

Dorjan Močinić, dipl. ing. el.
HEP – ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
dorjan.mocinic@hep.hr

Renato Čučić, dipl. ing. el.
HEP – ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
renato.cucic@hep.hr

Željko Grgurić, ing. el.
HEP – ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
zeljko.grguric@hep.hr

Boris Krstulja, dipl. ing. el.
HEP – ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
boris.krstulja@hep.hr

MODELIRANJE UZEMLJENJA DISTRIBUCIJSKE MREŽE U NMS SUSTAVU ELEKTROPRIMORJA RIJEKA

SAŽETAK

Network Management System (NMS) je novouvedeni NMS/SCADA sustav kojim se vodi pogon distribucijske mreže u Elektroprimorju Rijeka. U sustavu su osim osnovnih SCADA funkcija za nadzor i upravljanje mrežom implementirane i napredne funkcije za proračun elektroenergetskih mreža. Pravilan model distribucijske mreže, odnosno odgovarajući pristup modeliranju elemenata distribucijske mreže, ključan je faktor točnosti tih proračuna. Stoga je pri definiranju modela nužno postaviti određene dodatne zahtjeve.

Proračuni jednopolnih kratkih spojeva između ostalog zahtijevaju i modeliranje uzemljenja zvjezdišta pojedinih energetskih transformatora. Pri tome je potrebno obuhvatiti i one načine uzemljenja zvjezdišta koji nisu primjenjeni u postojećem NMS-u. Rad prikazuje kako su određeni nedostaci u modelu uzemljenja NMS-a riješeni kroz korisničke programske modifikacije (SPL).

Ključne riječi: SCADA, NMS (DMS) funkcije, proračun kratkog spoja, mrežni centri vođenja, modeliranje mreža, uzemljenje zvjezdišta, SPL

DEVELOPMENT OF THE MODEL OF NEUTRAL POINT EARTHING IN NETWORK MANAGER SYSTEM AT ELEKTROPRIMORJE RIJEKA

SUMMARY

Network Management System (NMS) is new NMS/SCADA system implemented in Elektroprimorje Rijeka. It is used to supervise and control 35 kV and 20(10) kV distribution networks. NMS implements some advanced functions for network analysis. These functions place added demand over network and network element modelling. Optimal choosing of network model significantly impacts on a precision of calculation results.

Single line-to-earth fault analysis demands development of proper model of neutral point earthing system of HV substations. Nevertheless, not all of neutral earthing modes are included in available NMS functions. Thus, in this paper an approach to bypass certain deficiencies of NMS power transformer model through user software modifications is presented.

Key words: SCADA, NMS (DMS) functions, short circuit analysis, network control center, network modelling, neutral point earthing, SPL

1. UVOD

U sklopu projekta revitalizacije i modernizacije sustava daljinskog vođenja elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske, 2007. godine u Elektroprimorju je pušten u pogon obnovljeni Dispečerski centar. Prilikom revitalizacije implementiran je novi sustav za vođenje pogona Network Management System (NMS). Novi NMS osim standardnih SCADA funkcija (upravljanje elektroenergetskog sustava u realnom vremenu) između ostalog omogućuje i dodatne (napredne) funkcije, koje služe za analizu elektroenergetskog sustava odnosno za dugoročnu optimizaciju razvoja elektroenergetske mreže (funkcije planiranja). Neke od osnovnih dodatnih funkcija uključuju:

- proračun tokova snaga
- proračun kratkog spoja
- dinamičko bojanje mreže
- procjena stanja (prilagodba opterećenja)
- prognoza opterećenja

Funkcija proračuna kratkog spoja omogućuje proračun trofaznog (simetričnog) kratkog spoja, dvofaznog kratkog spoja, dvofaznog kratkog spoja sa dodirima sa zemljom, te jednofaznog kratkog spoja (zemljospoja). Za potrebe proračuna potrebno je modelirati kvar i elemente mreže. Za tu potrebu koriste se unaprijed definirane strukture koje opisuju pojedini elektroenergetski element. Ukoliko funkcionalnost nekog elementa nije modelirana na odgovarajući način postoji mogućnost da se neki nedostaci riješe programski uporabom SPL-a (Spider Programming Language - SPL).

2. UZEMLJENJE ZVJEZDIŠTA SREDNENAPONSKIH MREŽA

Način uzemljenja zvjezdišta srednjenaponskih mreža utječe na uvjete pogona mreže, stalnost i sigurnost opskrbe električnom energijom. Na samu odabir načina uzemljenja zvjezdišta utječu brojni čimbenici, koji su uvjetovani sa:

- iznosom kapacitivne struje zemljospoja
- specifičnim otporom tla
- vrstom srednjenaponske mreže (kabelska, nadzemna, mješovita)
- naponskom razinom
- tipom relejne zaštite
- itd.

Izborom jednog načina uzemljenja ne mogu istovremeno biti zadovoljeni svi čimbenici. Stoga se prilikom odabira načina uzemljenja uzimaju u obzir prethodno određeni kriteriji i eventualna specifičnost mreže. S obzirom na način uzemljenja zvjezdišta, razlikujemo sljedeće srednjenaponske mreže:

- mreže s neuzemljenim (izoliranim) zvjezdištem
- mreže s maloohmskim uzemljenjem
- mreže s djelomičnom kompenzacijom
- mreže s rezonantnim uzemljenjem

U početku su srednjenaponske mreže radile u pogonu s izoliranim zvjezdištem. Danas je tendencija da se takvi sustavi zbog svojih nedostataka napuštaju. U takvim sustavima zvjezdište je odvojeno od zemlje. Jedinu spoj sa zemljom ostvaruje se preko dozemnih kapaciteta dalekovoda i kabela. Pri nastanku zemljospoja struje teku preko dozemnih kapaciteta zdravih faza. Uz zanemarenje odvodnosti i uzdužnih impedancija struja na mjestu kvara ovisi o kapacitivnoj struji mreže i o prijelaznom otporu.

Važeća tehnička regulativa u Hrvatskoj dopušta pogon srednjenaponskih mreža s izoliranim zvjezdištem uz uvjet da kapacitivne struje zemljospoja ne prijeđu granični iznos koji za 20 kV mrežu iznosi 15 A, dok za 10 kV mrežu iznosi 20 A. Ukoliko kapacitivna struja prijeđe navedene iznose, preporuča se razdvajanje mreže ili uzemljenje zvjezdišta, kako bi se smanjili unutrašnji prenaponi prilikom pojave zemljospoja.

U slučajevima kada kapacitivne struje porastu iznad dozvoljenih vrijednosti, od osamdesetih godina prošlog stoljeća po uzoru na rješenja iz francuskih srednjenaponskih mreža, u Hrvatskoj se primjenjuje maloohmsko uzemljenje. Uobičajene nazivne struje otpornika za uzemljenje zvjezdišta 20(10) kV mreža iznose 150 A i 300 A. U slučaju kada energetske transformatori nisu odgovarajuće grupe spoja ili nije izvedeno zvjezdište sekundarnog namota potrebno je pristupiti uzemljenju umjetnog zvjezdišta, koje se dobiva pomoću transformatora za uzemljenje. Ukoliko su dostupna zvjezdišta energetskih transformatora, moguće su dvije sheme uzemljenja:

- jedan otpornik po trafostanici (kod trajnog paralelnog rada energetskih transformatora)
- jedan otpornik po transformatoru (kod odvojenog rada energetskih transformatora)

Ukoliko na područjima s visokim specifičnim otporom tla uz odgovarajuća isključna vremena zaštitnih uređaja te uz razumne troškove za poboljšanje uzemljivača TS 20(10)/0,4 kV nije moguće ostvariti dovoljno niske otpore uzemljenja, tada nije uputno primjenjivati maloohmsko uzemljenje, već je potrebno zvjezdište ostaviti izolirano ili izvršiti kompenzaciju kapacitivne struje.

U slučaju relativno visokih kapacitivnih struja, prilikom zemljospoja u mreži, na uzemljivačima se može pojaviti nedozvoljeni porast potencijala. Ukoliko je u napojnoj trafostanici VN(SN)/SN ugrađen maloohmski otpornik, najjednostavnije tehničko rješenje kojim se može kompenzirati kapacitivna struja, sastoji se od paralelnog spajanja ručno podesive prigušnice k postojećem maloohmskom otporniku. Takvim rješenjem postiže se djelomična kompenzacija s preostalom jalovom strujom primjerice iznosa $I_{L-IC} \leq 50$ A. Takvim tehničkim rješenjem zadržavaju se sve značajke maloohmskog uzemljenja te stoga rješenje ne zahtjeva eventualnu zamjenu zaštitnih uređaja. Obzirom na veličinu induktivne struje sustav može biti podkompenziran ili nadkompenziran.

Naprednije, ali ujedno i značajno skuplje rješenje za kompenzaciju kapacitivnih struja predstavlja ugradnja automatskih kompenzacijskih prigušnica. Prema načinu izvedbe automatske kompenzacijske prigušnice mogu biti kontinuirane ili stupnjevane. Primjenom automatskih kompenzacijskih prigušnica postižu se vrlo niske struje jednopolnih kratkih spojeva, koje minimiziraju porast potencijala na uzemljivačima. Niska struja na mjestu kvara utječe na samogašenje prolaznih kvarova, čime se povećava stalnost isporuke električne energije, što zapravo predstavlja najveću prednost takvog sustava uzemljenja zvjezdišta.

3. MODELIRANJE ELEMENATA ZA UZEMLJENJE ZVJEZDIŠTA

Za modeliranje elektroenergetskih elemenata u NMS/SCADA sustavu koriste se unaprijed definirane strukture. U prvom koraku definiraju se nazivi pojedinih elemenata. Vrlo je važno da se nazivi kreiraju prema nekom logičkom slijedu, radi kasnijeg lakšeg snalaženja prilikom korištenja sustava, te radi lakšeg pretraživanja baze podataka. U drugom koraku definira se topologija mreže, dok se u trećem koraku definiraju tehnički parametri pojedinih elemenata. Procedura se vrši pomoću posebnog alata za unos podataka (Data Engineering, DE). U zadnjem koraku unesene podatke potrebno je prebaciti u bazu podataka za rad u realnom vremenu.

Općenito se SPL alatom odnosno programiranjem mogu kreirati nove funkcionalnosti u NMS sustavu. Neke od osnovnih funkcija poput slijednog upravljanja, blokada i jednostavnijih proračuna kreirane su također pomoću SPL-a. SPL je proceduralni programski jezik sličan Pascal-u čiji se kod prevodi i tako prevedeni kod sprema se u bazu podataka za rad u realnom vremenu. Jednom kreirani i prevedeni program moguće je koristiti nad raznim ulaznim odnosno izlaznim podacima. Povezivanje ulazno/izlaznih podataka i programa vrši se u alatu za unos podataka (Data Engineering).

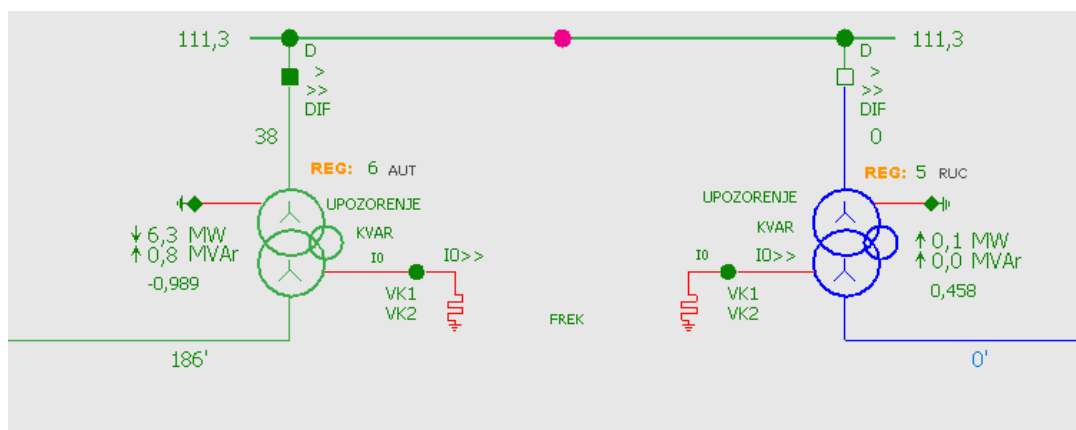
Elementi za uzemljenje zvjezdišta u NMS sustavu modeliraju se preko impedancije u obliku $Z=R+jX$. U Elektroprimorju se za uzemljenje zvjezdišta koriste različite kombinacije otpornih i induktivnih elemenata, opisanih u prethodnom poglavlju. Nadalje, ukupna impedancija elemenata za uzemljenje zvjezdišta u pogonu je promjenjiva ovisno o uklopnom stanju u mreži (promjena uklopnog stanja primjerice može uzrokovati promjenu udešenja induktivnosti kompenzacijske prigušnice).

Naknadne izmjene električnih parametara u modelu unutar NMS sustava nije jednostavno obuhvatiti. Navedeno svojstvo predstavlja ograničenje u pogledu modeliranja sustava, a posebice elemenata za uzemljenje zvjezdišta. Problem je moguće riješiti uporabom SPL alata.

U nastavku je prikazan način modeliranja elemenata za uzemljenje zvjezdišta primjenom SPL alata. Rješenje problema uzemljenja izvedeno je sa više SPL programa, ovisno o vrsti uzemljenja i dozvoljenom uklopnom stanju u predmetnoj napojnoj transformatorskoj stanici. Po jedan SPL program korišten je za sve trafostanice koje imaju sustav uzemljenja prikazan na slikama od 1. do 5.

3.1. Maloohmsko uzemljenje jednim otpornikom po transformatoru

Na slici 1. prikazan je najjednostavniji slučaj kod kojeg je potrebno pratiti samo stanje rastavljača kojim se u potpunosti može uključiti ili isključiti maloohmski otpornik. Ovisno o položaju tog rastavljača impedancija uzemljenja postavlja se na vrijednost otpornika ili na neku vrlo veliku vrijednost kako bi se modeliralo izolirano zvjezdište.

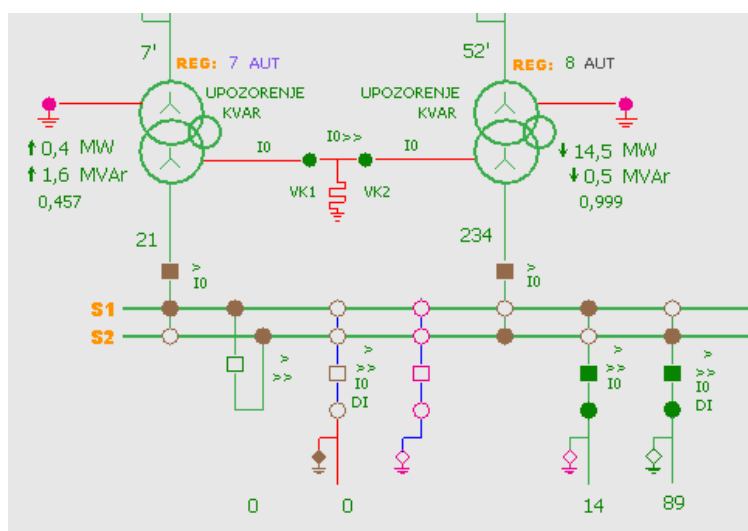


Slika 1. Maloohmsko uzemljenje po shemi jedan otpornik po transformatoru

3.2. Zajedničko maloohmsko uzemljenje jednim otpornikom po trafostanici

Slika 2. prikazuje primjer koji nije moguće topološki opisati u NMS sustavu već ga treba modelirati vrijednostima impedancije uzemljenja ovisno o tome da li energetske transformator rade u paraleli ili ne, te da li su rastavljači kojima je otpornik spojen na transformator otvoreni ili zatvoreni. Program provjerava paralelan rad transformatora na temelju uklopnog stanja sekundarnih transformatorskih polja i spojnog polja. Ako transformatori ne rade u paraleli, svakom od transformatora se za vrijednost uzemljenja dodjeljuje impedancija maloohmskog otpornika.

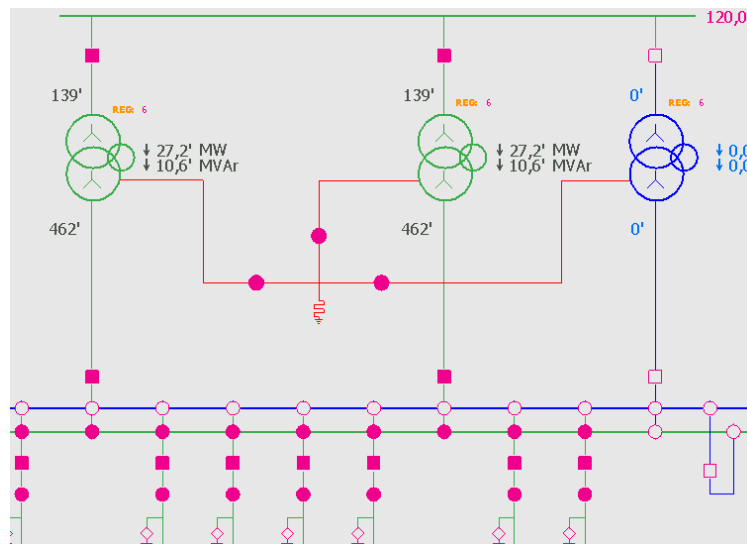
Ako transformatori rade u paralelnom pogonu onda se svakom za vrijednost uzemljenja upisuje dvostruka vrijednost impedancije. Time se struja kod kvara smanjuje na polovicu što se stvarno i događa pošto se struje dijele na dva transformatora.



Slika 2. Maloohmsko uzemljenje po shemi jedan otpornik po TS (uz dva transformatora)

3.3. Zajedničko maloohmsko uzemljenje jednim otpornikom po trafostanici (tri transformatora)

Na slici 3. prikazan je nešto složeniji slučaj u odnosu na slučaj na slici 2. U ovom slučaju potrebno je ustanoviti da li neki od transformatora rade u paralelnom pogonu, i ako rade u njih se upisuje vrijednost impedancije uzemljenja na isti način kako je to opisano u varijanti prikazanoj na slici 2.



Slika 3. Maloohmsko uzemljenje po shemi jedan otpornik po TS (uz tri transformatora)

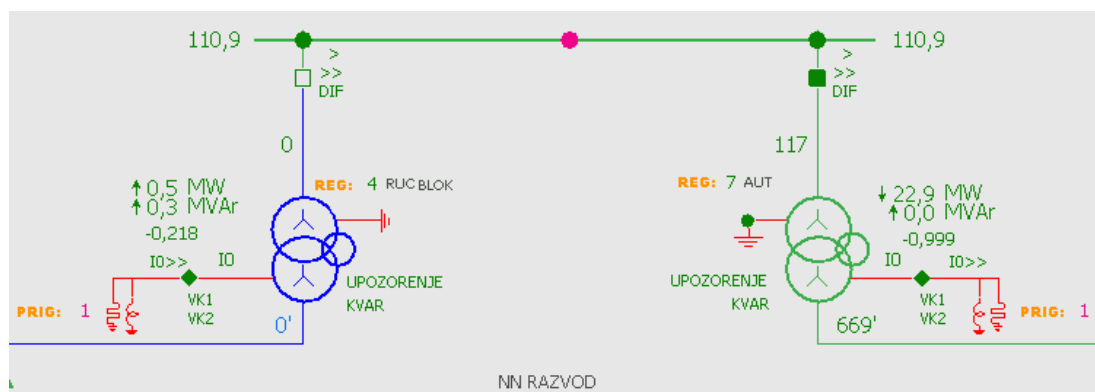
3.4. Uzemljenje pomoću ručno podesive prigušnice

Slika 4. prikazuje uzemljenje energetskog transformatora pomoću ručno podesive prigušnice u paralelnom spoju sa maloohmskim otpornikom. Kod ovakvog uzemljenja transformatori ne smiju biti u trajnom paralelnom pogonu pa se ispitivanje toga slučaja ne provodi.

Vrijednost impedancije uzemljenja mijenja se ovisno o uklopnom stanju rastavljača kojim su prigušnica i maloohmski otpor spojeni na energetski transformator te vrijednosti struje na koju je prigušnica podešena.

Položaj prigušnice u NMS postoji u obliku mjerenja koji dispečeri mijenjaju ručnim unosom prilikom promjene položaja na terenu (ne postoji daljinsko mjerenje položaja prigušnice).

Program za izmjenu parametara se tada pokreće te na temelju novog položaja prigušnice mijenja parametre uzemljenja transformatora primjerice prema tablici 1 (TS 110/20 kV Dunat).



Slika 4. Djelomična kompenzacija sa otpornikom i ručno podesivom prigušnicom

U tablici I. prikazane su vrijednosti parametara R i X sustava sa ručno podesivom prigušnicom i otpornikom od 80 Ω (150 A) u TS 110/20 kV Dunat.

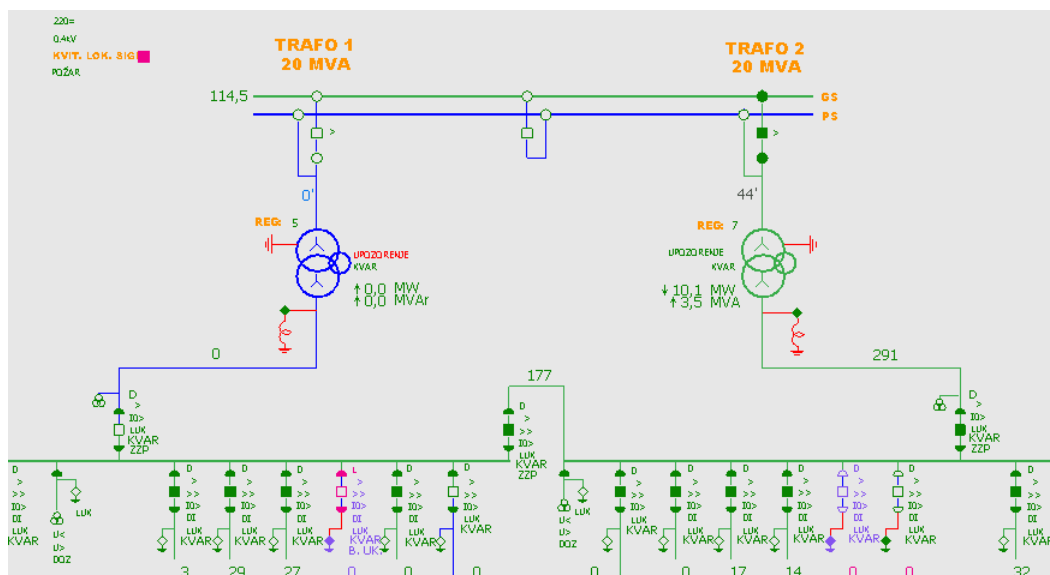
Tablica I. Parametri R i X sustava sa ručno podesivom prigušnicom i otpornikom (TS 110/20 kV Dunat)

Položaj	Struja (A)	R (Ω)	X (Ω)
1	50	72,00	24,00
2	100	55,38	36,92
3	150	40,00	40,00
4	200	28,80	38,40
5	250	21,18	35,29
6	300	16,00	32,00

3.5. Uzemljenje automatskom prigušnicom

Na slici 5. prikazano je rezonantno uzemljenje energetskog transformatora pomoću automatske kompenzacijske prigušnice. Gledano sa strane modeliranja u NMS ovo rješenje je vrlo slično rješenju uzemljenja pomoću ručno podesive prigušnice.

Vrijednost impedancije uzemljenja se mijenja ovisno o položaju prigušnice i uklopnom stanju rastavljača kojim je prigušnica spojena na transformator. Primjer vrijednosti R i X za prigušnicu u TS 110/20 kV Crikvenica dan je u tablici 2.



Slika 5. Rezonantno uzemljenje sa automatskom kompenzacijskom prigušnicom

Kod automatske prigušnice vrijednost se položaja prigušnice dobiva automatski iz procesa kao niz indikacija koje označavaju pojedine stupnjeve. Ukupna vrijednost struje dobiva se kao suma svih stupnjeva koji se nalaze u položaju „uključeno“.

Slika 6. prikazuje dio slike u NMS na kojoj se vidi trenutno stanje postavki automatskih prigušnica u pogonu. Ukupna vrijednost struje računa se pomoću zasebnog SPL programa na temelju indikacija koje opisuju stanje Uključeno/Isključeno za pojedine stupnjeve prigušnice.

POLOŽAJI : 40 A	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
80 A	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
160 A	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
320 A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
STRUJA	160	120	440	400

Slika 6. Prikaz podešenja automatske prigušnice u NMS

U tablici II prikazane su vrijednosti parametara R i X sustava sa automatski podesivom prigušnicom u TS 110/20 kV Crikvenica.

Tablica II. Parametri R i X sustava sa automatskom kompenzacijskom prigušnicom

Položaj (struja A)	R (Ω)	X (Ω)
80	577	138
120	577	95,6
160	577	72,9
200	577	59,4
240	577	50,2
280	577	43,7
320	577	38,9
360	577	34,7
400	577	31,4
440	577	28,7
480	577	26,4
520	577	24,5
560	577	22,9
600	577	21,4

4. PROGRAMSKO RJEŠENJE

U ovom je poglavlju detaljnije prikazano programsko rješenje najjednostavnijeg načina uzemljenja transformatora opisanog u poglavlju 3.1 gdje je svaki transformator uzemljen preko svog maloohmskog otpornika.

Programi imaju ulazne parametre koji opisuju topologiju mreže te parametre koji služe za definiranje transformatora čije će se parametre uzemljenja mijenjati u programu. To je nužno stoga što se isti program koristi za različite trafostanice, a postojanje parametara omogućava korištenje istog programa bez naknadnog prevođenja.

Slika 7. prikazuje sučelje u NMS kroz koje se mijenja vrijednosti parametara programa koji definiraju transformatore te iznos malog otpora u danoj transformatorskoj stanici. Parametar kojim se definira transformator u stanici je redni broj zapisa u tablici transformatora u bazi podataka stvarnog vremena kojim je isti transformator definiran.

	TR1	TR2	R-uzm
TS 110/20 kV RAB	1	16	
TS 110/20 kV LOŠINJ	2	3	80

Slika 7. Parametri programa za razne trafostanice

U nastavku je dan ispis programa. Program se funkcionalno gledano može podijeliti u nekoliko cjelina.

U prvom djelu se nalazi definicije ulaznih parametara i lokalnih varijabli potrebnih prilikom izvršavanja programa.

Drugi dio služi za inicijalizaciju svih varijabli. Tu se može primijetiti da su nekim varijablama dodijeljene statičke vrijednosti radi bolje čitljivosti programa i lakših naknadnih izmjena.

Treći dio programa izvršava topološku provjeru uklopnog stanja rastavljača kojim je transformator povezan sa malim otpornikom. Program za svaku vrijednost ulaznih parametara postavlja odgovarajuće vrijednosti impedancije uzemljenja transformatora. Navedene vrijednosti su tada upisane u bazu za rad u stvarnom vremenu u NMS međutim još uvijek ih program za izračun kratkog spoja nije preuzeo u svoju bazu.

Posljednjih šest linija programa predstavlja sistemski dio programa kojim se vrši inicijalizacija sustava za izračun kratkog spoja. Program za proračun kratkog spoja u tom trenutku briše svoju internu bazu podataka i ponovno je puni iz baze za rad u stvarnom vremenu.

```

program SCARAB;
OBJ
QTR1_UZ: input (<INDICATION>);
QTR2_UZ: input (<INDICATION>);
TR1_NO: input (<MEASURAND>);
TR2_NO: input (<MEASURAND>);

var      msg : ARRAY[120] OF CHAR;
inbuf    : ARRAY[ 60 ] OF INTEGER;
TIPTR1: <TR3_TYPE>;
TIPTR2: <TR3_TYPE>;
RS:REAL;
XS:REAL;
RM:REAL;
XM:REAL;
T1__: S_REAL;
T2__: S_REAL;
T1_: REAL;
T2_: REAL;
T1: INTEGER;
T2: INTEGER;
begin
  T1__ := getval(TR1_NO);
  T2__ := getval(TR2_NO);
  T1_:=T1__;
  T2_:=T2__;
  T1:=trunc(T1_);
  T2:=trunc(T2_);
  TIPTR1 := T1;
  TIPTR2 := T2;

  RS := 80.0;
  XS := 0.0;
  RM := 9999.0;
  XM := 9999.0;

  IF (QTR1_UZ.<ACTUAL STATUS>=OFF) THEN
  BEGIN
    TIPTR1.<sec_ground_r>:= RM;
    TIPTR1.<sec_ground_X>:= XM;
  END;
  IF (QTR1_UZ.<ACTUAL STATUS>=ON) THEN
  BEGIN
    TIPTR1.<sec_ground_r>:= RS;
    TIPTR1.<sec_ground_X>:= XS;
  END;
  IF (QTR2_UZ.<ACTUAL STATUS>=OFF) THEN
  BEGIN
    TIPTR2.<sec_ground_r>:= RM;
    TIPTR2.<sec_ground_X>:= XM;
  END;
  IF (QTR2_UZ.<ACTUAL STATUS>=ON) THEN
  BEGIN
    TIPTR2.<sec_ground_r>:= RS;
    TIPTR2.<sec_ground_X>:= XS;
  END;

  inbuf[ 1 ] := 1005;
  inbuf[ 2 ] := 1001;
  inbuf[ 3 ] := 0;
  inbuf[ 4 ] := 0;
  MSGPCK( inbuf, msg );
  SNDMSG( msg, 8, 888 );
end.

```

Slika 8. Prikaz programskog rješenja u SPL programu

5. ZAKLJUČAK

Standardni način modeliranja distribucijskog sustava za proračun kratkog spoja u NMS sustavu ne zadovoljava potrebe Elektroprimorja, u dijelu modeliranja raznih varijanti uzemljenja zvjezdišta mreže, pa tako ni ostalih distribucijskih područja operatora distribucijskog sustava. Problem predstavlja princip rada po kojem se vrijednosti impedancije uzemljenja transformatora ne mogu na jednostavan način mijenjati u redovnom radu.

Metoda promjene vrijednosti impedancije uzemljenja zvjezdišta mreže koja je prikazana u referatu već se koristi u radu sustava. Izrada programa i kasnije parametriranje zahtijevaju specijalistička znanja koja već postoje pa to ne predstavlja veći problem.

Rezultati proračuna kratkog spoja dobiveni iz NMS sustava uspoređeni su sa rezultatima proračuna drugih programa koji se koriste u Elektroprimorju i pokazuju neznatna odstupanja.

Može se zaključiti da je navedeno rješenje modeliranja uzemljenja prihvatljivo rješenje do unapređenja sustava novom verzijom koja bi sličnu funkcionalnost već imala ugrađenu.

LITERATURA

- [1] V. Komen, B. Krstulja, "DMS distribucijskog područja", 1. savjetovanje hrvatskog ogranka međunarodne elektrodistribucijske konferencije - HO CIRED, Šibenik, 2008.
- [2] ABB, „SPL, Reference Manual“, Revision B03.
- [3] ABB, „Users guide to SPL“, Revision 01.