasi, što omogućuje brzo gašenje električnog luka.

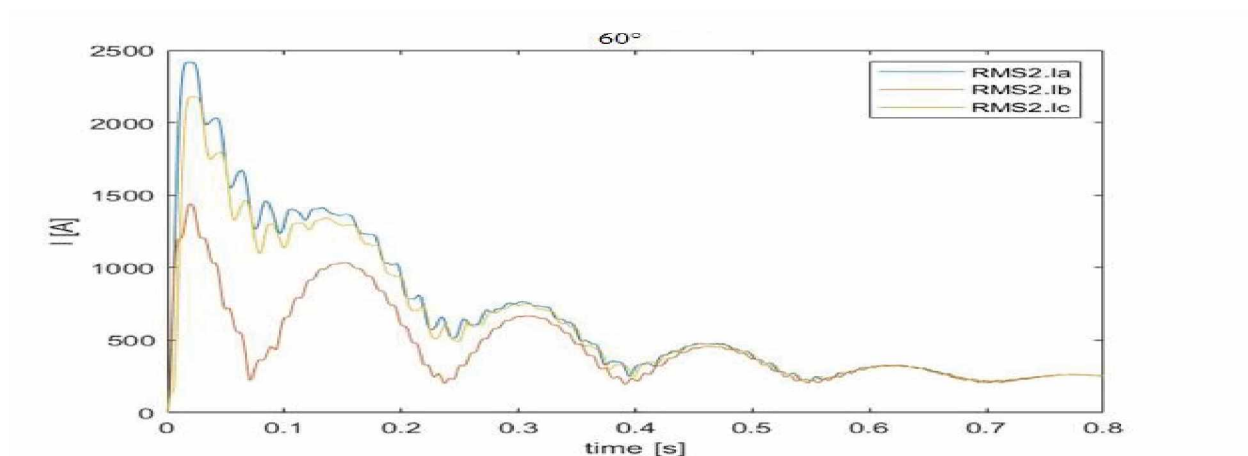


Slika 56. Efektivna vrednost struja za ugao 30° .

Tabela 19. Maksimalna i minimalna efektivne vrednosti struja za ugao od 30° .

| 30° | | | |
|------------|----------|--------|----------|
| | Ia [A] | Ib [A] | Ic [A] |
| Irms max: | 1,287.44 | 768.40 | 1,225.02 |

Sa slike 56 se vidi da je maksimalna vrednost struje u fazi A, sa vrednošću $I_a = 1,287.44$ A, dok je minimalna vrednost struje u fazi B, sa vrednošću $I_b = 768.40$ A. Sa simulacija se može videti da se za ugao 30° , negde nakon 50 ms, skoro sinhronizuje sa mrežom.

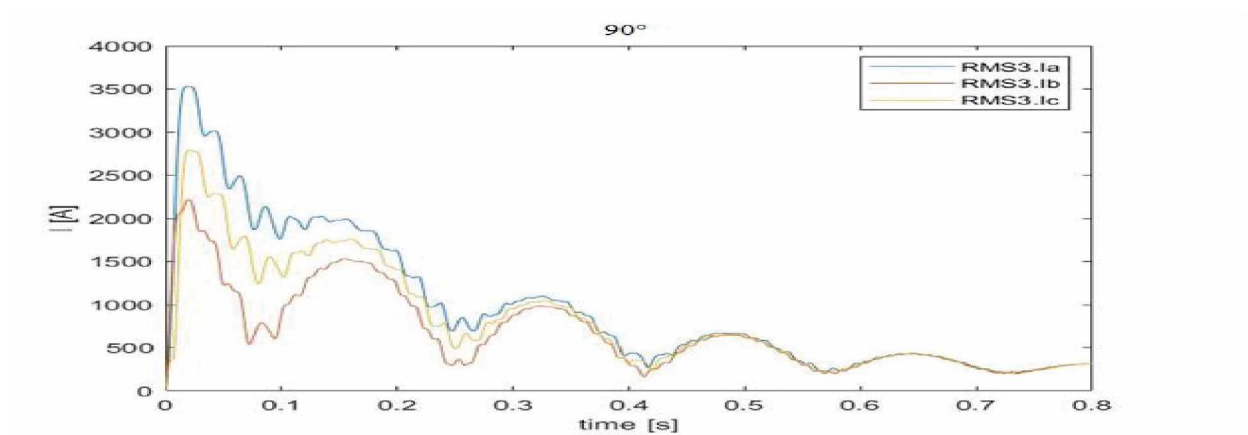


Slika 57. Efektivna vrednost struja za ugao 60° .

Tabela 20. Maksimalna i minimalna efektivne vrednosti struja za ugao od 60° .

| 60° | | | |
|------------|-----------|-----------|-----------|
| | I_a [A] | I_b [A] | I_c [A] |
| Irms max: | 2,418.39 | 1,439.87 | 2,179.77 |

Sa slike 57 se vidi da je maksimalna vrednost struje u fazi A, sa vrednošću $I_a = 2,418.39$ A, dok je minimalna vrednost struje u fazi B, sa vrednošću $I_b = 1,439.87$ A. Sa simulacija se može videti da se za ugao 60° , negde nakon 70 ms, skoro sinhronizuje sa mrežom.

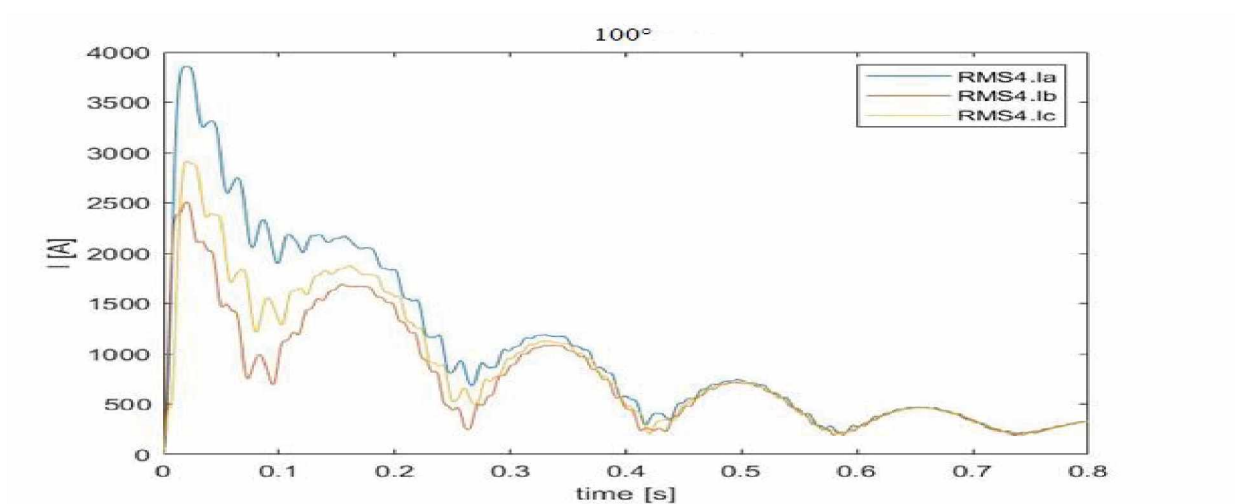


Slika 58. Efektivna vrednost struja za ugao 90° .

Tabela 21. Maksimalna i minimalna efektivne vrednosti struja za ugao od 90° .

| 90° | | | |
|------------|----------|----------|----------|
| | Ia [A] | Ib [A] | Ic [A] |
| Irms max: | 3,530.00 | 2,219.04 | 2,793.49 |

Sa slike 58 se vidi da je maksimalna vrednost struje u fazi A, sa vrednošću $I_a = 3,530.00$ A, dok je minimalna vrednost struje u fazi B, sa vrednošću $I_b = 2,219.04$ A. Sa simulacija se može videti da se za ugao 90° , i nakon 80 ms i dalje imaju oscilacije i nisu sinhronizovani sa mrežom.



Slika 59. Efektivna vrednost struja za ugao 100° .

Tabela 22. Maksimalna i minimalna efektivne vrednosti struja za ugao od 100° .

| 100° | | | |
|-------------|----------|----------|----------|
| | Ia [A] | Ib [A] | Ic [A] |
| Irms max: | 3,855.11 | 2,509.16 | 2,912.10 |

Sa slike 59 se vidi da je maksimalna vrednost struje u fazi A, sa vrednošću $I_a = 3,855.11$ A, dok je minimalna vrednost struje u fazi B, sa vrednošću $I_b = 2,509.16$ A.

Sa simulacija se može videti da se za ugao 100° , i nakon 80 ms i dalje imaju oscilacije i nisu sinhronizovani sa mrežom, isto kao i za ugao 90° .

Iz simulacija (slike 55, 56, 57, 58 i 59) se vidi da, što je veći ugao, veće su struje, isto tako i vreme sinhronizacije generatora sa mrežom je duže.

Dobijeni podaci će poslužiti za upoređivanje realnih vrednosti (snimljenih rezultata u toku događaja) sa simuliranim vrednostima (određene pomoću softvera MATLAB) [6], [58].

Osim za ugao 114° učinjene su simulacije još za nekoliko uglova uključenja nesinhroniziranog generatora na mrežu, i to za uglove od 30° , 60° , 90° i 100° .

Svrha ovih simulacija je pronalaženje najkritičnijeg slučaja i postavljanje zaštitnih mera od ove pojave.

U sledećem poglavlju, rezultati dobijeni simulacijom preko softvera EMTP/ATP, će se upoređivati sa rezultatima koji su snimljeni u realnom vremenu (realni u toku događaja), i na osnovu izvedenih zaključaka dati preporuke za dimenzioniranje generatorskog prekidača i preduzimanje potrebnih mera za sprečavanje ovih pojava.

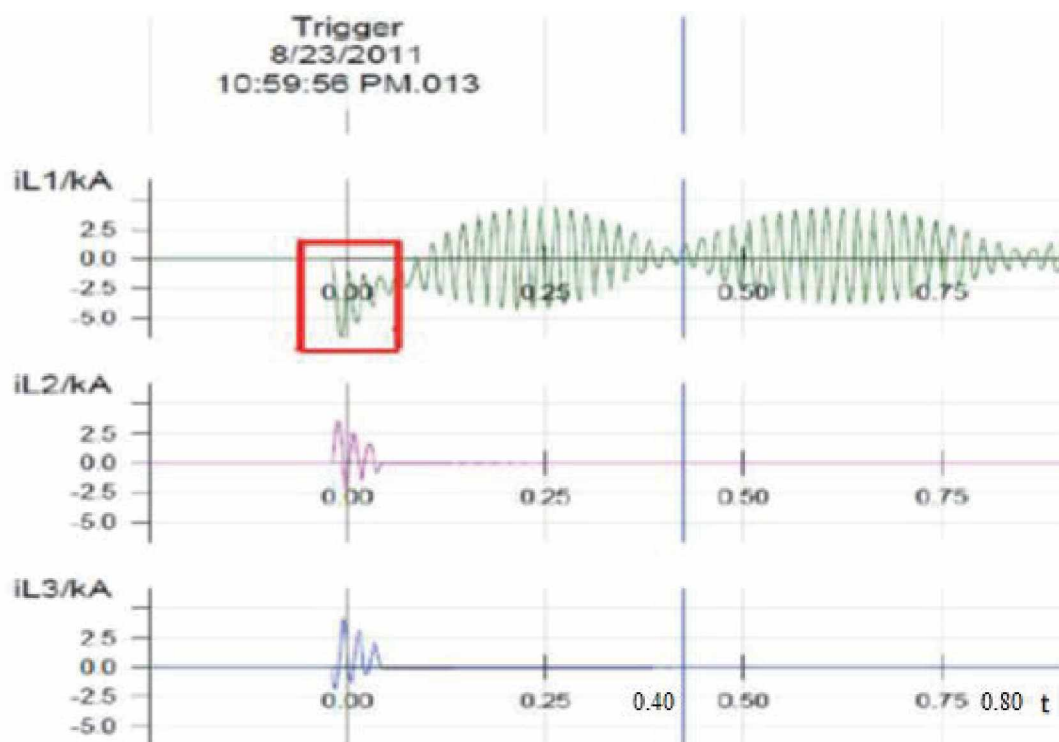
10. ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA

U cilju verifikacije dobijenih, snimljeni rezultati (realni u toku događaja) su upoređivani sa rezultatima simulacija dobijenih uz pomoć softvera EMTP/ATP.

Ove simulacije pružaju informacije o fizičkom fenomenu i njegovim posledicama, tako da upoznavajući fizičke efekte preduzimaju se mere za zaštitu opreme i elektroenergetskog sistema od posledica ove pojave.

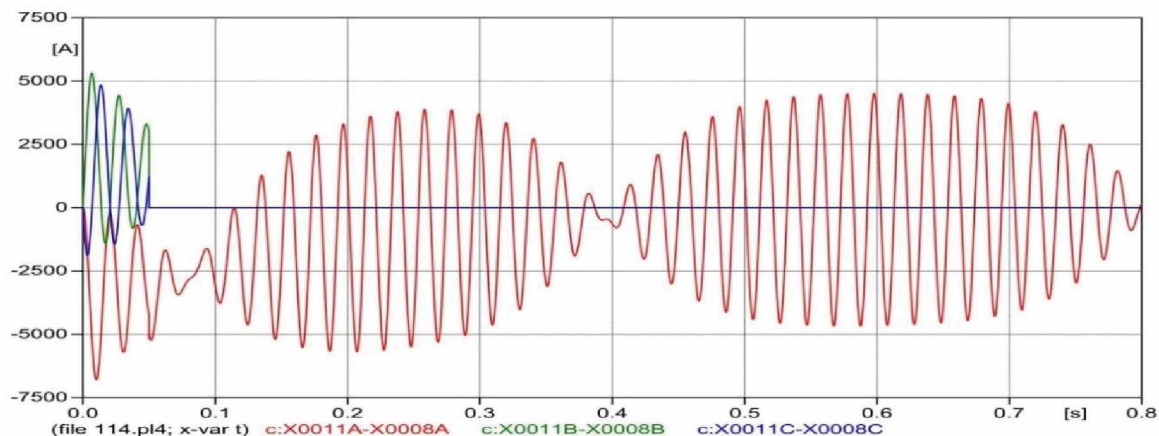
Na slikama 60 i 61 su prikazani grafikoni snimljenih (slika 60 je ista kao slika 22 u toku realnog događaja) i simuliranih rezultata (slika 61 je ista kao slika 48, simuliranih uz pomoć softvera EMTP/ATP).

Iz slike 60 se može videti da je bilo uspešno isključenje prekidača preko releja u fazama B i C (crvena i plava krivulja), dok je isključenje faze A (zelena krivulja) bilo neuspešno zbog ne-prolaska jednosmerne struje kroz nulu.



Slika 60. Oscilogram struja na visokom naponu 400 kV generatora-blok transformatora tokom uključenja-isključenja prekidača (u toku događaja).

Na slici 61 prikazana je simulacija pomoću softvera za uključenje nesinhroniziranog generatora na mrežu pomerenim za ugao od 114° . Ovde se vide oscilacije struja generatora kao rezultat uključivanja nesinhroniziranog generatora pod uglom od 114° . To je kritični ugao pod kojim se je dogodilo uključivanje nesinhroniziranog generatora.



Slika 61. Simulacija sinhrizacije generatora u energetskom sistemu pod širokim uglom 114° .

Analizirajući krivulje na slikama 60 i 61, može se videti da su forma i trajanje osciliranja približno ista, kao što je i DC komponenta isto veoma visoka u oba slučaja, uključujući i vremensku konstantu (može se viditi da je približnost rezultata zadovoljavajuća, tabela 23) [6], [58].

Na slici 61 isključivanje faze B i C je korišćeno sa ciljem da se vide trenutne oscilacije struja u sve tri faze tokom uključivanja nesinhroniziranog generatora na mrežu.

Simulacija za kritični ugao pod kojim se je uključio nesinhronizirani generator na mrežu je 114° odnosi se na konkretan slučaj koji se je dogodio. Pošto se radi za simulacije izvedenim softverom, to ne znači da će od početka simulacija krivulje imati isti oblik, kao što se vidi i na slici.

Za to vreme, generator je oscilirao sa mrežom uzimajući i isporučujući energiju.

Važno je da se evidentira, da struja zbog prisustva jednosmerne komponente ne prolazi kroz nulu (što se vidi na slikama 60 i 61) za dugo vremena, što predstavlja problem za AC prekidač prilikom isključenja ove struje.

U tabeli 23 date su uporedne vrednosti grešaka u % za I_{DC} , među vrednostima dobijenih u toku realnog događaja i vrednosti dobijenih simulacijom na ekvivalentnom modelu.

Tabela 23. Uporedna tabela.

| Vrednosti u toku događaja | | Vrednosti u toku simulacije | | Prosek greške [%] |
|---------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|-------------------|
| T(ms) | I_{DC} (kA) | T(ms) | I_{DC} (kA) | |
| -10 | 2.81 | -10 | 2.86 | 2% |
| 0 | 3.6 | 0 | 3.07 | 15% |
| 10 | 3.11 | 10 | 3.13 | 1% |
| 20 | 3.07 | 20 | 2.73 | 11% |
| 30 | 2.61 | 30 | 2.86 | 10% |
| 40 | 2.6 | 40 | 2.27 | 13% |

Važno je napomenuti da uključenje nesinhroniziranog generatora na mrežu izaziva probleme ne samo na prekidaču, već i uzrokuje prenapone na transformatoru i generatoru.

Kašnjenje prolaska struje kroz nulu je prouzrokovano uglavnom zbog brzog pomeranja rotora od početnog ugla δ_0 . U ovom slučaju, konstanta inercije grupe generator-turbina ima odlučujući uticaj na ovu pojavu.

Sinhronizacija pod uglomom 114° je prilično kritična zbog odnosa $\frac{i_{dc}}{i_{ac}} = \frac{3.07}{3.41} = 0.9$, za vreme $t = 20$ ms (tabela 16).

U tabelama 24 (rezultati dobijeni u toku događaja) i 25 (rezultati dobijeni preko simulacije) date su uporedne vrednosti I_{rms} za izmerene vrednosti preko releja u vremenu kada je došlo do kvara (realnih) i izračunatih (određene) vrednosti dobijenih od simulacija pomoću softvera MATLAB za ugao 114° , ugao pod kojim se je dogodilo uključenje nesinhroniziranog generatora u mreži (razmatrani slučaj).

Tabela 24. Vrednosti I_{rms} (efektivna vrednost struje) u zavisnosti od vremena u toku razmatranog događaja (prema rezultatima navedenim u poglavlju 5, u tabeli 16).

| T(ms) | I_{rms} (kA) |
|-------|----------------|
| -10 | 3.9 |
| 0 | 4.18 |
| 10 | 3.49 |
| 20 | 3.41 |
| 30 | 2.8 |
| 40 | 2.76 |

Tabela 25. Vrednosti I_{rms} (efektivna vrednost struje) određeno softverom MATALAB za ugao 114° (dati u poglavlju 9).

| T(ms) | I_{rms} (kA) |
|-------|----------------|
| -10 | 3.46 |
| 0 | 4.24 |
| 10 | 3.62 |
| 20 | 3.6 |
| 30 | 3.21 |
| 40 | 3.26 |

Vremena u toku realnog događaja i simulacije sinhronizovana na isti trenutak, kako bi se mogle porediti dobijene vrednosti.

Dobijeni rezultati sa softverom MATALAB su vrlo približne sa snimljenim (realnim u toku događaja) [6], [58].

U tabeli 26 date su uporedne vrednosti grešaka u % za I_{rms} , među vrednostima dobijenih u toku realnog događaja i vrednosti dobijenih preko softvera (MATLB) na ekvivalentnom modelu.

Tabela 26. Uporedna tabela.

| Vrednosti u toku događaja | | Vrednosti u toku simulacije | | Prosek greške [%] |
|---------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|-------------------|
| T(ms) | I_{rms} (kA) | T(ms) | I_{rms} (kA) | |
| -10 | 3.9 | -10 | 3.46 | 11% |
| 0 | 4.18 | 0 | 4.24 | 1% |
| 10 | 3.49 | 10 | 3.62 | 4% |
| 20 | 3.41 | 20 | 3.6 | 5% |
| 30 | 2.8 | 30 | 3.21 | 15% |
| 40 | 2.76 | 40 | 3.26 | 18% |

Ekvivalentni model daje dovoljno precizne rezultate (tabela 23, 24 i 25) u poređenju sa snimljenim i simulacijom dobijenih rezultata (određeni rezultati dobijeni od simulacija pomoću softvera MATLAB što podrazumeva potvrđivanje korišćenog modela, koji se može koristiti za dalje kalkulacije i simulacije različitih događaja u sistemu [6], [58], [61].

Kroz ove simulacije (slike 48, 49, 50, 51 i 52, poglavlje 8) može se videti da se struje razlikuju po pojedinim fazama, kao i vrednost DC komponente zavisno od ugla u kojem je generator spojen na mrežu. To ima uticaj na vremensko zatezanje prolaska kroz nulu komponente izmenične struje.

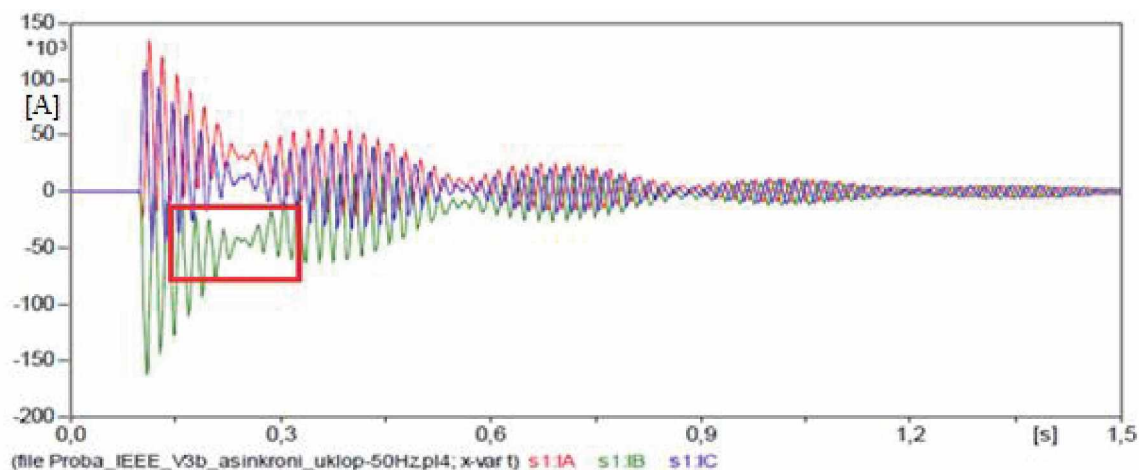
Dobijeni rezultati pokazuju da vremensko zatezanje ima uticaja na prolazak komponente izmenične struje kroz nulu. U slučaju kada je ugao napona generatora i mreže nula (0° , slika 53, poglavlje 8), jednosmerna komponenta struje se brzo gasi i sve tri faze struje prolaze kroz nulu, što omogućuje brzo gašenje električnog luka.

Za ostale uglove (slike 48, 49, 50, 51 i 52 poglavlje 8) je drugačije jer prisutnost komponente jednosmerne struje visoke vrednosti u pojedinim fazama, prouzrokuje kašnjenje prolaska kroz nulu do 200 ms i to prouzrokuje da se električni luk u prekidaču ne ugasi, što u nekim okolnostima može dovesti do oštećenja prekidača [6], [58].

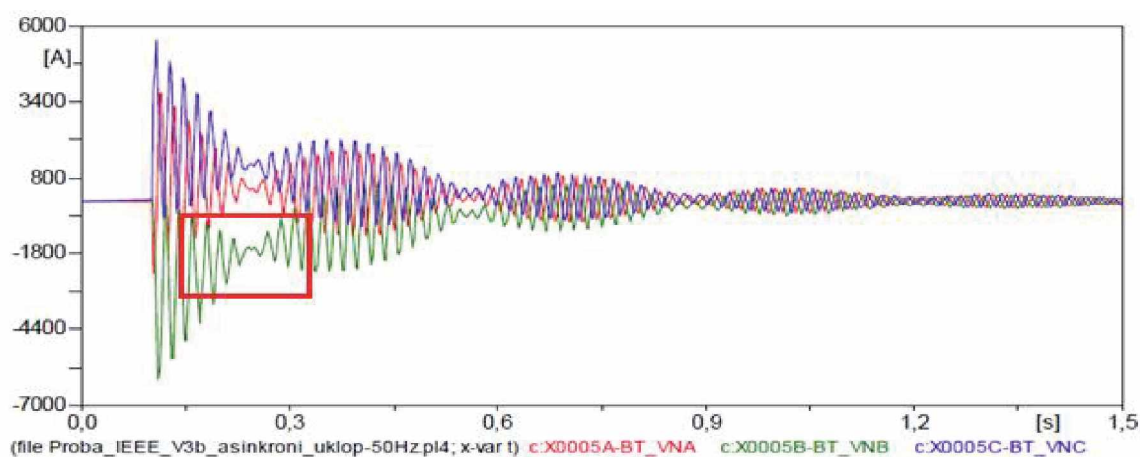
Pored analize i upoređivanja rezultata proračuna sa korišćenim programima sa rezultatima snimljenim u toku kritičkog događaja, izračunati su i analizirani i podaci dobijeni za slučajeve (ovo se uzima kao primer) uključjenja generatora pod uglom od 90° , radi upoređenja struja iz mreže sa onim iz generatora (slika 62 pokazuje struje iz generatora, dok slika 63 predstavlja struje iz mreže).

Iz grafikona se vidi da je kritična faza C u oba slučaja, zato što struja ne prolazi kroz nulu za vreme od približno 150 ms (površina prikazana u kvadratnoj crvenoj boji), to predstavlja problem za isključenje od strane prekidača, dok sa druge strane struje u fazama A i B kroz sve vreme oscilacija prolaze kroz nulu.

U svim slučajevima, trenutak uključjenja je na $t = 100$ ms, i to u trenutku kada jedan od generatorskih napona prolazi kroz nulu (maksimalna DC komponenta) [6].



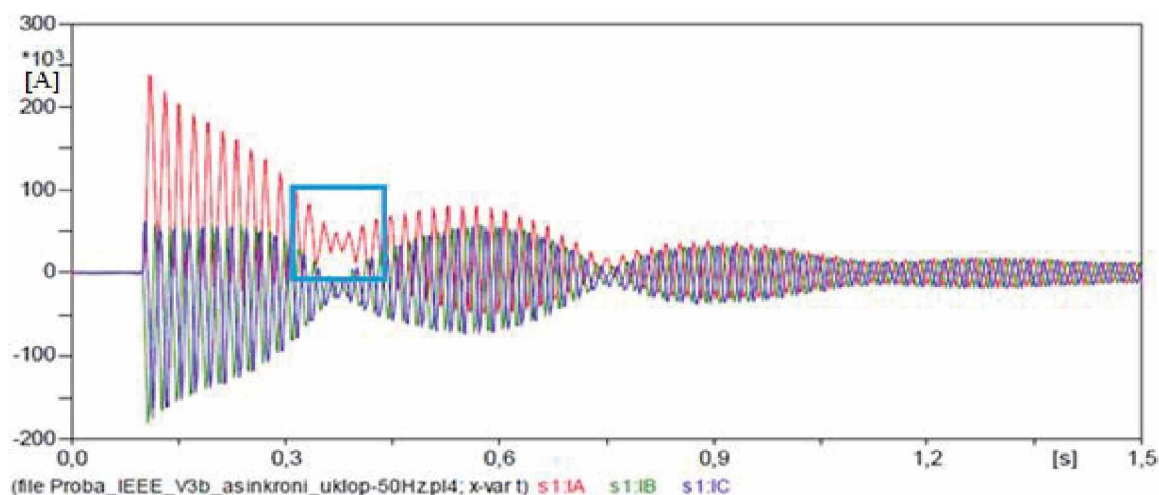
Slika 62. Struje iz generatora.



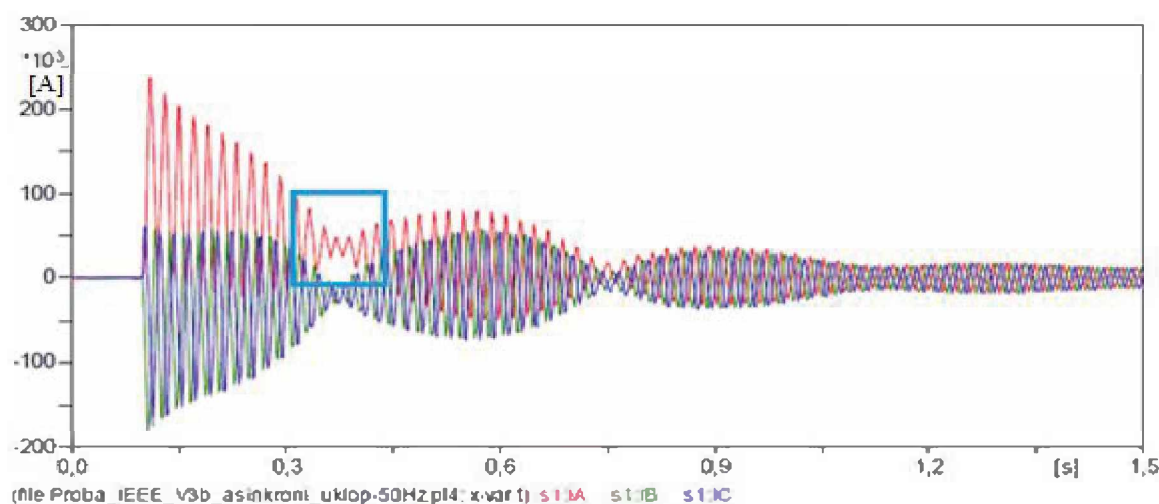
Slika 63. Struje iz mreže.

Na slikama 64 i 65 predstavljene su simulacije za upoređenje struja iz mreže sa onim iz generatora u momentu uključenja pod uglom od 180^0 , (slika 64 prikazuje struje iz generatora, dok slika 65 predstavlja struje iz mreže).

Iz grafikona se vidi da je u ovom slučaju kritična faza A u oba slučaja, zato što struja ne prolazi kroz nulu za vreme od približno 130 ms (površina prikazana u kvadratnoj plavoj boji), što predstavlja problem kod isključenja prekidača, dok sa druge strane struje faza B i C kroz sve vreme oscilacija prolaze kroz nulu.



Slika 64. Struje iz generatora.

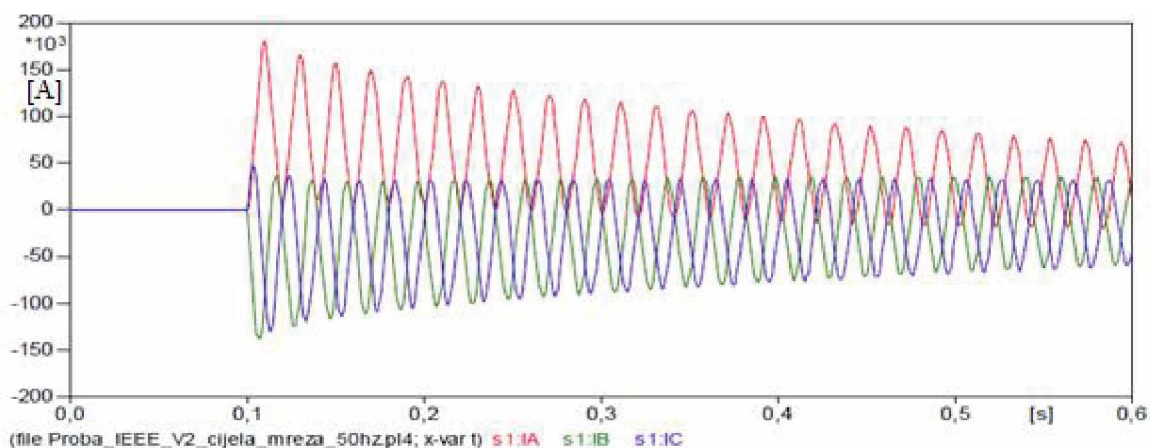


Slika 65. Struje iz mreže.

Iz ovoga proizilazi da ako je uključenje nesinhroniziranog generatora izvršeno pod različitim uglovima onda se relevantne struje, koje su ključne kod isključenja, sa strane prekidača menjaju od jedne faze na drugu fazu.

U slučaju 90° , faza C je bila kritična kako za struje iz generatora, tako i za struje iz mreže, dok je u slučaju uključnja nesinhroniziranog generatora pod uglom od 180° , kritična je faza A kako za struje iz generatora, tako i za struje iz mreže [6].

Za upoređivanje, je prikazan (slika 66) oscilogram struja kod simuliranog trolnog kratkog spoja na terminalima generatora.



Slika 66. Struje iz generatora, u sve tri faze, pri trolnom kratkog spoju na terminalima generatora.

Iz slika 62, 63, 64, 65 i 66 se vidi da se tokom uključenja nesinhroniziranog generatora struje previše povećavaju, što je gotovo isto kao i u slučaju kratkog spoja.

Amplitude struja se međusobno razlikuju u zavisnosti od stepena asinhronizma u trenutku uključivanja. U svakom slučaju, s povećanjem ugla odstupanja povećavaju se strujna naprezanja a time i mehanička naprezanja generatora.

Sa slike 66 se vidi da je maksimalna struja kratkog spoja u fazi A na generatoru oko 175 A, dok je ona tokom uključenja nesinhroniziranog generatora pod uglom od 90° negde oko 130 kA, što znači da tokom uključenja nesinhroniziranog generatora pod uglom 90° struje su manje od struja trofaznog kratkog spoja ali se primećuje da su u oba slučaja struje kao veličine sa prilično visokim vrednostima.

U slučaju uključenja nesinhroniziranog generatora pod uglom od 180° maksimalna struja je u fazi A i to u vrednosti od 230 kA, što znači da je veća od struja trofaznog kratkog spoja. Ovim simulacijama (slike 62, 63, 64, 65 i 66) se vidi da su u oba slučaja vrednosti struja visoke, kako kod uključenja nesinhroniziranog generatora tako i kod trofaznog kratkog spoja, samo što kod uključenja nesinhroniziranog generatora, vrednost struje zavisi od ugla pod kojim se je uključeno dogodilo.

Sa simulacija prikazanim u slikama 62, 63, 64, 65 i 66 se vidi da struje u slučaju uključenja nesinhroniziranog generatora mnogo osciliraju, ali se brzo gase (oko 150 ms), a zatim ponovo rastu, dok se kod kratkog spoja, oscilacije struja se kontinuirano smanjuju u skladu sa subtranzijentnim, tranzijentnim i stacionarnim reaktancama generatora [6], [58].

11. ZAKLJUČCI

Prekidači u visokonaponskim razvodnim postrojenima su uređaji koji služe za uključenje i isključenje strujnih krugova u normalnom pogonu, i za isključenje strujnih krugova u havarijskim režimima. Prekidači snage predstavljaju jedan od najvažnijih elemenata elektroenergetskog sistema jer pored normalnih operativnih radnji u sistemu, oni štite mrežu od posledica havarija u energetsom sistemu.

Zbog njihovog sigurnog i vrlo brzog delovanja, efikasnosti u otklanjanju kvarova, i ostalih prednosti, prekidači sa gasom SF₆ ugrađuju se, u novije vreme skoro u svim prenosnim sistemima.

Ugradnja generatorskih prekidača sa gasom SF₆ zahteva specijalnu analizu tranzijentnih procesa u mreži u tački uključanja za svaki konkretan slučaj.

Prekidači visokog napona na sabirnicima blizu generatora suočavaju se sa velikim elektromehaničkim naprezanjima tokom procesa isključenja raznih vrsta kvarova. Zbog toga je neophodno analizirati dimenzioniranje i rad svakog konkretnog prekidača generatora.

Prema dostupnoj literaturi i praksi prekidači izabrani u skladu sa normalnim pogonskim uslovima se provjeravaju na mehanička i termička naprezanja pri isključenju struje kratkog spoja.

Veoma mali broj analiza u dostupnoj literaturi odnosi se na pojavu naprezanja prekidača prilikom nesinhroniziranog uključanja generatora na mrežu, što je predmet ove doktorske teze.

Povod za izradu ove doktorske teze je pogonski događaj koji se dogodio usled slučajnog i nedozvoljenog (nesinhroniziranog) uključanja generatora na 400 kV strani blok-transformatora, pri čemu je nakon nekontrolisanog uključanja prekidača došlo do reagovanja pojedinih sistema zaštite i naredbe za isključenje prekidača blok-transformatora na 400 kV strani.

Razmatrani slučaj je nastao kao posledica akcidentnog uključanja prekidača snage bez sinhronizacije generatora sa mrežom zbog problema na komandnim krugovima (kvara u upravljačkim kolima generatorskog prekidača).

Ovaj se događaj dogodio u Kosovskom energetsom sistemu dana 23.08.2011, konkretno u TE “Kosovo B”, u krugovima generatorskog prekidača, kad je opterećenje sistema bilo 1050 MW. Snimanje ponašanja sistema u toku ovog događaja je vršeno na zaštitnim relejima tipa Siemens 7SA612 i 7SJ612, u generatorskom polju u TS 400/220 kV.

Usljed nedozvoljenog uključanja prekidača 400 kV došlo je do nesinhroniziranog uključanja generatora na VN mrežu, što je dovelo do pojave prelazne pojave sa izraženim asimetričnim faznim strujama.

Delovanjem sistema relejne zaštite Bloka, 400 kV prekidač u polju bloka dobija nalog za isključenje. Dolazi do isključenja i prekidanja struje u dve faze (B i C), dok u fazi A prekidanje struje izostaje jer prvi prolaz struje kroz nulu nastaje tek nakon završetka operacije isključenja i pokušaja gašenja luka. U cilju objašnjenja događaja, izvedenim simulacijama na pojednostavljenom simulacionom modelu, prikazan je nastanak, razvoj i priroda celokupne pojave.

S obzirom na tip prekidača, vrednost struje i talasni oblik struje u trenutku pokušaja prekidanja, pol prekidača faze A nije mogao prekinuti struju, a zbog termičkog delovanja električnog luka na otvorenim kontaktima pola tokom trajanja celokupne pojave dolazi do oštećenja polova te je prekidač stavljen van pogona. Kasnijim pregledom i izvedenim delimičnim ispitivanjima na polu prekidača, konstatovana je neispravnost istog za dalji pogon.

U radu je dat sistematizovan pregled analiza i rezultata dostupnih u 73 literaturne jedinice date u spisku literature, koje se odnose na pojavu koja je obrađena u radu. Na osnovu ovog pregleda izdvojeni su postupci i načini za dodatne analize koje su prezentovane u radu.

U dostupnoj literaturi analiziran je veći broj zatajivanja (nereagovanja) generatorskih prekidača visokog napona u slučajevima kvara, bilo zbog neadekvatnog dimenzioniranja i/ili zbog specifičnosti koje prate pojavu kvara u blizini generatora.

Ubrzanje rotora zbog gubitka sinhronizacije pod uglom δ rezultira sa malom izmeničnom struje (AC komponentom) i sa dominacijom jednosmerne struje (DC komponentom). Postoje razni parametri koji, u većoj ili manjoj meri, utiču na pojavu, intenzitet i vreme trajanja DC komponente a s tim i na kašnjenje prolaska struje kvara kroz nulu.

Parametar sa najvećim uticajem na DC komponentu je početni ugao δ . Drugi važni parametri su konstanta inercije turbo grupe i početna devijacija od sinhronne brzine.

Zavisno od podataka generatora u trenutku pojave kvara, kvarove koji su u blizini terminala generatora, prati i DC komponenta koja ima veliku vrednost i koja uzrokuje kašnjenje struje kvara da prolazi kroz nulu.

Usled nedozvoljenog uključanja prekidača 400 kV došlo je do nesinhroniziranog uključanja generatora na VN mrežu, što je dovelo do pojave prelazne pojave sa izraženim asimetričnim faznim strujama.

Ova se pojava u praksi retko dešava, ali se može pojaviti kao rezultat raznih kvarova u signalnim i komandnim strujnim krugovima.

Kao rezultat ovakvih uključanja, posledice mogu biti različite, u zavisnosti od toga kako i u koje vreme se desilo nesinhronizirano uključanje.

Analizirani kvarovi su se najčešće odnosili ili na kratke spojeve ili na pojave eventualnog uključanja nesinhroniziranog generatora na mrežu bez ispunjenja uslova sinhronizacije zbog različitih razloga.

U svim analiziranim slučajevima javlja se jednosmerna komponenta struje, za koju se, uz karakteristike relejne zaštite, pretpostavlja da je bila uzrok oštećenja prekidača, zbog njihove nemogućnosti da istu, u datim okolnostima, prekinu.

Prekidači visokog napona sa gasom SF₆ koji se upotrebljavaju za generatore trebaju imati specijalne zahteve u poređenju sa ostalim prekidačima, posebno oni moraju biti sposobni da prekidaju struje kvarova koje ne prolaze kroz nulu i za nekoliko ciklusa.

Prednosti prekidača sa gasom SF₆ u odnosu na ostale prekidače su brzina isključenja tokom prelaznih (tranzientnih) procesa. Ali to nije uvek prednost.

Za potrebe analiza predmetnog događaja, nakon razvijanja konceptualnog fizičkog modela sistema, razvijen je matematički model koji omogućava da se izračunaju potrebni parametri na osnovu kojih je moguće pratiti ponašanje električnih veličina u sistemu tokom prelaznih pojava.

Za razvijeni matematički model odabrani su odgovarajući softveri najčešće korišćeni u praksi, kojima je analizirana razmatrana pojava.

Problem prelazne stabilnosti elektroenergetskog sistema utvrđuje se procenom da li će sistem posle kvara uspeti da se vrati u miran-stabilan rad u vrlo kratkom vremenu.

Pošto je subtranzijentni period obično vrlo kratak u odnosu na period oscilacije rotora, efekat subtranzijentnog fenomena na elektromehaničku dinamiku može se zanemariti.

U cilju analize dobijenih rezultata simulacije su sprovedene pomoću programa koji su najčešće u upotrebi za proračune i analize u elektroenergetskim sistemima.

Od programa datih u stručnoj literaturi, kao najpodesniji za planirane analize odabrani su programi EMTP/ATP, PSS/E i MATLAB, pri čemu je uzet model simuliranja realnog generatora na kome se desio kvar sa njegovim realnim parametrima.

Softverski paket EMTP/ATP je dobar za tranzijentne elektromagnetne analize. Ipak sa ovim softverskim paketom se ne mogu simulirati veliki sistemi.

Za simulacije u velikim sistemima, softverski paket PSS/E je pogodniji od EMTP/ATP.

Softverski paket MATLAB u našem slučaju se koristi za izračunavanje efektivne vrijednosti struja (I_{RMS}).

Da bi prikazali ponašanje generatora u toku procesa sinhronizacije uključujući slučaj kad nisu ispunjeni zahtevi za sinhronizaciju, na bazi objašnjenja datih u poglavlju 6, su urađene simulacije za različite uslove, odnosno fazne uglove između generatora i energetske mreže.

Za razne slučajeve prezentirani su i analizirani rezultati promena napona i struja i oscilacije snaga generatora sa energetskom mrežom.

Na osnovu rezultata simulacija sa EMTP/ATP softverom, može se zaključiti da zbog komponente jednosmerne struje, struja ne prolazi kroz nulu u određenim fazama za nekoliko perioda, osim za slučaj kad je ugao nula. Simulacije su vršene za različite uglove između mreže i proizvodnje, uključujući ugao od 114° stepeni (ugao od 114° je ugao pri kome se desio incident).

Kroz ove simulacije može se videti da, zavisno od ugla u kojem je generator spojen na mrežu, struje se razlikuju po pojedinim fazama, kao i po vrednosti DC komponente.

Dobijeni rezultati pokazuju da vremensko zatezanje ima uticaja na prolazak komponente izmenične struje kroz nulu. U slučaju kada je ugao napona generatora i mreže nula, jednosmerna komponenta struje se brzo gasi i sve tri fazne struje prolaze kroz nulu, što omogućuje brzo gašenje električnog luka.

Za ostale uglove je drugačije jer zbog prisutnosti DC komponente struje visoke vrednosti u pojedinim fazama, kasni prolazak kroz nulu do 200 ms i to prouzrokuje da se električni luk u prekidaču ne ugasi. U određenim slučajevima mogu nastati i njegova oštećenja.

Brzo isključenje relejne zaštite kod generatorskih prekidača nije uvek prednost u svim situacijama, pa o tome treba voditi računa. U posmatranom slučaju naprimer kašnjenje isključenja omogućilo bi komponenti jednosmerne struje da prolazi kroz nulu i tako bi prekidač bez problema isključio ovaj kvar tokom uključenja nesinhroniziranog generatora na mreži.

Uvođenje vremenskog zatezanja pri isključenju prekidača sa gasom SF₆ je neophodno da bi se omogućilo smanjenje prisutnosti jednosmerne komponente u momentu isključenja.

Posledice dodavanja ovog kašnjenja treba dodatno analizirati u kontestu njenog efekta na ostale delove sistema obuhvatajući i tranzientnu stabilnost.

Ukoliko se mora podesiti kratko vreme tada to treba uvažiti prilikom izbora prekidača i njegove provere na snagu isključenja koja je u tom slučaju veća zbog postojanja DC komponente.

Zbog uvođenja vremenskog zatezanja u sistem treba analizirati tranzijentnu stabilnost sistema.

U analiziranom incidentu vremensko zatezanje releja za nalog za isključenje visoko naponskog prekidača sa gasom SF₆ bilo bi korisno jer bi omogućio prigušenje komponente jednosmerne struje, i ukupnoj struji kvara prolaz kroz nulu i tako bi došlo do prekidanja struje bez oštećenja prekidača sa gasom SF₆.

Na bazi rezultata simulacija za različite uglove pod kojim se simulira isključenje, zaključuje se da kašnjenje od 70 ms treba upotrebljavati u šemama zaštite sabirnica blizu generatora. Sa ovim dodatnim vremenskim zatezanjem bili bi pokriveni svi kvarovi na sabirnicama.

Snimanje ponašanja tokom pomenutog događaja pokazuju prisustvo velike vrednosti DC komponente koja ne dozvoljava struji kratkog spoja prolaz kroz nulu za nekoliko desetina ms. Ovo je kao posledicu imalo ozbiljno oštećenje jednog pola prekidača.

Zavisno od mesta ugradnje prekidača, isti se odabira na osnovu maksimalne struje kvara koja se može pojaviti u mreži na mestu ugradnje, i vremenske konstante, koja definiše prigušenje DC komponente struje kvara u momentu delovanja prekidača.

Prekidači namenjeni za određeni nazivni napon mogu se upotrebiti i za niži nazivni napon, ali sa manjom prekidnom snagom. Za viši nazivni napon prekidač se ne sme upotrebiti bez obzira na prekidnu snagu.

Analizom snimljenih rezultata može se izvući zaključak da je uključanje generatora u mrežu vršeno u trenutku širokog ugla odprilike 114° , što se potvrđuje i rezultatima izvršenih simulacija.

Ekvivalentni model daje dovoljno precizne rezultate u poređenju sa snimljenim (relanim) što ukazuje da se korišćeni model može koristiti za dalje kalkulacije i simulacije različitih sličnih događaja u sistemu.

Dobijeni rezultati simulacijom su vrlo približni sa snimljenim za vreme razmatranog stvarnog događaja. Može se videti da su forma i trajanje osciliranja približno ista. I DC komponenta je veoma velika u oba slučaja, uključujući i vremensku konstantu. Za to vreme, generator je oscilirao sa mrežom uzimajući i isporučujući energiju.

Kroz simulacije može se videti da su očigledne oscilacije napona i struje u toku kvara. Ove oscilacije se primećuju i po formi krivulja sa prisustvom visoke jednosmerne komponente struje, što utiče na vreme kašnjenja prelaza AC komponente kroz nulu.

Sa dobijenih grafika se vidi da, što je veći ugao, veće su struje, isto tako i vreme sinhronizacije generatora sa mrežom je duže.

Ako je uključanje nesinhroniziranog generatora izvršeno pod različitim uglovima onda se relevantne struje, koje su ključne kod isključenja, sa strane prekidača menjaju od jedne faze na drugu fazu.

Iz prikaznih simulacija se vidi da struje u slučaju uključanja nesinhroniziranog generatora mnogo osciliraju, ali se brzo gase (do 150 ms), a zatim ponovo rastu, dok se kod kratkog spoja, oscilacije struja kontinuirano smanjuju u skladu sa subtranzijentnim, tranzijentnim i stacionarnim reaktancama generatora.

Upoređivanjem vremenskih oblika struja u slučaju kratkog spoja i u slučaju nesinhroniziranog uključanja vidi se da su struje vrlo visokih amplituda, pri čemu talasni oblik struja zavisi od ugla uključanja generatora na mrežu.

Instaliranje kondenzatora kod prekidača je poželjno. Obično kondenzatori se postavljaju kod prekidača sa više prekidnih mesta po fazi da bi garantovali linearnu raspodelu napona i da bi smanjili ponovno povećanje tranzijentnog napona, što se dogodilo i na TS 400/220 kV “Kosovo B” nakon što se dogodio kvar.

Podrazumeva se da se kondenzator generalno koristi kod prekidača sa nazivnim naponom 420 kV ili više. Za 420 kV prekidač potreban broj prekidnih mesta je 2 (po fazi), a za 800 kV je 4 (po fazi). Dakle, da bi se postigla raspodela napona jednaka po svakom prekidnom mestu, tj. 210 kV, koriste se kondenzatori, koji su povezani paralelno sa svakim prekidnim mestom u prekidaču.

Uključenje nesinhroniziranog generatora na mrežu izaziva probleme ne samo na prekidaču, već i uzrokuje prenapetosti na transformatoru i generatoru.

Kašnjenje prolaska struje kroz nulu je prouzrokovano uglavnom zbog brzog pomeranja rotora od početnog ugla δ_0 . U ovom slučaju, konstanta inercije grupe generator-turbina ima odlučujući uticaj na ovu pojavu.

U većini slučajeva, isključivanje ovih pojava je prilično problematično. U nekim slučajevima u nekim elektranama, nalog za isključivanje prekidača se daje sa određenim vremenskim zatezanjem kako bi se izbegao ovaj fenomen.

Korisnik mora da odredi stvarno očekivanu struju kvara uključujući smanjenje (prigušenje) AC i DC na interesnoj tački sistema gde se očekuje ugradnja definisanog prekidača.

U nekim slučajevima smanjenje (prigušenje) AC može biti značajno i može eliminisati potrebu za više dimenzionisanje prekidača bazirano samo na zahtevu za DC komponentu.

DC komponenta treba da se detaljno analizira sa ciljem da se naruči odgovarajući prekidač koji će biti sposoban da isključi struje za razne kvarove blizu generatora.

Na osnovu dobivenih rezultata može se zaključiti da prekidač generatora treba biti specifikovan i urađen tako da može da isključi nesimetrične struje prouzrokovane kratkim spojem gde DC komponenta struje prelazi vrednost od 7.3 kA.

Dobijeni rezultati u istraživanjima daju mogućnost za formiranje smernica za predlaganje konkretnih mera za izbor prekidača, podešavanje relejne zaštite i eventualne probleme koji se u datim uslovima mogu pojaviti.

Treba očekivati da će napredne tehnologije prekidača obezbeđivati isključenje pri najpovoljnijem uglu između generatora i mreže, na način da DC komponenta bude na odgovarajućem nivou, i da se ostvaruje uspešno isključenje u momentu prolaska AC komponente kroz nulu.

U budućim istraživanjima bi trebalo analizirati i elektromehaničke prelazne procese, kako bi se povećala tačnost modela i uvažili svi parametri generatora, kako električni tako i mehanički. Takođe, može se analizirati uticaj električnog luka u prekidaču prilikom uključenja.

12. LITERATURA

- [1] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, inc. edition 1994.
- [2] I. M. Canay, D. Braun and G. S. Köppl, "Delayed current zeros due to out-of-phase synchronizing", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No. 2, June 1998.
- [3] B. Udovič, "Elektroenergetski sustav", Kigen, Zagreb, 2005.
- [4] R.E. Owen, W.A. Lewis, "Asymmetry Characteristics of Progressive Short Circuit on Large Synchronous Generator", Vol. Pas-90, No.2, March/April 1971.
- [5] Mirko Palazzo, Dieter Braun and Maurizio Delfanti, "Investigation on the Occurrence of Delayed Current Zeros Phenomena in Power Stations and Related Stress Imposed on Generator Circuit-Breakers", International Conference on Power Systems Transients (IPST2011) in Delft, the Netherlands, June 14-17, 2011.
- [6] TPP Kosovo B, SS 400/220 kV, "Report and recordings from damages of the circuit breaker", 2011.
- [7] KOSTT, "Electrical Equipment Code", 2nd Edition, 2009, www.kostt.com.
- [8] KOSTT, "Grid Code", 2008, 2nd edition 2010.
- [9] Prof. Dr. Milan Savić: "Visokonaponski sklopni aparati", Elektrotehnički fakultet univerziteta u Beogradu, 2004.
- [10] J. Moser, "Pregled razvoja elektroprivrede djelatnosti u Hrvatskoj", Kigen, Zagreb, 2003.
- [11] Mirsad Kapetanović, "High Voltage Circuit Breakers", Sarajevo, 2011.
- [12] Mirsad Kapetanović, "Visokonaponski Prekidajući", Elektrotehnički Fakultet, Sarajevo, BiH, 2002.
- [13] R. P. P. Smeets et al., "Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems", John Wiley, ISBN 978-1-118-38135-9, 2015.
- [14] M. H. Kim, K. H. Kim, A. Smajkic, M. Kapetanovic, M. Muratovic, "Influence of Contact Erosion on the State of SF6 Gas in Interrupter Chambers of HV SF6 Circuit Breakers", International Power Modulator and High Voltage Conference, 2014.

- [15] I. M. Canay, "Comparison of Generator Circuit-Breaker Stresses in Test Laboratory and Real Service Condition", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 3, July 2001.
- [16] S. Delic, D. Beslija, M. Muratovic, M.H. Kim, M. Kapetanovic, H. Zildzo, "New Approach to Breakdown Voltage Estimation after Interruption of Capacitive Currents", International Power Modulator and High Voltage Conference, 2014.
- [17] R. W. Alexander, D. Dufournet, "Transient recovery voltages (TRVs) for high-voltage circuit breakers", IEEE Tutorial, October 16th, Calgary, Canada, 2008.
- [18] Božidar Filipović-Grčić, "Model električnog luka u SF6 prekidaču pri prekidanju induktivnih struja", HRO CIGRE, Caftat 2011.
- [19] Hrvoje Požar, "Visokonaponska Rasklopna Postrojenja", Zagreb, 1973.
- [20] Nikola Rajaković, "Analiza Elektroenergetskih Sistema", Beograd, 2002.
- [21] Marijan Kalea, "Prenos električne energije, sto je to", Zagreb, 2006.
- [22] H. Schelleken, G. Gaudart "Compact High-Voltage Vacuum Circuit Breaker, a Feasibility Study", Vol 14, No.3, June 2007.
- [23] Ruben D. Garzon, "High Voltage Circuit Breakers, Design and Applications", CRC Press, 2nd edition, 1996.
- [24] Seelig, M. "Impact of new generator circuit-breaker technologies on power plant availability and profitability". In Proceedings CEPSI 2000, Powering the New Millennium, Technology, People & Development, Manila, Philippines, 25–27 October 2000.
- [25] Predrag Radosavljević, "Dijagnostička ispitivanja savremenih SF6 prekidača u prenosnoj mreži Srbije", master rad, Beograd, septembar 2013.
- [26] KEMA „High-Power Laboratory“: Report of Performance No. 337-08, 2009.
- [27] KEMA "High-Power Laboratory": Report of Performance No. 338-08, 2009.
- [28] KEMA "High-Power Laboratory": TypeTest Certificate of Switching Performance TOT 2011-10, 2010.
- [29] IEEE Standard for "AC High-Voltage Generator Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis", IEEE Standard C37.013-1997, R2008.
- [30] IEC 62271-100 High-voltage alternating current circuit-breakers, CEI/IEC 62271-100:2001+A1:2002.

- [31] International standard IEC 62271-100, High-voltage alternating-current circuit breakers, 2003.
- [32] International standard IEC 62271-203, Use and handling of sulphur hexafluoride (SF₆) in high-voltage switchgear and controlgear, 2008.
- [33] International standard IEC 60694, Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards, 2001.
- [34] Eidinger, A. "Interruption of high asymmetric short-circuit current having delayed zeros: An acute problem for generator breaker", IEEE Trans. 1972, 91, 1725–1731.
- [35] IEC Technical Report 62271–306: Guide to IEC 62271–100 IEC 62271–1 and other IEC standards related to alternating current circuit breakers, 2012.
- [36] A. Hassanpoor, J. Häfner, B. Jacobson, "Technical assessment of load commutation switch in hybrid HVDC breaker", IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 10, pp. 5393–5400, Oct. 2015.
- [37] C37.010, IEEE Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers >1000 Vac Rated on a Symmetrical Current Basis, 2016.
- [38] C37.012-2014/Cor 1-2016-IEEE Guide for the Application of Capacitance Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breakers above 1000 V - Corrigendum 1, 2016.
- [39] Y. Kieffel et al., "SF₆ alternative development for high voltage switchgears", Cigré Paper D 1–305 Paris, 2014.
- [40] Ivo Uglešić, Božidar Filipovic-Grčić i Srećko Bojić, "Analiza kvara 400 kV SF₆ prekidača uslijed isklopa dalekovoda u praznom hodu", 11 savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 10–13, studenoga 2013.
- [41] G. Choi, J. H. Sohn et al., "Performance improvement of a gas-insulated circuit breaker using multibody dynamic simulations and experiments", J. Mech. Sci. Technol., vol. 27, no. 11, pp. 3223–3229, 2013.
- [42] Boris Babić i Srećko Bojić, "Pojava određenog prolaska struje kvara kroz nulu u slučaju kratkog spoja u blizini generatora kao moguć uzrok havarije prekidača", 11 savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 10–13. Studenoga 2013.
- [43] "Siemens launches world's first 1200 kV SF₆ Circuit Breaker". Retrieved 14 November 2011.
- [44] Jan Machowski, Janusz W. Bialek, James R. Bumby, Power System Dynamics and Stability, Jon Wiley & Sons Ltd, second edition 2008.

- [45] Ježek, V. Perspective generator circuit breaker. In Intensive Programme “Renewable Energy Sources”; Železná Ruda-Špičák, University of West Bohemia: Czech Republic, May 2010. Available online: http://home.zcu.cz/~tesarova/IP/Proceedings/Proc_2010/Files/021%20IP2010%20Jezek.pdf, accessed on 31 March 2012.
- [46] D. Braun and G. S. Köppl, “Transient Recovery Voltages During the Switching Under Out-of-Phase Conditions”, International Conference on Power Systems Transients-IPST 2003, New Orleans, USA, 2003.
- [47] Ruben D. Garzon, "High Voltage Circuit Breakers, Design and Applications", CRC Press, 2nd edition, 1996, pp 27-40, pp 381-410, 2003.
- [48] P-O Andersson, H-E Olovsson, B Franzén, U Lager, J Lundquist, “Applications of Disconnecting Circuit Breakers,” Report B3-210, Cigré Session, Paris, 2004.
- [49] Smeets, R.P.P. Barts, H.D. Zehnder, L. Extreme stresses on generator circuit breakers. In Proceedings of CIGRE Conference 2006, Paris, France, 27 August–1 September 2006; paper A3-306, 2006.
- [50] Ježek, V. Short-circuit capability of generator circuit breaker. In Intensive Programme “Renewable Energy Sources”; Železná Ruda-Špičák, University of West Bohemia: Czech Republic, May 2011. Available online: http://home.zcu.cz/~tesarova/IP/Proceedings/Proc_2011/Files/Jezek.pdf, accessed on 30 June 2012.
- [51] "Applications of Disconnecting Circuit Breakers", Michael Faxä, p.1". Retrieved 9 July 2012.
- [52] "Applications of Disconnecting Circuit Breakers", IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela, 2006.
- [53] Working Group, B5.04 International Guide on the Protection of Synchronous Generators, October 2011.
- [54] Application guide: Live Tank Circuit Breakers, ABB High Voltage, 2010.
- [55] Václav Ježek, Short Circuit Capability of Generator Circuit Breaker, Železná Ruda-Špičák, University of West Bohemia, Czech Republic, Intensive Programme “Renewable Energy Sources”, pp 155-158, May 2011.
- [56] The technical data from Thermo power plant (TPP) Kosovo A, 2015, www.kek-energy.com.

- [57] The technical data from Thermo power plant (TPP) Kosovo B, 2015, www.kek-energy.com.
- [58] A. Alidemaj, S. Škuletić, V. Radulović, Struja kvara uslijed asinkronog priključka generatora na mrežu i njen utjecaj na visokonaponski prekidač s plinom SF₆, Tehnički vjesnik, Slavonski Brod, Osijek, Hrvatska, Decembar 2017.
- [59] Mazen Abdel Salam. High Voltage engineering Theory and Practices, Marcel Dekker, Inc., Publication, 2000.
- [60] Mohamed A. Ibrahim, Disturbance Analyses for Power system, Jon Wiley & Sons, Inc., Publication, 2012.
- [61] Kadri Kadriu, Ali Gashi, Ibrahim Gashi, Ali Hamiti, Gazmend Kabashi, Influence of dc component during inadvertent operation of the high voltage Generator circuit breaker during mis-synchronization, Energy and Power Engineering, 2013.
- [62] J. Lewis Blackburn, Protective relaying Principles and Applications, by Taylor & Francis Group, LLC, 2007.
- [63] C.L. Wagner, D. Dufournet, G.F. Montillet: Revision of the Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers of IEEE C37.011: A Working Group Paper of the High Voltage Circuit Breaker Subcommittee, IEEE Transaction on Power Delivery, Volume 22, No. 1, Jan. 2007.
- [64] A. Ahmethodzic, Z. Gajic, M. Kapetanovic: Computer Simulation of High Voltage SF₆ Circuit Breakers: Approach to Modeling and Application Results, Paper 2P25, 2010 IEEE-IPMHVC. (International Power Modulator and High Voltage Conference), May 23 - 27, Atlanta, GA. USA, 2010.
- [65] R. Thomas: Controlled Switching of High Voltage SF₆ Circuit Breakers for Fault Interruption, Thesis for the degree of licentiate" of engineering, Chalmers University of Technology, Geiteborg, Sweden 2004.
- [66] Božidar Filipović-Grčić, Model električnog luka u SF₆ prekidaču pri prekidanju induktivnih struja, HRO CIGRE, Caftat 2011.
- [67] C37.06-2000 AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis–Preferred Ratings and Related Required Capabilities, National Electrical Manufacturers Association, 1300 N. 17th Street, Rosslyn, VA 22209, USA, 19 May 2000.

- [68] J.C. Henry, G. Perrissin, C. Rollier, "The behaviour of SF6 puffer circuit-breakers under exceptionally severe conditions", *Cahiers Techniques*, Schneider Electric, no.101/p.2, 2002. CIGRE Working Group 13.04 of Study Committee 13, "State of the art-capacitive current switching", *Electra*, No. 155, August 1994.
- [69] Canadian/American EMTP User Group: ATP Rule Book, 1987-1992.
- [70] EMTP/ATP sotwer, *ATP-EMTP Rule Book*, Canadian-American EMTP Users Group, 2016.
- [71] PSEE softwer, Siemens, Erlangen, Germany, 2016.
- [72] MATLAB Programming for Engineers | 5th Edition, 2017.
- [73] P3002.3/D7, IEEE Draft Recommended Practice for Conducting Short-Circuit Studies of Industrial and Commercial Power Systems, Jun 2017.
- [74] PC37.06.1/D5, IEEE Draft Recommended Practice for Preferred Ratings for High-Voltage (>1000 volts) AC Circuit Breakers Designated Definite Purpose for Fast Transient Recovery Voltage Rise Times, Apr 2017.

13. BIOGRAFIJA AUTORA

| Osnovni podaci | |
|--------------------------------|--|
| Rodendan, mjesto i općina. | 16.10.1967, S. Kernina, Istog, Kosovo |
| Pol. | M |
| Adresa. | Ul. Zhujë Selmani, B.B, Peć, Kosovo |
| Građanski status. | Oženjen, troje djece. |
| Obrazovanje i akademska zvanja | |
| 2013 | Registracija Doktorata u Univerzitetu Crne Gore, Elektrotehnički Fakultet, Podgorica. |
| | Teza: “Uticaj karakteristika visokonaponskih prekidača sa gasom SF ₆ na proces isključenja iz mreže generatora velike snage” |
| 2008 | Mr. Sc., Univerzitet u Prištini, Fakultet elektrotehnike i računarske tehnike. |
| | Teza: “Uticaj korone na vrednost energestkih gubitaka na prenosne mreže 220 kV i 400 kV kao i njen efekat na širenje radio i TV talasa” |
| 1997 | Diplomirani inženjer elektrotehnike, Univerzitet u Prištini, Tehnički Fakultet |
| | Teza: “Negativni i pozitivni efekti fenomena korone u tehnici visokog napona” |
| Profesionalna karijera | |
| 2010-2015 | Asistent, Univerzitet u Prištini, Fakultet elektrotehnike i računarske tehnike. |
| Decembar 2019-U toku | Vanredni profesor, Sveučilište Obrazovanje za poslovno-tehnološka (UBT), Priština. |
| 14 Mart 2019 U toku | Izvršni savjetnik, KEDS |
| 27 Mart 2017 - 14 Marta 2019 | Direktor za saradnju sa vladinim institucijama i kontrolu investicija, KEDS |
| Mart 2014-27 Marta 2017 | Direktor za Operacije i Održavanje Mreže, KEDS |
| Januar 2013 - Maj 2013 | V.D. Generalni Direktor, KEDS_a |
| Juni 2008 - Mart 2014 | Ekzekutivni Direktor Distribucije, KEK sh.a/KEDS |
| 08. Mart 2006 - Juni 2008 | Menadžer odseka za razvoj mreže, KEK sh.a. |
| 2003 - 08. March 2006 | Inženjer za planiranje i razvoj mreže, KEK sh.a. |
| 2002-2003 | Odgovorni inženjer Energetike, KEK sh.a. |
| 15.09.1999-2002 | Inženjer za nova priključenja, KEK sh.a. |

| Dužnosti na fakultetu | | | | |
|---|--|--|---------------|--------|
| 2010-2015 | | Asistent, Univerzitet u Prištini, Fakultet elektrotehnike i računarske tehnike. | | |
| Decembar 2019-U toku | | Vanredni profesor, Sveučilište Obrazovanje za poslovno-tehnološka (UBT), Priština. | | |
| Održani / održavaju predmeti na Fakultetu | | | | |
| 2010-2015 | | <div>1. Elektrotehnički materijali</div> <div>2. Tehnika visokog napona</div> <div>3. Prenaponi i koordinacija izolacije</div> | | |
| Decembar 2019-U toku | | <div>1. Sustav prijenosa i distribucije / Menadžment inženjeringa</div> <div>2. Energetska elektronika u pametnim mrežama</div> <div>3. Tehnike mjerenja</div> <div>4. Proizvodnja energije vjetra</div> <div>5. Primenjeni projekat</div> | | |
| Naučna objavljivanja | | | Impact Factor | Cituar |
| 1. | <div>“Efficiency of Electrostatic Precipitators at Kosova ‘B’ PP”</div> <div>Objavljeno u: “Balkan Power Conference”, Šibenik, Hrvatska. 2008.</div> <div>Autori: Isuf Krasniqi, Avni Alidemaj</div> | | | |
| 2. | <div>“Efekti korone i njena uloga ”</div> <div>Objavljeno u: casopisu KERKIME, br 17-Akademija Nauke i Umetnosti Kosovo, Priština, 2009.</div> <div>Autori: Isuf Krasniqi, Avni Alidemaj</div> | | | |
| 3. | <div>“Increase Power Transfer Capability And Controlling Line Power Flow In Power System Installed The FACTS”</div> <div>Objavljeno u: “Mediterranean MedPower 2010”, Cipar, Novembar 2010.</div> <div>Autori: Vjollca Komoni, Isuf Krasniqi, Gazmend Kabashi, Avni Alidemaj</div> | | | 1 |
| 4. | <div>“Corona Losses Dependence From The Conductor Diameter”</div> <div>Objavljeno u: WSEAS Conferences, 3-5 Oktobar, 2011, Malajzia.</div> <div>Autori: Isuf Krasniqi, Vjollca Komoni, Avni Alidemaj, Gazmend Kabashi</div> | | | 2 |

| | | | |
|----|--|--|---|
| 5. | <p align="center">“Sunčano osvetljenje u Štimlje”</p> <p>Objavljeno u: Nacionalna Konferencija, Politehnički Univerzitet Tirana, Albanija, Oktobar, 2011.</p> <p>Autori: Vehbi Sofiu, Isuf Krasniqi, Zamir Dika, Avni Alidemaj</p> | | |
| 6. | <p>“Procenjivanje električnih gubitaka u mreži distribucije kao i mere koje treba preduzeti da bi se oni smanjili”</p> <p>Objavljeno u: Konferenca kombëtare, Politehnički Univerzitet, Tirana, Albanija, Oktobar, 2011.</p> <p>Autori: Vjollca Komoni, Arben Gjokaj, Avni Alidemaj, Lutfije Dervishi.</p> | | |
| 7. | <p>“Control Active and Reactive Power Flow With UPFC Connected in Transmission Line”</p> <p>Objavljeno u: 8th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy, Cagliari, Italy, 10/2012.</p> <p>Autori: V. Komoni, I. Krasniqi, Gazmend Kabashi, A. Alidemaj</p> | | 8 |
| 8. | <p>“Improve energy losses and quality of electricity in low voltage network in Kosova”</p> <p>Objavljeno u: The 5th International Conference & Workshop, Remo, Budva, Montenegro, 23-24.09.2015.</p> <p>Autori: L. Dervishi, M. Koc, A. Alidemaj, A. Ymeri</p> | | |
| 9. | <p>“Impact of Time Relay for Changing of the Tariff on Commercial Losses at Mechanical Meters”</p> <p>Objavljeno u: IFAC International Conference on International Stability, Technology and Culture, (TECIS), 26-28 Oktobar, 2016 Durres, Albanija.</p> <p>Autori: Avni ALIDEMAJ, Vehbi SOFIU, Lutfije DERVISHI, Arif VITIJA, Sadik LATIFAJ</p> | | |

| | | | |
|-----|---|------|---|
| 10. | <p>“Application of Complementary Machine-Complex”</p> <p>Objavljeno u: IFAC International Conference on International Stability, Technology and Culture, (TECIS), 26-28 Oktobar 2016, Durres, Albanija.</p> <p>Autori: Vehbi SOFIU Avni ALIDEMAJ</p> | | 1 |
| 11. | <p>“Fault current due to asynchronous connection of the generator to the grid and impact on HV circuit breaker with gas SF6”</p> <p>Objavljeno u: Tehnički Vjesnik, Technical Gazette, December 2017, Slavonski Brod, Hrvatska.</p> <p>Authors: Avni ALIDEMAJ, Sreten Škuletić, Vladan Radulović</p> | 0.64 | 6 |
| 12. | <p>“Production, distribution and supply of electricity in Kosovo for the period 2000-2015”</p> <p>Objavljeno u: International Journal of Civil Engineering and Technology, IAEME Publication (IJCIET), Tamilnadu, India, 06. April. 2018.</p> <p>Autori: Avni ALIDEMAJ, Ahmet Shala</p> | | |
| 13. | <p>“Interruptions in the electricity distribution system”</p> <p>Objavljeno u: CIGRE, SEERC, KIEV, UKRAINE, June 12-13. 2018.</p> <p>Autori: Avni ALIDEMAJ, Sadik LATIFAJ, Arben SALIHU, Shukri ALIU</p> | | |
| 14. | <p>“Dissolved gas analysis (DGA) method application in power transformer maintenance”</p> <p>Objavljeno u: CIGRE, SEERC, KIEV, UKRAINE, June 12-13. 2018.</p> <p>Autori: Kjani GURI, Avni ALIDEMAJ</p> | | |

| | | | |
|---|--|-----|--|
| 15. | <p>“Internal defects of the medium voltage circuit breaker”</p> <p>Objavljeno u: CIGRE, SEERC, Priština, Kosovo, 06-08 November 2018.</p> <p>Autori: Avni ALIDEMAJ, Arif VITIJA, Nezir NEZIRI, Naser XHAMBAZI</p> | | |
| 16. | <p>“Advantages and disadvantages of the underground network and respecting the rules during aligning medium voltage cables”</p> <p>Objavljeno u: CIGRE, SEERC, Priština, Kosovo, 06-08 November 2018.</p> <p>Autori: Avni ALIDEMAJ, Sadik LATIFAJ, Qendrim NIKA, Kujtim MIFTARI</p> | | |
| 17. | <p>“The benefits for switching from overhead lines (OHL) to underground cable lines”</p> <p>Objavljeno u: CIGRE, SEERC, Priština, Kosovo, 06-08 November 2018.</p> <p>Autori: Avni ALIDEMAJ, Edita BYTYQI, Enis RIZA</p> | | |
| 18. | <p>“Important Factors for Consideration during the Specification of SF6 Circuit Breakers for High Voltage Generators”</p> <p>Objavljeno u: MDPI-Energies, Basel, Switzerland, July 2020</p> <p>Autori: Avni ALIDEMAJ, Qendrim NIKA</p> | 2.7 | |
| Članstvo u organizacije i profesionalne akademije | | | |
| Od 2010 | Član Tehničkog Komiteta za Standarde u Elektrotehnici, Kosovo, MTI. | | |
| Od 2015 | Član IEEE | | |
| Od 2017 | Član CIGRE-a, Nacionalnog komiteta Kosova. | | |
| Treninzi | | | |
| | <ul style="list-style-type: none"> Supervisory skills USAID Managing Planning USAID Overall Managing USAID Distribution Network Modelling Power flow calculation - GREDOSI Software, Pristina. | | |

| | |
|---------------|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Energy Measurement and Management, Iskraemeco-Kranj, Slovenia, 2007. • Time Management, MDA, Pristina. • Management Training Program USAID • ArcGIS-basics beak Consultants • Public Procurement, MDA, Pristina • Decisions Making, MDA, Pristina • Public Relations, MDA, Pristina • Dig SILENT Power Factory Basic Training, Pristina • Security Management in KEK, Pristine • Megger Training Centre, High and Low Voltage test equipment at Megger Limited, Dover Kent, and England. • Training regarding Software “EPLAN Electric P8, FIEK, Pristina. • MODERN AND SUSTAINABLE WATER AND ENERGY MANAGEMENT, International Visitor Leadership Program from 10 – 28, 2015, USA. |
| Jezici | |
| | Albanski – materni jezik |
| | Engleski – dobro |
| | Crno Gorski, Serpski, Hrvatski, Bosanski – vrlo dobro |

Izjava o autorstvu

Potpisani Avni ALIDEMAJ
Broj indeksa/upisa 6/12

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

Uticaj karakteristika visokonaponskih prekidača sa gasom SF₆ na proces isključenja iz mreže generatora velike snage

• rezultat sopstvenog istraživačkog rada.

- da predložena disertacija ni u cjelini ni u djelovima nije bila predložena za dobijanje bilo kakve diplome prema studijskim programima drugih ustanova visokog obrazovanja,
- da su rezultati korektno navedeni, i
- da nisam povredio autorska i druga prava intelektualne svojine koja pripadaju trećim licima.

Potpis doktoranda

U Podgorici

Avni ALIDEMAJ

Izjava o istovjetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora Avni ALIDEMAJ

Broj indeksa/upisa 6/12

Studijski program Energetski Sistemi

Naslov rada: Uticaj karakteristika visokonaponskih prekidača sa gasom SF6 na proces isključenja iz mreže generatora velike snage

Mentor Prof. Dr Sreten Škuletić, ETF Podgorica, Crna Gora

Potpisani Avni ALIDEMAJ


Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovjetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore.

Istovremeno izjavljujem da dozvoljavam objavljivanje mojih ličnih podataka u vezi sa dobijanjem akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja, naziv disertacije i datum odbrane rada.

Potpis doktoranda

U Podgorici

Avni ALIDEMAJ



IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore pohrani moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Uticaj karakteristika visokonaponskih prekidača sa gasom SF6 na proces isključenja iz mreže generatora velike snage

koja je moje autorsko djelo.

Disertaciju sa svim priložima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo

- 2. Autorstvo – nekomercijalno
- 3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
- 4. Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima
- 5. Autorstvo – bez prerade
- 6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poledini lista).

Potpis doktoranda

U Podgorici

Avni ALIĐEMAJ