



## IMPLEMENTACIJA UREĐAJA ATS U TRANSFORMATORSKOJ STANICI INDUSTRIJSKOG KOMPLEKSA NAPAJANOG IZ ELEKTRODISTRIBUTIVNE MREŽE

### IMPLEMENTATION OF ATS SYSTEM IN A SUBSTATION OF AN INDUSTRIAL COMPLEX POWERED BY ELECTRIC POWER DISTRIBUTION NETWORK

Brankica POPOVIĆ ZDRAVKOVIĆ, Energoprojekt Entel a.d. Beograd, Srbija  
Nada VRCELJ, Energoprojekt Entel a.d. Beograd, Srbija  
Nikola ŠUŠNICA, Energoprojekt Entel a.d. Beograd, Srbija

#### KRATAK SADRŽAJ

Potpuni prekid napajanja usled poremećaja u mreži predstavlja jedan od najvećih problema snabdevanja potrošača električnom energijom. U tom smislu, jedan od načina poboljšanja sigurnosti i pouzdanosti napajanja potrošača je uvođenje sistema automatskog transfera, sistema ATS (Automatic Transfer Switch), koji, prilikom poremećaja, automatskim prenosom opterećenja na alternativni (pomoćni) sistem napajanja, u veoma kratkom vremenskom periodu, obezbeđuje kontinuitet napajanja potrošača. U ovom radu predstavljen je primer implementacije uređaja ATS u transformatorskoj stanici industrijskog kompleksa u Kataru koji se napaja iz elektrodistributivne mreže, i to sa stanovišta tranzijentne stabilnosti sistema. Analiza stabilnosti sistema podrazumeva simulaciju karakterističnih poremećaja u mreži koji se mogu očekivati u njenoj eksploataciji, a za cilj ima da ustanovi sposobnost sistema da održi stabilnost nakon reagovanja zaštite i automatskog prebacivanja opterećenja na alternativni (pomoćni) sistem napajanja. U radu su prikazani rezultati analize tranzijentne stabilnosti za različite poremećaje, gde su posmatrani odzivi i stanja relevantnih veličina u razmatranoj mreži. Na osnovu ovih rezultata date su odgovarajuće preporuke za izbor načina i vremenskog podešenja reagovanja uređaja ATS, kao i za odgovarajuće podešenje relejne zaštite.

**Ključne reči:** elektrodistributivna mreža, industrijski kompleks, sistem ATS, tranzijentna stabilnost

#### ABSTRACT

Complete power disruptions due to network disturbances represent one of the biggest problems for the quality of electrical supply to consumers. In that regard, one of the ways to improve the safety and reliability of power supply to consumers is introducing the ATS (Automatic Transfer Switch), which in the event of a disturbance, automatically transfers the load to an alternative (auxiliary) power source, in a very short time period, and thereby provides continuity of power supply to consumers. This paper presents an example of the implementation of the ATS system in a substation of an industrial complex in Qatar, supplied from distribution network, from the standpoint of system's transient stability. System stability analysis involves simulation the characteristic disturbances that can be expected in the studied network, and aims to establish the system's ability to maintain stability after protection devices' response and automatic load switching to an alternative (auxiliary) power source. The paper presents the results of the transient stability analysis for various disturbances, where the responses and states of relevant parameters in the studied network are observed. Based on these results, appropriate recommendations are given regarding the transfer mode selection and response time setting of the ATS device, as well as relay protection settings.

**Key words:** ATS system, distribution network, industrial facility, transient stability

## 1. UVOD

U radu su predstavljeni rezultati analize tranzijentne stabilnosti električne mreže koja napaja jedan industrijski kompleks u Kataru. Na osnovu rezultata analize date su odgovarajuće preporuke u pogledu očuvanja stabilnosti mreže i pouzdanosti napajanja potrošača.

Osnovni cilj ove analize je da ustanovi može li se stabilnost sistema očuvati primenjivanjem sistema za automatsko prebacivanje izvora napajanja (ATS – Automatic Transfer Switch) na sabirnice 6,6 kV transformatorske stanice koja napaja pomenuti industrijski kompleks.

Sistem ATS predstavlja sklop automatskih prekidača koji obezbeđuje prenos napajanja sa osnovnog na alternativni izvor. Koristi se u mreži za objekte koji zahtevaju neprekidno napajanje električnom energijom kao što su bolnice, data centri, fabrike, itd. uređaji ATS su samodelujući, inteligentni uređaji za prebacivanje napajanja kojima upravlja primenjena kontrolna logika. Upravljačka logika uređaja ATS je tipično bazirana na mikroprocesoru i konstantno prati električne parametre (napon i frekvenciju) primarnih i alternativnih izvora napajanja. U slučaju kvara detektovanog sa primarnog izvora napajanja, uređaj ATS automatski prebacuje opterećenje na drugi, alternativni izvor napajanja. Kao opšte pravilo, većina ovih uređaja kontinuirano traži vezu sa primarnim izvorom napajanja, i nakon detekcije poremećaja povezuje opterećenje sa alternativnim izvorom napajanja ili kada to zahteva komanda operatera, [1].

Kako bi se izvršila analiza tranzijentne stabilnosti bilo je potrebno kreirati ekvivalentni model elektroenergetske mreže sa odgovarajućim dinamičkim modelima motora koji predstavljaju i najveći deo kompleksa koji se napaja. Analiza tranzijentne stabilnosti podrazumeva simulaciju karakterističnih, iznenadnih poremećaja koji se mogu javiti u toku normalnog rada sistema. Ova simulacija određuje sposobnost sistema da postigne stabilnost nakon pojave kvara i ukloni ga delovanjem zaštitnih uređaja nakon određenog vremenskog perioda.

## 2. METODOLOGIJA

Proračun tranzijentne stabilnosti podrazumeva simulaciju u vremenskom domenu karakterističnih, iznenadnih poremećaja koji se mogu javiti u toku rada elektroenergetskog sistema. Ova simulacija određuje sposobnost sistema za postizanje stabilnosti nakon pojave kvara i njegovo uklanjanje delovanjem zaštitnih uređaja, nakon određenog vremenskog perioda od pojave kvara.

Generalno, stabilnost sistema je ravnoteža između mehaničkog ulaza turbine generatora i opterećenja sistema, uključujući gubitke. Kada se ova ravnoteža postigne, svi generatori i sinhroni motori su u sinhronizmu, tj. rotiraju se istom prosečnom električnom brzinom. Ako se pojave iznenadne smetnje, poput stanja kvarova, ispada generatora, naglog povećanja ili smanjenja opterećenja itd, stabilnost sistema postaje ugrožena. Delovi sistema, kada se poremećaj dogodi, teže nagloj promeni brzine, [2]. U takvom stanju, zaštitni uređaji reaguju sa ciljem da očuvaju stabilnost sistema. Nakon aktiviranja zaštitnih uređaja, sistem će ostati stabilan ukoliko su, nakon nastanka poremećaja, sile koje teže ponovnom uspostavljanju sinhronne brzine veće u poređenju sa silama koje izazivaju odstupanje brzine, [3]. U tom smislu, cilj provere tranzijentne stabilnosti je simuliranje iznenadnih poremećaja u vremenskom domenu i utvrđivanje da li sistem može da održi stabilan rad nakon što se takvi poremećaji uklone uz pomoć zaštitnih uređaja.

U vezi sa problematikom i temom ovog rada, generatori su modelovani kao napajanje obezbeđeno iz ekvivalentnog izvora, dok se opterećenje sastoji od indukcionih motora i drugih potrošača priključenih na distributivnu mrežu. Proračun tranzijentne stabilnosti zahteva dve grupe podataka o elementima mreže koja se posmatra. Prvi set opisuje topologiju električne mreže i sve njene elemente, zajedno sa opterećenjem. Drugi skup podataka odnosi se na mašine prisutne u posmatranoj mreži, kao što su generatori i ostale rotirajuće mašine (sinhroni i indukcionni motori itd.). Topologija mreže je definisana pomoću matičnog oblika povezivanja, dok su elementi mreže prisutni u ekvivalentnoj šemi, sa vrednostima impedanse i ostalih parametara, kao što su naznačena snaga transformatora, prenosni odnos, sprega i satni broj, vrsta uzemljenja itd. Druga grupa koja obuhvata obrtne mašine opisana je sa dve kategorije podataka. Prva kategorija sadrži tehničke parametre koji čine dinamičke modele obrtnih mašina (generatori, motori). Ovi podaci zahtevaju informacije kao što su naznačeni kapacitet i naznačeni napon mašine, impedanse u različitim fazama prelaznog procesa, vremenske konstante, svojstva magnetnog jezgra mašine, konstanta inercije, itd.

Na osnovu navedenih tehničkih parametara, dinamički model mašine se uvodi u ekvivalentni model mreže, koji će se koristiti u daljem proračunu tranzijentne stabilnosti. Druga kategorija podataka, neophodna za finalizaciju dinamičkih modela obrtnih mašina, odnosi se na podatke koji prikazuju parametre priključne mašine. U ovom slučaju, priključne mašine su ventilatori, pumpe i kompresori. Njihova karakteristika opterećenja, koja predstavlja odnos obrtnog momenta prema brzini obrtanja za takve uređaje, takođe je uključena u ekvivalentni model. Oni upotpunjuju podatke potrebne za uspostavljanje zajedničkog dinamičkog modela potrebnog za simulaciju i ustanovljenje tranzijentne stabilnosti.

Treba napomenuti da je razvijanje modela mreže, kao i proračun zajedničke tranzijentne stabilnosti izvršeno korišćenjem komercijalnog softverskog paketa, namenjenog analizi, ispitivanju i projektovanju

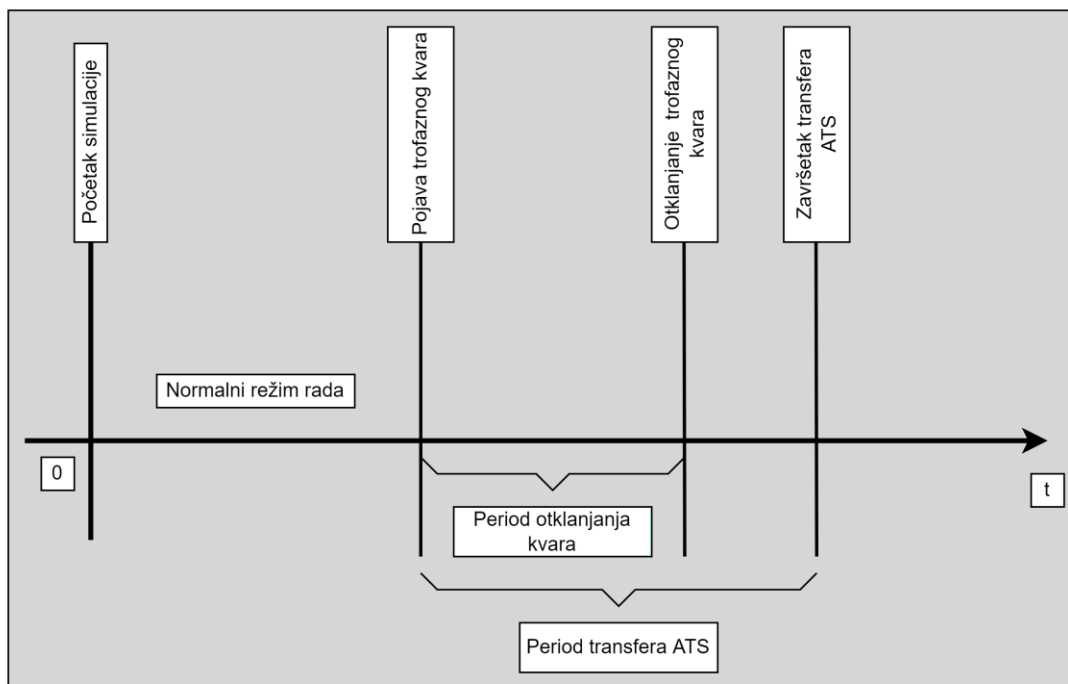
elektroenergetskih sistema, [4]. Program sadrži i značajan broj ekvivalentnih šema u svojoj biblioteci, koje pokrivaju različite elemente koji mogu biti prisutni u razmatranim električnim mrežama. U tom pogledu, ekvivalentni model mreže je razvijen na osnovu uobičajenih ekvivalentnih šema za elemente u razmatranoj mreži, koje su dostupne u biblioteci korišćenog softvera, a smatraju se dovoljno detaljnim za uspostavljanje modela adekvatnog za sprovođenje dinamičkih analiza.

Metodologija proračuna tranzijentne stabilnosti zasniva se na rešavanju dva niza jednačina koji opisuju ponašanje sistema tokom razmatranih poremećaja. Prvi skup jednačina predstavlja algebarske jednačine koje opisuju performanse mreže tokom tranzijentnog perioda. Drugi skup čine diferencijalne jednačine čije rešenje opisuje performanse karakterističnih električnih mašina. Proces rešavanja ovih jednačina se odvija u diskretnim vremenskim intervalima, [5]. Ovaj pristup omogućava uzimanje u obzir uticaja relevantnih komponenti koje menjaju svoje vrednosti usled poremećaja tokom analiziranog prelaznog perioda. U simulaciji tranzijentne stabilnosti učestvuju sve relevantne promenljive (naponi sabirnica, snaga i struja elemenata mreže, napon priključka na mašini, aktivna i reaktivna snaga, ugao rotora itd.). Vrednosti parametara izračunavaju se za svaki diskretni vremenski interval tokom simulacije poremećaja. Ove vrednosti se mogu tabelarno prikazati ili predstaviti u grafičkom obliku. Na osnovu izračunatih vrednosti i oblika grafika koji opisuju ponašanje relevantnih promenljivih, može se izvesti zaključak u vezi sa tranzijentnom stabilnošću sistema tokom trajanja i nakon određenog poremećaja.

Predstavljeni postupak proračuna je uključen u algoritam za izračunavanje tranzijentne stabilnosti softverai primenjen na model mreže industrijskog kompleksa u Kataru, kako bi se procenila tranzijentna stabilnost sistema i proverila njegova sposobnost da održi stabilan rad u slučajevima pojave iznenadnih poremećaja.

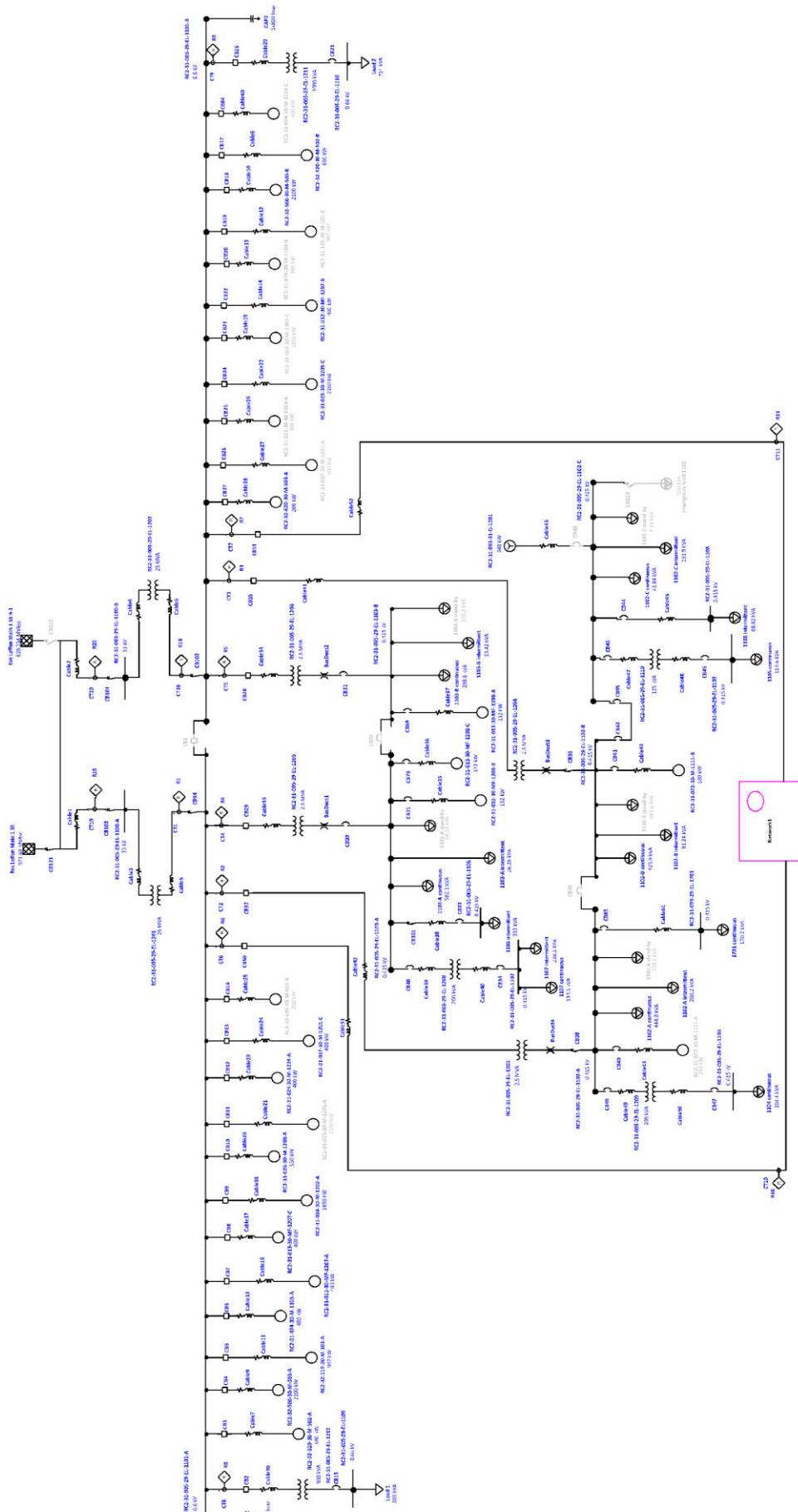
### 3. ANALIZA TRANZIJENTNE STABILNOSTI

Provera tranzijentne stabilnosti mreže koja se razmatra u radu je sprovedena za jedan karakterističan slučaj - analizira se događaj kada uređaj ATS reaguje nakon određenog vremenskog perioda od trenutka uklanjanja kvara. Simulacija ovog scenarija, kada se dogodi trofazni kratak spoj, grafički je prikazana na Slici 1. Period za koji uređaj ATS izvrši transfer napajanja podrazumeva vreme obrade releja radi pokretanja komande istovremenog otvaranja prekidača neispravnog elementa (uklanjanje kvara), kao i naredbe zatvaranja prekidača za nastavak napajanja u sklopu postupka ATS, [6].

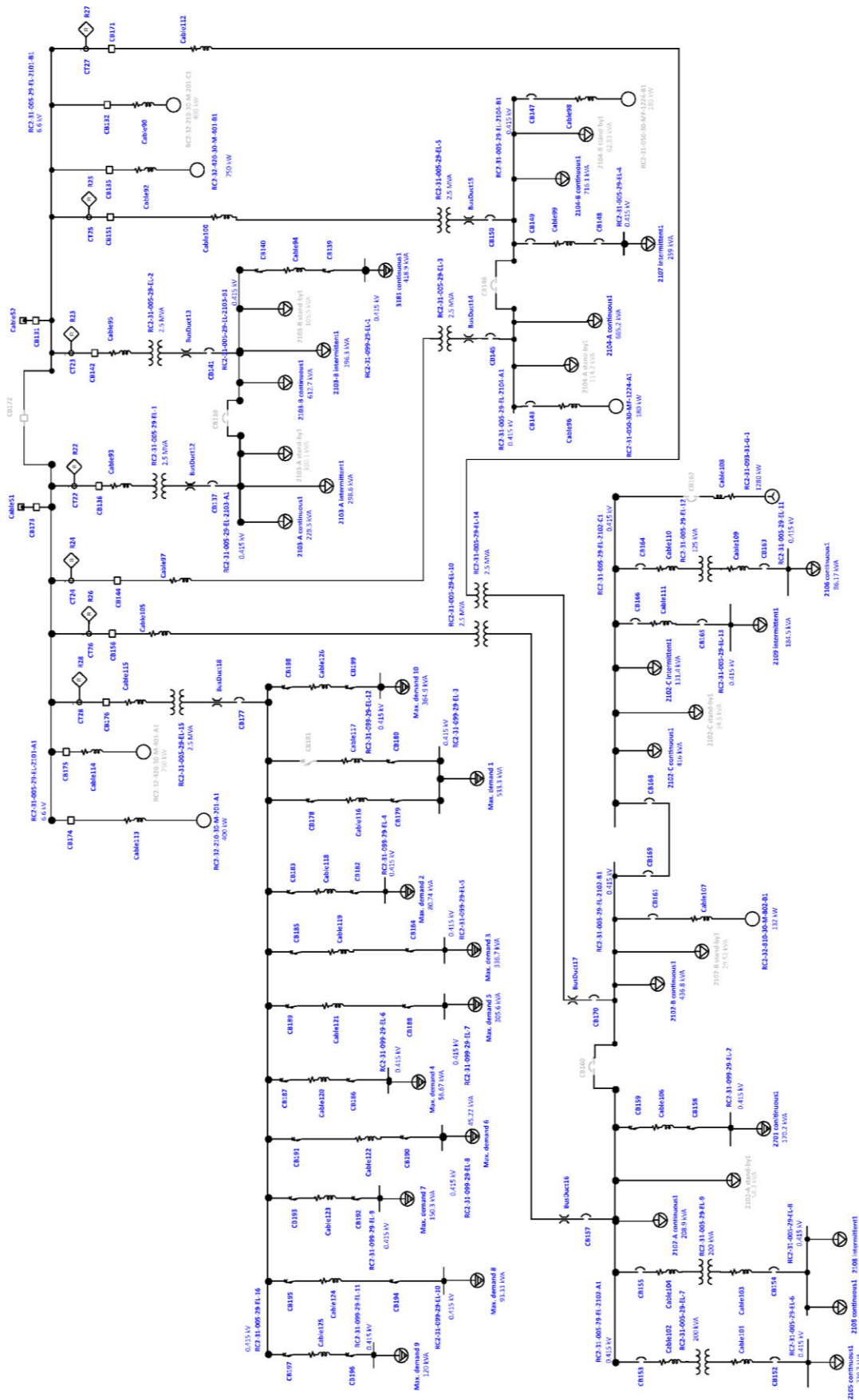


Slika 1 – Grafički prikaz simulacije predstavljenog scenarija (scenario 1)

Izgled mreže industrijskog kompleksa, koja je predmet ove analize, prikazan je na Slici 2a i Slici 2b, [7].



Slika 2a – Jednopolna šema industrijskog kompleksa u Kataru, SS1



Slika 2b – Jednopolna šema industrijskog kompleksa u Kataru, SS2

U datoj analizi pretpostavlja se da period inicijalizacije traje 30 ms (vreme potrebno za inicijacijski signal uređaju ATS da otpočne svoje delovanje), dok se vreme otvaranja prekidača neispravnog uređaja računa kao period od 50 ms. Prema tome se pretpostavlja da je period uklanjanja poremećaja od trenutka kada se on pojavi, traje 80 ms. Vreme zatvaranja prekidača koji će omogućiti nastavak napajanja smatra se da traje 80 ms. Treba napomenuti da se procenjuje da vreme otvaranja prekidača traje kraće od vremena zatvaranja prekidača. Kako je poremećaj detektovan, a inicijalizacija započeta 30 ms nakon otkrivanja greške, istovremeno se aktiviraju obe naredbe za manipulisanje prekidačima, te je kompletan period u postupku izvršenja transfera napajanja pomoću uređaja ATS završen 110 ms nakon što je došlo do poremećaja. Tako je period izvršenja transfera uređaja ATS od 110 ms.

Scenario 1 se odnosi na pojavu trofaznog kratkog spoja na vodu koji napaja sekciju sa oznakom RC2-31-005-29-EL-1101-A sabirnica 6,6 kV (Slika 1). Kratak opis izvedenog slučaja pojave poremećaja predstavljen je u sledećoj tabeli.

Tabela 1. Opis izvedenog scenarija u okviru proračuna tranzijentne stabilnosti

Scenario	Period otklanjanja poremećaja	Period delovanja uređaja ATS	Opis scenarija
Scenario 1	80 ms	110 ms	Trofazni kratak spoj na vodu koji napaja sabirnicu 6,6 kV RC2-31-005-29-EL-1101-A, prekidač neispravnog voda se isključuje - kvar je eliminisan, prekidač za nastavak napajanja se uključuje.

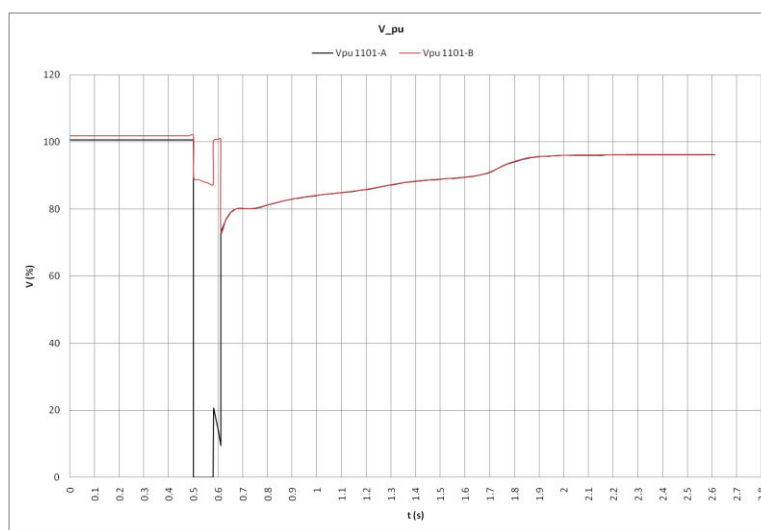
Simulacijom karakterističnog poremećaja, dobijeni su rezultati koji prikazuju:

- promenu napona na svim sabirnicama, ugla napona i frekvencije;
- promenu struje “zdravog” napojnog voda;
- promenu napona na krajevima motora, struje i klizanja.

U radu su prikazane samo neke karakteristične veličine.

#### 4. REZULTATI PRORAČUNA TRANZIJENTNE STABILNOSTI

Scenario 1 simulira slučaj pojave trofaznog kvara na sekciji A sabirnica 6,6 kV sa oznakom RC2-31-005-29-EL-1101 (Slika 1). Ovaj kvar je izolovan 80 ms nakon njegovog javljanja isključenjem prekidača napojnog voda. Simultano sa pojavom kvara aktivirana je procedura ATS i upućena je inicijacija komande uključenja prekida između sekcija A i B sabirnica RC2-31-005-29-EL-1101, čime se omogućuje nastavak napajanja ugroženih potrošača. Sa periodom transfera ATS od 110 ms, napon na sekciji A sabirnica RC2-31-005-29-EL-1101 postiže vrednost od oko 21% svoje nazivne vrednosti, odmah nakon eliminisanja kvara, i dostiže 73% nazivne vrednosti u momentu kada procedura ATS obezbedi nastavak napajanja potrošača koji su prethodno bili napojeni sa sekcije koju je pogodio kvar. Ponašanje napona na obe sekcije sabirnica RC2-31-005-29-EL-1101 prikazano je na Slici 3.

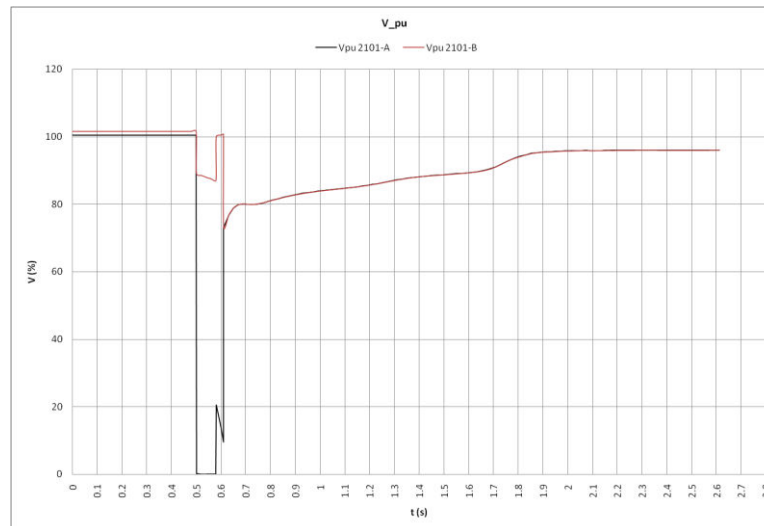


Slika 3 – Promena napona na sekcijama A i B sabirnica RC2-31-005-29-EL-1101

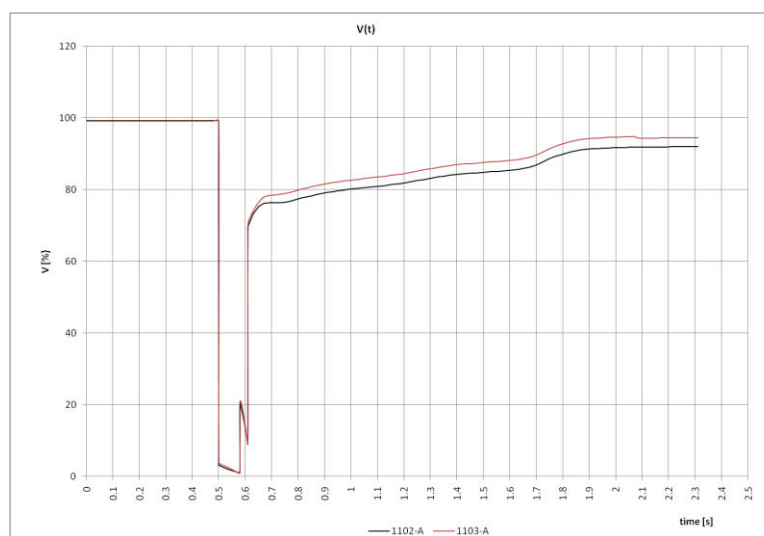
Nakon toga, u periodu manjem od 100 ms, vrednost napona na sabirnicama pogođenim kvarom dostiže 80% svoje nominalne vrednosti, i stabilizuje se otprilike 1,5 s nakon završetka procedure transfera ATS. Ponašanje napona je praktično identično na obe sekcije sabirnica RC2-31-005-29-EL-2101 koje su direktno vezane za



sabirnice sa oznakom RC2-31-005-29-EL-1101. Ovo je potvrđeno na Slici 4. Propad napona na vrednost od 21% nominalne vrednosti, nakon eliminacije kvara, ispod je vrednosti podešenja podnaponske zaštite (30% nominalne vrednosti u periodu od 150 ms). Kako je podešena vrednost premošćena u sledećih 30 ms, neće doći do aktivacije podnaponske zaštite. Sledeći nivo podnaponske zaštite se aktivira ukoliko vrednost napona dostigne manje od 80% svoje nazivne vrednosti. Kako se u slučaju Scenarija 1 ova vrednost dostigne odmah nakon završetka transfera ATS u periodu kraćem od 100 ms, podnaponska zaštita neće odreagovati.

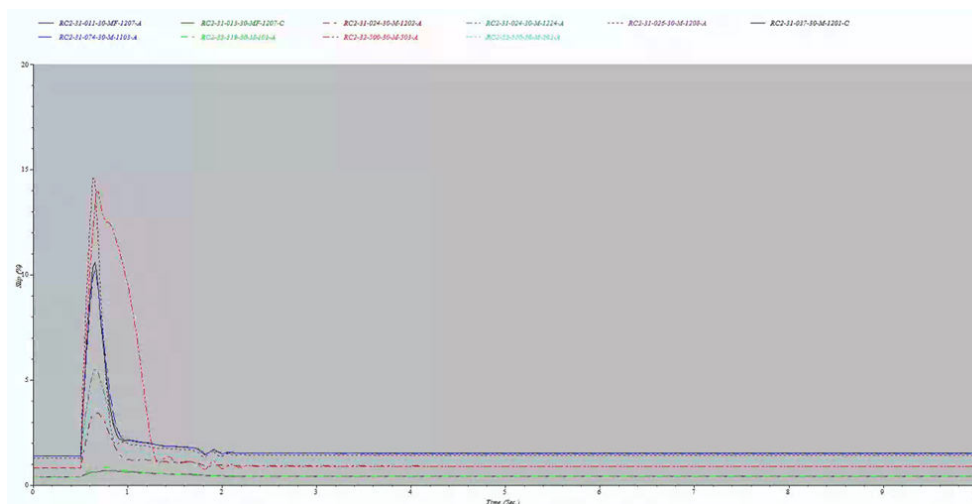


Slika 4 – Promena napona na sekcijama A i B sabirnica RC2-31-005-29-EL-2101



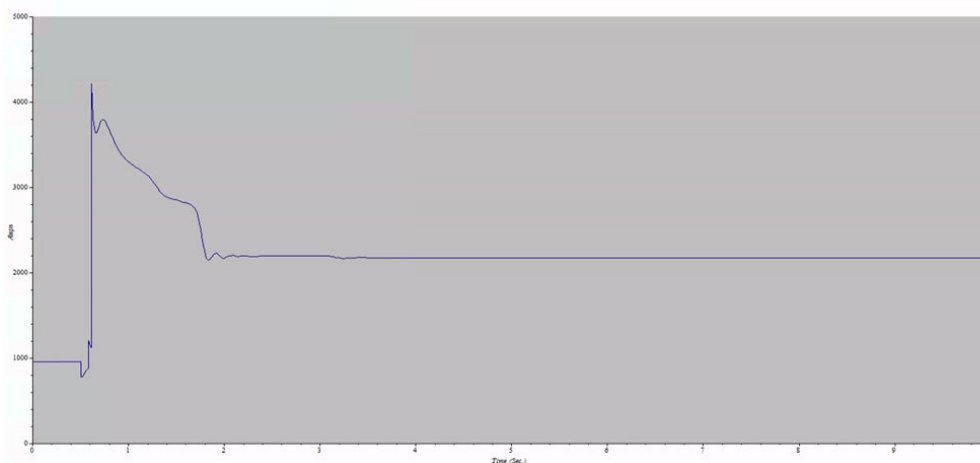
Slika 5 – Promena napona na sekcijama A sabirnice RC2-31-005-29-EL-1102 i RC2-31-005-29-EL-1103

Nakon eliminacije kvara i završetka procesa transfera ATS, na sabirnicama NN (RC2-31-005-29-EL-1102 i RC2-31-005-29-EL-1103, Slika 5) događa se pad napona na nivo od 70% do 73% nominalne vrednosti. Tokom prelaznog perioda, vrednost napona na A sekciji sabirnice RC2-31-005-29-EL-1102 dostiže vrednost od 80% nominalnog napona za otprilike 400 ms, dok ovo vreme za sekciju A sabirnice sa oznakom RC2-31-005-29-EL-1103 iznosi 200 ms, a vreme potrebno za stabilizaciju napona za obe sabirnice je oko 1,6 s. Prema ovim rezultatima, može se zaključiti da postojeće podešenje zaštite motora koji se napajaju sa sabirnice NN neće biti ugroženo instalacijom sistema ATS. Ovo ne važi za motore koji se napajaju sa sekcije A sabirnice sa oznakom RC2-31-005-29-EL-1102, gde je potrebno produžiti vreme reagovanja podnaponske zaštite na 400 ms za nivo napona od 80% nazivne vrednosti. Indukcioni motori vezani za sabirnice pogođene kvarom su snage između 400 kW i 2100 MW, i pokreću ventilatore, pumpe i kompresore. Tokom trajanja poremećaja, svi motori ostaju u pogonu, dok većini od njih brzina opadne za manje od 10%, osim za najveće motore (32-500-30-M-503-A I 31-024-30-M-1202-A), gde je ova vrednost oko 15%. Ovo se može uočiti na Slici 6. Promena vrednosti struje motora NN tokom tranzijentnog perioda je blago povećana i nije kritična.



Slika 6 – Promena klizanja motora napajanih sa sabirnice pogođene kvarom

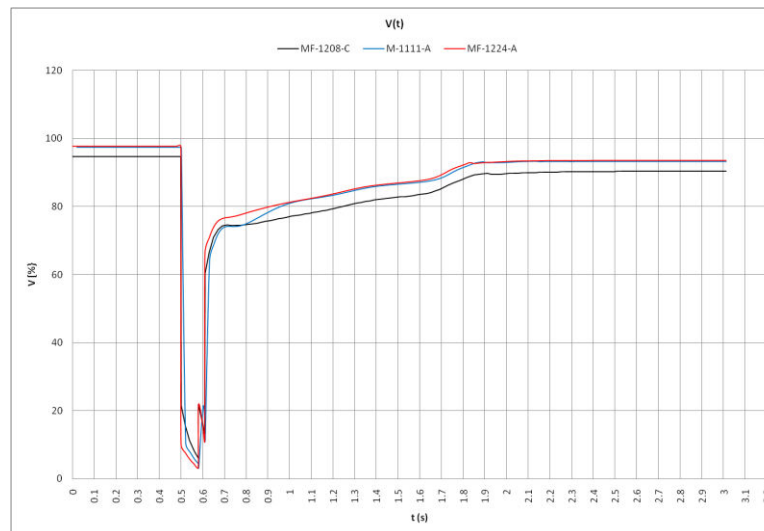
Tokom trajanja poremećaja, struja najvećih motora se povećava tri puta za motor snage 2100 kW i četiri puta za motor snage 1850 kW, što se smatra prihvatljivim, budući da su obe vrednosti manje od njihove respektivne polazne struje. Takođe, analiza pokazuje da struja napojnog voda koji preuzima ugrožene potrošače neće dostići kritičnu vrednost, te prekostrujna zaštita neće odreagovati.



Slika 7 – Promena struje "zdravog" napojnog voda

Na sledećoj slici, (Slika 8) prikazana je promena napona na krajevima karakterističnih motora u predmetnoj mreži. Nakon završetka transfera ATS, napon na krajevima motora opadne na nivo između 60% i 66% svoje nazivne vrednosti. Period od 300 ms do 640 ms je potreban kako bi napon na krajevima motora NN dostigao nivo od 80% nominalne vrednosti. Ovo implicira da su izvesne promene u podešenju podnaponske zaštite neophodne: za sve motore NN vreme reagovanja za vrednost napona  $0,8 \times U_n$  treba odložiti za 350 ms do 400 ms, dok u slučaju motora sa oznakama 31-013-30-MF-1208-B i 31-013-30-MF-1208-C ovaj period treba odložiti za 650 ms. Vrednost napona za ove elemente se oporavlja za 1,5 s od trenutka pojave poremećaja. Kod svih motora javlja se smanjenje brzine za oko 2% od nominalne, dok za motor sa oznakom 31-072-30-M-1111-A ovaj pad iznosi 5,4%.





Slika 8 – Promena napona na krajevima karakterističnih motora NN (31-013-30-MF-1208-C, 31-072-30-M-1111-A, 31-050-30-MF-1224-A)

Na osnovu prethodno izloženih rezultata proračuna tranzijentne stabilnosti, dolazi se do zaključka da implementacija sistema ATS za prenos napajanja podrazumeva i određene modifikacije u postojećem sistemu zaštite. Sledeća prilagođenja će biti potrebna za pravilan rad sistema:

- Na sekciji A sabirnica sa oznakom RC2-31-005-29-EL-1102, reagovanje podnaponske zaštite za 80% nominalnog napona treba odložiti za oko 400 ms kako bi se omogućio nastavak napajanja potrošača.
- Za sve motore NN, reagovanje podnaponske zaštite za  $0.8 \times U_n$  treba odložiti za 300 ms do 450 ms, dok za motore sa oznakom 31-013-30-MF-1208-B i 31-013-30-MF-1208-C neophodno je taj period odložiti za 650 ms.
- Kada se započne prenos ATS na sabirnice SS1 i inicira isključenje prekidača između dve sekcije sabirnica od kojih je jedna pogođena kvarom, preporučljivo je poslati signal “nizvodnom” uređaju ATS na sabirnice SS2 da blokira svoje aktiviranje, kako bi se izbegle nepotrebne manipulacije prekidačima.

## 5. ZAKLJUČAK

Glavna svrha sprovođenja analize tranzijentne stabilnosti bila je provera ponašanja karakterističnih veličina svih elemenata u mreži tokom poremećaja, nakon implementacije sistema ATS prenosa napajanja na sabirnice 6,6 kV jedne industrijske mreže, zadržavajući, pritom, sve ostale postojeće sisteme zaštite. Prikazana analiza je dala promene vrednosti napona na karakterističnim sabirnicama, kao i promene brzine i struje pojedinih motora u mreži. Dodatni cilj analize je bila provera u kojoj meri sistem ATS prenosa napajanja i njegovo podešenje koincidira sa podešenjima postojeće podnaponske i prekostrujne zaštite u posmatranoj mreži i specifikacija rešenja za prepodešenje ukoliko se detektuju neusaglašenosti. Na osnovu dobijenih rezultata zaključuje se da primena sistema ATS u predmetnoj mreži neće ugroziti njene potrošače, već doprinosi povećanju pouzdanosti napajanja potrošača. Međutim, implementacija sistema ATS u ovom slučaju iziskuje izvesne promene u postojećim podešenjima podnaponske zaštite, koji su u radu predloženi.

## LITERATURA

- [1] Amit Raje, Anil Raje and Arvind Chaudhary, 2008, “Fast Bus Transfer Systems – A System Solution Approach”, IEEE
- [2] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr. Stephen D. Umans, 2003, “Electric Machinery” - Sixth Edition
- [3] Girish Hunswadkar, N.R. Viju, 2010, “Considerations and Methods for an Effective Fast Bus Transfer System”, Conference “Power System Protection and Automation”
- [4] ETAP User Manual, version 19
- [5] John Grainger, William Stevenson, 1994, “Power System Analysis”
- [6] Tarlochan S. Sidhu, Vinayagam Balamourougan, Manish Thakur and Bogdan Kasztenny, Smith W and Doe J, 2005, “A Modern Automatic Bus Transfer Scheme”, “International Journal of Control, Automation, and Systems”, “vol. 3, no. 2 (special edition), pp. 376-385”
- [7] Projektna dokumentacija - Arhiva Energoprojekt Entel-a