Analiza prijelazne pojave i utjecaja na generator kod APU u mreži s distribuiranom proizvodnjom

Pandžić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:732840

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni studij

ANALIZA PRIJELAZNE POJAVE I UTJECAJ NA GENERATOR KOD APU U MREŽI S DISTRIBUIRANOM PROIZVODNJOM

Diplomski rad

Ivan Pandžić

Osijek, 2017

Sadržaj

1. UVOD 1
2. TEORIJSKI OPIS ELEMENATA 3
2.1. Transformatori 3
2.2. Konstrukcija transformatora 5
2.3. Pokusi kratkog spoja i praznog hoda transformatora 8
2.4. Nadomjesna shema transformatora 10
2.5. Paralelni rad transformatora 11
2.6. Reaktancije transformatora 13
2.7. Generator 14
2.8. Načini rada sinkronog generatora 16
2.9. Reaktancije generatora 17
2.10. Vodovi 19
2.11. Materijali i izvedbe vodiča 20
2.12.Nadomjesne sheme voda 21
2.13. Reaktancije voda 22
2.14. Prekidači 23
2.15. Elektrana Uni Viridas 24
2.16. Struje kratkih spojeva 25
3. PROGRAMSKI PAKET ATP – EMTP 27
3.1. Uvod u ATPDraw 28
4. MODELIRANJE ELEKTRIČNE SHEME U PROGRAMSKOM PAKETU ATPDraw 31
5. ANALIZA REZULTATA 47
5.1. Kratki spojevi na kabelu 35kV Viridas – Babina Greda 48
5.1.1 Jednofazni kratki spoj 51
5.1.2 Trofazni kratki spoj 55
5.2. Kratki spojevi na sabirnici Viridas 35 kV 59
5.2.1 Jednofazni kratki spoj 59
5.2.2 Trofazni kratki spoj 61
5.3. Kratki spojevi na sabirnici vlastite potrošnje 0.4 Kv 63
5.3.1 Jednofazni kratki spoj 63
5.3.2 Trofazni kratki spoj 65
6. ZAKLJUČAK 68
LITERATURA 70
SAŽETAK 71
ŽIVOTOPIS 72

1. UVOD

Tijekom cjelokupne ljudske povijesti, postojala je potreba za energijom. Svakodnevni život čovjeka je najviše izmijenila druga industrijska revolucija u drugoj polovici 19.stoljeća i početkom 20.stoljeća. Brojne znanstvene spoznaje i tehnička otkrića dovela su do ubrzane elektrifikacije planeta zato što se električna energija pokazala kao najjeftiniji, najekonomičniji, najjednostavniji i najpouzdaniji oblik energije. Postavljanje temelja elektroenergetskog sustava kakvog danas poznajemo (izmjenični prijenos, indukcijski motori, izmjenični generatori) pripisuju se velikom izumitelju Nikoli Tesli. Od prvotne elektrifikacije pa sve do danas, ljudske potrebe za električnom energijom konstantno rastu uslijed sve veće industrijske razvijenosti, ali i rasta osobne potrošnje.

Osim klasifikacije oblika energije na konvencionalne i nekonvencionalne oblike energije, za problematiku ovog rada bitnija je podjela primarnih oblika energije s obzirom na njihovu obnovljivost; obnovljivi i neobnovljivi. U obnovljive primarne oblike energije pripadaju: ogrjevno drvo, Sunčevo zračenje, energija vjetra, vodne snage, energija plime i oseke, energija valova, a u neobnovljive oblike primarne oblike energije spadaju sva fosilna goriva (nafta, prirodni plin i ugljen) i nuklearna goriva. Obnovljivi oblici energije su oni oblici koji se prirodno obnavljaju i ne mogu se potpuno iscrpiti tehničkom eksploatacijom (iznimke su u vidu potpunog iskorištenja energije vodotoka rijeke te potreba za neprekidnim pošumljavanjem šuma). Većina obnovljivih oblika energije ne može se uskladištiti i potrebno ih je iskoristiti u trenutku pojavljivanja jer ne postoji konstantnost snage zbog stohastičkog pojavljivanja određenog oblika energije (npr. snaga vjetra ovisi o brzini koja se u nekoliko minuta može više puta promijeniti). Neobnovljivi oblici energije odlikuju se konstantnošću snage, moguće ih je transportirati u svom primarnom obliku te skladištiti bez velikih teškoća i ulaganja. Mogućnost prilagodbe potrebama konzuma, mogućnost transporta i uskladištenja u prikladnom obliku i manja potrebna sredstva po jedinici snage su razlozi zbog kojih se i danas više upotrebljavaju neobnovljivi primarni oblici energije [1].

Povećanom industrijalizacijom planeta ljudska civilizacija se našla pred problemom globalnog zagrijavanja i ekološkog onečišćenja planeta. Problemi moguće eksploatacije fosilnih i nuklearnih goriva te njihove štetne posljedice su razlog traženja alternativa i rapidnog povećanja instaliranih kapaciteta obnovljivih izvora energije.

Elektrana „Viridas Biomass“ u Babinoj Gredi je kogeneracijsko postrojenje električne snage 9.5 MW, priključeno na lokalnu distributivnu mrežu napona 35 kV. Kao pogonsko gorivo u elektrani „Viridas Biomass“ se koristi šumska i poljoprivredna biomasa. Oduzimanjem dijela pare, napajaju se okolni toplinski potrošači.

U prvom dijelu diplomskog rada jednostavno i koncizno će biti objašnjeni najbitniji pojmovi vezani uz elemente prikazane u radu kao što su transformator, generator, vodovi. U drugom dijelu rada, pomoću simulacijskog programa ATP – EMTP, napravit će se model spoja elektrane na distributivnu mrežu te detaljno pojasniti postupak podešavanja pojedinog elementa. Simuliranjem različitih vrsta kratkog spoja na pojedinim mjestima mreže, analizirat će se prijelazne pojave kod generatora i utjecaj kratkog spoja na strujno – naponske prilike promatrane mreže.

2. TEORIJSKI OPIS ELEMENATA

2.1. Transformatori

Rad transformatora, kao i svih drugih električnih strojeva, temelji se na tri fundamentalne fizikalne pojave: elektromagnetskoj indukciji, sili na vodič protjecan strujom u magnetskom polju i zakonu protjecanja. Elektromagnetska indukcija predstavlja pojavu induciranja napona u vodiču pozicioniranom u magnetskom polju zbog promjene magnetskog toka. Michael Faraday je prvi opisao tu pojavu uobličivši ju u zakon: magnetski tok Φ obuhvaćen zavojem inducirat će u tom zavoju napon trenutne vrijednosti proporcionalan brzini promjene toka:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \tag{2-1}$$

Negativni predznak u jednadžbi (2-1) predstavlja Lentzov zakon koji kazuje da se posljedice induciranja napona protive uzroku svoga nastanka (stvorena struja stvara magnetski tok koji se protivi magnetskom toku koji ju je proizveo). U praksi je uvijek prisutan veći broj zavoja stroja, tako da u slučaju N zavoja jednadžba (2-1) poprima oblik:

$$e = -N\frac{d\Phi}{dt}. \tag{2-2}$$

Smjer induciranog napona u vodiču određuje se pravilom desne ruke i to na način: dlan se postavi tako da silnice magnetskog toka ulaze u njega, ispruženi palac pokazuje smjer gibanja vodiča naspram magnetskog polja, a ispruženi prsti pokazuju smjer induciranog napona. Dva su načina pojave induciranog napona: napon se može inducirati zbog promjene magnetskog toka bez gibanja vodiča (što je slučaj kod transformatora gdje su vodiči, odnosno namoti statični) ili se napon inducira promjenom toka zbog mehaničkog pomicanja strujnog prema magnetskom krugu (što je slučaj kod generatora).

Sila na vodič u magnetskom polju je fizikalna pojava bitna za shvaćanje principa rada motora; svaki generator može raditi kao motor i obrnuto. Na ravni vodič duljine l u magnetskom polju magnetske indukcije B kojim protječe struja I djeluje sila F prema formuli (formula predstavlja slučaj kada su vektori magnetske indukcije B i duljine vodiča l skalarni):

$$F = B \cdot I \cdot l \tag{2-3}$$

Kako bi se odredio smjer sile F, koristi se pravilo lijeve ruke: dlan lijeve ruke se postavi tako da silnice magnetskog toka ulaze u dlan, ispruženi prsti pokazuju smjer toka struje, a ispruženi palac smjer sile na vodič.

Dok su prethodne dvije fizikalne pojave pojasnile elektro – mehaničku pretvorbu, zakon protjecanja povezuje električne struje i magnetske tokove: kruženje magnetskog polja H po zatvorenoj krivulji jednako je sumi jakosti svih struja koje protječu kroz površinu koju ta krivulja obuhvaća:

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_A \vec{J} \cdot d\vec{A} = \sum I = \theta \tag{2-4}$$

gdje je:

H - jakost magnetskog polja,

l - zatvorena krivulja,

J - gustoća struje,

A - površina kroz koju teče struja I,

$\sum I$ algebarski zbroj struja obuhvaćenih krivuljom l,

θ strujno protjecanje, tj. amper zavoje.

U svakom infinitezimalnom dijelu magnetskog kruga magnetsko polje H ovisi o iznosu magnetske indukcije B, proporcionalno iznosu konstante μ. Konstanta μ naziva se permeabilnost, opisuje svojstvo materijala te prikazuje stupanj magnetizacije tijela pri djelovanju magnetskog polja. Permeabilnost ovisi o vrsti materijala i umnožak je relativne (μ_r) i apsolutne permeabilnosti (μ_0), što je prikazano u sljedećoj jednadžbi:

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \tag{2-5}$$

Transformator je statični električni stroj bez okretnih dijelova i služi za povezivanje dijelova mreže različitih napona i struja. Sastoji se od najmanje dva namota, magnetske jezgre i izolacije. Na principu elektromagnetske indukcije transformator transformira izmjenični napon određene vrijednosti u viši ili niži izmjenični napon različite vrijednosti, ali iste frekvencije.

Princip rada transformatora je sljedeći: jedan namot transformatora (npr. primar) se priključi na izmjenični napon U_1 određene frekvencije, njime tada poteče izmjenična struja koja stvara izmjenični magnetski tok Φ. Tok se prenosi kroz željeznu jezgru i u sekundaru inducira napon E_2, srazmjeran toku koji ga stvara, frekvenciji izmjeničnog napona na koji je spojen i broju zavoja namota u kojem je induciran. U primarnom namotu se inducira napon E_1 kao protuteža priključnom naponu. Magnetski tok se javlja kao posljedica protjecanja električne struje i ovisi o sredini kroz koju prolazi (željezo, zrak, drvo). U radu transformatora uvijek jedan

namot prima električnu energiju, a jedan namot predaje električnu energiju. Namoti su reverzibilni, svaki od njih može primati ili predavati električnu energiju, sve ovisi o smjeru toka energije.

U raznim literaturama mogu se naći pojmovi kao što su idealni, savršeni i realni transformator. Idealni transformator nema ograničenja vezanih za vrijednost struje i napona, nema gubitke u jezgri i namotima primara i sekundara, nema rasipanja magnetskih silnica i može prenositi snagu bez gubitaka u neograničenim količinama (ne postoji limit snage). Idealni transformator je model koji olakšava shvaćanje rada transformatora u realnom svijetu, on je bez dimenzije i predstavlja točku. Savršeni transformator je međukorak do realnog transformatora, gubici u namotima ne postoje, kao ni rasipni tokovi. Za razliku od idealnog transformatora, postoji magnetski otpor u jezgri, i kada se on zanemari, transformator je idealni. Realni transformator ima ograničenja vezana uz napon i struju na kojima radi, postoje gubici u namotima primara i sekundara te gubici u jezgri, pošto je jezgra izgrađena od feromagnetskih materijala. Namoti ne mogu podnijeti beskonačno velike vrijednosti struje, kao što ni izolacija ne može podnijeti abnormalno visoke napone. Također, prisutni su rasipni tokovi zbog nemogućnosti stvaranja idealne magnetske veze.

2.2. Konstrukcija transformatora

Pri projektiranju i izradi transformatora, potrebno je paziti na niz električnih, mehaničkih i toplinskih problema koji se mogu pojaviti za vrijeme pogona. Električni problemi tiču se namota gdje pogonski prenaponi, atmosferski prenaponi, kratki spojevi te proboji izolacije uzrokuju probleme u radu transformatora, ispad iz pogona i dr. Sve vrste kratkih spojeva te povećani iznosi struja u transformatoru štetni su sa stajališta mehaničkih i toplinskih naprezanja materijala. Kao i svaki električni stroj, transformator je moguće preopteretiti u određenom iznosu naspram nominalne snage (do 150% nominalne snage), ali samo kratkotrajno zato što dolazi do ubrzanog zagrijavanja i ubrzanog trošenja izolacije.

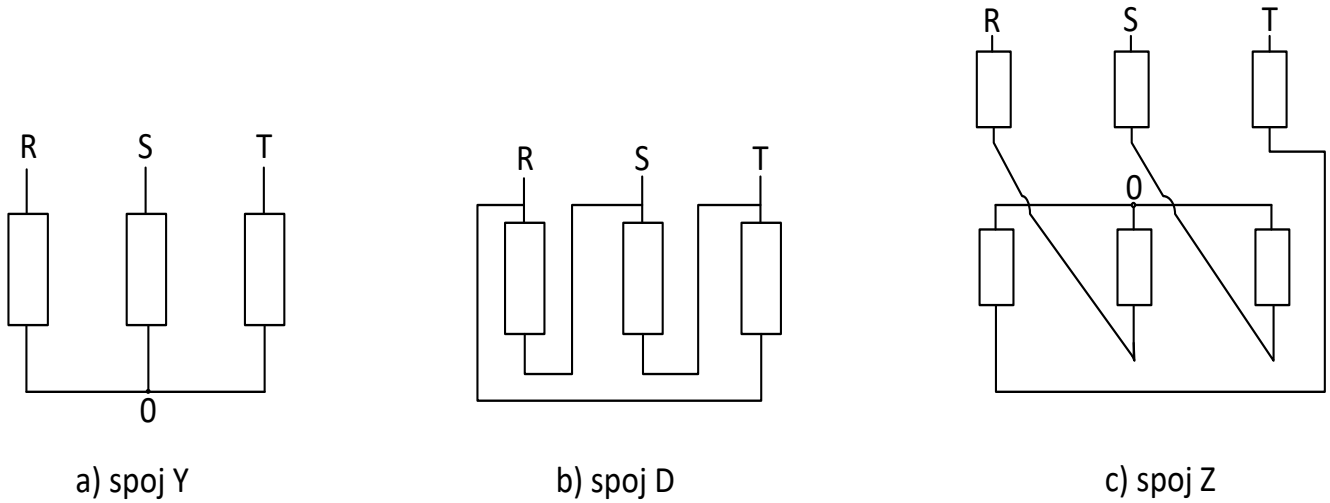
Dijelovi transformatora su najmanje dva namota (ponekad postoji i tercijarni), koji služe za vođenje struja, željezna jezgra kao vodič magnetske energije i ostale dijelovi koji ne sudjeluju u pretvorbi energije. Kako bi se osigurala ekonomičnost i pouzdanost u radu te određena svojstva u pretvorbi energije, potrebno je poznavati svojstva korištenih materijala.

Osnovni aktivni dijelovi svakog stroja su magnetski krugovi kojima se osigurava vođenje magnetskog toka i elektromagnetska pretvorba te strujni krugovi koji služe za vođenje električne

struje. Zadaća jezgre je dvostruka: mehanička i elektromagnetska. Jezgra mehanički služi da drži i nosi namote, a elektromagnetska zadaća je prethodno opisana. Prema obliku jezgre transformatori se dijele na jezgraste i ogrnute. Razlika je u relativnom položaju limova i namota. Kod jezgrastih transformatora namoti obuhvaćaju limove, a kod ogrnutih limovi obuhvaćaju namote. Izvedba željezne jezgre može biti različita, ali je zbog jednostavnosti izrade najčešće pravokutna. Jezgra transformatora, kao vodič za magnetsku energiju koju izmjenjuju namoti, u pravilu je od željeza koji je vrlo dobar vodič magnetske energije. Kako bi se spriječili veći gubici zbog vrtložnih struja, proporcionalno rastu frekvencije i magnetske indukcije, željezna jezgra nije puna, već se sastoji od međusobno izoliranih transformatorskih limova (udio silicija je 4 – 5 %), raspona debljine od 0.2 do 0.5 mm, ovisno o snazi transformatora. Limovi se slažu na način da se zračni raspor svede na minimum, a magnetska vodljivost maksimizira kako bi se smanjila struja magnetiziranja te gubici u željezu.

Namot predstavlja skupinu vodiča povezanih zajedno i svi pripadaju strujnom krugu jednog od nazivnih napona. Služe za vođenje električnih struja i stvaranje izmjeničnog magnetskog toka. U većini slučajeva namoti se izrađuju od čistog, elektrolitskog bakra standardne kvalitete i vodljivosti, dok se aluminij upotrebljava iznimno rijetko zbog ekonomske neisplativosti. Kod transformatora većih snaga koristi se tvrdi bakar veće mehaničke čvrstoće kako bi namot bio u mogućnosti izdržati velike dinamičke sile kratkog spoja. Kružni presjeci vodiča koriste se kod manjih presjeka (do 3 mm), dok se pravokutni profili koriste kod većih. Svi namoti moraju biti izolirani međusobno, ali i izolirani prema jezgri i ostalim dijelovima transformatora. Kao izolacija se koristi sintetski lak ili visokokvalitetni papir. S obzirom da se u transformatoru nalaze namoti u kojima struje i naponi nisu jednaki, važno je kako su namoti postavljeni na jezgru. Namoti nižeg napona nalaze se uz samu jezgru, dok namoti višeg napona obuhvaćaju namote nižeg napona. Takav način rasporeda namota se radi kako jezgra ne bi došla na viši napon u slučaju proboja izolacije. Namoti se mogu spojiti na različite načine i kombinacijom različitih spojeva primara i sekundara dobiju se željena svojstva transformatora. Tri su načina spoja namota: zvijezda (označuje se slovom Y), trokut (označuje se slovom D) i cik – cak spoj (označava se slovom Z). Spojevi namota Y i D se najčešće koriste, dok se cik – cak spoj većinom koristi kod distributivnih transformatora 10/0.4 kV. Spoj namota Y i Z moguće je uzemljiti, direktno ili putem otpornika, a kod spoja D uzemljenje nije moguće. Kod spoja Y, linijska i fazna struja su jednake, a linijski napon je $\sqrt{3}$ puta veći od faznog. Obrnuta situacija je kod spoja D, gdje su linijski i fazni naponi jednaki, dok je linijska struja veća $\sqrt{3}$ puta veći od fazne. Spoj cik – cak je povoljno koristiti u slučajevima većih nesimetričnih opterećenja, spoj

bolje podnosi nesimetriju nego Y spoj, a i sam prenosi manju nesimetriju u mrežu naspram Y spoja. Spoj transformatora označava se pomoću tri znaka, npr. Yyn0. Prvo slovo označava način spoja primarnog namota, drugo slovo označava način spoja sekundarnog namota, slova n i N nalaze se uz oznaku spoja namota i govore o postojanju uzemljenja. Broj uz oznaku spojeva primara i sekundara naziva se satni broj. Satni broj pokazuje fazni pomak između vektora primarnog i sekundarnog napona. Grupa spoja koristi brojeve u rasponu od 0 do 12, fazni pomak od 30° označava jedan broj.



Sl. 2.1. *Načini spojeva namota*

Faktor koji najviše utječe na način konstrukcije ostalih dijelova transformatora ovisi o načinu hlađenja po kojem se transformatori dijele na:

1. Suhe transformatore
2. Uljne transformatore

Kao rashladno sredstvo mogu se koristiti razne sintetske tekućine, zrak, voda i razne vrste trafo ulja. Suhi transformatori se u pravilu rade za napone do 50 kV jer zrak ima lošija izolacijska svojstva i slabije odvodi toplinu od ulja, dok su aktivni dijelovi kod uljnih transformatora uronjeni u izolacijsku tekućinu [2]. Ulje se nalazi u kotlu koji je izgrađen od čeličnog lima, a kao rashladna površina služe radijatori zavareni na poklopcima kotla.

2.3. Pokusi kratkog spoja i praznog hoda transformatora

Tri su osnovna pogonska stanja svakog stroja: kratki spoj, prazni hod i stanje opterećenja. Pokusima kratkog spoja i praznog hoda može se doći do parametara ekvivalente sheme transformatora i pojedinih nazivnih podataka bitnih za opis rada transformatora. Stanje opterećenja je za sve strojeve stanje aktivnog rada, tj. samo u tom pogonskom stanju postoji korisna pretvorba energije.

Pokus kratkog spoja izvodi se tako da se jedan od namota priključi na izvor napona, a na drugom se stezaljke kratko spoje. Napon se povećava dok kratko spojenim stezaljkama ne poteče nazivna struja. Svrha izvođenja pokusa kratkog spoja je određivanje napona kratkog spoja, potrebnog za određivanje impedancije kratkog spoja Z_K, gubitaka u bakru te određivanje radne i jalove komponente impedancije uzdužne grane ekvivalente T - sheme transformatora. Prije početka izvođenja pokusa potrebno je znati vrijednosti nazivnih struja primara i sekundara, I_{1N} i I_{2N}, a ukoliko oni nisu poznati, traže se podaci od proizvođača transformatora. Napon pri kojem kratko spojenim stezaljkama poteče nazivna struja naziva se napon kratkog spoja (u_k) i u pravilu se daje relativno u odnosu na nazivni napon. Energetski transformatori grade se s naponima kratkog spoja u rasponima od 4 – 12 %. Struja kratkog spoja toliko je puta veća od nazivne struje koliko je puta napon kratkog spoja manji od nazivnog napona, a struja pogonskog kratkog spoja računa se prema jednadžbama (2-6) i (2-7), ovisno uzima li se napon kratkog spoja relativno ili apsolutno:

$$I_K = \frac{U_{1N}}{U_K} \cdot I_N \tag{2-6}$$

$$I_K = \frac{100}{u_k} \cdot I_N \tag{2-7}$$

Impedancija kratkog spoja Z_K jednostavno se izračunava prema formuli $Z_K = \frac{U_K}{\sqrt{3} \cdot I_K}$, ukoliko je riječ o trofaznom transformatoru. Pošto su u pokusu kratkog spoja indukcije i naponi mali i ne utječu na mjerenje, cijela poprečna grana T – sheme može se zanemariti tako da se mjerenjem snage u pokusu može doći do gubitaka u bakru, tj. $P_K = P_{Cu}$. Daljnjom analizom pomoću gubitaka u bakru može se doći do određivanja radne i jalove komponente impedancije uzdužne grane. Gubici u bakru ovisni su o opterećenju i ovise o kvadratu struje.

Pokus praznog hoda je bezopasno stanje za transformator i njegovim izvršenjem dolazi se do gubitaka u željezu, a pomoću tog podatka daljnjim proračunom i do parametara elemenata poprečne grane. Vrlo koristan je i podatak o vrijednosti struje praznog hoda i_0. Taj podatak

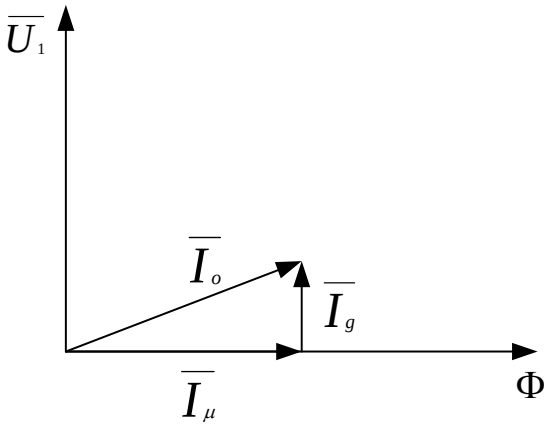
govori kolika je struja potrebna za magnetiziranje jezgre u relativnom odnosu spram nazivne struje. Pokus se izvodi tako da se na jednu stranu narine nazivni napon, a druga strana se ostavi od spojena, tj. otvorena. Kroz namot na koji je narinut nazivni napon teče struja magnetiziranja I_m koja proizvodi magnetski tok inducirajući na primaru napon E_1. Struja magnetiziranja predstavlja jalovu komponentu struje praznog hoda, dok radnu komponentu struje I_0 predstavlja struja I_g koja pokriva gubitke u željezu [3]. Mjerenjem napona na primarnim i sekundarnim stezaljkama te postavljanjem tih napona u omjer može se dobiti prijenosni omjer transformatora.

$$n = \frac{U_1}{U_2} \tag{2-8}$$

Struja praznog hoda, kao što je ranije spomenuto, sastoji se od radne i jalove komponente:

$$\overline{I_o} = \sqrt{I_g^2 + I_m^2} \tag{2-9}$$

Zbog relativno male struje I_0 mogu se zanemariti padovi napona na uzdužnoj grani, pa se tako mjerenjem snage zbog zanemarivih gubitaka u bakru dobiju gubici u željezu $P_0 = P_{Fe}$; snaga preuzeta iz mreže troši se na pokrivanje gubitaka u željezu (gubici zbog vrtložnih struja i petlje histereze).



Sl. 2.2. *Vektorski dijagram struje praznog hoda*

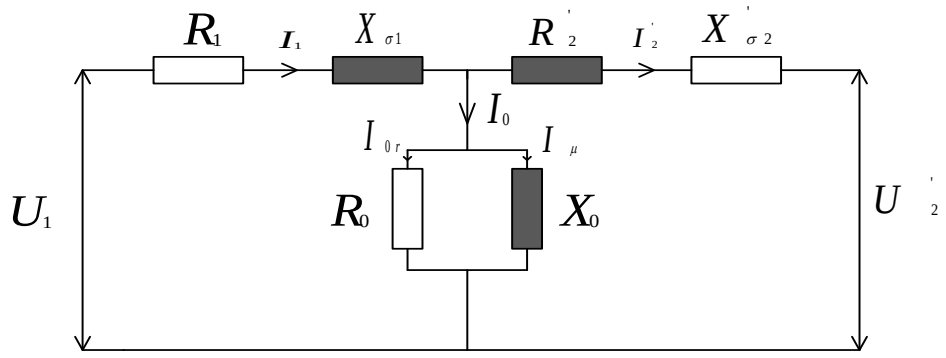
Gubici koji nastaju u transformatoru dijele se na gubitke u željezu i gubitke u bakru, kako je pokusima kratkog spoja i praznog hoda prethodno prikazano. Gubici u željezu su konstantni, neovisni su o opterećenju i njihova vrijednost vezana je uz odabir materijala jezgre i način njene izvedbe. Kao što je prethodno podijeljeno, gubici u željezu sastoje se od gubitaka petlje histereze i gubitke uslijed vrtložnih struja. Na gubitke petlje histereze moguće je utjecati samo kvalitetom trafo lima (odabir trafo lima najboljih magnetskih svojstava), a na gubitke vrtložnih struja

konstrukcijom jezgre trafo limova. Gubici u namotima primara i sekundara ovise o opterećenju, protjecanoj struji kroz njih i rastu s kvadratom struje.

2.4. Nadomjesna shema transformatora

Nadomjesna shema svakog elementa predstavlja model kojim se modeliraju stvarne prilike u stroju i njegovi sastavni dijelovi (otpori namota, rasipni induktiviteti, otpori magnetskog kruga i jezgre). Kod transformatora, najčešće se koristi T – shema pomoću koje se najvjernije modeliraju otpori vodiča, rasipni induktiviteti i željezna jezgra. I – shema i Γ – shema zadovoljavaju kod proračuna u kojima postoje mogućnosti zanemarenja određenih elemenata, zanemarivih vrijednosti za krajnji rezultat.

Nadomjesna shema prikazana na slici 2.3. predstavlja T – shemu transformatora sa željeznom jezgrom gdje uzdužne grane predstavljaju omske otpore namota primara i sekundara, R_1 i R'_2, tj. gubitke u namotima uzrokovane protjecanjem struja primara i sekundara. Reaktancijama X_1 i X'_2 modeliraju se induktivni otpori nastali zbog rasipnih tokova koji se zatvaraju samo kroz jedan namot i kroz zrak umjesto da obuhvaćaju oba namota kao što to čini glavnina toka. Poprečna grana predstavlja jezgru transformatora gdje se u paralelnom spoju nalaze omski otpor R_0 i induktivni otpor X_0. Na slici 2.3. prikazano je kako se struja praznog hoda I_0 sastoji od dvije komponente, I_{0r} i I_μ. Struja I_{0r} i otpor R_0 protjecan tom strujom predstavljaju gubitke u jezgri transformatora prema formuli $P_{Fe} = 3 \cdot I_{0r}^2 \cdot R_0$. I_μ je struja magnetiziranja i bitna je za shvaćanje elektromagnetske pretvorbe energije u željeznoj jezgri i zajedno s otporom X_0 prikazuje magnetski otpor kruga. Prema [2], svi otpori iz nadomjesne sheme većim dijelom ovise o snazi transformatora i stupnju magnetskog zasićenja jezgre, što ovisi o kvaliteti i materijalu iste.



Sl. 2.3. *Nadomjesna T – shema transformatora*

Više je razloga zbog kojih je sekundarne veličine potrebno reducirati na primarni broj zavoja. Kod manjih prijenosnih omjera (npr. $n = \frac{220}{110}$), crtanje vektorskih dijagrama ne predstavlja veći problem, međutim pri većim prijenosnim omjerima vektorski dijagrami struja i napona su nepregledni i kompleksni za izradu. Također, pri proračunu parametara transformatora koji nisu jednake naponske razine dolazi do povećanja težine zadatka. Pri proračunima je potrebno imati jedinstvenu naponsku razinu. Formule koje vrijede za preračunavanje parametara sekundara:

$$R_2' = R_2 \cdot \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \tag{2-10}$$

$$X_2' = X_2 \cdot \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \tag{2-11}$$

Uzdužna grana je važna za shvaćanje ponašanja transformatora za vrijeme kratkog spoja i pri različitim promjenama opterećenja, dok poprečna grana predstavlja ponašanje transformatora u praznom hodu.

2.5. Paralelni rad transformatora

Najčešći način rada dva ili više transformatora je paralelni rad, kako bi se maksimalno iskoristile nazivne snage svakog transformatora. Za paralelni način rada potrebno je ispuniti određene uvjete:

1. Prijenosni omjeri moraju biti jednaki
2. Naponi kratkog spoja moraju biti približno jednaki
3. Nazivni naponi moraju biti približno jednaki
4. Omjerni nazivnih snaga ne smiju biti veći od 3:1
5. Transformatori moraju biti iste grupe spoja

Kada transformatori nemaju jednake prijenosne omjere, transformator većeg sekundarnog napona protjerat će, zbog razlike potencijala, struju izjednačenja kroz oba transformatora i u neopterećenom stanju. Uz pretpostavku da su razlike napona jednake $\Delta U = U_1 - U_2$, a impedancija jedne faze transformatora Z, struja izjednačenja iznosi:

$$I_i = \frac{\Delta U}{2 \cdot Z} \tag{2-12}$$

Opterećivanjem sekundarne strane transformatora, povećavat će se opterećenje jednoga, a smanjivati opterećenje drugog transformatora. Na taj način neće se moći iskoristiti kapacitet ukupnih nazivnih snaga transformatora. Kako bi transformatore opteretili što bliže njihovim nazivnim snagama u paralelnom radu, potrebno je da su prijenosni omjeri što bliži i naponi kratkog spoja što veći.

Nazivni naponi transformatora mogu biti različiti, npr. 110/10 kV i 115.5/10.5 kV, ali je potrebno da su im prijenosni omjeri jednaki. Različiti nazivni naponi imat će za posljedicu smanjenje prijenosne moći transformacije, dok će transformator s višim naponima primara i sekundara biti više naponski napregnut.

Što se tiče napona kratkog spoja, bitno je da njihove vrijednosti ne budu različite za više od 10% od aritmetičke sredine napona kratkog spoja svih transformatora u paralelnom radu. Razlike manje od 10% prihvatljive su zato što je i preopterećenje, zbog kojeg dolazi, kratkotrajno dopušteno. Kada je razlika veća, ukupno opterećenje će se podijeliti tako da će transformator sa najmanjim u_k biti opterećen snagom većom od nazivne, a onaj s najvećim u_k s manjom snagom od nazivne. Ukupno opterećenje neće biti jednako zbroju svih nazivnih snaga, a da transformator s najmanjim naponom kratkog spoja ne bude u stanju preopterećenja. U slučaju jednakih napona kratkog spoja svih transformatora, opterećenje transformatora će se podijeliti proporcionalno nazivnim snagama transformatora i transformatore će biti moguće opteretiti snagom koja je jednaka sumi nazivnih snaga [4].

Sljedeći kriterij je vezan za omjere nazivnih snaga. Preporučljivo je da omjeri budu manji od 3:1 kako bi transformatori imali što sličnije omjere *R/X*. Različite impedancije transformatora znače i različite padove napona gdje zbog razlike potencijala protječe struja izjednačenja čiji su štetni učinci prethodno opisani. Pretpostavka o jednakosti napona kratkog spoja ne utječe na problem pojave struje izjednačenja u slučaju većih omjera snaga od 3:1. Jednakost padova napona (time i omjera *R/X*), postiže se kod transformatora s jednakim nazivnim snagama. Gubici su minimalni, nema pojave struje izjednačenja te se opterećenje jednoliko raspoređuje.

Transformatori iste grupe spoja mogu se spajati paralelno, ali je potrebno paziti da se na sabirnicu višeg napona spoje stezaljke višeg napona svakog transformatora. Analogno je i za sabirnicu nižeg napona. Moguće je paralelno spojiti npr. transformatore grupe spoje Yd11 i Dy11.

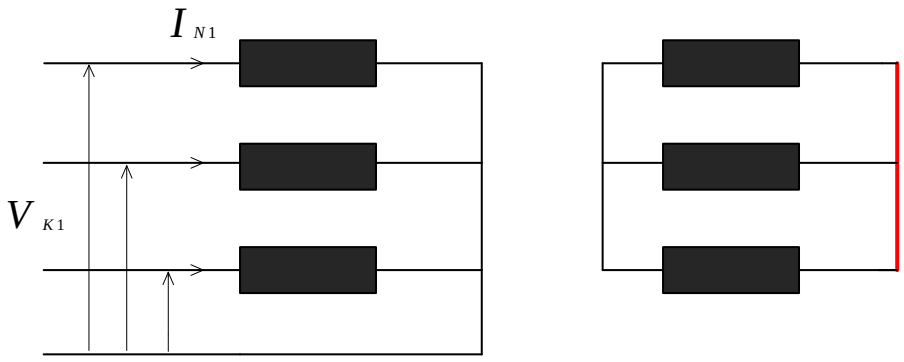
2.6. Reaktancije transformatora

Reaktancije elemenata u elektroenergetskom sustavu bitne su za proračune pri poremećenim stanjima u mreži, pogotovo za slučaj kratkog spoja i promatranje simetričnih komponenti struje kratkog spoja. Direktna reaktancija dvonamotnog transformatora dobije se pokusom kratkog spoja. Direktna reaktancija se dobije iz odnosa faznog napona V_k, narinutog na jednoj strani transformatora i nazivne struje koja teče kroz kratko spojene stezaljke druge strane I_n:

$$X_{d1} = \frac{V_{k1}}{I_{n1}} \tag{2-13}$$

Nadalje, bitno je spomenuti da je važno spaja li se kratko primarni ili sekundarni namot. Ako se izvodi tako da je primarni namot kratko spojen, a na sekundaru nazivni fazni napon, potrebno je reducirati veličine prijenosnim omjerom po formuli:

$$X_{d2} = X_{d1} \cdot \left(\frac{U_{n2}}{U_{n1}}\right)^2 \tag{2-14}$$



Sl. 2.4. *Pokus kratkog spoja za dobivanje direktne reaktancije*

U oba slučaja, napon kratkog spoja je jednak jer se i dalje radi o istom transformatoru. Inverzna reaktancija se dobije tako da se dvije faze zamijene pri spajanju, a dolazi se do identičnog rezultata kao i za direktnu reaktanciju, one su jednake. Svi elementi bez rotirajućih dijelova imaju jednaku direktnu i inverznu reaktanciju. Direktne i inverzne reaktancije transformatora uvijek se određuju na prethodno opisan način i ne ovise o izvedbi, spoju namota i uzemljenju nul – točke, dok nulta reaktancija ovisi o tim čimbenicima. Brojne su kombinacije spojeva namota i načini uzemljenja nul – točaka primara i sekundara. Što se tiče spojeva, u slučaju izolirane zvijezde i trokut spoja, struje nultog sistema ne mogu se zatvoriti u strujnom krugu i nulte reaktancije su beskonačno velike. To se predočava kao prekid strujnog kruga. Pri spoju zvijezda,

uzemljenje je moguće postići direktno ili preko otpornika, uz već spomenuti slučaj ostavljanja izolirane zvijezde. Direktnim uzemljenjem, strujni krug se zatvara i nulta reaktancija je jednaka direktnoj i inverznoj reaktanciji. Uzemljenjem preko otpornika, ukupna reaktancija se povećava za tri puta veću vrijednost dodanog otpornika. Različite kombinacije spoja i uzemljenja pojedinog namota su moguće, tako da je pri raznim kombinacijama čest slučaj da se nulte komponente struje kratkog spoja mogu zatvoriti u jednom namotu, a u drugom ne mogu. U tom slučaju, ukupna nulta reaktancija je jednaka direktnoj.

2.7. Generator

Električni rotacijski strojevi posjeduju svojstvo reverzibilnosti, moguć je rad u motorskom i generatorskom režimu rada. Generator je električni rotacijski stroj koji na načelu elektromagnetske indukcije pretvara mehaničku energiju dovedenu s pogonskog stroja u električnu energiju određenog napona i frekvencije. Sinkroni strojevi su jedini aktivni elementi elektroenergetskog sustava koji konstantno proizvode električnu energiju. U grupu sinkronih strojeva spadaju sinkroni generatori (proizvodnja djelatne i jalove energije), sinkroni motori (pogon radnih strojeva uz mogućnost proizvodnje reaktivne energije) i sinkroni kompenzatori, tj. sinkroni generatori u praznom hodu i služe za snabdijevanje sustava jalovom energijom. Sinkroni generatori se danas većinom koriste za dobivanje električne energije u elektranama. S druge strane, sinkroni motori se koriste u pogonima gdje se zahtjeva konstantna brzina vrtnje, neovisna o opterećenju.

Sinkroni generator se sastoji od statorskog (nepokretnog) i rotorskog (pokretnog) paketa. Iako se induciranje napona može postići i s uzbudnim namotom na statoru, češća izvedba je s uzbudnim namotom na rotoru i armaturnim namotom na statoru. Izolacija i kontaktni problemi s kliznim kolutovima i četkicama, tehnički su razlozi zašto je izvedba s uzbudnim namotom na rotoru češća. Razlog tomu je prijenos velikih količina energije visokog napona (do 27 kV) preko statorskog namota i nepostojanje prijelaza energije preko kliznih koluta i četkica. Statorski paket proizvodi se u obliku šupljeg cilindra sastavljenog od međusobno izoliranih dinamo limova radi smanjenja gubitaka uzrokovanih vrtložnim strujama. Limovi su u pravilu debljine 0.5 mm i svaki od njih na unutrašnjem obodu ima šupljine koje čine žljebove u koje se postavljaju namoti. Rotori sinkronih generatora dijele se na turborotore i hidrorotori. Podjela uvelike ovisi o brzini vrtnje, funkciji frekvencije i broja pari polova generatora. Pri velikim brzinama vrtnje (1500 o/min, 3000 o/min), velike su obodne brzine i dolazi do velikog mehaničkog naprezanja osovine, što rezultira malim promjerima rotora i ravnomjernije raspoređenim namotima rotora. Takva

vrsta rotora naziva se turborotor ili okrugli rotor i kao pogonski stroj koristi parnu turbinu, pogodnu za velike brzine vrtnje. Pri konstantnoj frekvenciji i povećanom broj pari polova, brzina vrtnje opada i što je ona manja, povećava se promjer rotora do mehanički određene granice. Rotori s istaknutim polovima koriste se za manje brzine vrtnje i pogone se pomoću vodnih, sporohodnih turbina (Francisova i Kaplanova). Kod rotora s istaknutim polovima, često se koristi i kratkospojeni, prigušni namot koji ima sljedeće zadaće [2]:

I. Smanjivanje gubitaka i prenapona nastalih u prijelaznim stanjima i pri nesimetričnim opterećenjima
II. Prigušenje njihanja rotora nastalih zbog poremećenog stanja u mreži, promjene momentne ravnoteže turbine i generatora ili nesimetričnog opterećenja
III. Asinkrono pokretanje trofaznog sinkronog motora

Protjecanjem istosmjerne struje uzbude kroz rotorske namote, stvara se nepokretno magnetsko polje. Pokretanjem rotora nekim pogonskim strojem (plinske, parne turbine, vodne turbine), magnetsko polje postaje okretno i silnice magnetskog toka sijeku vodiče statorskih namota i u njima induciraju napon. Spajanjem opterećenja na stezaljke generatora, poteče struja. Sinkroni strojevi su strogo povezani s konstantnom brzinom vrtnje jer su i frekvencija i broj pari polova konstantni. Jedna od fundamentalnih formula sinkronih strojeva uopće pokazuje tu ovisnost :

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \tag{2-15}$$

gdje je:

f - frekvencija,

p - broj pari polova.

Okretno magnetsko polje okreće se sinkronom brzinom, jednakoj brzini vrtnje rotora i te dvije brzine su međusobno relativno nepokretne, tj. rotor i okretno magnetsko polje vrte se sinkrono.

Uzbuda sinkronog generatora postiže se na više načina, a izbor vrste uzbude ovisi o vrsti generatora, njegovoj snazi i nazivnoj brzini vrtnje, o fizičkim dimenzijama, ali i o mrežnim uvjetima. Uzbudni sustavi moraju osigurati pogonsku sigurnost pri različitim promjenama opterećenja ili promjenama u mreži. Četiri su osnovne zadaće uzbude: održavanje vrijednosti struje rotora postignute u trenutku smetnji ili promjenama opterećenja, što brži povratak

napona generatora u slučaju poremećaja, očuvanje faktora snage tereta generatora i jednoliku distribuciju tereta u odnosu na ostale agregate u elektranama. Uzbudu sinkronog generatora moguće je postići drugim generatorom (istosmjerni generator ili sinkroni generator s ispravljačima) ili napajanjem sinkronog generatora putem statičkog elektroničkog pretvarača. Izvor napajanja kod istosmjernih generatora može biti sam sinkroni generator neovisni izvor. Statički elektronički pretvarači napajaju se i dobivaju uzbudnu struju pomoću upravljivih i neupravljivih energetskih pretvarača. Više je principa uzbude; pri samouzbudi, sinkroni generator se uzbuđuje strujom dobivenom sa statorskih stezaljki, prvotno ispravljenom u pretvaračima. Vlastita uzbuda sinkronog generatora postiže se pomoću drugog generatora čija je brzina vrtnje ovisna o brzini vrtnje glavnog sinkronog generatora. Strana uzbuda se postiže iz neovisnog izvora uzbudne struje, neovisna o brzini vrtnje sinkronog generatora.

2.8. Načini rada sinkronog generatora

Dva su osnovna načina rada sinkronog generatora: otočni rad, gdje sinkroni generator radi na vlastitu mrežu i paralelni rad, gdje je sinkroni generator priključen na mrežu koja ima veći broj generatora. U većini slučajeva, sinkroni generator se spaja paralelno s mrežom, dok se otočni pogon primjenjuje u situacijama kada je potrebna opskrba ograničene skupine trošila (u slučaju ekonomske isplativosti ili nemogućnosti priključka na mrežu) i kada je potrebno maksimizirati sigurnost opskrbe u slučaju nestanka glavnog napajanja (npr. bolnice).

Otočni rad je pogonsko stanje sinkronog generatora gdje svaka promjena opterećenja generatora ima za posljedicu promjenu napona na stezaljkama i brzine vrtnje. Kako bi se to izbjeglo i kako bi brzina vrtnje i napon bili konstantni, potrebno je regulirati napon na stezaljkama regulatorom uzbude, tj. stalnim promjenama uzbudne struje. Promjenjivo opterećenje mijenja napon na stezaljkama jer se povećavanjem ili smanjenjem struje koju trošila traže, mijenja pad napon u armaturnom namotu i kada ne bi bilo regulatora uzbude, napon bi se mijenjao u širokim granicama, što nikako nije prihvatljivo. Održavanje brzine vrtnje rotora osigurava se pogonskim strojem. Pri povećanju opterećenja, rotor usporava i potrebno je povećati brzinu vrtnje pogonskog stroja, povećati mehaničku snagu koju pogonski stroj daje generatoru. Kada pogonski stroj ne bi pratio promjenu opterećenja, rotor generatora se ne bi okretao nazivnom brzinom i posljedica toga bi bile velike promjene frekvencije. Održavanje konstantne brzine vrtnje osigurava automatski regulator brzine vrtnje.

Najčešći način rada sinkronih generatora je paralelni rad. Generatori su spojeni na mrežu koju napaja više generatora i ukupna snaga ostalih generatora je puno veća od snage jednog

generatora ili skupine generatora u pojedinoj elektrani. Što je veća ukupna snaga sustava (mreže) u odnosu na generator(e) koji se priključuje, manji je utjecaj tog generatora na mrežu [2]. Napon na stezaljkama generatora i frekvencija određeni su naponom mreže i frekvencijom mreže zato što je mreža za generator „kruta“, ona ima konstantan napon i frekvenciju. Koliko će se pojedini generator ili pojedina grupa generatora opteretiti s obzirom na stanje opterećenosti sustava, određuje se tako da strojevi rade optimalnom snagom (tehnički optimum) ili da se generatori opterete po ekonomskom optimumu, kad njihova proizvodnja ovisi o dostupnosti primarnih energenata (nafta, količina vode, uran itd.). Kako bi se generator priključio na mrežu, potrebno je sinkronizirati mrežu i generator, a uvjeti koji moraju biti ispunjeni su:

a) Jednake frekvencije napona generatora i napona mreže (generator se priključuje tek kada je postigao sinkronu brzinu)

b) Jednake efektivne vrijednosti induciranog napona generatora i napona mreže

c) Iste faze napona mreže i napona generatora (u protivnom mogu poteći velike struje izjednačenja)

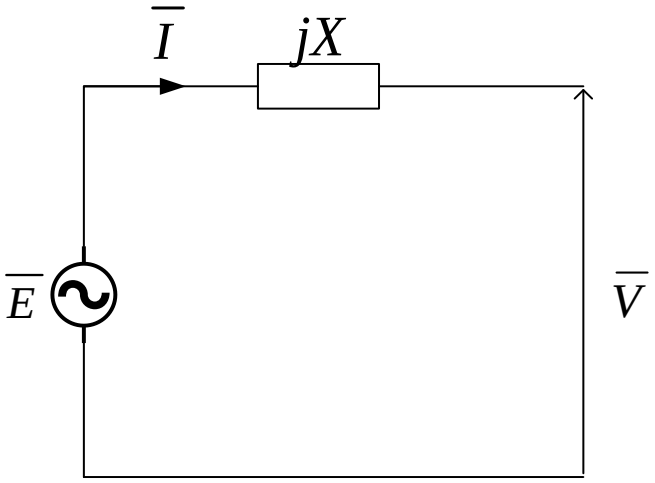
d) Isti redoslijed faza

Sinkronizacija generatora na mrežu postiže se na različite načine, a u slučaju nužde dopuštena su određena odstupanja od gore navedenih uvjeta. Prvi korak u sinkronizaciji je pokretanje generatora pogonskim strojem i dostizanje brzine koja je bliska sinkronoj brzini (određena je frekvencijom mreže i broj pari polova). Nakon što je ispunjen uvjet jednakosti frekvencija, generator se uzbuđuje tako da njegov inducirani napon bude približno jednak naponu mreže. Tada se provjerava redoslijed faza i njihova jednakost pomoću indikatora redoslijeda faza ili jednostavno spajanjem asinkronog motora na generator, pa na mrežu i promatranjem podudaranja smjera vrtnje u oba slučaja. Prva tri uvjeta su tada ispunjena i tada se točnim podešavanjem brzine vrtnje i uzbude uklopi generator na mrežu kada se postigne istofaznost.

2.9. Reaktancije generatora

Proračuni napona, tokova snaga, struji kratkog spoja i stabilnosti zahtijevaju što točnije, ali i jednostavnije nadomjesne sheme elemenata i pripadajućih reaktancija. Za sve prethodno spomenute proračune, sinkroni generator može se nadomjestiti serijskim spojem idealnog naponskog izvora E i reaktancije X. Djelatni otpori namota generatora se zanemaruju zbog neznatnog utjecaja na proračune i opisivanje prilika u stroju. S druge strane, reaktancije sinkronog generatora poprimaju konstantne vrijednosti. Promjena vrijednosti reaktancija događa

se u slučaju kratkog spoja kad one poprimaju različite vrijednosti; tome je uzrok magnetska tromost generatora. Elektromotorne sile su čvrsto vezane za uzbudu i samo promjenom uzbude moguće je utjecati na njih. Nadomjesna shema sinkronog stroja prikazana je na slici 2.5.:

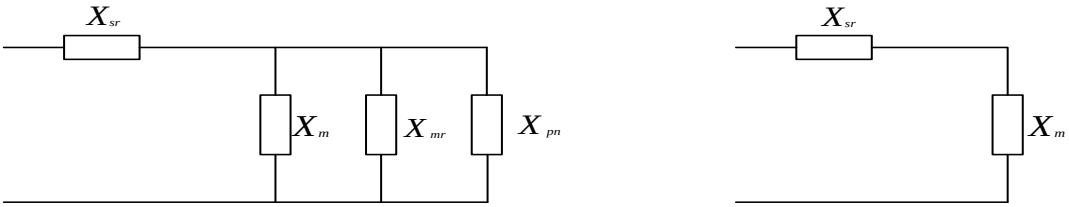


Sl. 2.5. *Nadomjesna shema sinkronog generatora*

Naponska jednadžba koja opisuje prilike u sinkronom generatoru, s obzirom na prethodnu sliku, jednostavna je:

$$\bar{E} = \bar{I} \cdot jX + \bar{V} \tag{2-16}$$

Iako je prikaz sinkronih strojeva jednostavan, fizikalna slika vrlo je kompleksna, osobito u vremenskom intervalu prijelazne pojave za vrijeme trajanja kratkog spoja. U početnom trenutku nastanka kratkog spoja, što generator vidi kao malo opterećenje, magnetska tromost generatora onemogućuje trenutnu promjenu, već je potreban vremenski interval prelaska iz jednog stacionarnog stanja u drugo. Prijelazna pojava se sastoji od početnog razdoblja, prileaznog razdoblja i trajnog razdoblja. U prvotnom trenutku nastajanja kratkog spoja generator ima najmanju reaktaciju koja pojednostavljeno izgleda kao na slici 2.6. a), i kako vrijeme teče, paralelne reaktancije otpadaju, ukupna reaktancija se povećava i smanjuje struju kratkog spoja, sve dok se ne dođe u trajno razdoblje. Slika 2.6. b) prikazuje reaktanciju u trajnom razdoblju. Struja kratkog spoja u početnom trenutku najveće je vrijednosti, reaktancija je najmanja. Prolaskom određenog broja vremenskih intervala, reaktancija se povećava, a struja smanjuje.



Sl. 2.6. *Reaktancije generatora za vrijeme kratkog spoja*

Na prethodnoj slici X_{sr} predstavlja reaktanciju rasipnog toka statora, X_m reaktanciju rotorskog namota, X_{mr} reaktanciju rasipnog toka rotora, a X_{pn} reaktanciju prigušnog namota. Udarna reaktancija generatora je ukupni otpor otpora sa slike u slučajevima a) i b).

Reaktancije generatora se dobivaju pokusom kratkog spoja, identičnim načinom kao kod transformatora. Uzbuđeni generator rotira u praznom hodu, kratko spojene stezaljke rotora protjeraju struju kratkog spoja i iz oscilograma struje se određuje reaktancija.

2.10. Vodovi

Krucijalni elementi elektroenergetskog sustava za stvaranje kostura prijenosnog sustava su vodovi i kabeli. Bez njih ne bi postojao prijenos električne energije na velike udaljenosti i iščezla bi jedna od temeljnih prednosti električne energije. Radi maksimalnog smanjenja gubitaka pri prijenosu energije, na mjestu proizvodnje napon generatora se transformira na viši napon preko blok – transformatora. Povećanjem generatorskog napona, smanjuje se iznos proizvedenih struja i posljedično potrebni presjek vodiča. Smanjujući struju, smanjuju se gubici nastali protjecanjem struje u vodiči, ovisni o kvadratu struje. Smanjena vrijednost struje znači i smanjenje presjeka vodiče, time i smanjenje izdataka za materijal vodiča i kabela.

Po jedinici prenesene snage ili energije na određenu udaljenost, prijenos kabelima je (računajući ukupne troškove izgradnje ili eksploatacije), nekoliko puta skuplji od prijenosa dalekovodom [5]. Kabeli se koriste u specifičnim situacijama, npr. u urbanim područjima ili pri povezivanju otoka sa kopnom. Osim cijene, jednostavnost i brzina popravka idu u prilog dalekovodima. Još jedna bitna razlika u pogledu analize stanja sustava je u karakteru dalekovoda i kabela. Dalekovod predstavlja radno – induktivnog potrošača, a kabeli radno – kapacitivne potrošače. U pravilu, dalekovodi su bolji vodiči električne energije od kabela. Nadzemne vodove moguće je podijeliti prema nazivnom naponu, broju trofaznih sustava na istom stupu, prema materijalu i konstrukciji vodiča i nosivih stupova.

Osnovni elementi dalekovoda su:

I. Vodiči

II. Izolatori

III. Stupovi

IV. Zaštitna užad

V. Sustavi za uzemljenje

Vodiči služe za vođenje električne energije i povezivanje različitih točaka elektroenergetskog sustava. Najčešće se izrađuju od čistog aluminija iz ekonomskih razloga. Izolatori su elementi koji onemogućuju tok struje među vodičima ili stupovima, već samo onim dijelom dalekovoda predviđenim za vođenje električne energije. Stupovi dalekovoda služe kao potporanj i mehanički nose ostale elemente dalekovoda kao što su vodiči, izolatori i zaštitna užad. Uglavnom su od čelika zbog njegove izuzetne čvrstoće i tvrdoće. Zaštitnu užad nije potrebno električni projektirati, samo mora biti metalni, a svrha im je sprječavanje direktnog udara groma u vodiče. Sustavi za uzemljenje su najčešće izrađeni od pocinčanog željeza i uloga im je odvodnja struje u slučaju kratkih spojeva ili proboja radi otklanjanja opasnosti.

2.11. Materijali i izvedbe vodiča

Vodovi predstavljaju elemente elektroenergetskog sustava u kojima se osim elektrotehničkih znanja pojavljuju i elementi strojarstva i mehanike. Vodiči vodova su najbitniji dijelovi dalekovoda i kao jedini aktivni dijelovi svrhu nalaze u vođenju električne energije. Od materijala za vodiče zahtjeva se velika električna vodljivost, ali i dovoljna mehanička čvrstoća kako bi podnijeli sva mehanička naprezanja u pogonu. Među svim elementima, srebro je najbolji vodič električne energije, ali ne nalazi primjenu u praksi zbog neekonomičnosti, već se kao materijali koriste bakar i aluminij. Bakar ima bolja vodljiva svojstva od aluminija, ali se radi uštede za dalekovode upotrebljava čisti aluminij, čija manja specifična težina rezultira 50% manjom težinom aluminijskog vodiča iste vodljivosti od bakrenog vodiča. Zbog slabe mehaničke čvrstoće, čisti aluminij nije prikladno koristiti pri većim rasponima, tj. za visokonaponske dalekovode. Poboljšanje mehaničkih svojstava aluminija i bakra razlog je legiranja s drugim materijalima (najčešće čelik), ali u tom slučaju električna svojstva se ne smiju znatnije smanjiti. Tako legirane vodiče može se shvatiti kao obostranu korist, čelik preuzima

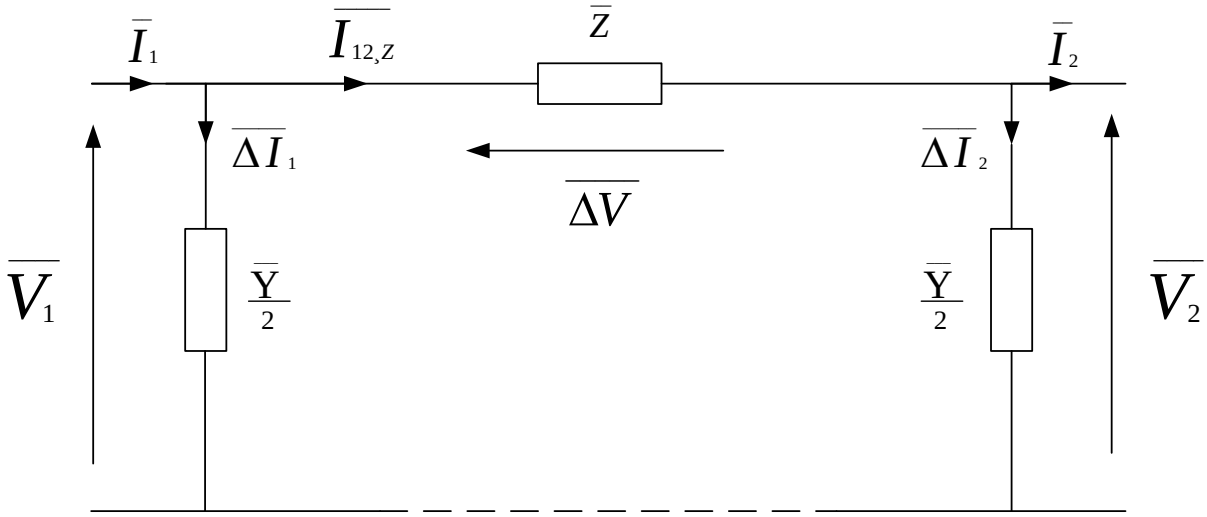
mehanička naprezanja i teret na sebe, dok aluminij služi za vođenje električne struje. AluČel vodiči se primjenjuju od srednjih do najviših napona.

Pri dimenzioniranju vodiča potrebno se pozabaviti s nekoliko pitanja i zahtjeva za vodove. Što se tiče električkih zahtjeva, vodiče je potrebno dimenzionirati s obzirom na pogonsku struju koja će njima protjecati i nominalni napon koji će vladati u pogonu. Gubitke nastale protjecanjem struje mora se držati u granici dopuštenih, jakost električnog polja ne smije biti prevelika kako ne bi došlo do prekoračenja granice električne čvrstoće zraka. Mehanički zahtjevi su vezani za mehaničko naprezanje vodiča u pogonu i za vrijeme kratkih spojeva. Zbog vlastite težine i dodatnih sila koje djeluju na njega u pogonu (kiša, vjetar) i stanja optimalne zategnutosti između stupova, vodiči dalekovoda moraju biti mehanički čvrsti i sposobni podnijeti mehanička naprezanja prisutna u normalnom pogonu. Ekonomski zahtjev je također bitan faktor u projektiranju vodiča.

2.12.Nadomjesne sheme voda

Uzdužne i poprečne jedinične vrijednosti impedancija i admitancija dobiju se korištenjem simetričnih komponenata na simetrični vod, a vod određenih jediničnih konstanti i određene dužine može se prikazati nadomjesnim četveropolom za direktni sustav i nadomjesnim četveropolom za nulti sustav [5]. Vodovi su u većini slučajeva homogeni, pa će i četveropol biti simetričan, a tada se ulaz i izlaz bez štetnih posljedica mogu zamijeniti i omogućuju da se pomoću prilika na početku ili na kraju voda izračunaju prilike na vodu. Vod se u praksi većinom prikazuje π ili T – shemom, a rjeđe Γ – shemom.

Na slici 2.7. prikazana je jednofazna π - shema, gdje je polazna pretpostavka da su poznate strujno – naponske prilike na kraju voda te se pomoću prijenosnih jednadžbi dobivaju prilike na početku voda.



Sl. 2.7. *Jednofazna π – shema voda*

Sa slike 2.7. vrijedi: $\bar{Z} = R + j \cdot X$ i $\frac{\bar{Y}}{2} = \frac{G}{2} + j \cdot \frac{B}{2}$. $\bar{Z}$ i $\frac{\bar{Y}}{2}$ predstavljaju impedanciju uzdužne grane i admitanciju poprečnih grana sastavljenim od svojih sastavnih komponenata. Proračun prijenosa na π – shemi voda obavlja se pomoću Kirchhoffovih zakona, poznavanjem prilika na jednom kraju voda. Pretpostavkom poznatih strujno – naponskih prilika na kraju voda, napon $\bar{V}_2$ se postavlja kao referentni i daljnjim proračunom dolazi se do jednadžbi koje vrijede za pojedinu granu i dio nadomjesne sheme.

Kod vodova dužine do 200 kilometara, dovoljno je koristiti približnu nadomjesnu shemu jer pogreška ne prelazi 0.5%. Ukoliko je vod duži od 200 kilometara, on se podijeli na jednolike fragmente kraće od 200 km i sve dionice se povežu u lanac četveropola. Podaci voda dobivaju se pokusima kratkog spoja i praznog hoda.

2.13. Reaktancije voda

Kao i kod ostalih elemenata elektroenergetskog sustava, i kod voda su prisutne direktna, inverzna i nulta reaktancija. Direktna reaktancija jednaka je reaktanciji pojedine faze koja ovisi o geometriji vodiča, međusobnom rasporedu vodiča i o promjeru samog vodiča, ovisnom od vrijednosti struje u pogonu, dok nulta reaktancija ovisi o više faktora. Sljedeći dijagram pokazuje vrijednosti direktne i inverzne reaktancije ovisno o nazivnim naponima dalekovoda i presjeku samog vodiča.

Vrijednosti direktnih, inverznih i nultih reaktancija vodova moguće je empirijski znati i bez poznavanja faktora o kojima one ovise. Kod vodova nazivnog napona većeg od 30 kV približna vrijednost direktne i inverzne reaktancije iznosi $0.4\ \Omega/km$, a nulta reaktancija veća je tri puta od direktne. Pri manjim vrijednostima napona, direktna reaktancija iznosi $0.35\ \Omega/km$.

2.14. Prekidači

Ispravan rad elektroenergetskog sustava nemoguće je zamisliti bez prekidača. Prekidači su središta svih rasklopnih postrojenja i osim funkcije uklapanja i isklapanja struja, služe za pokretanje, regulaciju i zaštitu elektroenergetskog sustava. Prekidač je sklopni uređaj za uklapanje i isklapanje pogonskih struja te za isklapanje struja kratkog spoja. Što su veće struje kratkog spoja i što su ona električki bliže generatoru, brža su i isključenja prekidača. Sklopni aparati se najčešće dijele prema naponu, i to na visokonaponske (>35 kV), srednje naponske (između 35 kV i 1 kV) i niskonaponske (<1 kV). Zahtjevi koji se postavljaju pred prekidače su brzina djelovanja, pouzdanost i rasklopna snaga. Prekidačem je moguće upravljati daljinski, a životni vijek je određen brojem operacija. Osnovni dijelovi prekidača su komora za gašenje luka, izolatori i pogonski mehanizmi. Za niski napon, prekidači ne moraju imati komoru za gašenje luka (npr. prekidač u kući), dok svi prekidači na srednjem i visokom naponu imaju komoru u kojoj se gasi električni luk.

Električni luk je događaj nastao kao posljedica razdvajanja kontakata pri protjecanju struje kratkog spoja. Električni luk pri isklapanju struje kratkog spoja je opasan jer zagrijava metalne dijelove kontakata i tali metal. Kada ne bi postojala komora za gašenje luka, luk bi spalio sve oko sebe. Kako bi se na što efikasniji i sigurniji način ugasio električni luk pri razdvajanju kontakata potrebno je u što kraćem vremenskom intervalu povećati razmak među kontaktima, kako bi se čim prije postigla udaljenost na kojoj će se luk trajno ugasiti te osigurati intenzivno i efikasno odvođenje topline. Prilikom uklopa i isklopa prekidača, napon može porasti na dvostruko veću vrijednost od nazivne.

Prekidači trpe električna, mehanička, toplinska i kemijska naprezanja za vrijeme pogona, posebice prilikom isklapanja i uklapanja struja. Termičko naprezanje kontakata je povezano s protjecanjem nazivne, ali i struje kratkog spoja kroz prekidač i ovisi o vrijednosti struje i napona. Elektrodinamička naprezanja su važna u trenucima kratkog spoja. Velike elektrodinamičke sile koje se razvijaju za vrijeme kratkog spoja mogu fizički trajno deformirati kontakte prekidača. Najveći elektrodinamički udar događa se u početnom trenutku kratkog spoja, tzv. udarna struja kratkog spoja. Prethodne dvije vrste naprezanja prekidača najvažnije su i u prvom redu ovise o

uklopnoj struji i naponu koji vlada među kontaktima. Uklopna struja je struja koja teče kroz kontakte neposredno nakon uklopa prekidača.

Osim prema nazivnom naponu, prekidače se dijeli prema rasklopnoj struji i rasklopnoj snazi. Rasklopna moć predstavlja umnožak rasklopne struje i nazivnog napona za koji je prekidač napravljen. Rasklopna struja je struja koja teče kroz kontakte neposredno prije isklopa i razlikuje se od maksimalne, udarne struje kratkog spoja. Za trofazni prekidač, rasklopna moć računa se prema formuli:

$$S_{pr.} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{ras} \tag{2-17}$$

gdje je:

U_n - nazivni linijski napon

I_{ras} - rasklopna struja prekidača.

Rasklopna struja prekidača određuje se snimanjem valnog oblika struje na prekidaču. Dimenzioniranje opreme u rasklopnom postrojenju radi se prema udarnoj struji kratkog spoja I''_{KS}, a svi elementi, pa tako i prekidač mora izdržati tu struju. Udarna struja kratkog spoja mjerodavna je za dinamička naprezanja. Sljedeće svojstvo na temelju kojeg je moguće podijeliti prekidače je sredstvo za gašanje luka: zračni, pneumatski, uljni, malouljni, hidromatski, vakuumski i prekidači sa SF_6. Na srednjem naponu su najzastupljeniji vakuumski prekidači, u čijim komorama se nalazi vakuum pomoću kojeg se gasi električni luk. Prekidači s plinom SF_6 koriste se na najvišim naponima i predstavljaju najmoderniju vrstu prekidača. Prednost sumpor – heksafluorida u odnosu na ostale medije za gašenje luka je potreba manje količine plina i manji tlak naspram npr. komprimiranog zraka za jednaku rasklopnu snagu.

2.15. Elektrana Uni Viridas

Osnovna značajka svakog elektroenergetskog sustava je ravnoteža zbira snaga proizvodnje i zbira snaga potrošnje. Potrošači postavljaju svoje zahtjeve za djelatnom i jalovom snagom, a proizvodnja mora odgovoriti na te zahtjeve. Svaka elektrana sastoji se od jednog ili više agregata koji proizvode električnu energiju pomoću generatora pogonjenih raznim pogonskim strojevima. Sva proizvodna postrojenja na biomasu pripadaju skupini termoelektranama i ciklus rada im je identičan kao i konvencionalnim termoelektranama na ugljen. Pod pojmom biomasa podrazumijevaju se sve biorazgradive tvari biljnog i životinjskog porijekla, dobivene od ostataka poljoprivredne i šumske industrije te otpada. Biomasa može

dolaziti u čvrstom, tekućem i plinovitom stanju. Vrste biomase su šumska biomasa (ostaci sječe drva), biomasa iz drvne industrije (ostaci pri piljenju, brušenju itd.), poljoprivredna biomasa (ostaci poljoprivrednih kultura), energetski nasadi, biomasa sa farmi životinja, bio goriva i gradski otpad.

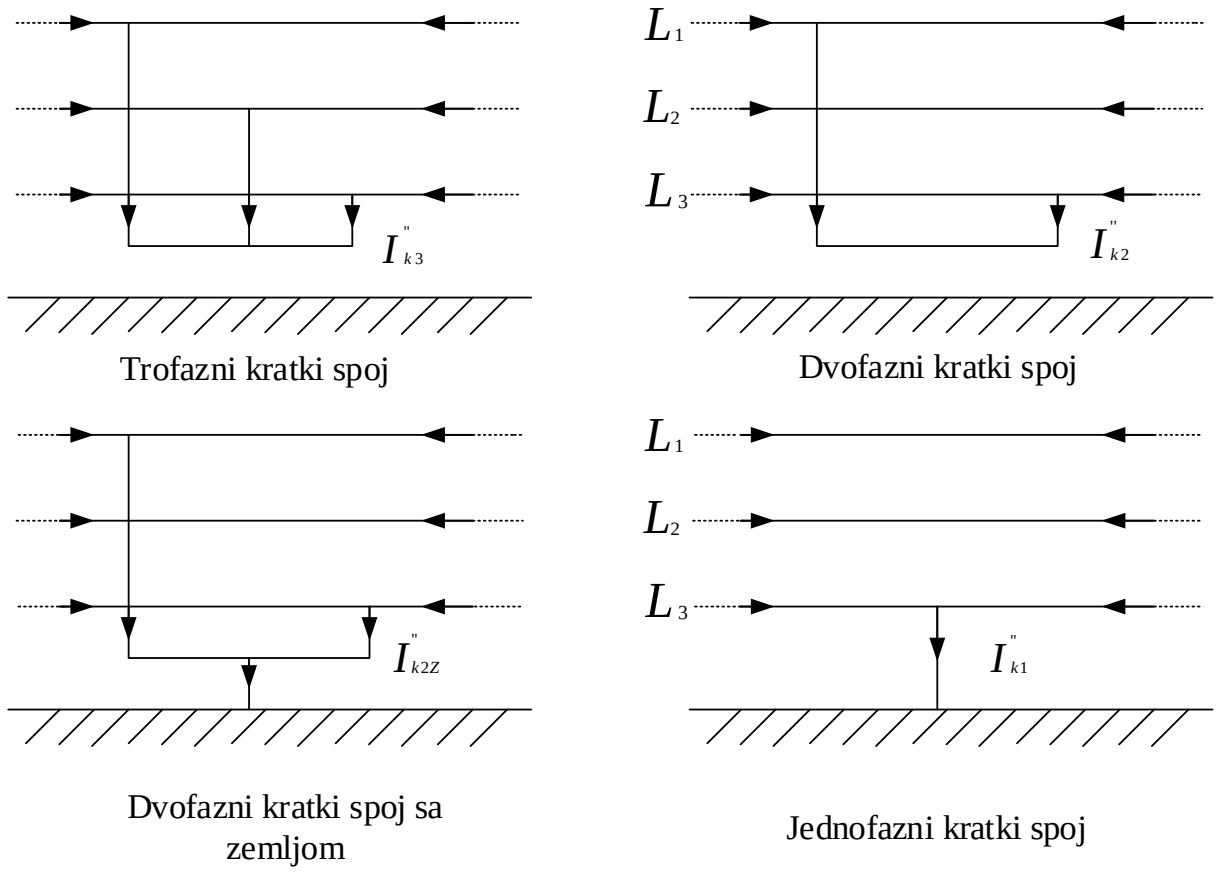
Proces dobivanja električne energije u termoelektranama je slijedeći: izgaranjem pogonskog goriva zagrijava se voda i unutrašnja energija goriva pretvara se u toplinu medija, tj. vodene pare. Toplina vodene pare dovodi se na lopatice parne turbine i transformira se u mehaničku energiju kojom turbina okreće generator, proizvodeći električnu energiju. Pojnu vodu potrebno je nizom tehnoloških postupaka pripremiti za napajanje parnog kotla u kojem dolazi do generiranja vodene pare koja pogoni parnu turbinu. Termoelektrane se koriste za pokrivanje temeljnog dijela dnevnog dijagrama opterećenja i spadaju u skupinu temeljnih elektrana.

Elektrana „Viridas Biomass“ je kogeneracijsko postrojenje na biomasu za proizvodnju električne i toplinske energije korištene od strane neposrednih potrošača. Elektrana je u vlasništvu turskih investitora, a brigu za normalan rad i kontrolu postrojenja obavlja tvrtka „Uni Viridas“. Kao pogonsko gorivo koristi se sječka drveta čije su količine u okolnim šumama enormno velike. Sječku je potrebno prije izgaranja osušiti kako bi se razina vlage smanjila na manje od 20%. Distribuirana proizvodnja električne energije elektrane opskrbljuje energijom šire područje Babine Grede, dok se toplinska energija koristi za staklenike poljoprivrednih kultura i sušaru.

2.16. Struje kratkih spojeva

Problematika proučavana u ovom diplomskom radu ne bi bila moguća bez nastanka poremećenog stanja u mreži zvanog kratki spoj. Automatski ponovni uklop je skup operacija u određenom vremenskom intervalu za vrijeme trajanja kratkog spoja. Nakon što relej mjereći mjerenu veličinu prepozna nastanak kratkog spoja daje nalog prekidaču za isklop. Pošto je u praksi čest slučaj da je kvar prolaznog karaktera, određeno vrijeme (najčešće 350 ms) prekidač ostaje otvoren. Tada ponovno uklopi i ako je kvar trajan, pogon nastavlja s normalnim radom, a ako nije i kvar se pokazao kao trajan, prekidač ponovno isklapa i ostaje u otvorenom stanju. Za svako postrojenje ili mrežu izrazito negativne situacije su ekstremno velike struje u slučaju nastanka kratkog spoja te pojave visokih napona (pogonski i atmosferski prenaponi). Kratki spoj je stanje u kojem dva vodljiva dijela postrojenja ili mreže postanu vodljiva međusobno ili sa zemljom. Uzroci nastanka kratkog spoja su kvarovi na pojedinim elementima u mreži i proboj na izolaciji elemenata. Posljedice kratkog spoja mogu biti pogubne za čovjeka, ali i za elemente i

mrežu uzrokujući elektrodinamička i termička naprezanja. Cijeli elektroenergetski sustav u Republici Hrvatskoj temelji se na trofaznom sustavu struja i u takvom sustavu postoje četiri vrste kratkih spojeva prikazanih na slici 2.9.



Sl. 2.9. *Vrste kratkih spojeva*

Od gore prikazanih kratkih spojeva, jedino trofazni kratki spoj predstavlja simetrični kratki spoj, dok su ostali nesimetrični. Način proračuna struja kratkog spoja važan je i složen zadatak kojim se ovaj rad neće detaljnije baviti, detalji su objašnjeni u literaturi [4]. Međutim, pri proračunu struja kratkog spoja potrebno je razlikovati minimalnu i maksimalnu struju kratkog spoja. Maksimalnu struju kratkog spoja potrebno je poznavati kako bi se dimenzionirali elementi mreže i kako bi se proračunala elektrodinamička naprezanja koja elementi moraju izdržati. Također, maksimalna struja kratkog spoja je bitna za određivanje rasklopne snage prekidača spomenute u potpoglavlju 2.14. Minimalna struja je potrebna sa stajališta podešavanja cjelokupne zaštite i mora biti što točnije proračunata zato da bi zaštita odradila na minimalnu struju kratkog spoja, a osigurala normalan rad pri najvećoj pogonskoj struji. Struju kratkog spoja moguće je promatrati u odnosu na udaljenost od generatora. U oba slučaja, struja kratkog spoja sastoji se od

izmjenične i istosmjerne komponente. Istosmjerna komponenta struje kratkog spoja u slučaju kratkog spoja blizu generatora, ali i daleko od njega, eksponencijalno opada. U slučaju kratkog spoja daleko od generatora, izmjenična komponenta ima konstantnu vrijednost, dok se u slučaju bliskog kratkog spoja prigušuje.

3. PROGRAMSKI PAKET ATP – EMTP

Analiza prijelazne pojave pri automatskom ponovnom uklopu prekidača i praćenju utjecaja na Siemens-ov generator obavlja se u programu ATP – EMTP. ATP – EMTP je jedan od najraširenijih simulacijskih programa za obavljanje digitalnih simulacija elektromagnetskih i elektromehaničkih prijelaznih pojava. Koristi se za analize prijelaznih pojava u elektroenergetskim sustavima, za simulaciju kontrole rada električnih elemenata, za simulaciju pojava vezanih za komponente energetske elektronike te razne kombinirane situacije. Program ima širok opus djelovanja, omogućuje modeliranje mreže, vršenje simulacije te dobivanje grafičkih rezultata i to kako u vremenskoj, tako i u frekvencijskoj domeni. Također, posjeduje bazu podataka u koju je moguće upisati i vlastite podatke pojedinog elementa. Ovaj program se sastoji od velikog broja različitih modela sinkronih i asinkronih strojeva, DC izvora, transformatora, dalekovoda i kabela, prekidača i dr.

Dodatni programi koji povećavaju obim djelovanja ATP – EMTP programa su ATP Control Center, ATPDraw, PCPlot, PlotXY, GTPPlot i Programer´s File Editor (PFE). ATP Control Center predstavlja korisničko sučelje Windowsa kako bi se moglo upravljati programima kao što su PCPlot i PlotXY. ATPDraw je grafički procesor pomoću kojeg se crtaju modeli strujnih krugova koji se žele simulirati. Komponente koje će činiti strujni krug već su unaprijed definirane i samim njihovim izborom, ATPDraw stvara ulaznu datoteku. PCPlot i PlotXY su programi koji služe za grafički prikaz rezultata dobivenih simulacijom u ATP – u. GTPPlot je program koji omogućuje grafički ispis rezultata dobivenih simulacijom. PFE omogućuje generiranje i mijenjanje ulaznih podataka za ATP, dio programa u kojem je moguće programirati.

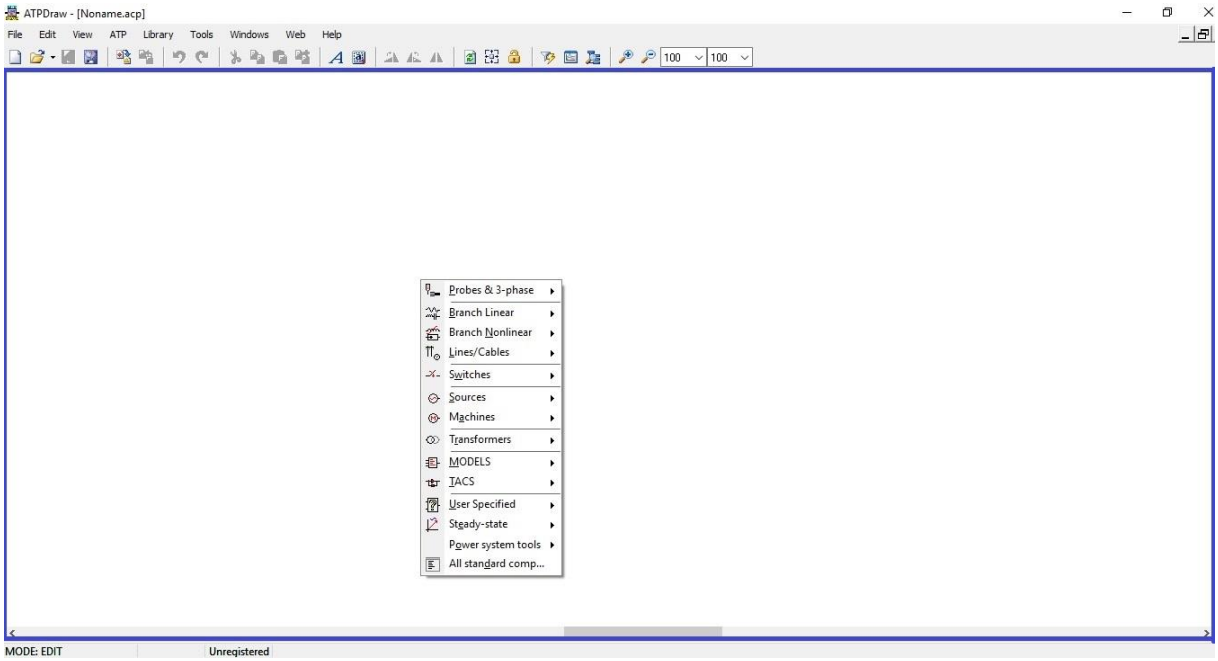
Više je potpornih programa koji omogućuju izračun parametara za posebne vrste različitih električnih elemenata. Najkorišteniji od njih su BCTRAN, XFORMER i LINE CONSTANTS. BCTRAN je program koji podatke dobivene iz pokusa kratkog spoja i praznog hoda transformatora koristi kako bi se iskoristile reprezentacije jednofaznog ili trofaznog transformatora. XFORMER se koristi za izradu linearnog modela jednofaznog dvonamotnog i

tronamotnog transformatora. LINE CONSTANTS potporni je program za izračun parametara nadzemnih vodova, matrice jediničnih induktiviteta i kapaciteta, međutim ne u vremenskoj, već u frekvencijskoj domeni.

3.1. Uvod u ATPDraw

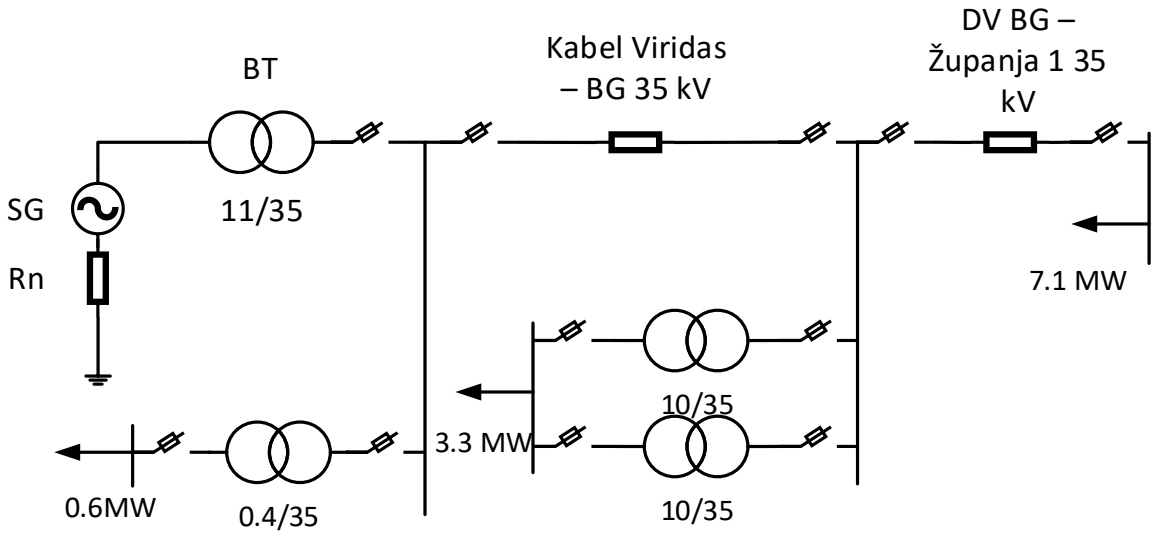
Početni prozor programskog paketa *ATPDraw*-a sastoji se od trake *Main menu, Tool bar icons* i *Circuit window*-a. Jedini izbornik koji je moguće koristiti početnim ulaskom u program ATPDraw je *Main menu. Main menu* osigurava korištenje svih funkcija koje podržava program, a sastoji se od stavki kao što su *File, Edit, View, ATP, Library, Tools, Windows*, *Web* i *Help*. Otvaranjem stavke *File* glavnog izbornika može se otvoriti novi projekt, spremiti postojeći ili otvoriti jedan od spremljenih projekata. Također, postoji opcija ispisa rezultata putem printera. *Edit* omogućuje uređivanje elemenata strujnog kruga te brže i jednostavnije crtanje istog. Opcija *View* služi za uređivanje i prikaz strujnog kruga u željenom stanju, a *ATP*, kao najvažnija opcija, služi za postavljanje postavki simulacije (trajanje simulacije, korak, mrežna frekvencija i dr.), prikaz ulaznih podataka u atp.*file* i koristi se za pokretanje simulacije i samu analizu problema te za grafički prikaz rezultata.

Odabirom *File/New* u glavnom izborniku ili bijelog dokumenta na početku *Tool bar icons*, otvara se novi projekt, prozor s prostorom za crtanje električnih shemi i krugova. Slika 3.1. prikazuje otvoreni prozor za crtanje električnih krugova (uokviren plavim pravokutnikom) te se u tom prozoru desnim klikom otvara izbornik elemenata. Kao što je prikazano, moguć je izbor različith elemenata od električnih elemenata kojima se mjeri i nadzire električne veličine (*Probe*) kao što su napon, struja, snaga i dr. do onih kojima se modelira čitava grana strujnog kruga elementima poput otpora, kapaciteta ili induktiviteta (*Branch Linear/Nonlinear*). Grane mogu biti linearne ili nelinearne. *Lines/Cables* služi za modeliranje dalekovoda i kabela, kako prepletenih tako i raspodijeljenih. Također, moguće je preuzeti i gotov predložak kojim se može odrediti i geometrijski raspored vodiča unutar dalekovoda i kabela (*LCC template*). Odabirom *Switches* prikazuje se široka paleta mogućnosti prekidača bitnih za upravljanje elektroenergetski sustavom, pogotovo u trenucima kvarova ili radova na pojedinim dijelovima sustava. *Sources* i *Machines* su najvažniji za modeliranje izvora svakog sustava. Raznovrsni izbor u oba izbornika omogućuje modeliranje strujnih, naponskih, istosmjernih izvora, ali i različitih tipova sinkronih i asinkronih strojeva. Modeli transformatora nalaze se u *Transformers* gdje *ATPDraw* nudi više modela transformatora, čak i idealni transformator. Ostale rubrike tiču se različitih modela unutar programa *ATPDraw*.



Sl. 3.1. *Izbornik elemenata u programu ATP - EMTP*

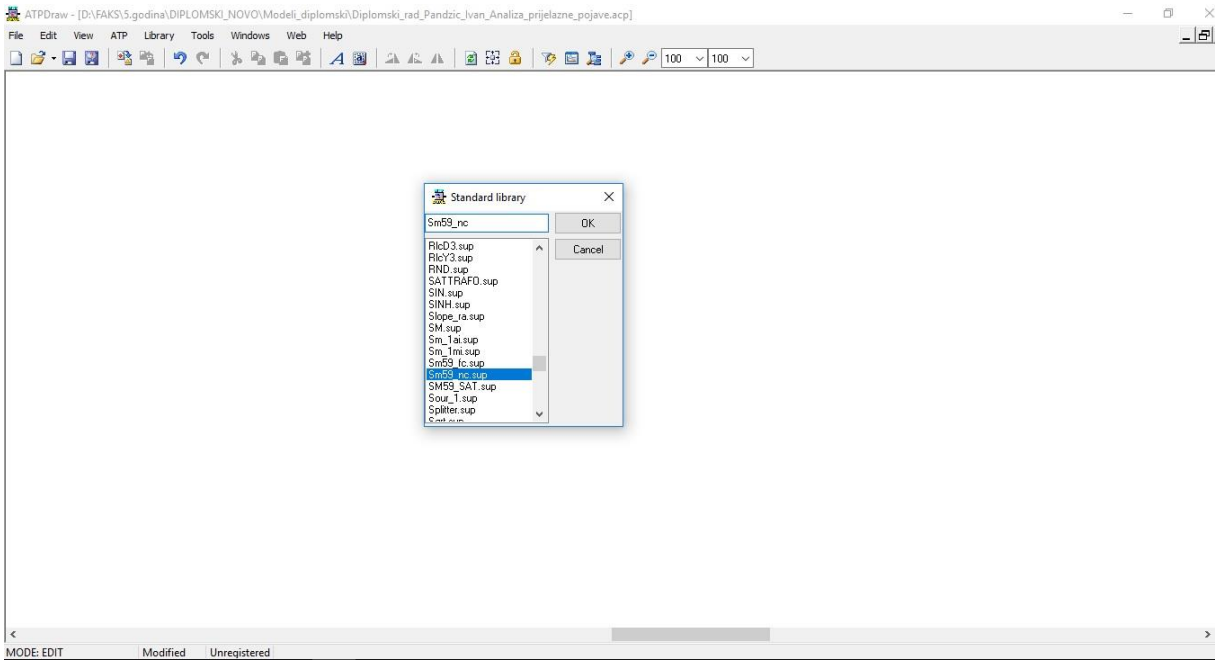
Prije nego što bude opisan način modeliranja promatranog električnog kruga, potrebno je opisati dio mreže koji će se simulirati. Elektrana „Viridas“ modelirat će se sinkronim generatorom nazivne snage $S_n = 12.158\,MVA$, nazivnog napona $U_n = 11\,kV$ i nazivne struje $I_n = 638\,A$. Generator je posredno uzemljen radnim otporom putem naponskog mjernog transformatora. Podizanje napona s generatorskih stezaljki kako bi se smanjila struja, a s njom i gubici, obavlja se pomoću blok transformatora 35/11 kV, nazivne snage $S_n = 13\,MVA$. Nakon toga dolazi do čvorišta gdje jedan dio snage odlazi na napajanje vlastite potrošnje $P_1 = 0.6\,MW$ preko transformatora vlastite potrošnje 35/0.4 kV, nazivne snage $S_n = 2\,MVA$. Drugi, veći dio snage, korišten za napajanje potrošača distributivne mreže, od blok transformatorima prenosi se kabelom do sljedeće točke grananja mreže, gdje jedan dio preko dalekovoda napaja potrošača na 35 kilovoltnom naponu snage $P_3 = 7.1\,MW$. Drugi dio snage prenesene kabelom preko 2 distributivna transformatora prijenosnog omjera 35/10 kV, nazivne snage $S_n = 4\,MVA$, napaja 10 kV potrošača koji uzima snagu $P_2 = 3.3\,MW$. Slika 3.2. prikazuje dio distributivne mreže prethodno opisan i za taj dio mreže vršit će se analiza prijelazne pojave i utjecaj na generator pri pojavi kratkog spoja i automatskog ponovnog uklopa. Opširniji podaci pojedinih elemenata mreže sa slike 3.2. bit će prikazani u nastavku rada.



Sl. 3.2. *Shema dijela mreže*

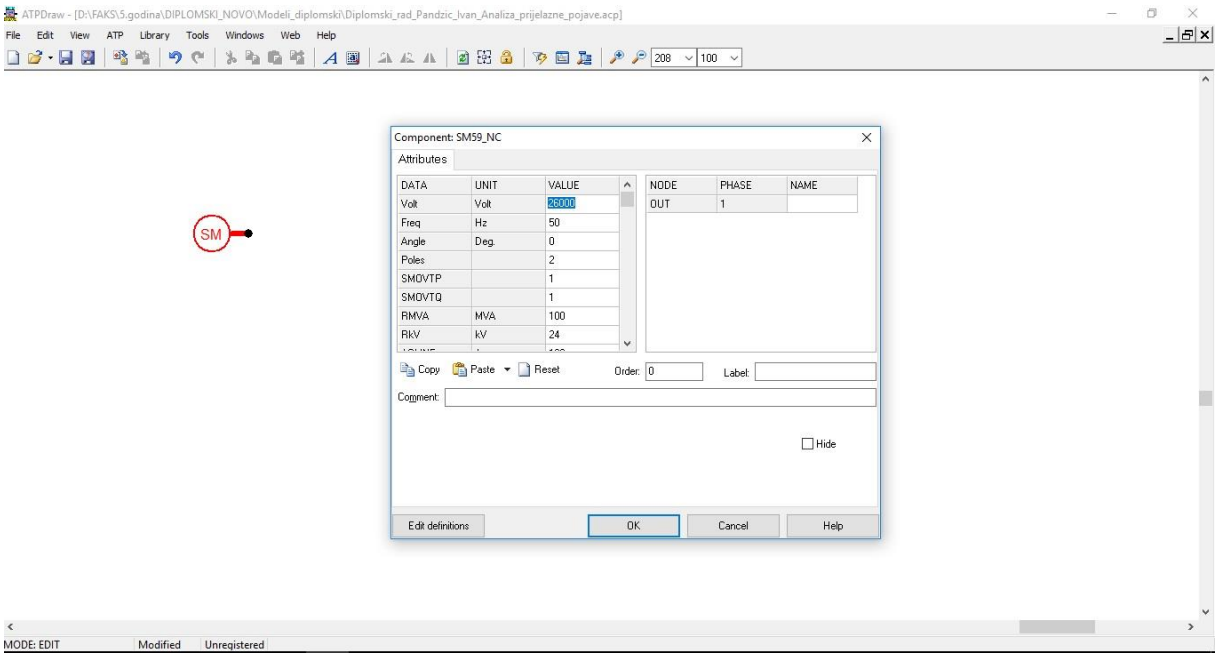
4. MODELIRANJE ELEKTRIČNE SHEME U PROGRAMSKOM PAKETU ATPDraw

Izrada električnog kruga sa slike 3.2. počinje odabirom prikladne vrste sinkronog generatora. Desnim klikom na praznom prostoru za izradu električne sheme dobiva se izbor kao na slici 3.1. Izbor posljednje mogućnosti *All standard components* otvara bazu podataka programa ATP - EMTP i tražilicu potrebnih elemenata. U tražilicu se upisuje Sm59_nc i pritiskom *OK* odabire se model sinkronog generatora bez TACS kontrole.



Sl. 4.1. *Odabir modela sinkronog generatora*

Odabirom prethodno spomenute vrste generatora te dvostrukim lijevim klikom na ikonicu SM otvara se izbornik prikazan na sljedećoj slici s parametrima koje je potrebno zadati sinkronom generatoru.



Sl. 4.2. *Ulazni podaci sinkronog generatora*

Otvoreni izbornik s parametrima potrebno je popuniti dostupnim podacima dobivenim od proizvođača generatora. Prije pojašnjenja pojedinog parametra kojeg treba zadati generatoru, prikazat će se svi dostupni podaci generatora od strane proizvođača. Tablica 4.1. prikazuje parametre generatora.

Tablica 4.1. *Podaci proizvođača za generator*

Parametri	Generator
S_n [MVA]	12.158
U_n [kV]	11
I_n [A]	638
I_f [A]	226
f [Hz]	50
n_n [o/min]	1500
X_d [%]	143.2 %
X_q [%]	129.9 %
X'_d [%]	17.1 %
X'_q [%]	129.9 %
X''_d [%]	10.8 %
X''_q [%]	11.9 %
T'_{d0} [s]	3.056 s
T'_d [s]	0.402 s
T''_d [s]	0.031 s
T_a [s]	0.125 s

Kratice S_n, U_n i I_n opisane su u prethodnom poglavlju, predstavljaju nazivnu prividnu snagu generatora, nazivni linijski napon generatora i nazivnu linijsku struju generatora. I_f predstavlja struju uzbude sinkronog generatora.

Prvi parametar za sinkroni generator koji treba unijeti je amplituda napona na stezaljka stroja u stacionarnom stanju. S obzirom da je ATP – EMTP programski paket gdje se rezultati simulacije dobiju u trenutnim vrijednostima, u ovaj prozor upisuje se tjemena vrijednost nazivnog napona, tj. $U_{tj.} = \sqrt{2} \cdot 11000 = 15556.35\,V$. Sljedeći parametri su vezani za frekvenciju, broj polova sinkronog generatora te kut fazora napona u stacionarnom stanju. Frekvencija rada generatora dana je tablicom 4.1. i iznosi $50\,Hz$. Koristeći jednadžbu (2-15), dolazi se do broja pari polova stroja te množeći rezultat s dva, dolazi se do ukupnog broja polova. Kut fazora napona postavlja se na vrijednost nula kao referentni kut. Parametri SMOVTP i SMOVTQ tiču se paralelnog načina rada generatora opisanog u poglavlju 2.8. Koliko se sinkronih generatora nalazi u sustavu, toliki se broj upisuje za ova dva parametra. U

ovom slučaju, postoji samo jedan sinkroni generator u sustavu, stoga se upisuju jedinice. Sljedeća tri parametra određuju prividnu snagu koju će generator davati u sustav, nazivni linijski napon u kV te vrijednost struje uzbude koja stvara nazivni linijski napon armature. Za proučavanje ovoga rada prividna snaga koju će generator generirati u mrežu bit će $S_n = 11.8\,MVA$, a nazivni linijski napon i struja uzbude ostaju na nazivnim vrijednostima kao što je prikazano u tablici 4.1. Otpor armature i reaktancija rasipanja postavljaju se u omjer 1:2, $R_a = 0.005\,p.u.$ te $X_l = 0.01\,p.u.$ Nakon toga potrebno je upisati vrijednosti početnih, prijelaznih i trajnih sinkronih reaktancija za d i q os stroja. Uzdužna d i poprečna q os predstavljaju zamišljene osi u odnosu na namote rotora i koriste se za lakše razumijevanje dinamike stroja. Vrijednosti reaktancije dane su u postocima, a pošto program traži upis u p.u., vrijednosti se dijele sa 100. Tražene vremenske konstante, subtranzijentne i tranzijentne vremenske konstante d i q osi potrebno je izračunati. Tranzijentnu vremensku konstantu d osi T'_{d0} unosi se na temelju tablice 4.1. Uz pomoć sljedećih formula, vrši se proračun ostalih potrebnih konstanti uz pomoć onih u tablici 4.1. Vremenska subtranzijentna i tranzijentna konstanta d osi pri kratkom spoju T''_d i T'_d koriste se za izračun subtranzijentnih vremenskih konstanti d i q osi prema formulama iz [4]:

$$\frac{T''_d}{T''_{d0}} = \frac{X''_d}{X'_d} \tag{4-1}$$

$$\frac{T''_q}{T''_{q0}} = \frac{X''_q}{X_q} \tag{4-2}$$

Potrebno je napomenuti kako je $T''_q = T''_d$ za turbogeneratore s prigušnim namotom. Tranzijentna vremenska konstanta q osi T'_{q0} uzima se jednaka jedinici na temelju empirijskih iskustava. Kako bi program prepoznao da se radi o vremenskim konstantama dobivenim za vrijeme praznog hoda, potrebno je parametar FM postaviti na vrijednost manju od 2. Vremenske konstante pojedinih osi pokazuju koliko je trajanje pojedinih vremenskih intervala za vrijeme kratkog spoja za pojedinu os. Nulta reaktancija unosi se na identičan način kao i vrijednosti sinkronih reaktancija. Zadnji parametar koji je potrebno upisati je onaj vezan za djelatni otpor i reaktanciju uzemljenja generatora ako je posredno uzemljen. Sinkroni generator u elektrani Viridas uzemljen je preko naponskog mjernog transformatora $\frac{\frac{11000}{\sqrt{3}}}{500}$ V djelatnim otporom $3.94\,\Omega$. Metodom relativnih impedancija dolazi se do izračuna bazne impedancije te postavljanjem u odnos s nazivnom impedancijom generatora $Z_n = 9.952\,\Omega$ dolazi se do vrijednosti djelatnog otpora 0.139 p.u., a imaginarni dio impedancije uzemljenja ne postoji. Ostali parametri traženi od strane

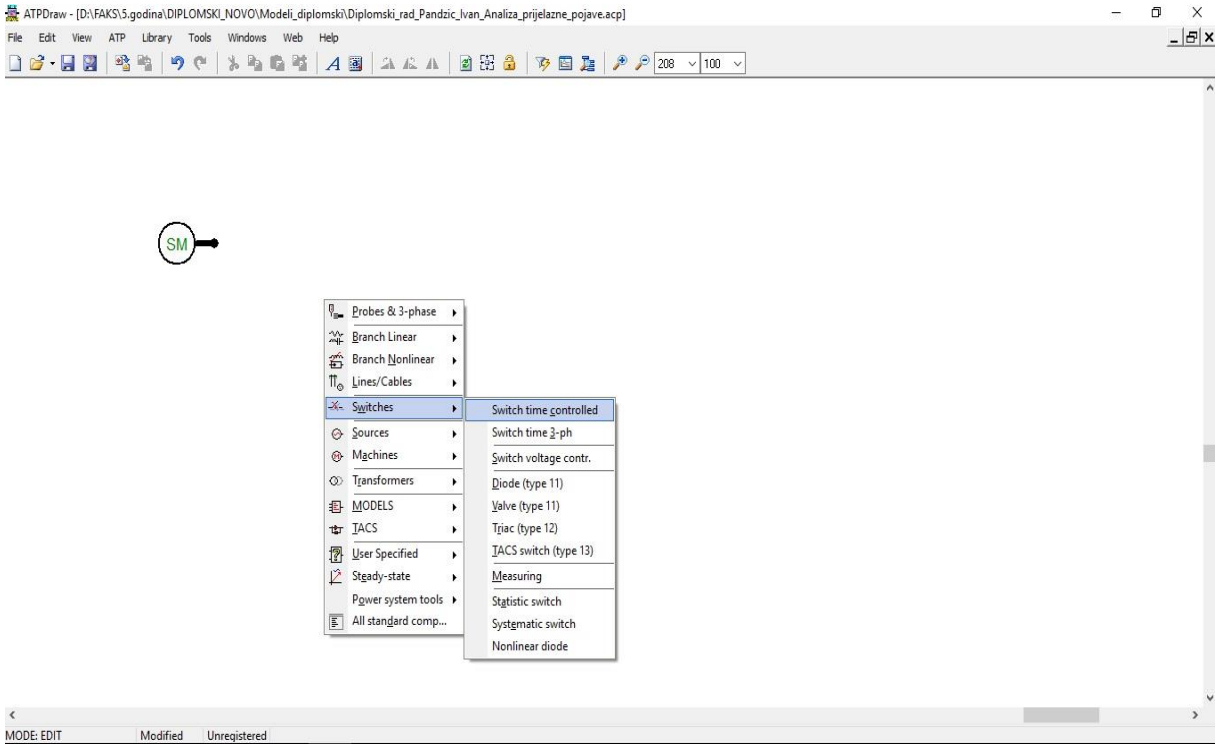
programa ostavljaju se na početnim vrijednostima. Ukoliko korisnik ima bilo kakvih poteškoća s razumijevanjem parametara ponuđenih pri otvaranju ikone sinkronog generatora, odabirom opcije *Help* prikazane na slici 4.2., ATPDraw opisuje značenje pojedine kratice i mjernu jedinicu u kojoj je potrebno zadati parametar. Ulazni podaci generatora u programskom paketu ATPDraw prikazani su u tablici 4.2.

Tablica 4.2. *Ulazni podaci generatora*

$U_{tj.}$ [V]	15556.35
f [Hz]	50
Kut [°]	0
Broj polova	4
Faktor podjele djelatne snage među više SG	1
Faktor podjele jalove snage među više SG	1
RMVA [MVA]	11.7
RkV [kV]	11
AGLINE [A]	226
R_A [p.u.]	0.005
X_L [p.u.]	0.01
X_d [p.u.]	1.432
X_q [p.u.]	1.299
X'_d [p.u.]	0.171
X'_q [p.u.]	1.298
X''_d [p.u.]	0.108
X''_q [p.u.]	0.119
T'_{d0} [s]	3.056
T'_{q0} [s]	0.5
T''_{d0} [s]	0.049
T''_{q0} [s]	0.0334
X_0 [p.u.]	0.058
R_N [p.u.]	0.139
X_N [p.u.]	0
XCAN [p.u.]	0.01
HICO [10^6]	0.03
DSR [N – m/rad/sec]	0
DSD [N – m/rad/sec]	50
FM	1
MECHUN	1

Prema shemi sa slike 3.2., element koji dolazi poslije generatora je blok transformator, međutim između generatora i transformatora postavit će se jedan prekidač koji će čitavo vrijeme biti zatvoren. Generalno, između generatora i transformatora ne postoji prekidač zato što su bliske struje kratkog spoja vrlo velikog iznosa i ne postoji prekidač koji bi isklopio tako velike

struje kratkog spoja. U elektrani „Viridas“ takav prekidač fizički ne postoji, ali će u ovom slučaju služiti kao strujni mjerni instrument. Svaki prekidač u programskom paketu ATP – EMTP ima mogućnost snimanja vrijednosti struja, napona, energije i snage. Desnim klikom te odabirom *Switches* → *Switch time controlled* odabire se vremenski upravljani prekidač i otvara se izbor prikazan na slici 4.3.

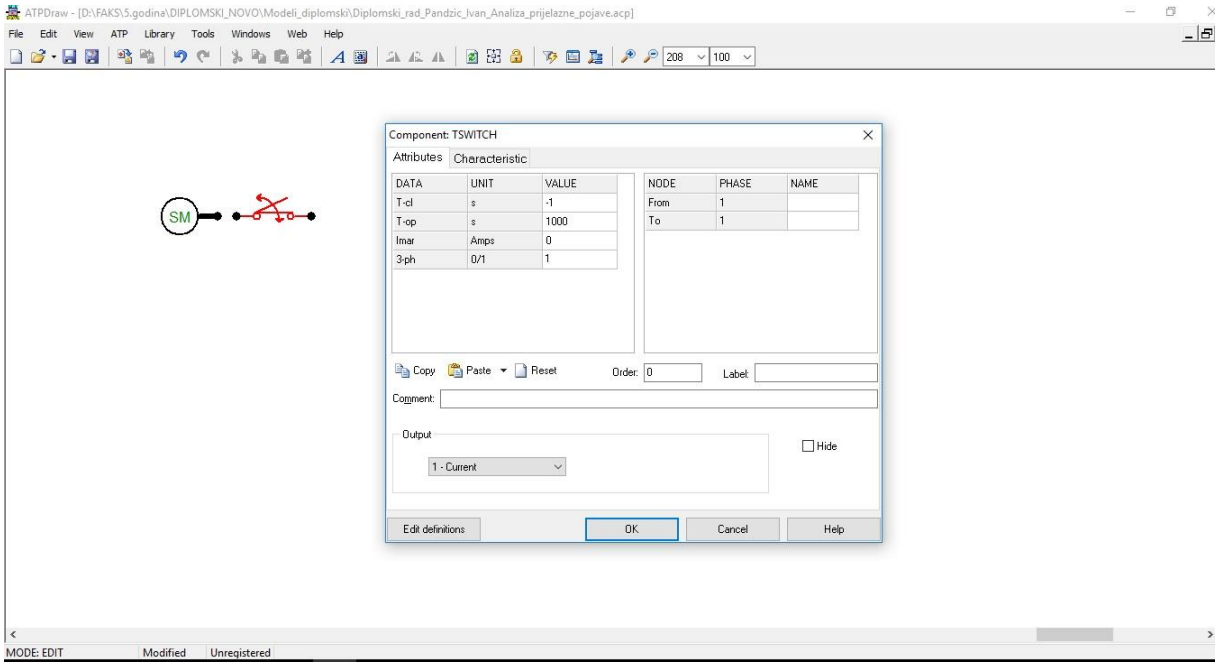


Sl. 4.3. *Odabir modela vremenski kontroliranog prekidača*

Jedina stavka koja će se promijeniti bit će 3-ph, gdje nula određuje jednofazni, a jedan trofazni prekidač, potreban za trofazni sustav u ovom radu. Ova vrsta prekidača ima mogućnost ponovnog uklopa isklopa i to više puta, što se parametrira u dijelu *Characteristic*, ali taj dio će se opisati u kasnijem dijelu rada. U otvorenom izborniku za prekidač izmijenit će se i vrsta izlazne veličine koju će se pratiti na tom elementu, kod ovog prekidača to će biti struja, tj. struja generatora. Ulazni podaci svih prekidača nalaze se u tablici 4.3.

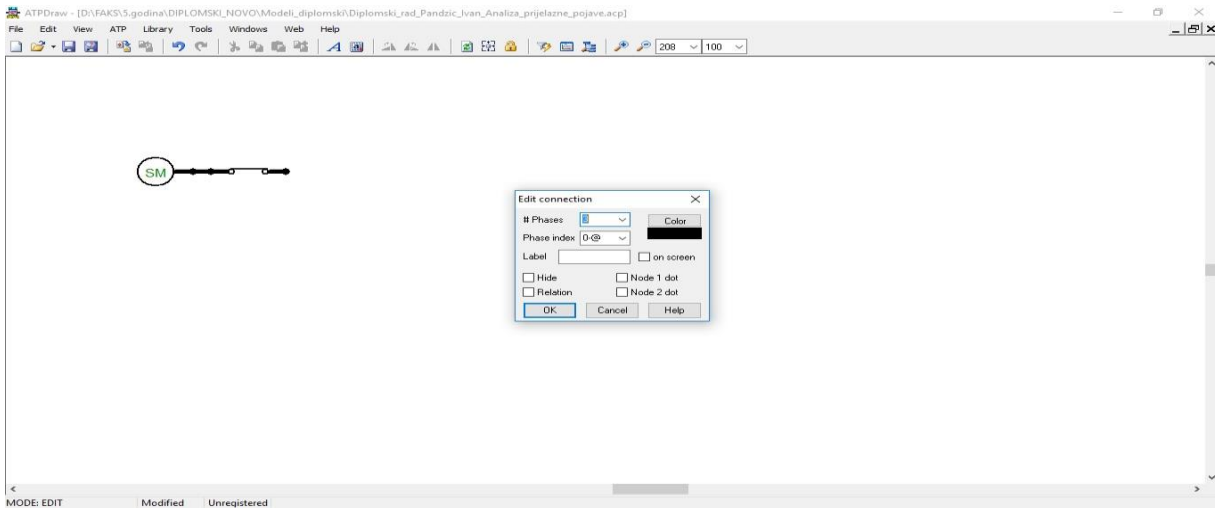
Tablica 4.3. *Ulazni podaci prekidača*

T – cl [s]	-1
T – op [s]	1000
I_{mar} [A]	0
3 - ph	1
Praćena izlazna veličina	0 - 4



Sl. 4.4. *Podešavanje podataka prekidača*

Povezivanje dva elementa strujnog kruga može se obaviti jednostavnim spajanjem točke jednog elementa s točkom drugog elementa ili jednostavnim povezivanjem točaka tako da se lijevim klikom označi točka jednog elementa i povuče do točke elementa s kojima želimo spojiti prvotni element. Lijevim klikom se označuje točka s kojom povezujemo element i dva elementa su povezana. Dvostrukim lijevim klikom na poveznicu dva elementa otvara se izbornik kao na slici 4.5. Izbornik nudi mogućnosti odabira broja faza, indeks kojim će biti označena poveznica, odabir imena krajnjih točaka te poveznice i boju kojom će biti označena poveznica dva elementa.



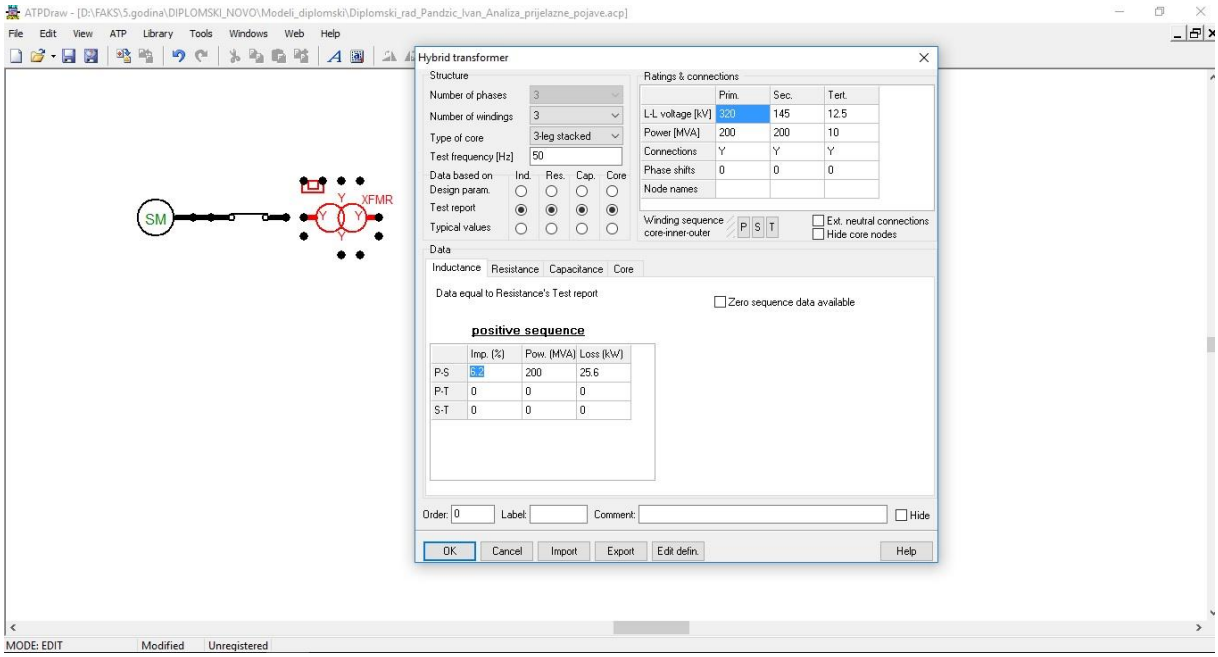
Slika 4.5. *Povezivanje dva elementa strujnog kruga*

Nakon generatora i prekidača, sljedeći element u shemi sa slike 3.2. koji treba modelirati je transformator. Pošto će se sva četiri transformatora u strujnom krugom modelirati istim modelom transformatora, prvo će se pregledno prikazati svi transformatori sa svojim pripadajućim nazivnim podacima. Tablica 4.4. prikazuje nazivne podatke svih transformatora korištenih u ovoj simulaciji.

Tablica 4.4. *Nazivni podaci transformatora*

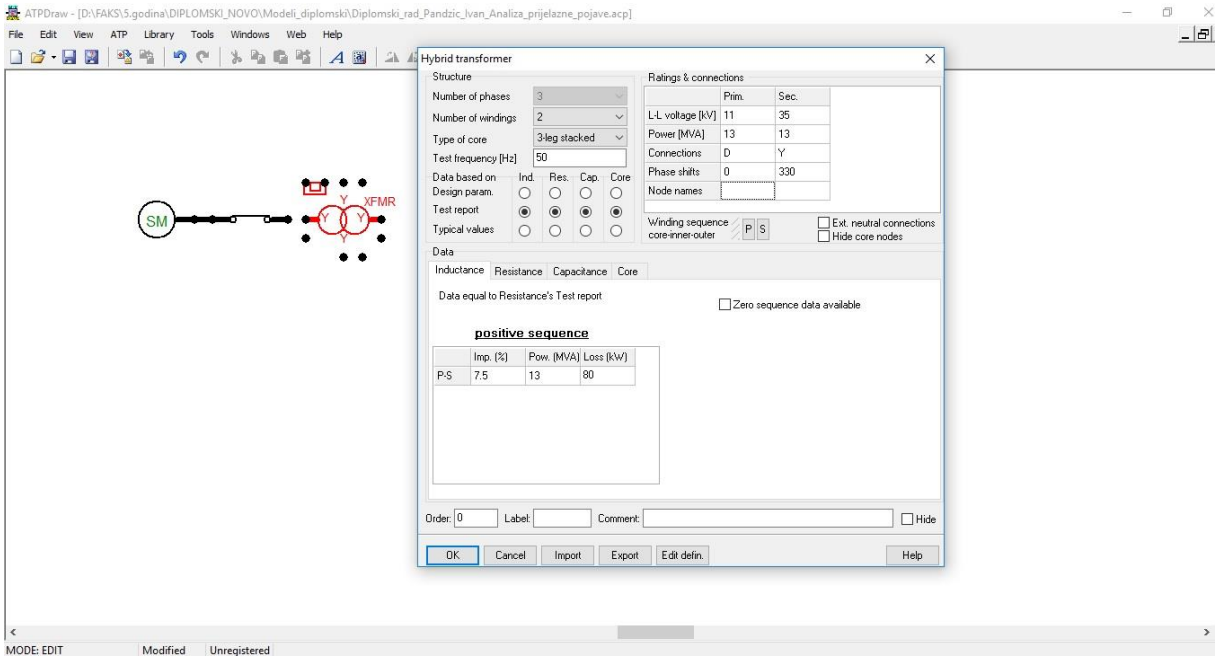
	Blok transformator	Transformator vlastite potrošnje	Transformator 1 Babina Greda	Transformator 2 Babina Greda
S_n [MVA]	13	2	4	4
U_{n1}/U_{n2} [kV]	35/11	35/0.4	35/10	35/10
f [Hz]	50	50	50	50
Grupa spoja	YNd11	Dyn5	Dyn5	Dyn5
P_0 [kW]	14	2.1	7	7
P_k [kW]	80	22	31	31
u_k [%]	7.5	6	5.3	5.3
i_0 [%]	1	5	4	4

S_n predstavlja identičnu stvar kao i kod generatora, nazivnu prividnu snagu svakog transformatora. Omjer U_{n1}/U_{n2} predstavlja prijenosni omjer transformatora, kao i nazivni napon namota višeg i nižeg napona. Grupa spoja označava način spajanja trofaznih namota višeg i nižeg napona, kao i fazni pomak među trofaznim namotima (objašnjeno u poglavlju 2.2.). Desnim klikom te odabirom *Transformers* → *Hybrid model* te otvaranjem izabranog modela transformatora otvara se izbornik na slici 4.6.

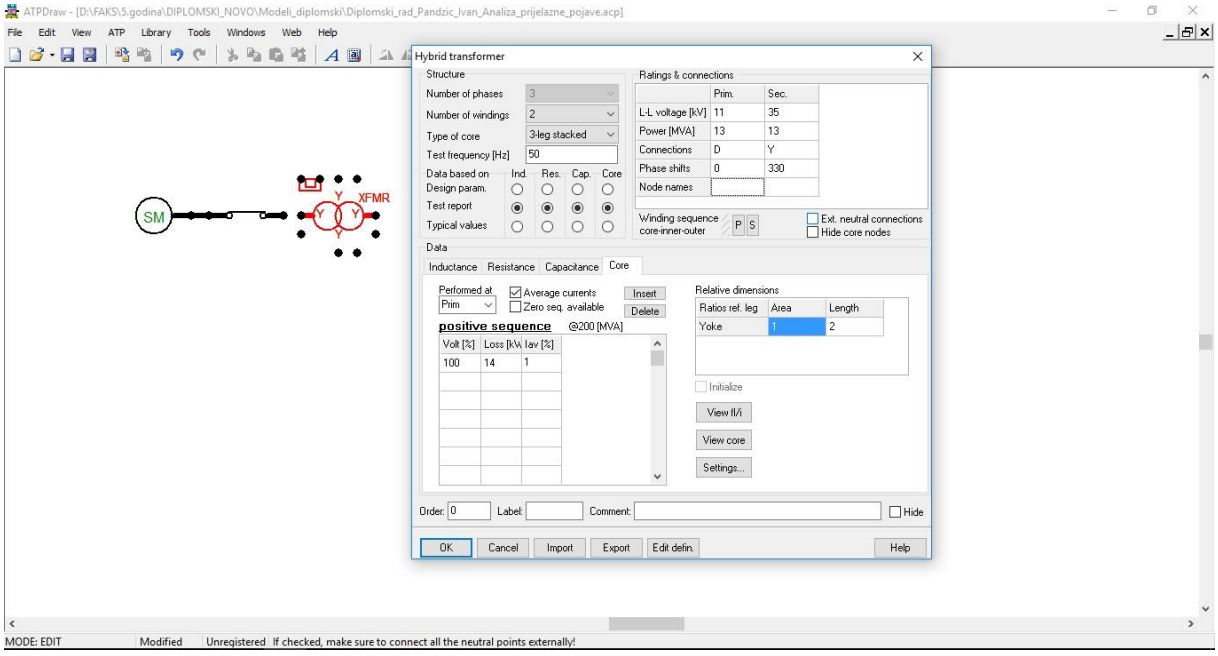


Sl. 4.6. *Izbornik transformatora*

Odabrani model nudi mogućnost izbora vrste jezgre transformatora, frekvencije rada, broja namota, upis podataka linijskog napona primara i sekundara, nazivne prividne snage, grupu spoja pojedinog namota te fazni pomak između njih. U donjem dijelu izbornika nudi se tablica koja opisuje ponašanje transformatora za vrijeme kratkog spoja i praznog hoda. Gubici praznog hoda i kratkog spoja, impedancija kratkog spoja i struja praznog hoda se unose na predviđena mjesta. Na temelju tih podataka, i onih ranije spomenutih, *Hybrid model* transformatora računa parametre nadomjesne sheme transformatora pokretanjem cjelokupne simulacije. Slike 4.7 i 4.8. prikazuju unesene parametre za blok transformator.



Sl. 4.7. *Podešavanje podataka blok transformatora*



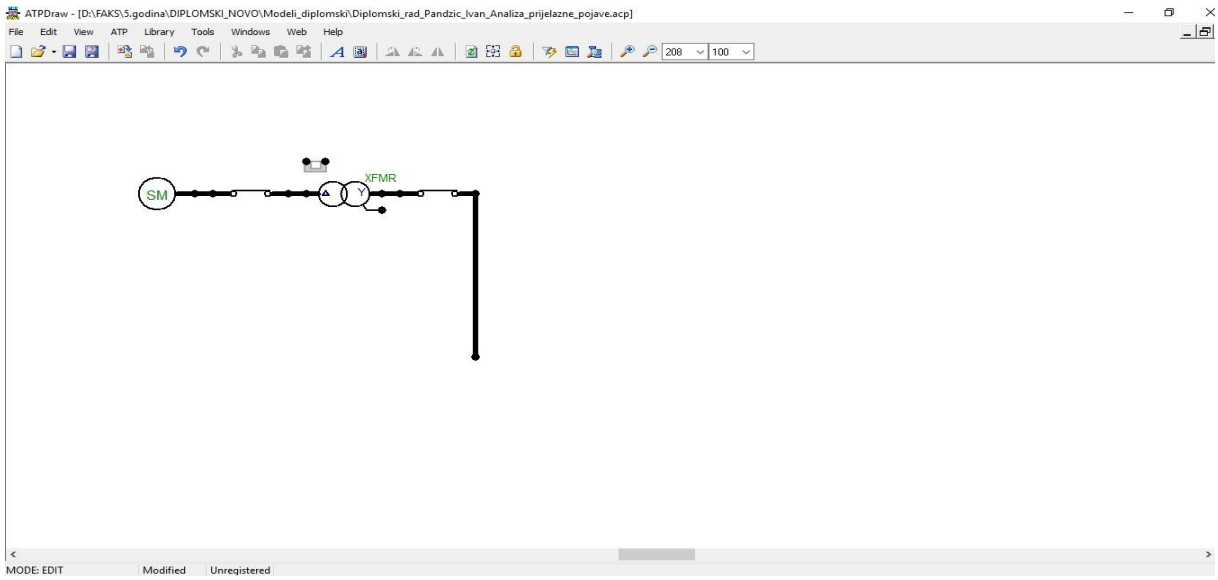
Sl. 4.8. *Podešavanje vrijednosti pokusa kratkog spoja i praznog hoda transformatora*

U tablici 4.5. nalaze se ulazni podaci svih transformatora.

Tablica 4.5. *Ulazni podaci svih transformatora*

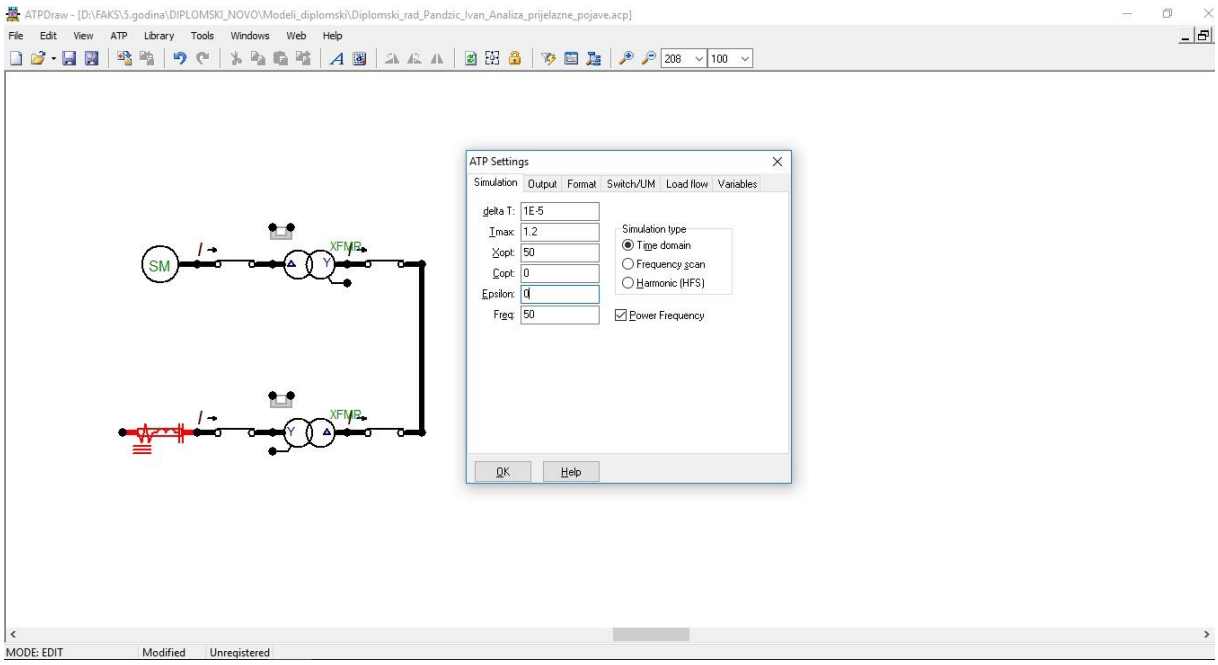
	Blok transformator	Transformator vlastite potrošnje	Transformator 1 BG 35/10 kV	Transformator 2 BG 35/10 kV
Broj faza	3	3	3	3
Broj namota	2	2	2	2
Tip jezgre	Trostupna	Trostupna	Trostupna	Trostupna
Frekvencija [Hz]	50	50	50	50
U_{n1} [kV]	11	35	35	35
U_{n2} [kV]	35	0.4	10	10
S_n [MVA]	13	2	4	4
Grupa spoja	YNd11	Dyn5	Dyn5	Dyn5
u_k [%]	7.5	6	5.3	5.3
$S_{n,k}$ [MVA]	13	2	4	4
P_k [kW]	80	22	31	31
U_0 [%]	100	100	100	100
P_0 [kW]	14	2.1	6	6
i_0 [%]	1	5	4	4

U nastavku modeliranja strujnog kruga prema shemi sa slike 3.2. crta se prekidač za blok generator – transformator analogno slici 4.3. Nakon toga se stvara spoj sa transformatorom vlastite potrošnje tako što se povuče crta kao pri povezivanju dva elementa prikazano na slici 4.9.



Sl. 4.9. *Modeliranje sabirnice*

Nakon toga modeliraju se dva prekidača s 35 i 0.4 kV-ne strane transformatora vlastite potrošnje, kao i sam transformator vlastite potrošnje. Prekidači se modeliraju na način kao i prethodni, promatrana izlazna veličina je struja i mijenja se vrsta prekidača u trofazni. Pomoću podataka iz tablice 4.4.. unose se podaci za transformator vlastite potrošnje koji se modelira korištenjem modela *Hybrid model* odabran na način objašnjen za blok transformator. Nakon parametriranja transformatora vlastite potrošnje, potrebno je modelirati i samu vlastitu potrošnju. Sva tri opterećenja u zadanoj mreži modelirat će se pomoću trofazne RLC grane. Ulaskom u glavni izbornik elemenata te otvaranjem stavke *Branch linear*, odabire se opcija *RLC 3 – ph*. Kako bi se vrijednosti reaktivnih otpora (X_l i X_c) upisivali u mjernim jedinicama s kojima je lakše raditi, potrebno je otići postaviti postavke simulacije. Brži način za otvaranje izbornika gdje se postavljaju uvjeti simulacije je pritiskom tipke F3, međutim odabran je drugi način. Izborom postavke ATP u glavnom izborniku te ulaskom u *Settings*, otvara se izbornik kao na slici 4.10.



Sl. 4.10. *Postavljanje uvjeta simulacije*

Potrebno je postaviti uvjet o simulaciji u vremenskoj domeni, što će dati odzive struja i napona u vremenskoj domeni, vremenski korak je 1^{-5}, trajanje simulacije se podešava na 1. s, a frekvencija sustava na 50 Hz. S obzirom da je kod sva tri tereta kapacitivna reaktancija zanemariva, $C_{opt.}$ se ostavlja na vrijednosti nula, dok se $X_{opt.}$ postavlja na vrijednost frekvencije, kako bi program sam izračunao induktivnu reaktanciju prema formuli $X_l = \omega \cdot L$. Ovo je vrlo korisno u situacijama kada se prave proračuni sustava gdje se analiziraju odzivi pri različitim

frekvencijama. Svaka faza ima odvojene vrijednosti *R, L* i *C*, što znači da je moguće postaviti nesimetrično opterećenje. Način na koji se teret zadan djelatnom snagom *P* i faktorom snage $cos(\varphi)$ pretvara u teret određen otporom *R* i reaktancijom *X* je jednostavan i brz. Koriste se sljedeće dvije formule:

$$R = \frac{U^2}{P} \cdot cos(\varphi) \tag{4-3}$$

$$X = \frac{U^2}{Q} \cdot sin(\varphi) \tag{4-4}$$

Poznatim teoremom trokuta snage, pomoću pravokutnog trokuta se dolazi do vrijednosti kuta φ (18.195°) te vrijednosti potrebne jalove snage svakog potrošača. Kada su sve nepoznanice potrebne za izračun *R* i *X* poznate, jednostavnim uvrštavanjem u formule (4-3) i (4-4) dolazi se do vrijednosti potrebnih za modeliranje tereta pomoću RLC 3 – ph grane. Tablica 4.6. prikazuje vrijednosti djelatne i jalove snage pojedinog tereta, dok tablica 4.7. prikazuje vrijednosti otpora i reaktancije pojedinog tereta nakon preračunavanja pomoću formula (4-3) i (4-4).

Tablica 4.6. *Djelatne i jalove snage potrošača*

	P [MW]	Q [MVAr]	$cos(\varphi)$
Vlastita potrošnja	0.6	0.1972	0.95
Babina Greda 10 kV	3.3	1.0847	0.95
Ostatak mreže	7.1	2.3333	0.95

Tablica 4.7. *Djelatni i jalovi otpori potrošača*

	R [Ω]	X [Ω]
Vlastita potrošnja	0.2533	0.2533
Babina Greda 10 kV	28.7879	28.7879
Ostatak mreže	163.9085	163.9085

Ulazni podaci potrošača nalaze se u tablici 4.8.

Tablica 4.8. *Ulazni podaci potrošača*

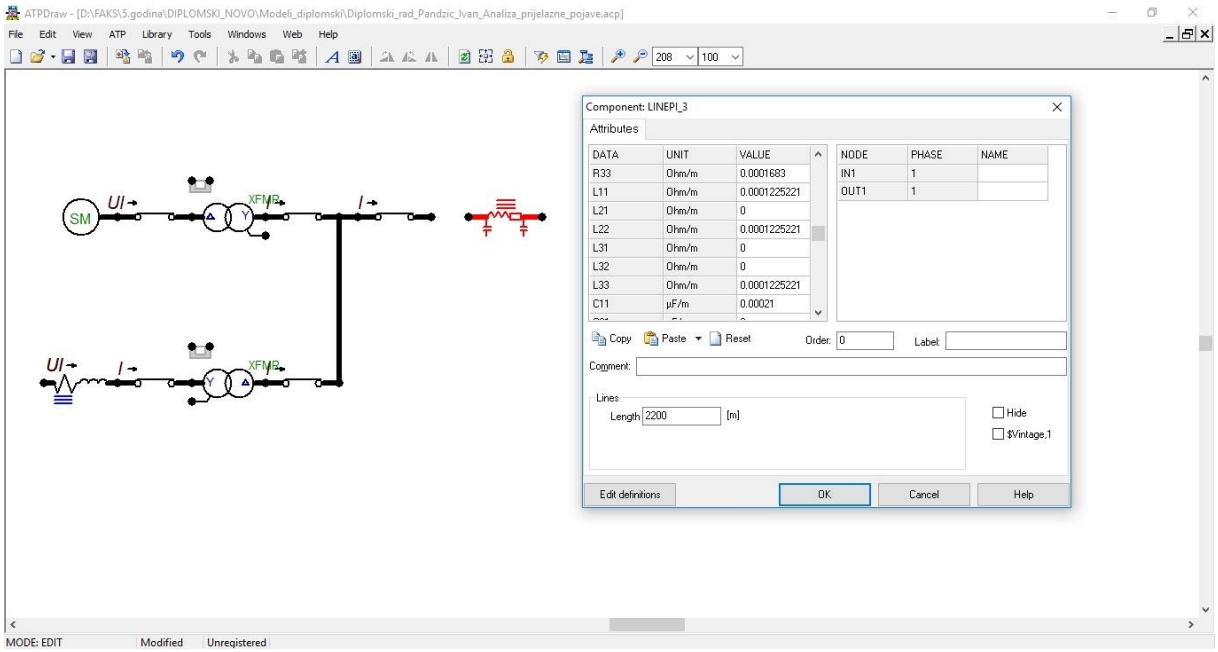
	Vlastita potrošnja	Babina Greda 10 kV	Potrošnja ostatka mreže
R_1 [Ω]	0.2533	28.7879	163.908
X_1 [Ω]	0.2533	28.7879	163.908
C_1 [µF]	0	0	0
R_2 [Ω]	0.2533	28.7879	163.908
X_2 [Ω]	0.2533	28.7879	163.908
C_2 [µF]	0	0	0
R_3 [Ω]	0.2533	28.7879	163.908
X_3 [Ω]	0.2533	28.7879	163.908
C_3 [µF]	0	0	0

Kabel i dalekovod modelira se na sljedeći način: desni klik da se otvori izbornik elemenata →*Lines/Cables* →*Lumped* → *RLC Pi equivalent* → *3 phase*. I za kabel i za dalekovod koristi se ekvivalentna π shema prikazana na slici 2.7. Nazivni podaci za kabel i dalekovod nalaze se u tablici 4.9.

Tablica 4.9. *Nazivni podaci kabela i dalekovoda*

	Kabel Viridas – Babina Greda	Dalekovod Babina Greda – Županja 1
l [m]	2200	13800
U_n [kV]	35	35
I_n [A]	340	345
R_1 [Ω/km]	0.1683	0.242528
X_1 [Ω/km]	0.1225221	0.4156
C_1 [µF/km]	0.21	0.00579324
R_0 [Ω/km]	0.6733	0.390187
X_0 [Ω/km]	0.4900884	1.42076
C_0 [µF/km]	0.2205	0

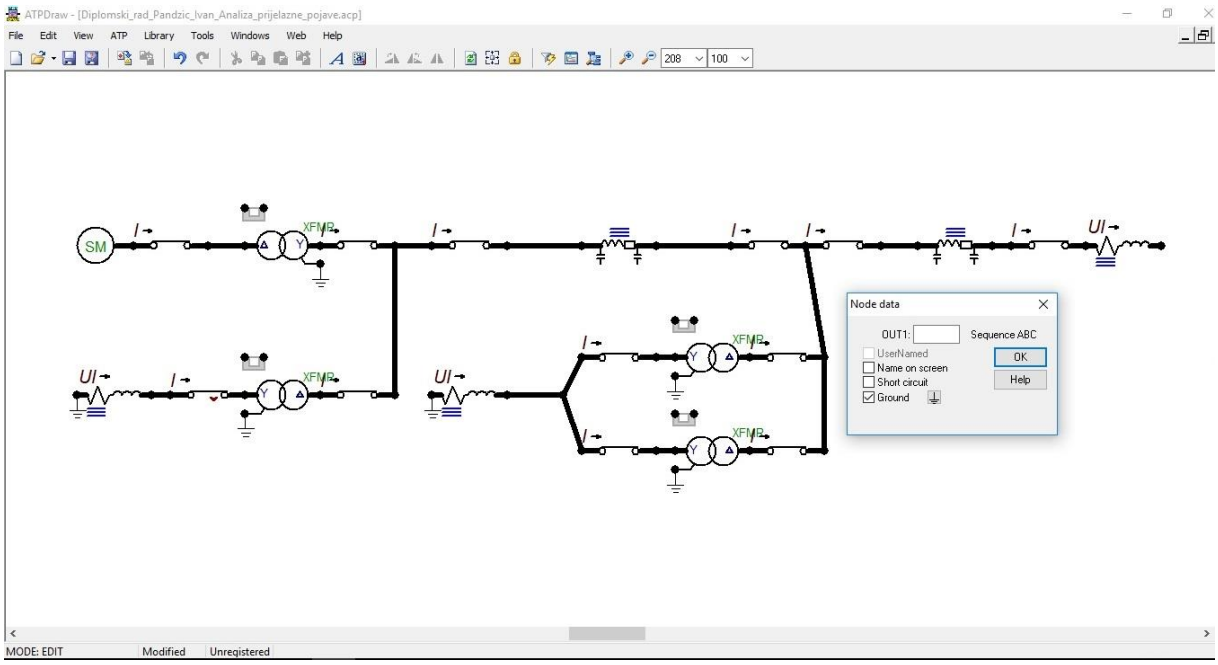
Jedinične podatke za otpor, induktivnu i kapacitivnu reaktanciju potrebno je pomnožiti s 1^{-3} kako bi se pravilno postavile prilike u kabelu (ATPDraw za mjerne jedinice uzima Ω/m, a ne Ω/km, kako najčešće daju proizvođači). Uneseni podaci za kabel nalaze se na slici 4.11.



Sl. 4.11. *Ulazni podaci kabela u ATDraw-u*

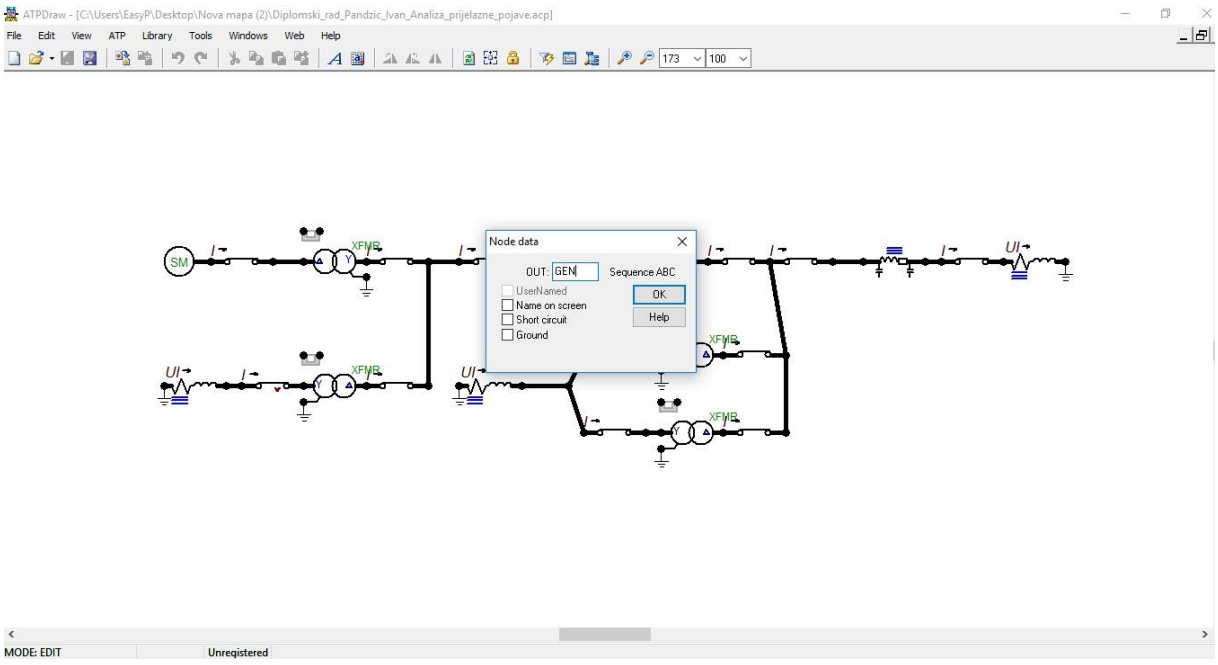
Vrijednosti se upisuju samo za otpore, induktivne i kapacitivne reaktancije pojedine faze, a vrijednosti istih između različitih faza jednake su nuli. Nakon modeliranja kabela, ostatak mreže se modelira na način da se preostali prekidači, dalekovod, potrošači i transformatori odabiru i parametriraju na već opisane načine, koristeći se tablicama 4.4., 4.7. i 4.9.

Prije samog početka provođenja simulacija jednofaznog i trofaznog kratkog spoja na određenim mjestima u mreži, potrebno je uzemljiti sve potrošače te namote transformatora kod kojih je to potrebno. Uzemljenje se vrši tako da se pritisne desni klik na točku koju se želi uzemljiti, otvara se izbornik i označi se kućica *Ground* te se potvrdi promjena. Na slici 4.12. prikazane su sve uzemljene točke promatranog dijela mreže te izbornik koji je potrebno namjestiti kako bi se pojedina točka sustava uzemljila.



Slika 4.12. *Povezivanje zahtijevanih točaka sa zemljom u ATPDraw-u*

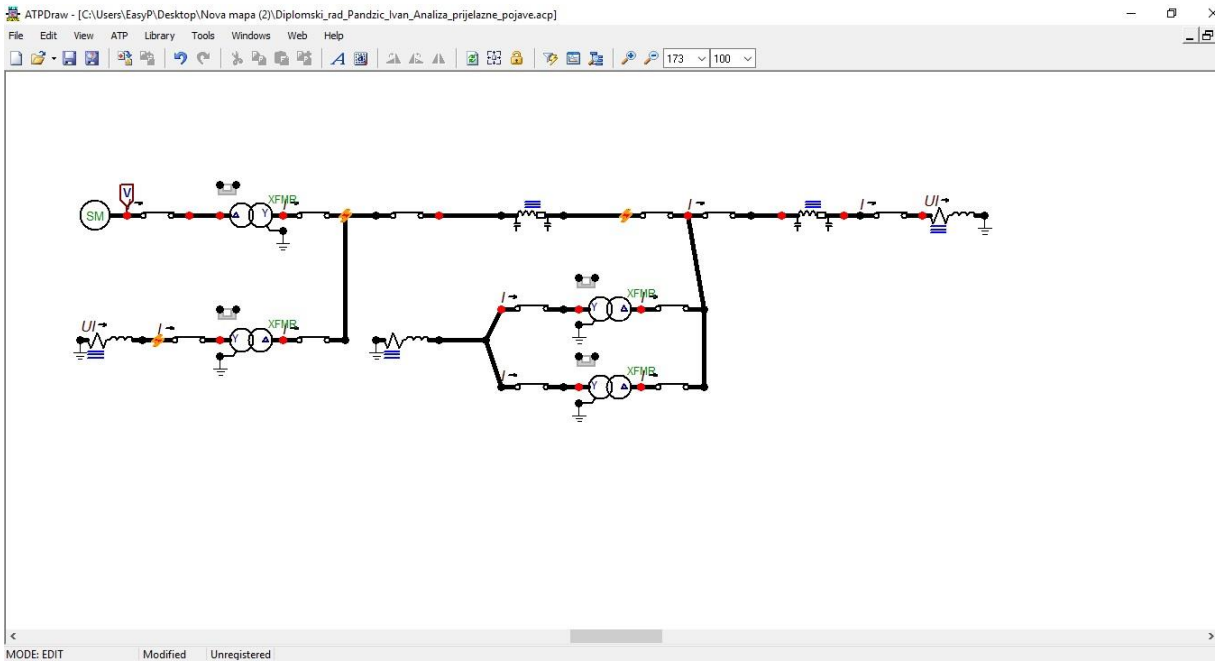
Posljednje stvar koju je potrebno napraviti prije početka postavljanja simulacije jednofaznog i trofaznog kratkog spoja te prikaza rezultata potrebno je imenovati pojedine točke mreže kako bi se zadržala brzina i jednostavnost odabira veličina koje želimo grafički prikazati. Imenovanje točke radi se tako da se dvostrukim lijevim klikom na točku pojavljuje izbornik kao na slici 4.13. i upisuje se ime koje se želi nadjenuti toj točki mreže.



Sl. 4.13. *Imenovanje točaka mreže*

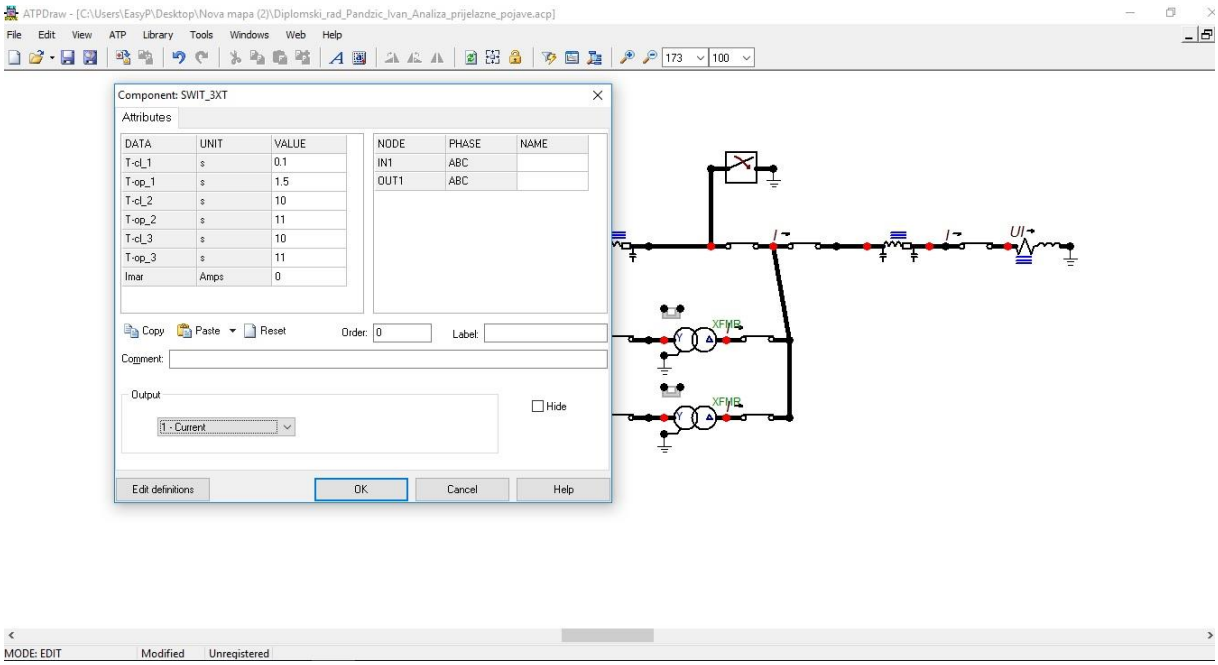
5. ANALIZA REZULTATA

Kao što je ranije spomenuto, u ovom diplomskom radu simulirat će se trofazni i jednofazni kratki spoj na tri različita mjesta u mreži. Veličine koje će se promatrati za vrijeme nastanka kratkog spoja, njegovog isklopa te ponovnog uklopa i završnog isklapanja su: napon i struja generatora te napon i struja na mjestu kvara. Prijelazna pojava predstavlja vremenski interval koji se događa kod prijelaza sustava iz jednog stacionarnog stanja u drugo. Može se shvatiti kao vrijeme prilagodbe svih parametara sustava na novostvorene uvjete u mreži. Slika 5.1. prikazuje mjesta u distributivnoj mreži gdje će se simulirati trofazni i jednofazni kratki spoj.



Sl. 5.1. *Lokacije nastanka kratkih spojeva u mreži*

Kratki spojevi će se simulirati na dijelu kabela u blizini prekidača sabirnice Babina Greda 35 kV, na sabirnici „Viridas“ 35 kV (na strani višeg napona blok transformatora) te na 0.4 kV strani transformatora vlastite potrošnje. Kratki spoj se simulira na način da se paralelno mjestu gdje se želi simulirati kraj postavi prekidač, uzemljen na kraju. Ulaskom u izbornik elemenata te odabirom *Switches* → *Switch time 3 – ph* i povezivanjem prekidača s ostatkom mreže na ranije opisani način, dolazi se do parametriranja prekidača, sa svrhom simulacije kratkog spoja.

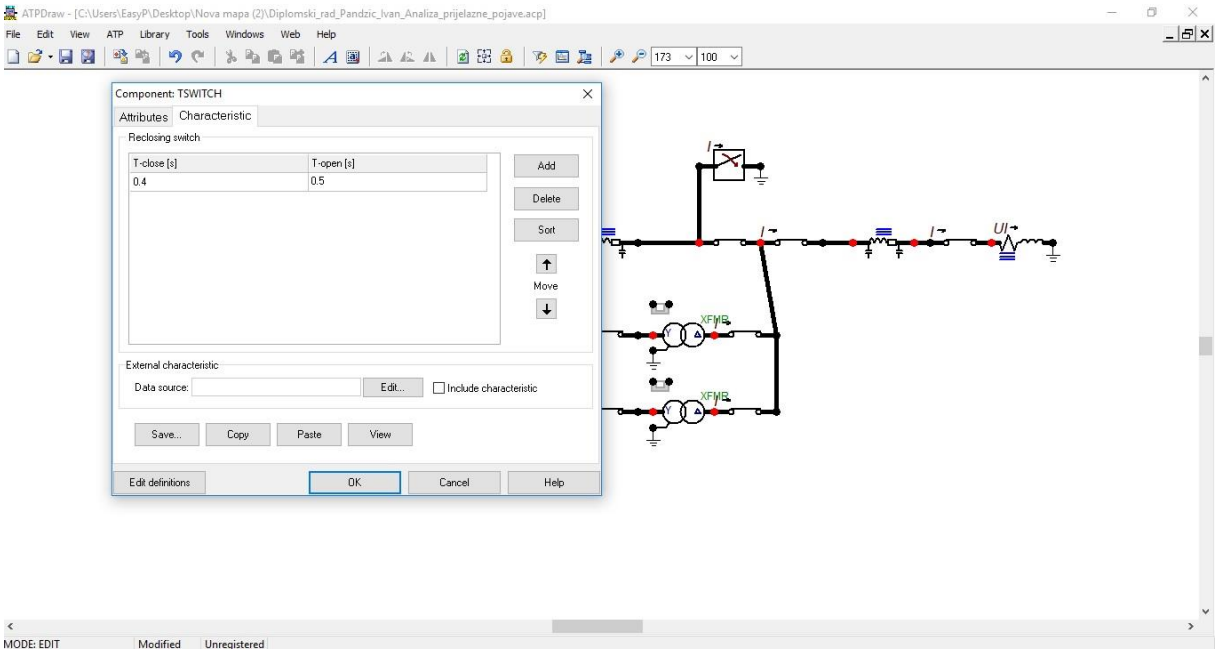


Sl. 5.2. *Podešenja prekidača za nastanak jednofaznog kratkog spoja*

5.1. Kratki spojevi na kabelu 35kV Viridas – Babina Greda

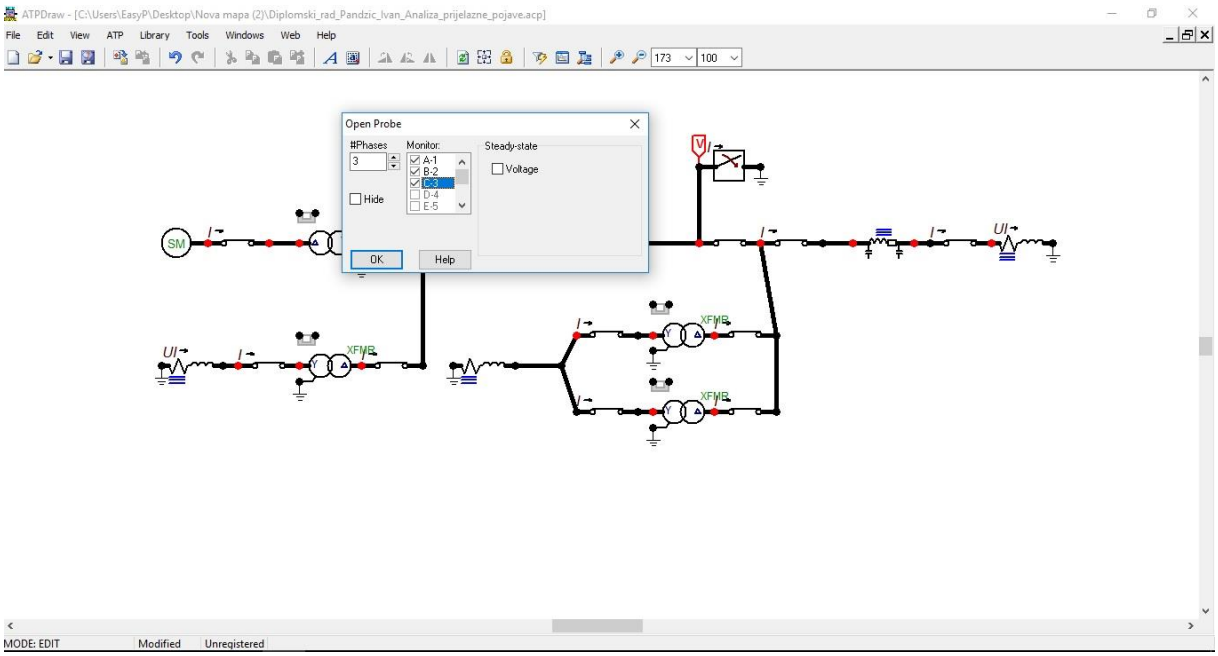
U prvom slučaju simulirat će se jednofazni kratki spoj faze A s početkom u $t_k = 100\,ms$. Zatvaranjem kontakta prekidača faze A, stvorit će se uvjeti za protjecanje velike struje kroz granu strujnog kruga u kojoj se nalazi prekidač zbog puno manjeg otpora nego paralelna joj grana. Otvaranje kontakta faze A potrebno je staviti na vrijeme veće od trajanja sveukupne simulacije, što simulira trajni kratki spoj. Ostale dvije faze potrebno je parametrirati tako da su cijelo vrijeme kontakti otvoreni za čitavo vrijeme trajanja simulacije. Izlazna veličina koja će se promatrati je struja, a napon će se promatrati zasebnim elementom. Prije nego se postavi voltmetar kojim će se mjeriti napon na mjestu kvara (identično se radi za mjerenje napona generatora), potrebno je parametrirati prekidač koji će odraditi isklop struje kratkog spoja te odraditi automatski ponovni uklop. Pošto kod kabela ne postoji automatski ponovni uklop zato što se svaki kvar tretira kao trajni, generatorski prekidač na 35 kV strani blok transformatora odradit će tu zadaću. Na slici 5.2. prikazano je kako trofazni prekidač otvara svoje kontakte na 0.16 *ms*, što govori kako je ukupno vrijeme isključenja zaštite 60 *ms*. Modeliranje ponovno uklopa vrši se odabirom *Characteristic* te dodavanjem mogućnosti ponovnog otvaranja i zatvaranja kontakta pritiskom na *Add*. Vrijeme oporavka mreže od mogućeg prolaznog kvara postavit će se na 240 ms, što znači kako će prekidač ponovno uklopiti na 0.4 *ms*. Kako se u ovom slučaju kvar pokazuje kao trajan, prekidač ponovno isklapa i odvaja generator od dijela mreže u kvaru. Zatvoreno stanje prekidača potrajat će 100 *ms* kako bi se bolje snimila pojava

automatskog ponovnog uklopa. Slika 5.3. prikazuje postavljanje uvjeta za automatski ponovni uklop.



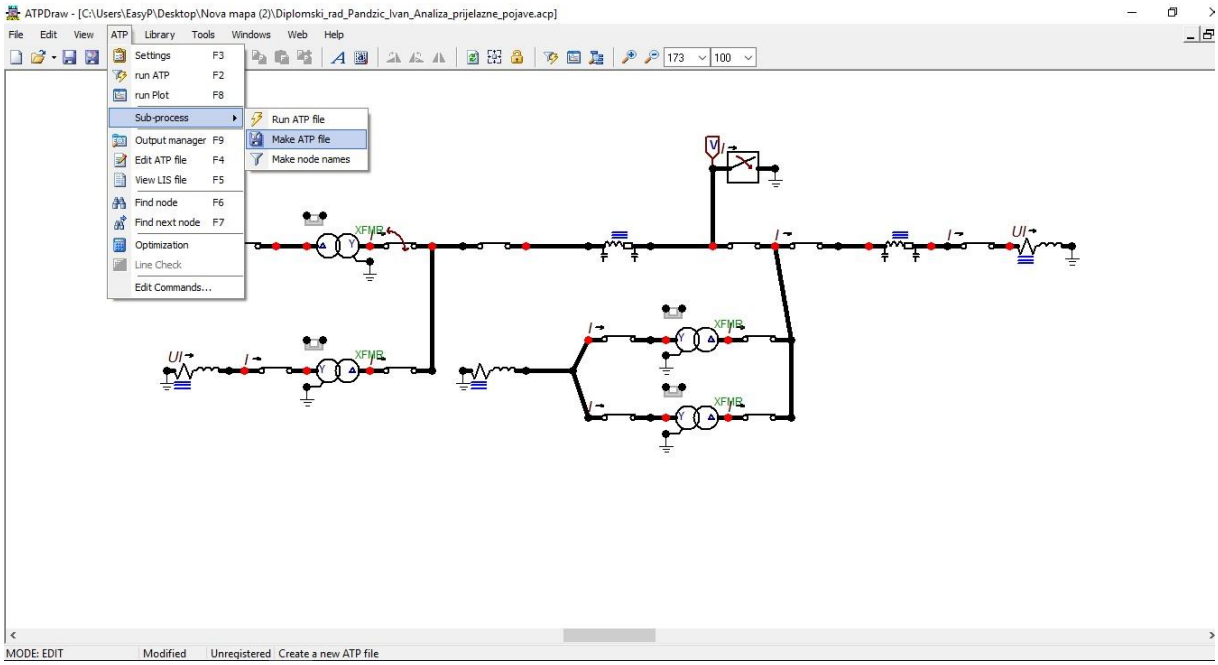
Sl. 5.3. *Postavke automatskog ponovnog uklopa*

Element za mjerenje napona na pojedinom mjestu bira se u izborniku, *Probe&3 – phase* → *Probe Voltage*. Postavljanjem mjernog instrumenta kod prekidača i parametiranjem kao na slici 5.4., tako da prati napone sve tri faze, dolazi se do dijela pokretanja simulacije.



Sl. 5.4. *Podešenje trofaznog voltmetra*

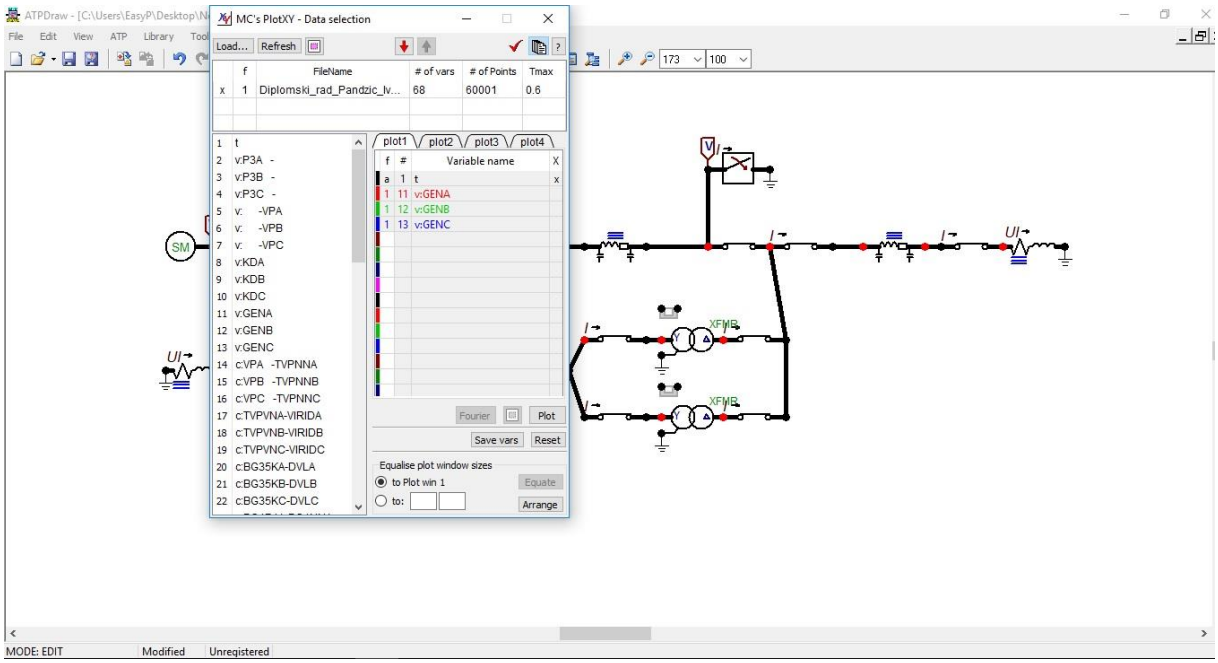
Postavke simulacije se postavljaju na ranije spomenuti način pri parametriranju RLC grane. Vrijeme trajanja simulacije se postavlja na 1 sekundu, ostale postavke ostaju kao na slici 4.10. Ulaskom u opciju ATP u *Main menu* te odabirom *Subprocess→ Make ATP file*, stvara se dokument s ekstenzijom .atp i rad se sprema pod željenim imenom. Nakon toga se ponovno ulazi u ATP i odabire opcija *Run ATP* kako bi se obavila simulacija. Za grafički prikaz rezultata simulacije ponavlja se identičan redoslijed postupaka kao i za pokretanje simulacije, samo se umjesto *Run ATP*, odabire *Run Plot*. Sve vezano za postavke simulacije, pokretanje iste te prikaz rezultata jasno je prikazano na slici 5.5.



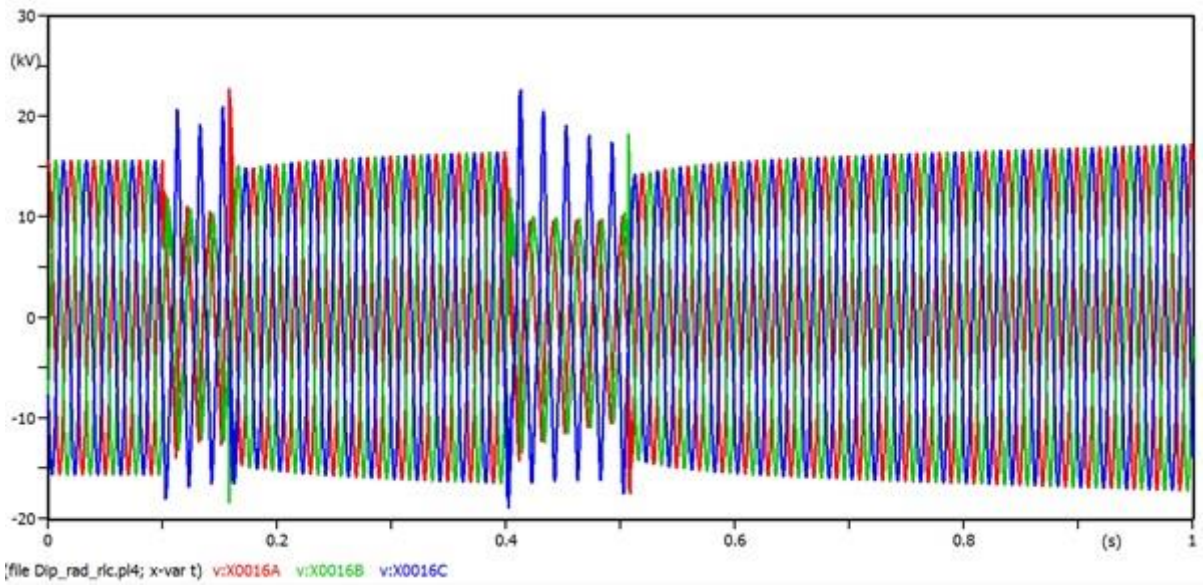
Sl. 5.5. *Pokretanje simulacije*

5.1.1 Jednofazni kratki spoj

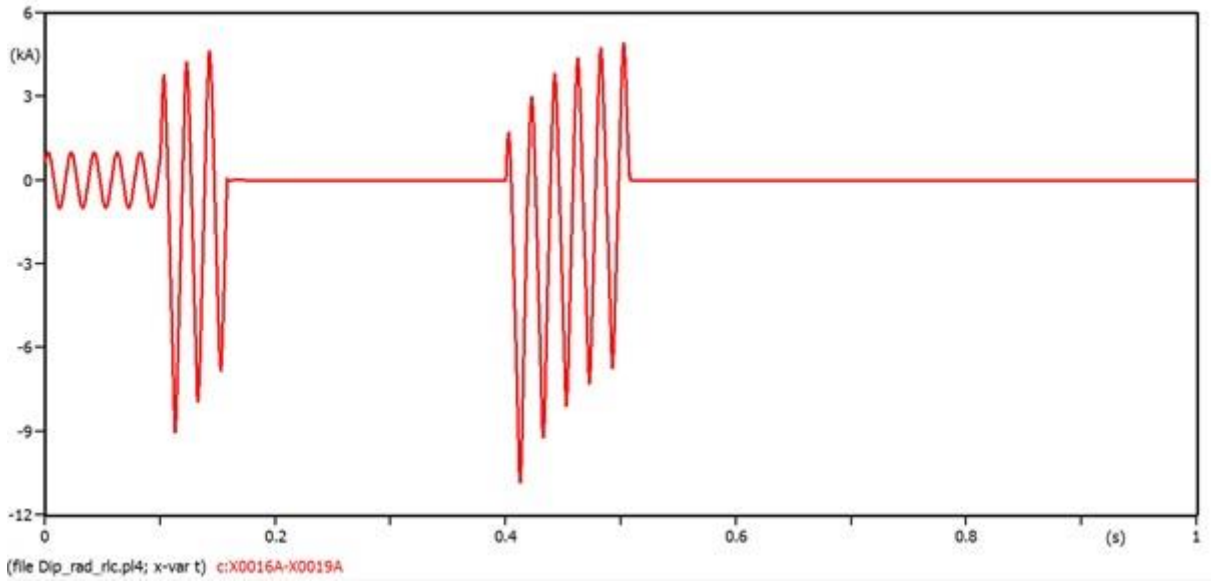
Nakon pokretanja opcije *Run Plot*, otvara se popis svih izabranih veličina za praćenje i njihova imena dodjeljena na ranije opisani način. Odabirom veličine elementa koja se želi prikazati i pritiskom *plot* dobiva se grafički prikaz tijekom trajanja simulacije. Na slici 5.6. prikazan je opisani proces, a slike u nastavku prikazuju grafički prikaz struje i napona generatora te struju i napon na mjestu kvara pri jednofaznom kratkom spoju.



Sl.5.6.*Prikaz grafičkih oblika napona i struja*



Sl. 5.7. *Valni oblik napona pojedinih faza generatora pri jednofaznom kratkom spoju*

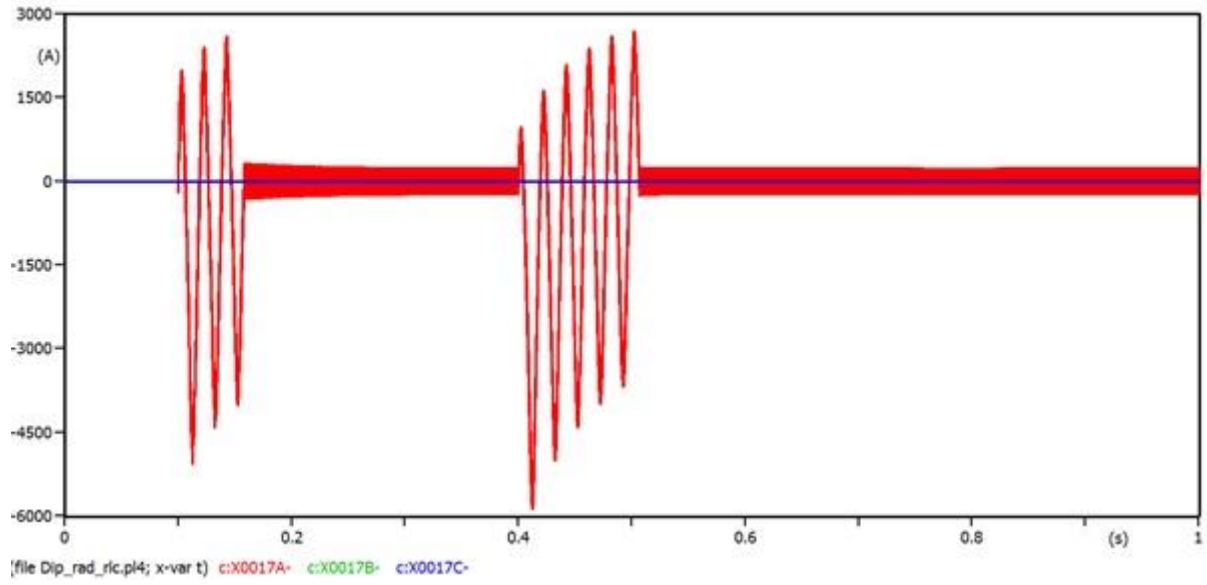


Sl. 5.8. *Valni oblik struje faze A generatora pri jednofaznom kratkom spoju*

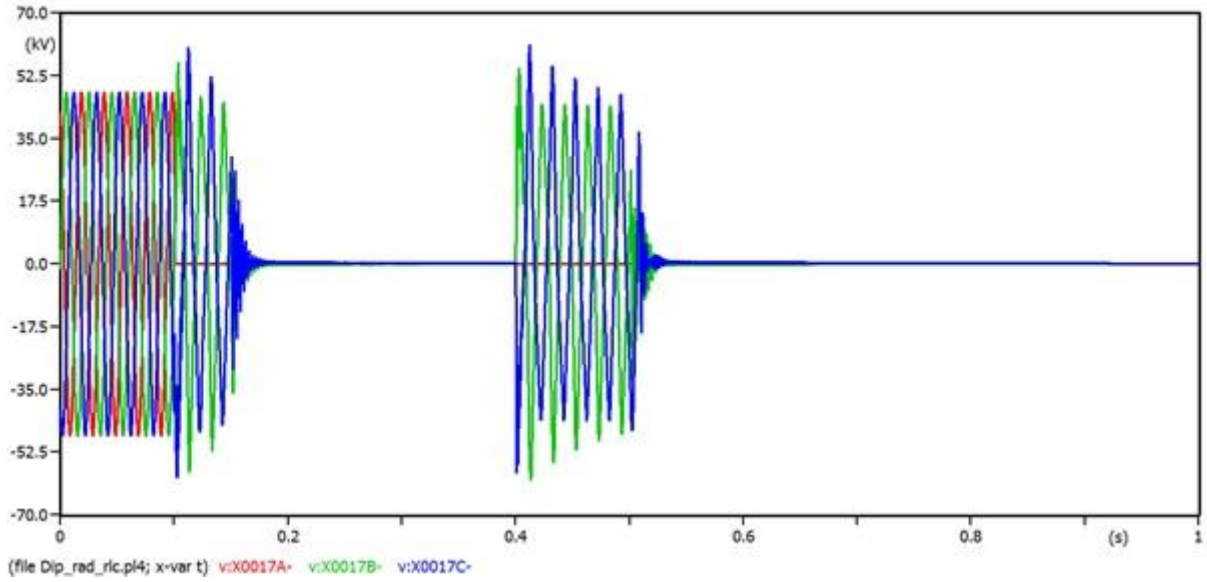
Prva stvar koja se primjećuje je kako su sve manipulacije generatorskog prekidača i prekidača koji simulira kratki spoj ispravno parametrirane. U trenutku $t_1 = 100\,ms$, dolazi do događaja koji mijenja prethodno ustaljeno stanje. Trenutak $t_2 = 160\,ms$ prikazuje sljedeću manipulaciju prekidača, gdje dolazi do isklopa generatorskog prekidača te određenog vremenskog intervala u kojem čeka mrežu kako bi se oporavila ukoliko je riječ o prolaznom kvaru. Tada, dolazi do ponovnog uklopa u $t_3 = 400\,ms$, zaštita prepoznaje kako kvar još uvijek traje te da je trajan i prekidač ponovno isklapa u $t_4 = 500\,ms$. Prethodno opisane stvari u skladu su s parametriranim u dijelu 5.1.

Slika 5.7. prikazuje valni oblik napona generatora u periodu od 1 *s*. Početkom simulacije, generator radi približno u nazivnom režimu rada, napon na stezaljkama je 11 kV, to je moguće provjeriti na slici 5.7. očitanjem tjemene vrijednosti napona koja iznosi 15.55 kV, što kada se upotrijebi odnos tjemene i efektivne vrijednosti sinusnog valnog oblika iznosi 11 kV ($11000 = \frac{15555}{\sqrt{2}}$). U trenutku nastanka jednofaznog kratkog spoja faze A, napon faze A generatora propada, a naponi ostale dvije zdrave faze porastu. Isklapanjem prekidača u $t_2 = 160\,ms$, napon faze A naglo poraste iznad nazivne vrijednosti i vrlo brzo se, zajedno s naponima ostale dvije faze, počinje postupno vraćati na vrijednost nazivnog napona. Generator je u stanju praznog hoda zato što je čitava mreža odvojena od njega te pokriva gubitke praznog hoda blok transformatora (35 kV strana transformatora je u periodu $t = 160 - 400\,ms$ otvorena). Nakon ponovnog isklapanja generatorskog prekidača, sve tri faze napona generatora teže postizanju novog stacionarnog stanja s pripadajućim nazivnim naponom. Što se tiče struje generatora, prije nastanka kratkog

spoja sve tri faze generiraju u mrežu sinusne struje fazno pomaknute za 120°. Kada nastupi kratki spoj, struja faze A generatora poraste na vrijednost višestruko veću od nazivne. Tjemena vrijednost struje kratkog spoja neposredno nakon nastanka kratkog spoja iznosi 9 kA. Kako vrijeme prolazi, impedancije generatora i ostalih elemenata koji se nalaze u strujnom krugu prigušuju struju kratkog spoja što se vidi na tendeciji smanjena struje kratkog spoja. Nakon isklapanja generatorskog prekidača, u fazi A generatora teče vrlo mala struja potrebna za magnetiziranje jezgre transformatora. S obzirom da se kvar pokazuje kao trajan, automatski ponovnim uklopom ponovno dolazi do višestrukog povećanja struje faze A, maksimalne vrijednosti 10.7 kA. Ponovno dolazi do prigušenja struje kratkog spoja sve dok prekidač trajno ne izbaci poremećeni dio mreže od elektrane. Generator prepoznaje kratki spoj kao lagano opterećenje, tj. kao rasterećenje i pri svakoj nagloj promjeni strujno – naponskih prilika u mreži, zbog svoje magnetske tromosti magnetski tok generatora ne može se trenutno promijeniti. U početnoj fazi nastanka kratkog spoja, istosmjerna komponenta struje kratkog spoja i ona opada eksponencijalno te je maksimalna dok izmjenična komponenta traje dok je zaštita ne isključi.



Sl. 5.9. *Valni oblici struja pojedinih faza na mjestu kvara pri jednofaznom kratkom spoju*



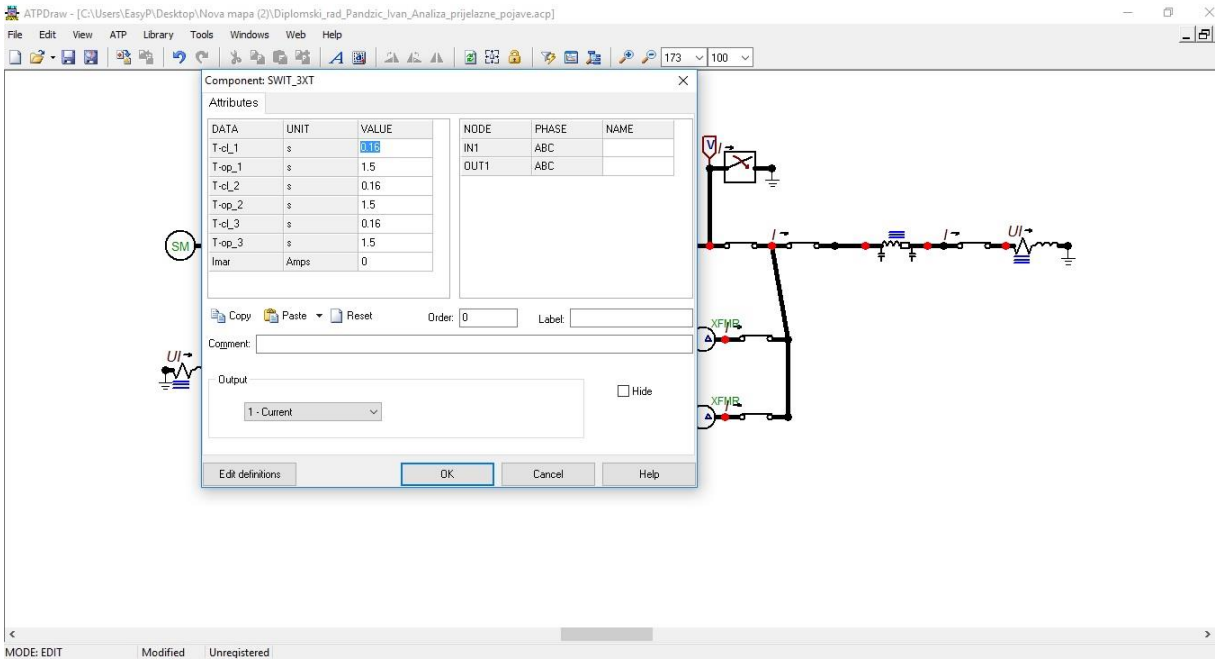
Sl. 5.10. *Valni oblici napona pojedinih faza na mjestu kvara pri jednofaznom kratkom spoju*

Struja na mjestu kvara oblikom je slična struji na generatoru za čitavo vrijeme trajanja simulacije. Do trenutka nastanka kratkog spoja struje u sve tri faze jednake su nuli, kratkog spoja nema. Pri pojavi jednofaznog kratkog spoja, ostale faze ostaju na vrijednosti nula, dok struja faze A poprima karakterističan oblik struje kratkog spoja. Udarna struja kratkog spoja prije prvog isklapanja generatorskog prekidača iznosi 5.3 kA, a nakon isklapanja prekidača i dalje teče mala struja kroz fazu A. Ponovnim uklopom prekidača, udarna struja poprima iznos 5.94 kA te se do idućeg i trajnog isklopa prekidača ta struja prigušuje. Napon na mjestu kvara prije pojave kratkog spoja konstantnog je i nazivnog iznosa, nakon kratkog spoja napon faze A pada na nulu i do kraja simulacije ostaje na nuli, što je očekivano. Na mjestu kratkog spoja napon je uvijek jednak nuli. U trenutku nastanka kratkog spoja zdrave faze poprimaju 1.3 puta veći napon od nazivnog te se vremenom smanjuju oscilatorno prema nazivnom naponu. Isklopom prekidača sve tri faze napona na mjestu kvara jednake su nuli, a ponovnim uklopom ponavlja se situacija s vrijednošću napona zdravih faza. Naponi zdravih faza naglo skaču na vrijednost veću od nazivnog napona te se po anvelopama smanjuju dok zaštita u potpunosti ne eliminira kvar.

5.1.2 Trofazni kratki spoj

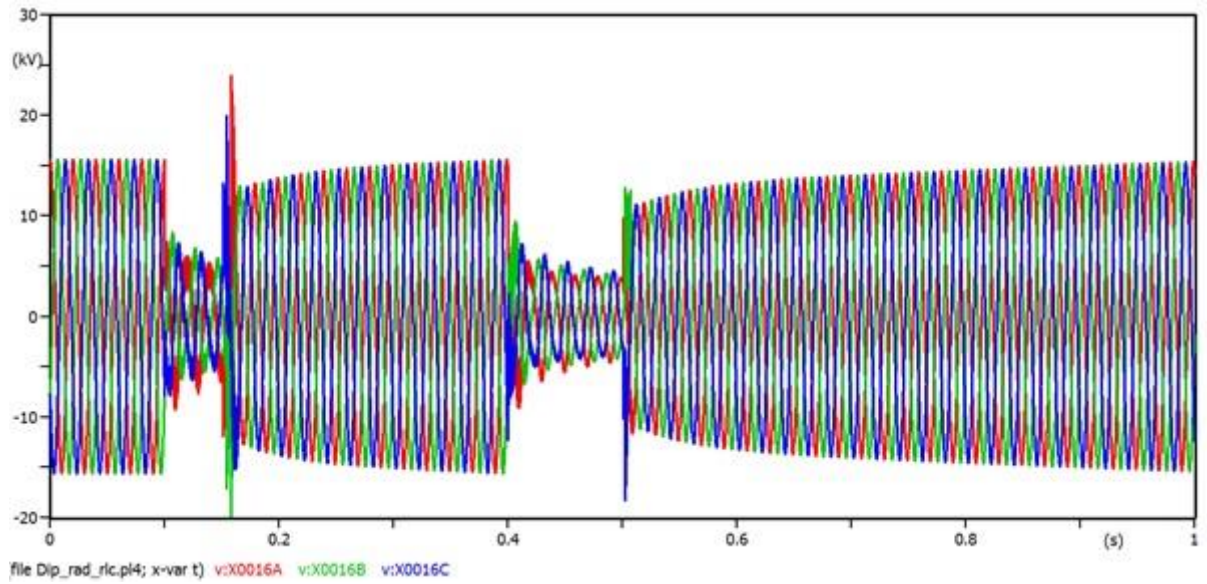
Razlika u simulaciji jednofaznog i trofaznog kratkog spoja vidljiva je samo u parametriranju prekidača čijim se uklopom simulira kratki spoj, podešenja na prekidaču koji isklapa i uklapa ostaju jednaka. Tako će biti za sva tri mjesta nastanka kratkog spoja, neovisno radi li se o jednofaznom ili trofaznom kratkom spoju. Slika 5.11. prikazuje parametriranje

prekidača za slučaj trofaznog kratkog spoja na kabelu Viridas – Babina Greda 35 kV. Ono što se postavilo za fazu A, sada se postavlja za ostale dvije faze.

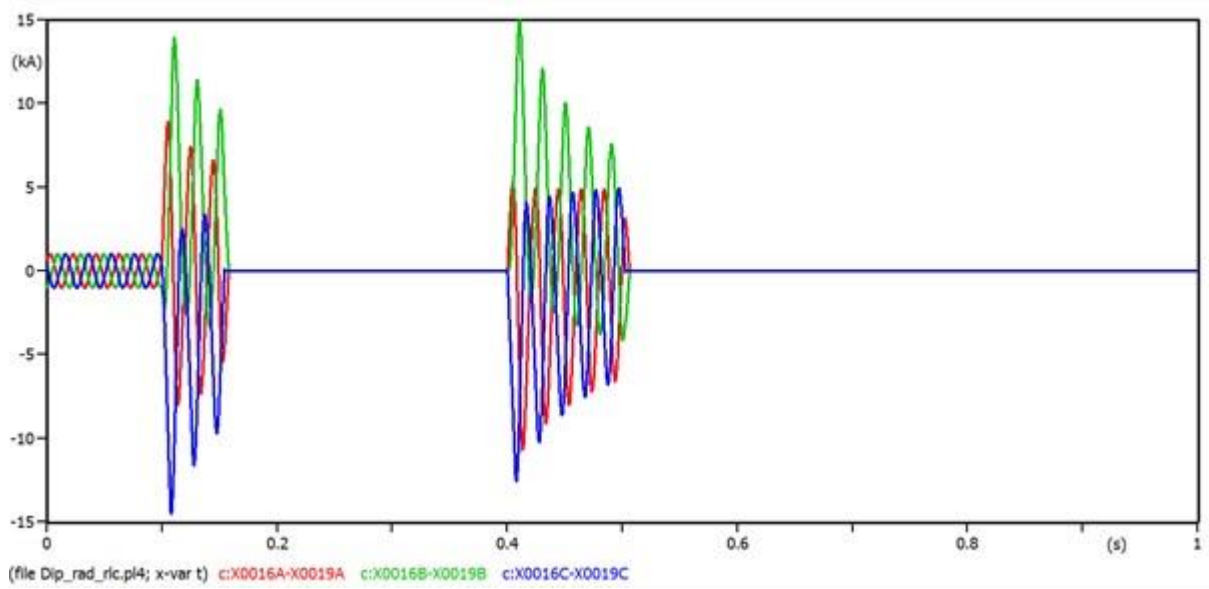


Sl. 5.11. *Podešenja prekidača za simulaciju trofaznog kratkog spoja*

Postupak pokretanja simulacije, otvaranja opcije crtanja grafičkih prikaza te odabir pojedinih veličina koje se žele prikazati identičan je kao i za jednofazni kratki spoj te će se stalno ponavljati.

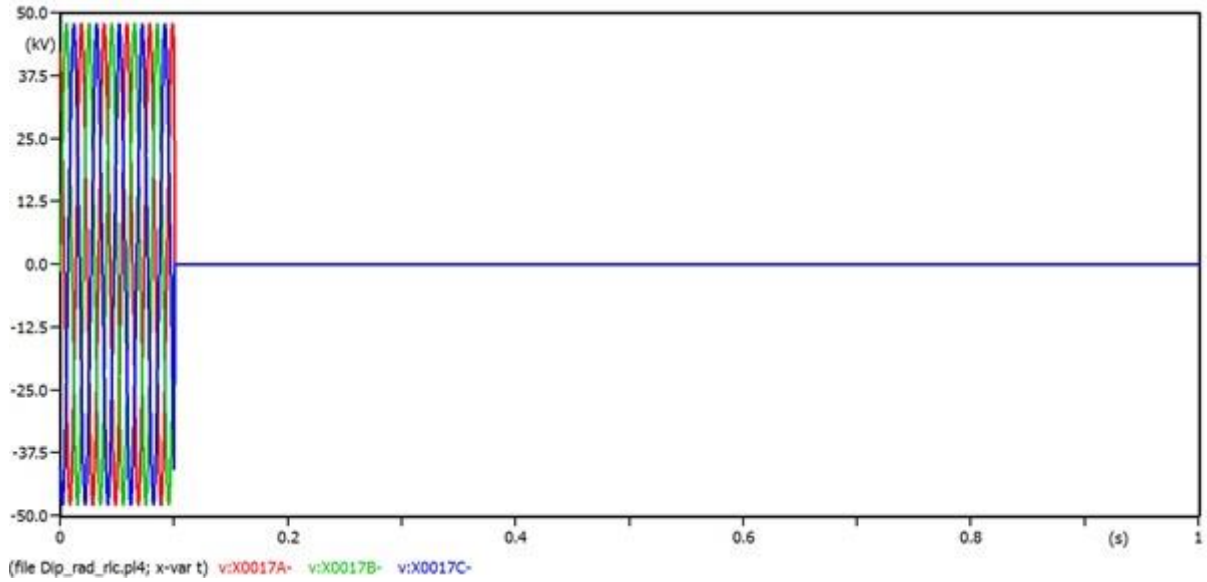


Sl. 5.12. *Valni oblici napona pojedinih faza generatora pri trofaznom kratkom spoju*

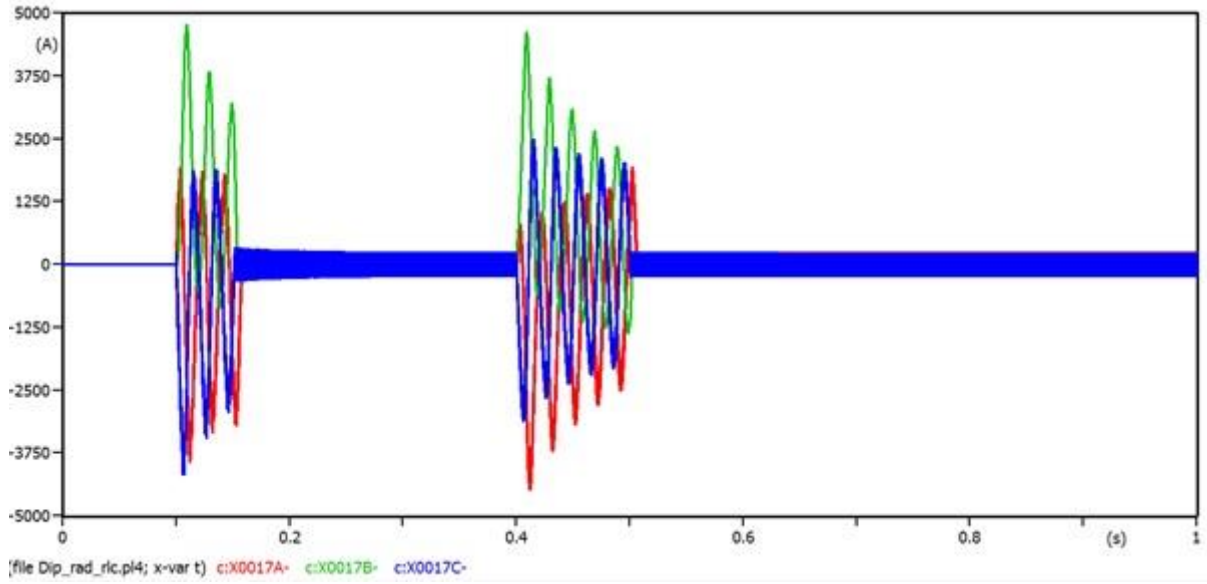


Sl. 5.13. *Valni oblici struja pojedinih faza generatora pri trofaznom kratkom spoju*

U trenutku nastanka trofaznog kratkog spoja na kabelu Viridas – Babina Greda kod sve tri faze napona generatora dolazi do propada na polovinu vrijednosti nazivnog napona te napon ima daljnju tendenciju opadanja. Za razliku od jednofaznog kratkog spoja, napon sve tri faze doživljava kolaps. Isklopom prekidača, napon faza se oporavlja i polako vraća na nazivnu vrijednost. Ponovnim uklapanjem prekidača dolazi do propada napona svih triju faza i tek završnim odvajanjem generatora od mreže, napon se počinje oporavljati i vraćati se na nazivnu vrijednost. Što se tiče struja generatora, potrebno je shvatiti teorijsku pozadinu. Prema [6], u trenutku nastanka tropolnog kratkog spoja, namoti triju faza su različito zakrenuti u odnosu na trenutni položaj rotora pa će zato struje kratkog spoja u početnom razdoblju nastanka kratkog spoja u pojedinim fazama biti različito raspoređene. Ova teorijska tvrdnja potvrđena je ovim primjerom, slika 5.13. Za vrijeme ustaljenog stanja, generator je napajao mrežu i potrošače približno nazivnom strujom, međutim u trenutku kratkog spoja dolazi do povećane struje kratkog spoja ovisno o položaju namota u odnosu na rotor. Udarna struja kratkog spoja faze B i C iznosi 14.5 kA, dok kod faze A iznosi 8.7 kA. Prekidom aksidentalnog stanja u trenutku $t_2 = 160\ ms$, struje sve tri faze generatora padaju na vrijednost približnu nuli, te se napaja samo transformator u praznom hodu kao u slučaju jednofaznog kratkog spoja. Ponovnim uklopom raspored struja je identičan kao u prvotnom trenutku nastanka kratkog spoja iz razloga što se ponovni uklop periodički ponovio za šest perioda. Pojedinačne vrijednosti udarnih struja kratkog spoja pojedine faze neznatno se razlikuju u odnosu na trenutak nastanka kratkog spoja, ali fazorski zbroj struja sve tri faze mora biti i u ovom slučaju jednak nuli.



Sl. 5.14. *Valni oblici napona pojedinih faza na mjestu kvara pri trofaznom kratkom spoju*



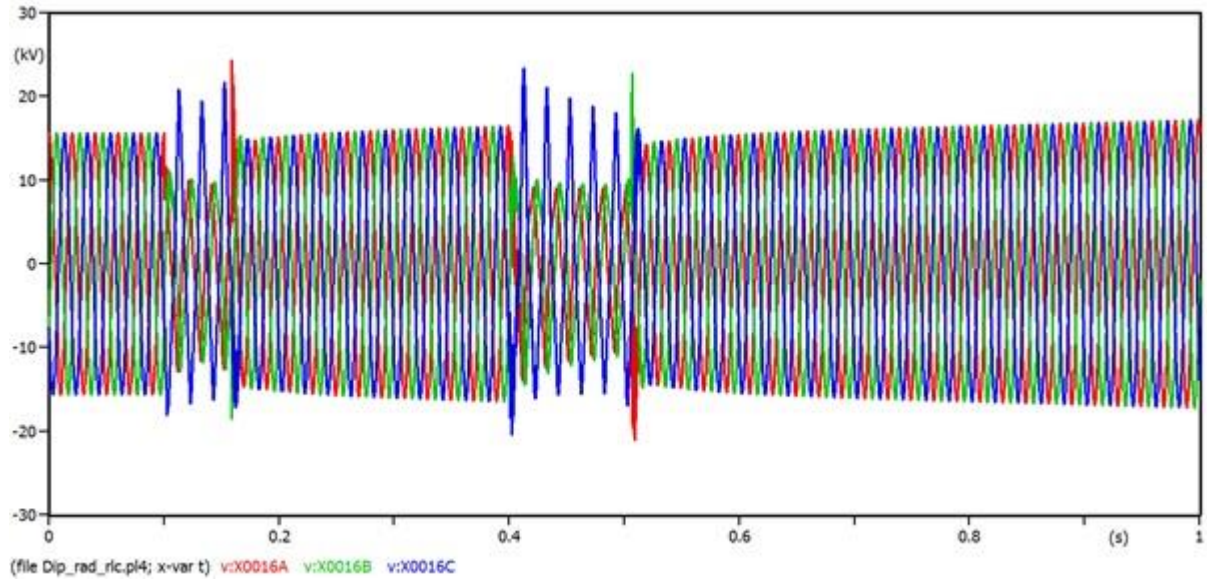
Sl. 5.15. *Valni oblici struja pojedinih faza na mjestu kvara pri trofaznom kratkom spoju*

Na mjestu kvara naponi faza su nazivnih vrijednosti, a pri nastanka trofaznog kratkog spoja dolazi do kolapsa napona u sve tri faze i napon je svugdje jednak nuli. Struje na mjestu kratkog spoja prate oblik struja faza generatora, raspored među pojedinim fazama je identičan, samo je razlika u vrijednostima struja. Maksimalna udarna struja kratkog spoja koja će se pojaviti na mjestu kvara iznosi 4.8 kA i sve elemente toga dijela mreže treba parametrirati da izdrže tu struju.

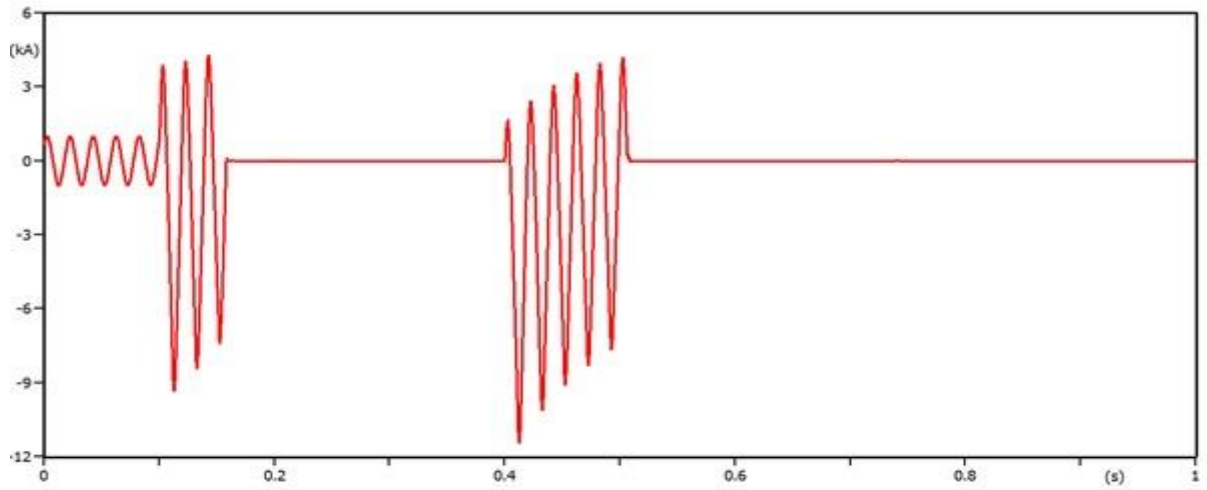
5.2. Kratki spojevi na sabirnici Viridas 35 kV

U ovoj situaciji, jednofazni i trofazni kratki spoj simulirat će se na sabirnici namota višeg napona blok transformatora. Iskapanje te automatski ponovni uklop ponovno će vršiti generatorski prekidač. Podešenje generatorskog prekidača, kao i prekidača s kojim se simuliraju jednofazni i trofazni kratki spoj parametriraju se na jednak način kao u prethodnom poglavlju.

5.2.1 Jednofazni kratki spoj



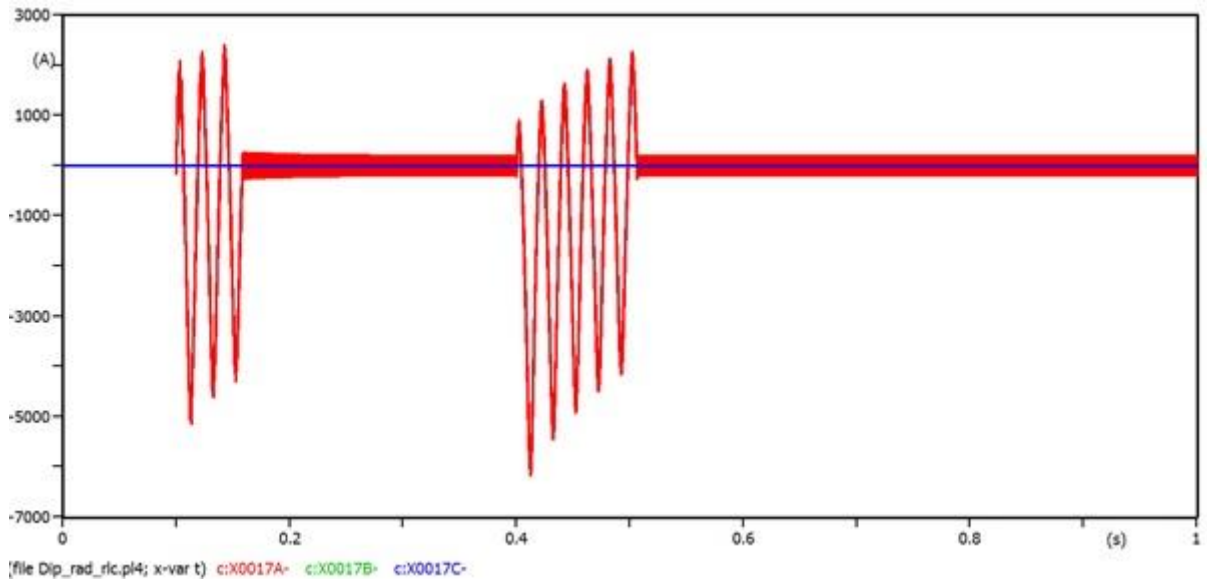
Sl. 5.16. *Valni oblici napona pojedinih faza generatora pri jednofaznom kratkom spoju*



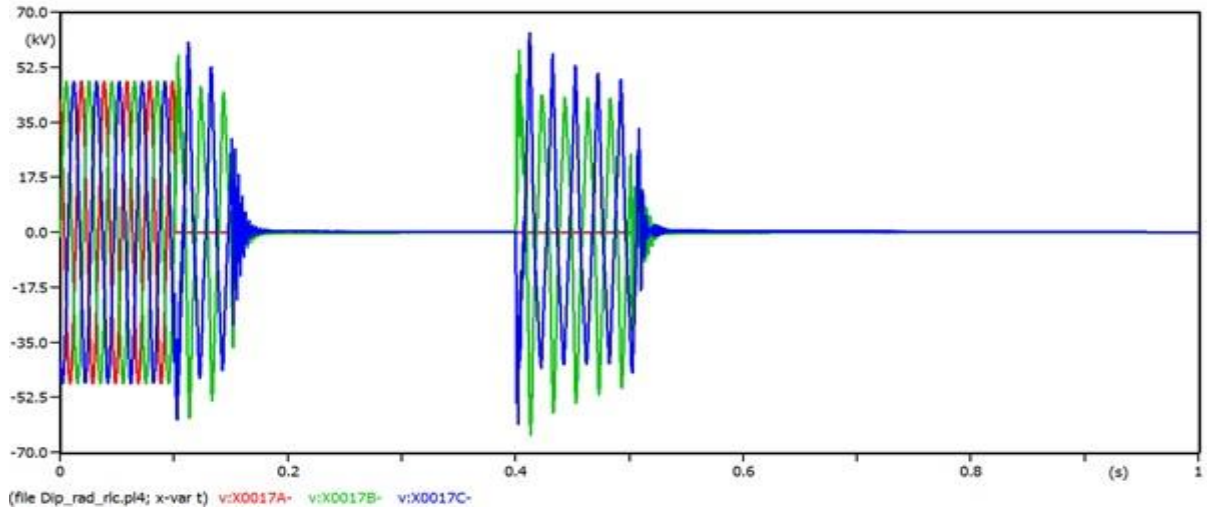
Sl. 5.17. *Valni oblik struje faze A generatora pri jednofaznom kratkom spoju*

Pri jednofaznom kratkom spoju na sabirnicama Viridas 35 kV, dobiju se vrlo slični rezultati u odnosu na jednofazni kratki spoj na kabelu 35 kV. Napon faze A propada u trenutku kratkog

spoja, dok naponi zdravih faza rastu 1.4 puta u odnosu na nazivnu vrijednost. Tijekom vremena u kojem je generator odvojen od ostatka mreže i kvara, dolazi do polaganog oporavljanja napona na nazivnu vrijednost. Identična stvar je za struju generatora, samo je iznos struje faze A malo veći u odnosu na jednofazni kratki spoj kod kabela jer je impedancija kvara umanjena za impedanciju kabela. Impedancija kvara predstavlja ukupnu impedanciju između izvora i mjesta nastanka kvara.



Sl. 5.18. *Valni oblici struja pojedinih faza na mjestu kvara pri jednofaznom kratkom spoju*

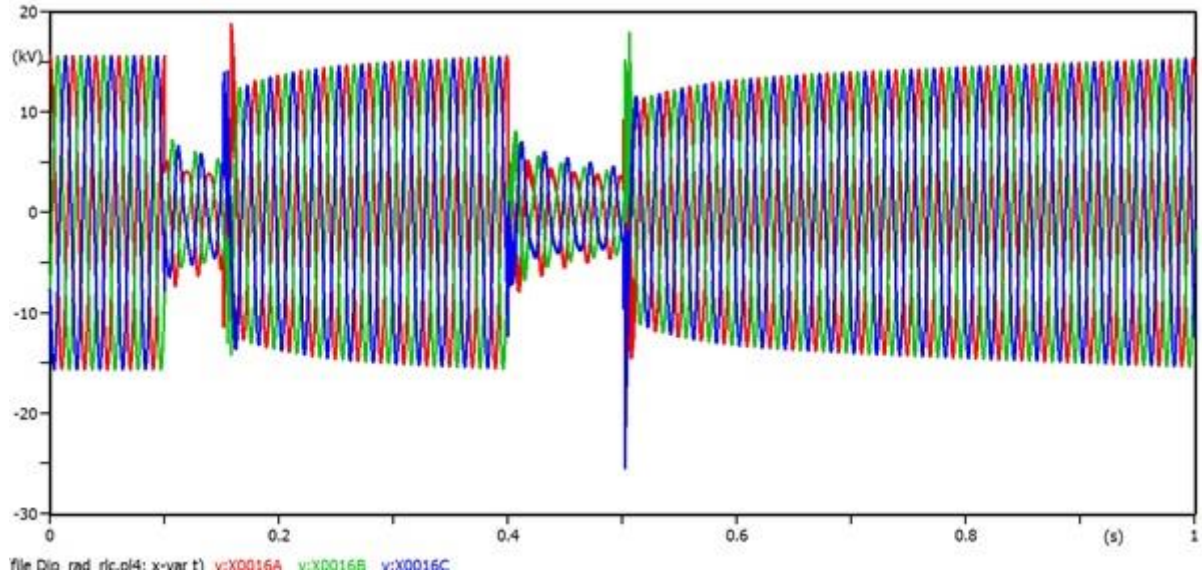


Sl. 5.19. *Valni oblici napona pojedinih faza na mjestu kvara pri jednofaznom kratkom spoju*

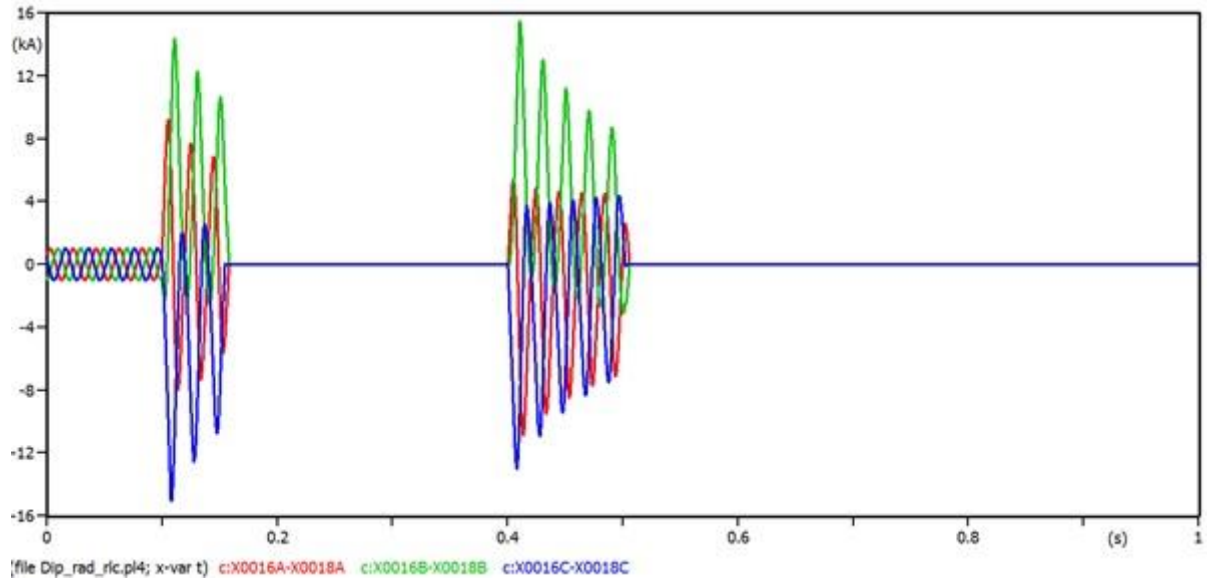
Struja na mjestu kvara prati ponašanje struje na generatoru uslijed smanjene impedancije kvara. Valni oblik struje na mjestu kvara isti je kao i u prethodnom primjeru jednofaznog kratkog spoja,

samo se vrijednost udarne struje kratkog spoja povećala na 5.2 kA, odnosno na 6.3 kA, nakon automatskog ponovnog uklopa. Napon faze A na mjestu kvara u trenutku nastanka kratkog spoja doživljava kolaps, dok naponi ostale dvije faze rastu.

5.2.2 Trofazni kratki spoj



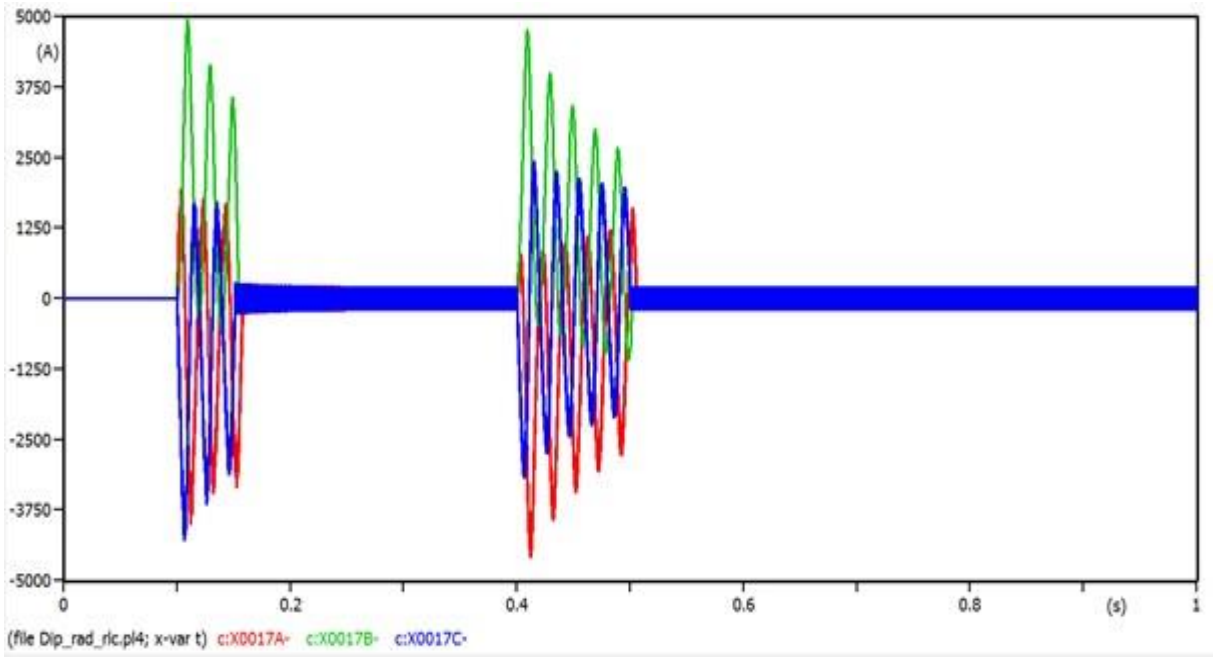
Sl. 5.20. *Valni oblici napona pojedinih faza generatora pri trofaznom kratkom spoju*



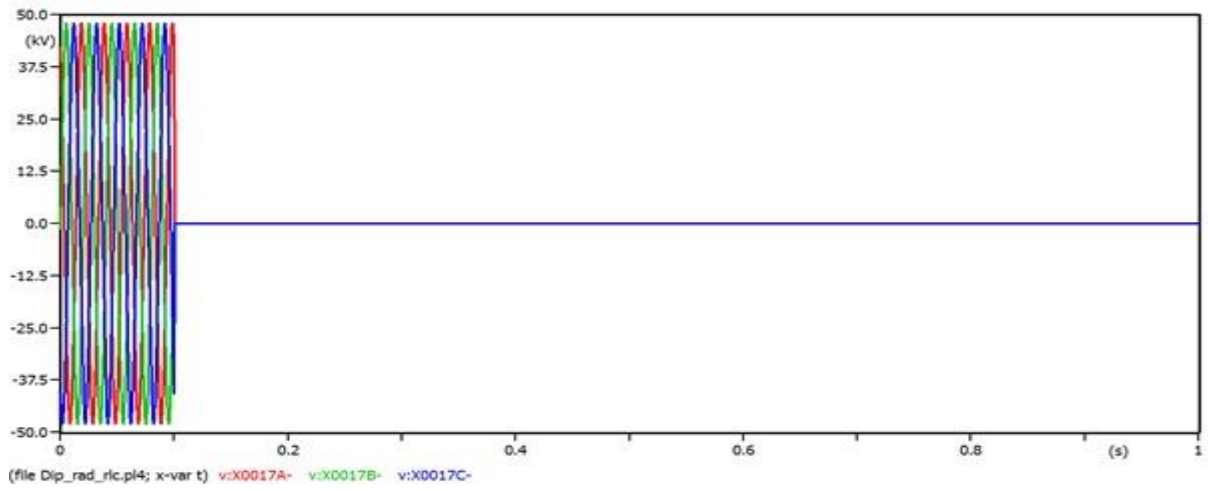
Sl. 5.21. *Valni oblici struja pojedinih faza generatora pri trofaznom kratkom spoju*

Slična stvar može se zaključiti kod simuliranja trofaznog kratkog spoja, prisutno je mnogo sličnosti s prethodnim slučajem. U trenutku kratkog spoja dolazi do kolapsa napona u sve tri faze

generatora, te se isklopom prekidača, one oporavljaju, ali ne trenutno, već u određenom vremenskom periodu. Struja generatora za sve tri faze sliči onoj u prethodnom primjeru, samo je raspored struja u fazama malo drukčije raspoređen u odnosu na prethodni primjer. Zašto se to događa, objašnjeno je u prethodnom slučaju. Udarna struja kratkog spoja dostiže 16 *kA* i predstavlja povećanje u odnosu na prethodni slučaj. Također, treba primijetiti kako je struja generatora kod trofaznog kratkog spoja približno 3 puta veća od vrijednosti udarne struje u odnosu na jednofazni kratki spoj.



Sl. 5.22. *Valni oblici struja pojedinih fazana mjestu kvara pri trofaznom kratkom spoju*

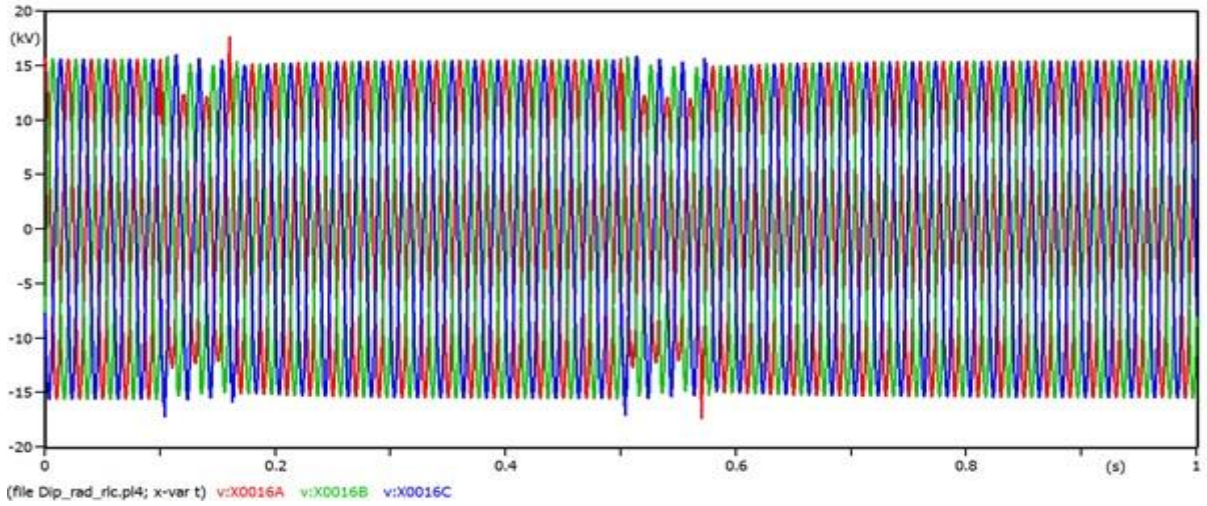


Sl. 5.23. *Valni oblici napona pojedinih faza na mjestu kvara pri trofaznom kratkom spoju*

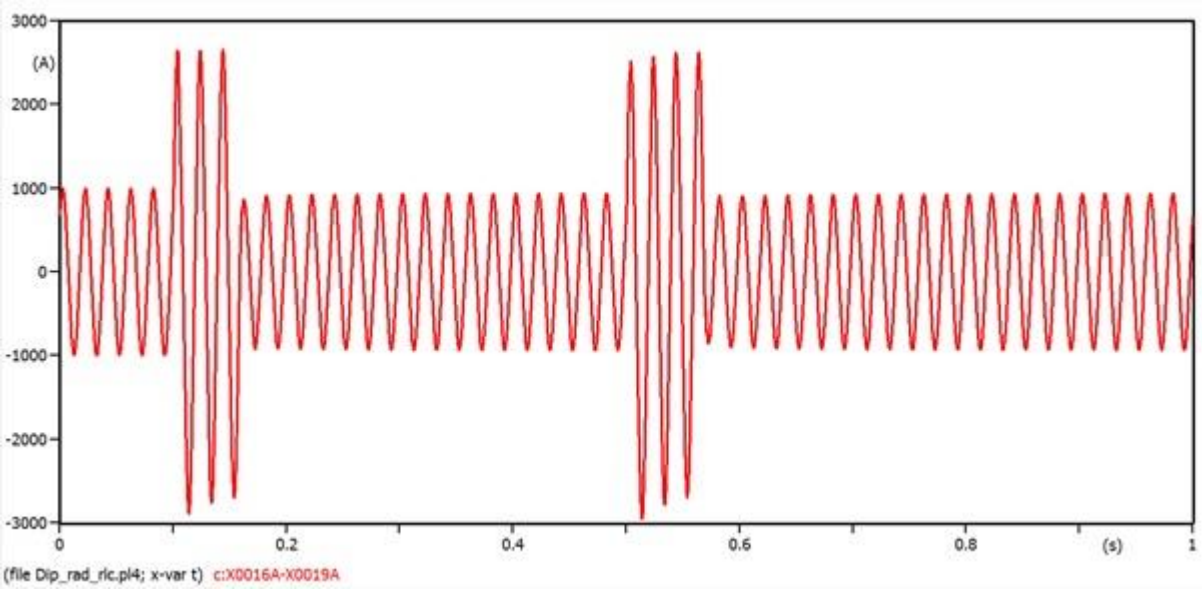
Usporedbom struje na mjestu kvara pri nastanku trofaznom kratkog spoja u ovom i prethodnom primjeru, razlike u struji su neznatne, blago povećanje struje je u korist trofaznog kratkog spoja na sabirnicama Viridas. Maksimalna moguća struja iznosi 5 kA. Napon na mjestu kvara identičan je kao u prethodnom slučaju, do trenutka nastanka kratkog spoja, vladao je nazivni napon u sve tri faze, a tada pa sve do kraja simulacije napon u fazama je jednak nuli.

5.3. Kratki spojevi na sabirnici vlastite potrošnje 0.4 Kv

5.3.1 Jednofazni kratki spoj

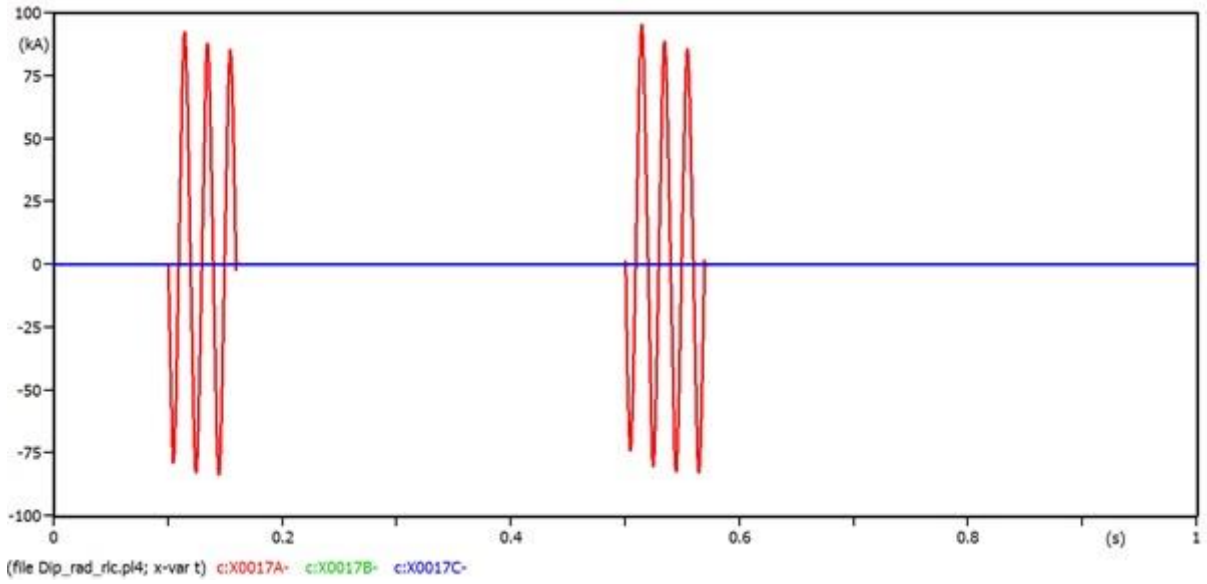


Sl. 5.24. *Valni oblici napona pojedinih faza generatora pri jednofaznom kratkom spoju*

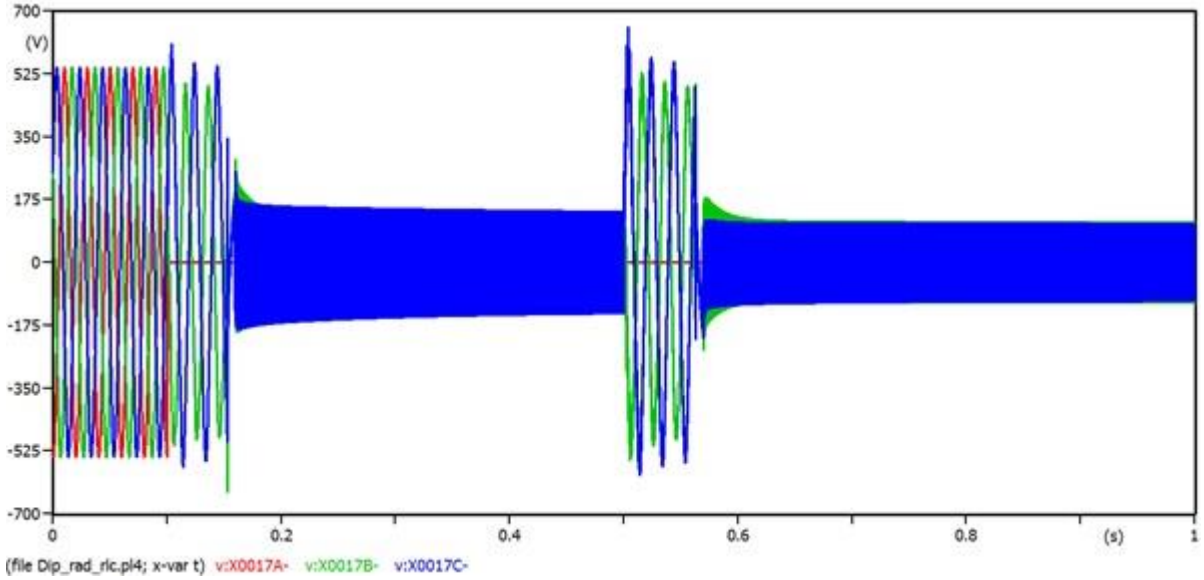


Sl. 5.25. *Valni oblik struje faze A generatora pri jednofaznom kratkom spoju*

Završni slučaj predstavlja simuliranje kratkog spoja na sabirnici vlastite potrošnje 0.4 kV. Podešavanje prekidača vrši se na identičan način kao i u prethodna dva slučaja, samo se za isklop i ponovni uklop u ovom slučaju koristi prekidač 35 kV strane transformatora vlastite potrošnje. Prekidač se parametira tako da prvi dio svojih operacija obavlja kao i generatorski prekidač u prošlim primjerima, ali duže čeka na stabilnost mreže, 350 *ms*. Ponovni uklop događa se pri 510 ms i prekidač isklapa u 570 *ms*. Isklapanjem prekidača, vlastita potrošnja generatora će biti odvojena od generatora i moguće ju je napajati vanjskom mrežom ili pomoćnim agregatima. Generator će nastaviti napajati ostatak mreže. Na slici 5.24. primjećuje se kako su naponi zdravih faza nakon nastanka kratkog spoja ostali u granicama tolerancije nazivnog napona uz blaga kolebanja u početku kratkog spoja. Napon faze A propao je za četvrtinu svoje vrijednosti. Povećanjem vremena čekanja oporavka zaključuje se kako je generator u tom periodu potpuno postigao nazivnu vrijednost napona u sve tri faze. Struja faze A zanimljiva je jer i nakon isklopa prekidača, teče struja približno jednaka nazivnoj. Nastankom kratkog spoja, struja generatora faze A raste na vrijednost višestruko nazivnoj, i to $I_u = 2.8\ kA$. Kada prekidač isklopi, on odvaja granu u kojoj se nalazi transformator vlastite potrošnje i vlastita potrošnja te nastavlja napajati ostatak mreže. Na slici 5.25. može se primijetiti blago smanjenje struje generatora faze A pri isklapanju vlastite potrošnje.



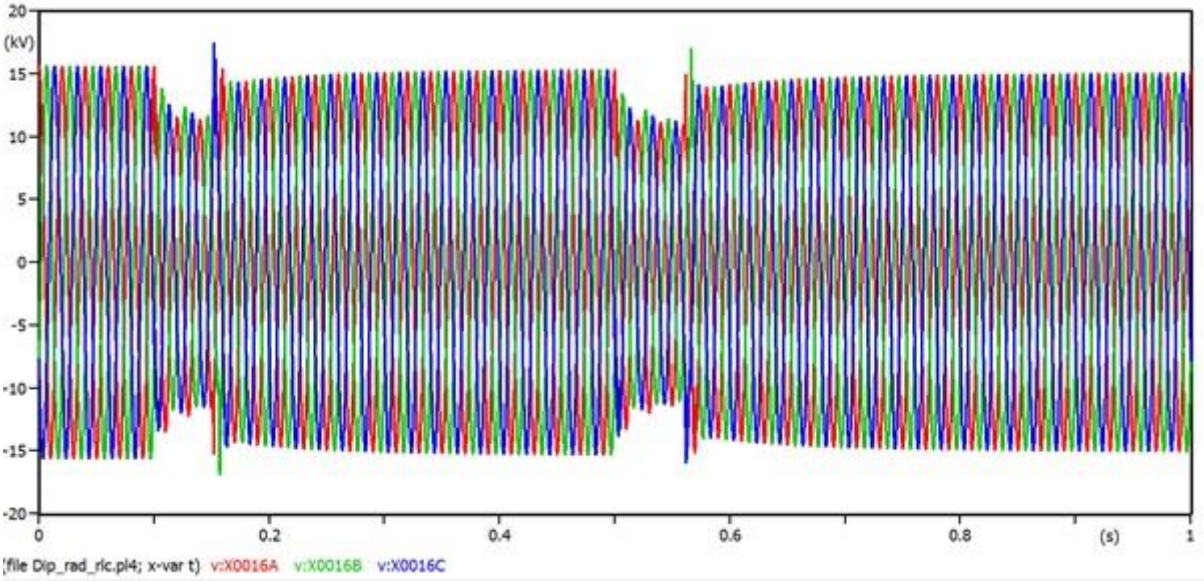
Sl. 5.26. *Valni oblici struja pojedinih faza generatora pri jednofaznom kratkom spoju*



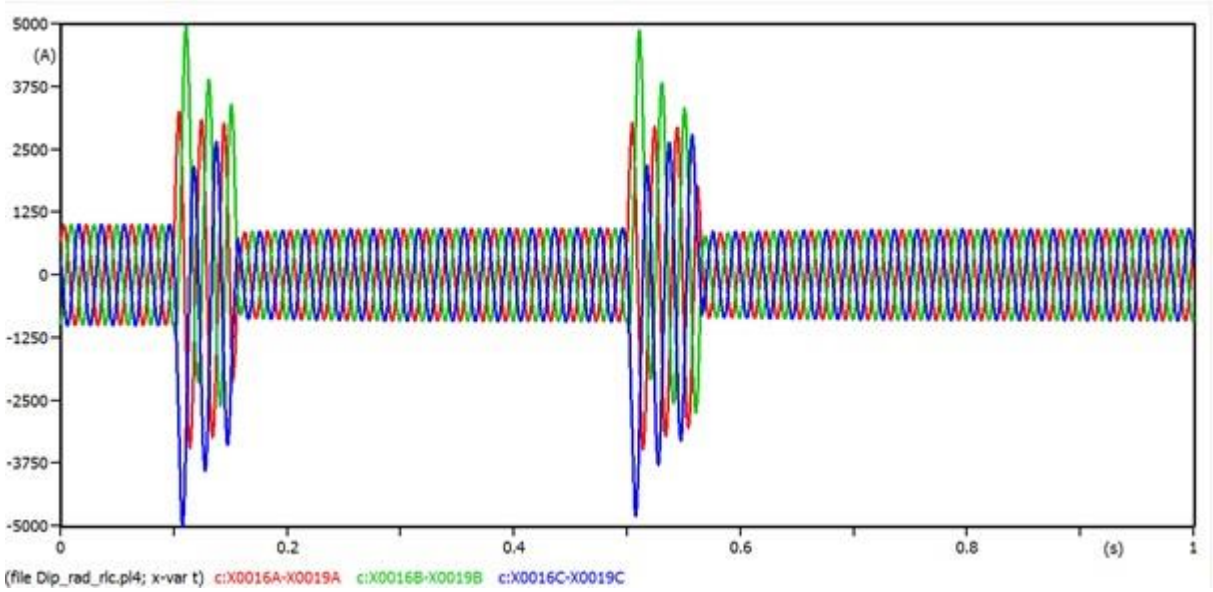
Sl. 5.27. *Valni oblici napona pojedinih faza na mjestu kvara pri jednofaznom kratkom spoju*

Slika 5.26. prikazuje struju faze A na mjestu kvara, ostale faze na mjestu kvara jednake su nuli jer se radi o jednofaznom kratkom spoju. Vrijednost udarne struje kratkog spoja osjetno je veća nego u prijašnjim slučajevima, i to za red veličine 10. Tomu je razlog što se kratki spoj pojavio na niskoj naponskoj razini. Što se tiče napona na mjestu kvara, on poprima oblik kao i u prethodnim slučajevima jednofaznog kratkog spoja.

5.3.2 Trofazni kratki spoj

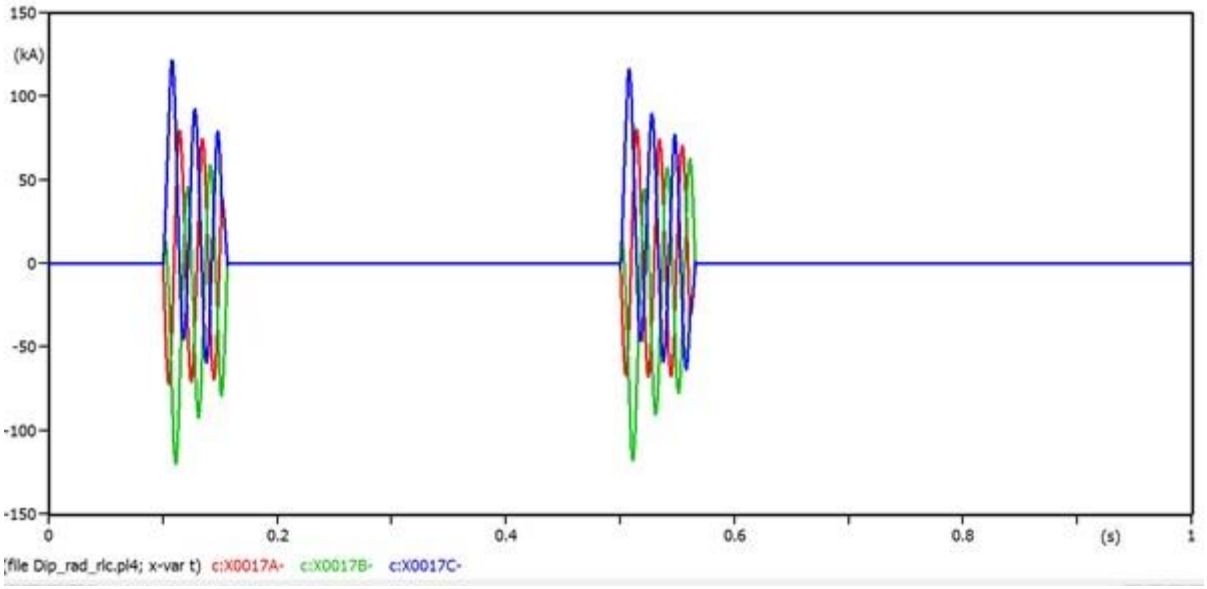


Sl. 5.28. *Valni oblici napona pojedinih faza generatora pri trofaznom kratkom spoju*

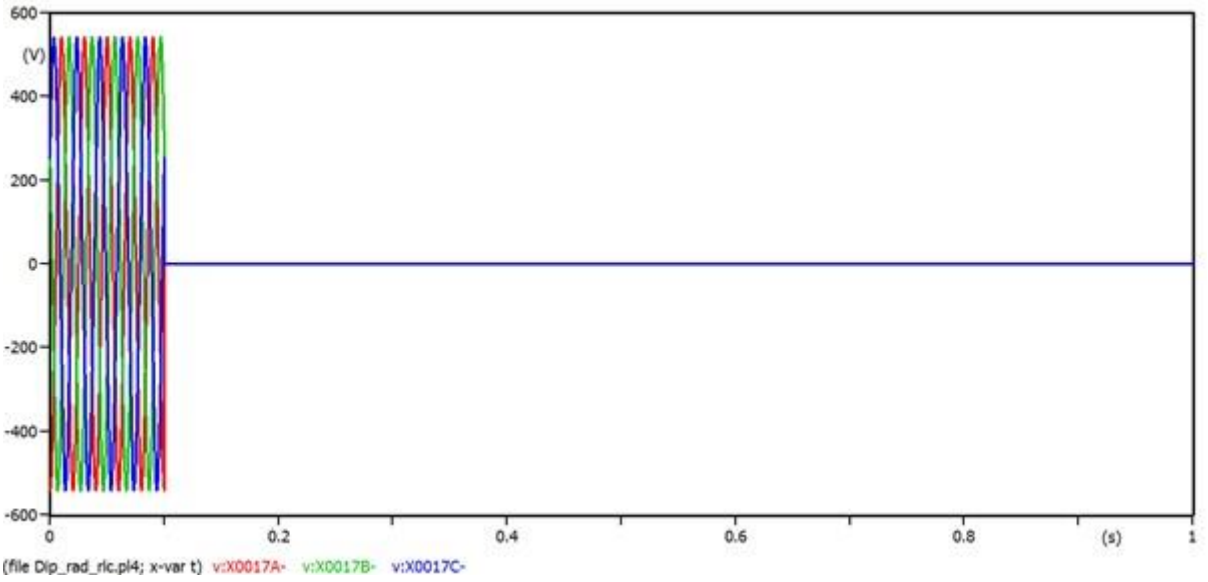


Sl. 5.29. *Valni oblici struja pojedinih faza generatora pri trofaznom kratkom spoju*

Posljednji u nizu je slučaj trofaznog kratkog spoja na sabirnicama vlastite potrošnje. Na slici 5.28. prikazuje se napon faza generatora; pri nastanku trofaznog kratkog spoja dolazi do propada napona u sve tri faze i tek ponovnim uklopom grane vlastite potrošnje (nakon prvotnog udara i povećanja napona), naponi faza teže k nazivnim vrijednostima. Kod struja generatora po fazama, stvar je slična prijašnjim slučajevima. Generator daje približno nazivnu struju jednaku po fazama, u trenutku nastanka kratkog spoja vrijednost struje po fazama poraste na vrijednosti više puta veću od nazivne, te se isklopom prekidača 35 kV strane transformatora vlastite potrošnje odvaja grana s vlastitom potrošnjom. Generator tada napaja ostatak mreže preko kabela i dalekovoda strujom umanjenom za onu koja je opskrbljivala vlastitu potrošnju. Udarna vrijednost struje kratkog spoja iznosi 5 kA.



Sl. 5.30. *Valni oblici struja pojedinih faza na mjestu kvara pri trofaznog kratkom spoju*



Sl. 5.31. *Valni oblici napona pojedinih faza na mjestu kvara pri trofaznom kratkom spoju*

Slika 5.30. pokazuje raspored struja na mjestu kvara te njihove maksimalne vrijednosti u trenutku nastajanja kratkog spoja i ponovnog uklopa. Zaključuje se kako su struje trofaznog kratkog spoja veće u odnosu na struju jednofaznog kratkog spoja za slučaj kratkih spojeva na sabirnici vlastite potrošnje. Napon na mjestu kvara ponaša se kao i u prethodna dva primjera trofaznih kratkih spojeva; do trenutka nastanka kratkog spoja nazivnih je vrijednosti po fazama, a nakon pojave kratkog spoja naponi faza padaju na nulu.

6. ZAKLJUČAK

Povećanim zahtjevima za električnom energijom, pojačanim i konstantnim rastom osobne i ukupne potrošnje električne energije, ekološka pitanja postala su temeljni problemi inženjera 21. stoljeća. Jedan od mnogih obnovljivih izvora energije koji u posljednje vrijeme doživljava rast instaliranih kapaciteta je i biomasa. Prema procesu dobivanja električne energije, elektrane na biomasu spadaju u grupu termoelektrane. Velika razlika, ali i prednost je višestruko manje zagađenje okoliša izgaranjem šumske, poljoprivredne biomase u odnosu na ugljen i plin. Elektrana "Viridas" spada u skupinu elektrana na biomasu, gdje se kao pogonsko gorivo koristi ostatak sječke u šumama u okolici Babine Grede. U Republici Hrvatskoj za svaku novu elektranu koja će se spojiti na distribucijsku mrežu (10, 20 i 35 kV) mjesto priključka, nazivni napon priključka, tehničke i pogonske uvjete određuje operator distribucijskog područja. Na srednje napononsku mrežu priključuju se elektrane ukupne snage 500 kW – 10 MW. Uplivom sve većeg broja instaliranih kapaciteta obnovljivih izvora energije, pojavljuju se nove zadaće i problemi vezani uz stabilnost i utjecaj na ostali dio mreže. Jedan od složenijih problema pri analizi utjecaja distribuirane proizvodnje na distributivnu mrežu je analiza parametara pri aksidentalnom stanju u mreži kao što je kratki spoj. U ovom diplomskom radu simulirali su se događaji jednofaznog i trofaznog kratkog spoja na različitim mjestima u mreži. Kod jednofaznih kratkih spojeva, najbitniji utjecaj na iznos struje kratkog spoja ima vrsta uzemljenja mreže. U slučaju uzemljenja mreže, struja kratkog spoja poprima vrijednost reda veličine kA i induktivnog je karaktera, dok u izoliranim mrežama struje su malog iznosa reda veličine nekoliko A i kapacitivnog su karaktera. Modeliranje strujnog kruga te sveopća analiza prijelazne pojave generatora pri automatskom ponovnom uklopu pri distribuiranoj proizvodnji vršilo se u programskom paketu ATP – EMTP. ATP – EMTP pokazao se kao vrlo moćan računalni alat za sve vrste prijelaznih pojava te snimanje valnih oblika u tranzijentnim stanjima u sustavu. Generator je jedini element mreže s mogućnošću proizvodnje električne energije i definira i diktira sve pojave u mreži. Svaki kratki spoj generator vidi kao rasterećenje i smanjenjem opterećenja počinje povećavati svoju brzinu vrtnje. Tada, električna energija generatora ispada iz balansa s mehaničkom energijom turbine i postaje veća u odnosu na nju. Kada zaštita ne bi proradila, generator bi nekontrolirano ubrzavao i nastavio kočiti turbinu koja bi u konačnici nadvladala generator i uzrokovala katastrofu te posljedično raspad sustava. Analizom dobivenih rezultata valnih oblika struja i napona moguće je uočiti određene sličnosti za istu vrstu kratkog spoja pri različitim slučajevima, odnosno različitim mjestima nastanka. Nakon početnog stacionarnog stanja i ustaljenog načina rada generatora koji napaja svoje potrošače, u trenutku nastanka kratkog spoja dolazi do smanjenja napona u fazi koja je kratko spojena. Pri trofaznom

kratkom spoju primjećuje se smanjenje napona generatora u sve tri faze, dok se pri jednofaznom kratkom spoju smanjuje samo napon faze generatora koja je kratko spojena. Ostale dvije faze po teoremu kratkih spojeva moraju biti jednake i zbrojene davati vrijednost nula. Blagi porast napona zdravih faza nastaje zbog iznenadne promjene opterećenja i pojave nesimetričnosti. Pri isklopu prekidača nakon isteka vremena prorade zaštite i prekidača, generator se odvaja od mreže i svojom magnetskom inercijom pokušava dostići stacionarno stanje, koje je u tom trenutku jednako onom u praznom hodu. Ponovnim uklopom prekidača, naponi pogođene (pogođenih) faze (faza) doživljavaju kolaps te se trajnim isključenjem prekidača ponovno vraćaju na nazivne vrijednosti u određenom vremenskom intervalu. Što se tiče struja generatora, one poprimaju karakteristične oblike struja kratkih spojeva u tri karakteristična vremenska intervala (subtranzijentni, tranzijentni i trajni). Četvrtinu periode nakon nastanka kratkog spoja pojavljuje se udarna, maksimalna struja kratkog spoja i ona predstavlja najvažniji parametar u proračunu struja kratkog spoja iz razloga što ju svi elementi sustava moraju elektrodinamički izdržati. Isklapanjem prekidača, struje padaju na vrijednost blisku nuli, međutim i dalje se proizvodi struja iznosa potrebnog za održavanje transformatora u praznom hodu. Kada prekidač odradi automatski ponovni uklop, ponavlja se situacija prvotnog nastanka kratkog spoja gdje je vrijednost struja bliska prvotnim vrijednostima. U slučaju kratkog spoja na sabirnicama vlastite potrošnje, nakon isklopa prekidača na strani višeg napona transformatora vlastite potrošnje, generator nastavlja napajati ostatak mreže na koju je i dalje spojen. U ovom slučaju moguće je vidjeti sve prednosti zamkaste topologije mreža jer se u slučaju kvara određenog dijela mreže, selektivnošću postiže da ostali dijelovi mreže ne ostanu bez električne energije. Iako su jednofazni kratki spojevi i zemljospoji češći događaji u mreži, trofazni kratki spojevi su daleko štetniji. Ovaj rad pokazao je da su nebitno o mjestu nastanka kratkog spoja, trofazni kratki spojevi u pravilu veće vrijednosti nego jednofazni. Kao što se očekivalo, što je kratki spoj električki bliže generatoru, vrijednosti struje su veće. Kod kratkih spojeva bliskih generatoru, struja kratkog spoja ograničavaju samo otpori namota, tj. sinkrona reaktancija. Što je ona manja, struja kratkog spoja je veća. Činjenica da generator ne može trenutno promijeniti svoj magnetski tok je u jednu ruku prednost, ali i mana. Generator apsorbira kratki spoj i svojom magnetskom inercijom ga u vremenskom intervalu apsorbira, ali isto tako mu treba vremena za postizanje nazivnog stacionarnog stanja.

LITERATURA

[1] L. Jozsa, Energetski procesi i elektrane, Osijek 2008.

[2] B. Skalicki, J. Grilec, Električni strojevi i pogoni, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2011.

[3] Električne mašine, Vahid Danon, 1972.

[4] Lajos Jozsa, Nadzemni vodovi, Osijek 2011.

[5] H. Požar, Visokonaponska rasklopna postrojenja,Tehnička knjiga, Zagreb, 1973.

[6] Marija Ožegović, Karlo Ožegović, Elektroenergetske mreže II, Split 1997.

[7] Elaborat podešenja zaštite

SAŽETAK

Glavni zadatak ovog rada bilo je analizirati prijelazne pojave i utjecaj automatskog ponovnog uklopa na glavni izvor svakog sustava, generator. Kao realan primjer, elektrana na biomasu „Viridas“ priključena na distributivnu mrežu trebala je dati odgovor na taj problem. Sve simulacije vršene su u programskom paketu ATP -EMTP, programu specijaliziranom za tranzijentne pojave u elektrotehnici. Simuliranjem trofaznog i jednofaznog kratkog spoja u mreži sa uzemljenjem, pojasnilo se ponašanje struja i napona generatora u prijelaznom vremenu između dva isklopa prekidača. Na osnovu dobivenih rezultata, može se zaključiti kako je trofazni kratki spoj nepovoljniji zbog većih vrijednosti struja, ali i zbog kolapsa napona u sve tri faze. Također, ovaj rad je pokazao prednost svojstva selektivnosti zaštite.

Ključne riječi: sinkroni generator, prijelazne pojave, kratki spojevi, elektrana na biomasu Viridas, APU

ABSTRACT

The main assignment of this paper was to analyze transient phenomena and impact of automatic reclosing of the switch on generator. Like realistic example, „Viridas“ biomass power plant connected to distributed grid needed to answer that problem. All simulations was made in simulation program ATP – EMTP which is specialized for transient phenomena in electrical engineering. By simulating three phase and single phase fault in grid with ground connection, it was explained current and voltage conditions of the generator in transient time between two openings of the switch. Based on obtained results, it can be concluded that three phase fault is unfavorable because of higher value of the currents and because of collapsing of the voltage in all three phases. Also, this paper shows benefit of selectivity of protection.

Key words: synchronous generator, transient phenomena, short circuits, biomass power plant Viridas, automatic reclosing

ŽIVOTOPIS

Ivan Pandžić je rođen 17.listopada 1992.godine u Osijeku. Upisuje Osnovnu školu Jagode Truhelke u istom gradu 1999. godine. Kroz osnovnoškolsko obrazovanje pohađa nekoliko natjecanja iz matematike te završava sve razrede s odličnim uspjehom. Nakon osnovne škole, 2007. godine upisuje Matematičku gimnaziju u Osijeku koju završava 2011.godine. Polaganjem osnovnih i izbornih predmeta na Državnoj maturi te vrlo dobrim uspjehom u četiri godine srednje škole, 2011.godine uspješno upisuje Elektrotehnički Fakultet u Osijeku. U drugoj godini preddiplomskog studija odabire elektroenergetiku kao područje svojeg interesa. Preddiplomski studij završava s temom završnog rada „Utjecaj klimatskih promjena na strujno – naponske karakteristike različitih tehnologija fotonaponskih sustava“ kod mentora Damira Šljivca s vrlo dobrim rezultatom. Nakon završetka preddiplomskog studija upisuje diplomski studij, gdje nakon završene prve godine odrađuje jednomjesečnu praksu u HOPS-u (Hrvatski Operator Prijenosnog Sustava).