

Sistematičen pristop iskanja neustreznih parametrov modela distribucijskega omrežja

Matej Pintarič¹, Miran Rošer², Boštjan Polajžer¹, Gorazd Štumberger¹

¹ Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija

² Elektro Celje, d.d., Vrunčeva ulica 2a, 3000 Celje, Slovenija

E-pošta: matej.pintaric1@um.si

Povzetek. Delo obravnava problematiko modeliranja 20 kV distribucijskega omrežja za potrebe načrtovanja zaščitne sheme pri obratovanju v zanki v okviru projekta NEDO. Model uporabljen pri načrtovanju zaščitnega sistema vpliva tudi na občutljivost in selektivnost njegovega delovanja. Problemi nastanejo, ko se rezultati simulacijskih izračunov ne skladajo z rezultati meritev, kar pomeni, da pri znani konfiguraciji omrežja parametri modelov posameznih elementov niso ustrezni. Odpravljanje opisane neskladnosti se lahko lotimo s poskušanjem ali pa uporabimo sistematičen pristop, ki je predlagan v tem delu. Pristop obsega tri korake. Prvi korak obsega preverjanje ustreznosti vrednosti kratkostične impedance uporabljenega modela tujega omrežja. Drugi korak obsega preverjanje ustreznosti vrednosti kapacitivnosti modela omrežja, ki temelji na meritvah izvedenih na dušilki resonančno ozemljene nevtralne točke transformatorja. Tretji korak obsega preverjanje ustreznosti vrednosti parametrov modelov posameznih odsekov nadzemnih vodov in kablovodov na podlagi meritev med nadzorovano izvedenimi okvarami v omrežju. Na koncu dela so podani primerjava med rezultati meritev, izračuni z modelom omrežja z začetnimi vrednostmi parametrov in izračuni z modelom omrežja s popravljenimi vrednostmi parametrov.

Ključne besede: modeliranje, distribucijsko omrežje, kratek stik

A systematic approach to identifying wrong power distribution network model parameters

The paper deals with modeling a 20 kV distribution network to be used in designing a protection-coordination scheme. Applying a network model to determine the protection-system parameters affects the sensitivity and selectivity of the protection system operation. The problems occur when there is no agreement between the simulation and measurement results, as a result of some model incorrect parameters of the network elements. The disparity of the results can be corrected by using a trial and error or a systematic approach proposed in this work. The approach consists of three steps. In the first step, the short-circuit impedance (surge impedance) of the external network model is confirmed based on the short-circuit power and network voltage. In the second step, the transmission line capacitances are confirmed by comparing the measured and model-calculated inductive current using the Petersen coil of a resonant earthed network. In the third step, the resistances and inductances of all power lines are confirmed. A two or three-phase fault is purposely made in the network, where the mismatch between the measured and the model-calculated currents and voltages indicates inconsistencies in the model parameters of the lines that power the fault. The approach is demonstrated in the case of a distribution network. The presented results show the measured and the model-calculated values before and after applying the proposed systematic approach for confirmation of the model parameters.

Keywords: modeling, power distribution network, short-circuit

1 UVOD

Modeliranje električnih omrežij je v današnjem času že zelo izpopolnjen postopek. Razpoložljiva programska orodja omogočajo, od priprave celotnega modela omrežja v obliki programske kode, do modelov, ki jih sestavimo s pomočjo blokov v danem programskem okolju [1]. Vsem modelom omrežij pa je skupno to, da so odvisni od parametrov modelov posameznih elementov omrežja. Slednje lahko določimo s standardnimi pristopi [2], ki temeljijo na podatkih posameznih elementov, kot so na primer tovarniški podatki o parametrih transformatorjev in generatorjev ali podatki o geometriji glav stebrov daljnovoda in geometriji in lastnostih uporabljenih vrvi električnih vodnikov. Drug pristop k določitvi parametrov elementov električnih omrežij temelji na meritvah napetosti, tokov in moči [3]. Ne glede na uporabljen način določitve parametrov omrežja so ti po navadi katalogizirani in shranjeni v podatkovne baze elementov omrežja. Tako pri določitvi parametrov, kot tudi pri njihovem vpisovanju v podatkovno bazo lahko pride do napak. Vedno obstaja možnost, da je postopek

priprave modela omrežja izveden korektno, parametri modela pa niso ustrezni. To se lahko zgodi, če so vhodni podatki napačni. Na primer, tip vodnika na podanem odseku voda se v realnem omrežju razlikuje od tistega v podatkovni bazi. Pri preverjanju ustreznosti topologije omrežij je mogoče zaslediti nekaj del [4], [5], ki pa se ukvarjajo predvsem s sklenjenimi in nesklenjenimi povezavami. Pri tem se poraja vprašanje, kako se je smiselno lotiti iskanja neustreznih vrednosti parametrov v modelih posameznih elementov obravnavanega omrežja, če se med izvedbo meritev v omrežju pokaže neskladnost med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi, ustreznost topologije modela omrežja pa je že potrjena. Nekaj odgovorov na to temo je podanih v tem delu. Nanašajo se na konkreten primer 20 kV distribucijskega omrežja, ki obratuje s sklenjeno zanko, njegova nevtralna točka pa je resonančno ozemljena.

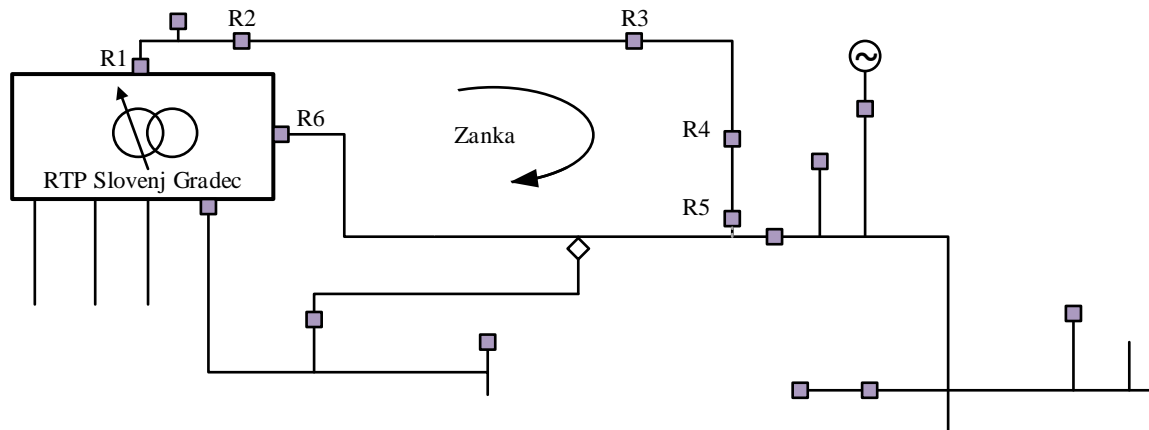
Za izvedbo statične in dinamične analize obratovanja v zanki je bil sestavljen model obstoječega 20 kV distribucijskega omrežja. Analiza je vključevala vpliv obratovanja v zanki na napetostni profil, prenosne izgube in izboljšanje sistemskih storitev. Eden ključnih pogojev za trajno obratovanje omrežja v sklenjeni zanki je tudi ustrezna zasnova zaščitnega sistema. Določitev vrednosti parametrov zaščitnih relejev za doseganje ustrezne občutljivosti in selektivnosti temelji na simulacijskih izračunanih kratkostičnih tokov z modelom omrežja [6]. Meritve v omrežju so pokazale neskladnost med izmerjenimi in z modelom izračunanimi vrednostmi tokov in napetosti. Opažena neskladnost med izmerjenim in izračunanimi vrednostmi kratkostičnih tokov neposredno vpliva na selektivnost in občutljivost zaščitnega sistema in jo je treba odpraviti preden določimo končne vrednosti parametrov zaščitnih relejev. Če je konfiguracija omrežja znanja in preverjena, so vzrok neskladnosti najpogosteje neustrezne vrednosti parametrov elementov v modelu omrežja. Iskanja neustreznih vrednosti parametrov se lahko lotimo s poskušanjem ali s sistematičnim pristopom, ki je predlagam v tem delu.

V 2. poglavju je opisano obravnavano distribucijsko omrežje. Predstavljeni so tudi uporabljeni modeli

posameznih elementov omrežja. Tretje poglavje kaže neskladje med rezultati meritev in rezultati simulacijskih izračunov. Četrto poglavje opisuje sistematičen pristop iskanja neustreznih vrednosti parametrov elementov omrežja, ki temelji na treh korakih. Opisani so vzroki, ki lahko privedejo do neustreznih vrednosti parametrov. V 5. poglavju je uporabljen sistematičen pristop na realnem omrežju. Podana je primerjava izmerjenih vrednosti s tistimi, ki jih dobimo s simulacijskimi, izračunanimi pred korekcijo vrednosti parametrov modela omrežja in po njej. Sklepne ugotovitve, v obliki zgoščenega opisa predlaganega sistematičnega pristopa in doseženih rezultatov, so podane v 6. poglavju.

2 OPIS DISTRIBUCIJSKEGA OMREŽJA IN NJEGOVEGA MODELA

Obravnavano distribucijsko omrežje podjetja Elektro Celje, d.d., prikazano na sliki 1, je del demonstracijskega projekta s področja pametnih omrežij "NEDO", ki ga financirata Sistemski operater prenosnega omrežja Elektro Slovenija, d.d. (ELES) in japonska tehnološka agencija NEDO. Obravnavano omrežje je napajano iz 110 kV tujega omrežja s transformatorjem 110/21 kV z močjo 31,5 MVA in vezavo Yn6. Transformatorska postaja napaja šest radialnih izvodov, na katere so s transformatorji 20/0,4 kV, z vezavo Dyn5 ali Yzn5 priključena bremena in razpršeni viri. Upoštevani razpršeni viri so bile male hidroelektrarne, katerih lokacija je prikazana na sliki 1. Slika 1 kaže radialna izvoda, ki s sklenitvijo tvorita zanko v omrežju. V zanki je nameščenih šest relejev. Releja na izvodih (R1 in R6) nista usmerjena, vsi drugi releji v zanki (R2, R3, R4 in R5) pa omogočajo usmerjeno delovanje. Omenjeni releji pri aktivaciji startnih členov omogočajo časovno omejeno shranjevanje časovnih potekov izbranega nabora merjenih spremenljivk. V omrežju obstaja tudi možnost obratovanja v drugače sklenjeni zanki z ustrezno konfiguracijo stikalnih naprav.



Slika 1: Shematska predstavitev obravnavanega distribucijskega omrežja Elektro Celje, ki je vključeno v projekt NEDO

Za določitev strukture in vrednosti parametrov zaščitnega sistema pri trajnem obratovanju sredjenapetostnega omrežja v sklenjeni zanki je potreben model omrežja. Sestavljen je bil v programskem okolju Simulink, ki uporablja knjižnico Simscape Power System [7]. Tuje omrežje je bilo modelirano kot bilančno vozlišče z vrednostjo notranje upornosti, določeno s kratkostično močjo v dani točki omrežja. Razpršeni viri (RV) in bremena so v modelu predstavljeni kot elementi z dano delovno in jalovo močjo, vrednosti moči pa so določene iz podatkov meritev profilov proizvodnje in odjema. Nadzemni vodi in kabli so predstavljeni s Π modeli in ne upoštevajo odvodnosti. Podatki o tipu in parametrih vodnikov so privzeti iz baze podatkov grafičnega informacijskega sistema (GIS) distribucijskega podjetja. Trifazni transformatorji so predstavljeni s tremi linearnimi modeli enofaznih transformatorjev z vezavo Yyn6, Dyn5 ali Yzn5. Vrednosti parametrov modelov transformatorjev v obliki upornosti in induktivnosti navitja ter magnetnega jedra so določeni s pomočjo merilnih podatkov iz baze podatkov elementov distribucijskega podjetja.

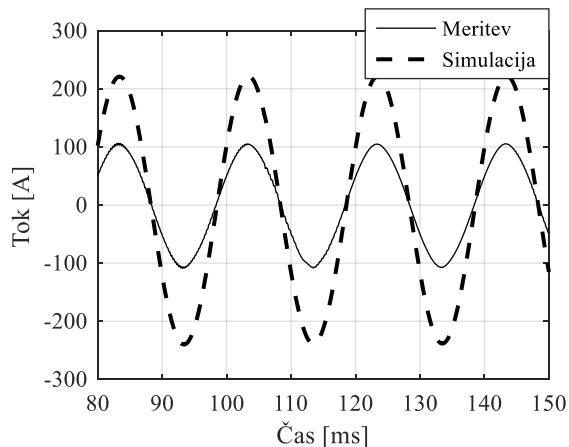
3 PRIMERJAVA REZULTATOV IZRAČUNOV IN MERITEV

Primerjava rezultatov simulacijskih izračunov in rezultatov meritev v omrežju je pokazala večje neskladje v toku zvezdiščne dušilke in v linijskih tokih v posameznih odsekih vodov ob kratkem stiku.

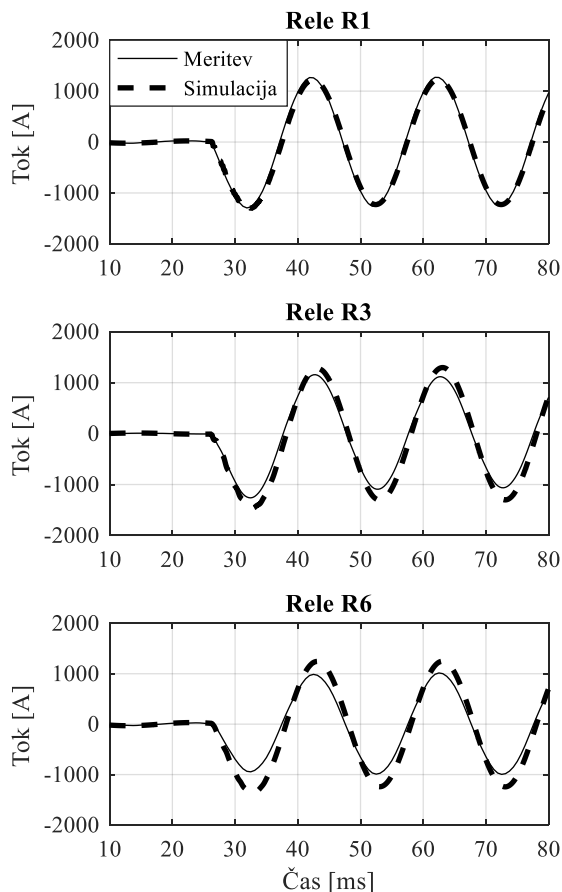
Razlika med izmerjenim in izračunanim tokom zvezdiščne dušilke je bila ugotovljena ob nastavljanju parametrov dušilke za izvedbo simulacijskih izračunov zemeljskih stikov v resonančno ozemljenem omrežju. Primerjavo izmerjenega in z modelom izračunane časovnega poteka toka dušilke kaže slika 2. Test zemeljskega stika je bil izveden blizu zbiralk na sekundarni strani transformatorja, induktivnost dušilke pa je bila nastavljena tako, da se je kapacitivna komponenta toka zemeljskega stika na mestu okvare kompenzirala z induktivnim tokom zvezdiščne dušilke skladno z nastavljeno stopnjo nadkompensacije okrog 5 %. Rezultati, podani na sliki 2, kažejo, da je z modelom izračunani tok zvezdiščne dušilke več kot 2-krat večji od izmerjenega, kar kaže na uporabo neustreznih vrednosti kapacitivnosti vodov v modelu.

Slika 3 kaže primerjavo izmerjenega in izračunane časovnega poteka linijskega toka L2 pri nadzirani kratkotrajni izvedbi kratkega stika v točki R3 na sliki 1. Na sliki 1 sta poleg položaja releja R3 označena tudi položaja relejev R1 in R6. Ujemanje izmerjenih in izračunanih vrednosti toka na releju R1 je zadovoljivo, kar pa, kot kaže slika 2, ne velja za releja R3 in R6. Podani rezultati kažejo, da v modelu uporabljene vrednosti parametrov vodov med relejnima točkama R6 in R3 niso ustrezni.

V nadaljevanju dela je predlagan postopek za iskanje neustreznih vrednosti parametrov, uporabljenih v modelu obravnavanega omrežja.



Slika 2: Izmerjeni in izračunani časovni poteki toka zvezdiščne dušilke



Slika 3: Izmerjeni in izračunani časovni poteki toka na posameznih relejih pri kratkem stiku v točki R3 (slika 1)

4 SISTEMATIČEN PRISTOP ISKANJA NEUSTREZNIH VREDNOSTI PARAMETROV

Potreba po razvoju sistematičnega pristopa k iskanju neustreznih vrednosti parametrov elementov modela omrežja je nastala zaradi neskladnosti izmerjenih kratkostičnih tokov s simulacijsko izračunanimi.

Predlagani sistematičen pristop obsega tri korake. Prvi korak obsega preverjanje ustreznosti uporabljene vrednosti kratkostične moči in impedance tujega omrežja in parametrov transformatorja 110/21 kV na podlagi podanih vrednosti kratkostičnih tokov. Drugi korak obsega preverjanje ustreznosti uporabljenih vrednosti kapacitivnosti električnih vodov in temelji na meritvah induktivnega toka resonančne dušilke in meritvah toka okvare ob zemeljskem stiku v resonančno ozemljenem omrežju [8]. Tretji korak obsega preverjanje ustreznosti uporabljenih vrednosti parametrov v modelih posameznih odsekov električnih vodov in temelji na meritvi kratkostičnih tokov z releji R1 do R6 ob nadzirani in načrtovani izvedbi kratkotrajnega kratkega stika v ustrezno izbrani točki obravnavanega omrežja. V vseh treh korakih so izmerjene vrednosti primerjane s tistimi, ki jih dobimo s simulacijskimi izračuni s sestavljenim modelom omrežja.

4.1 Kratkostična impedanca izvora

Kratkostična impedanca izvora Z_k je tista, ki omeji velikost kratkostičnega toka ob nastopu okvare blizu izvora. Zato je določitev te in preverjanje ustreznosti uporabljene vrednosti prvi korak v predlaganem sistematičnem pristopu. Vrednost kratkostične impedance določimo z znano vrednostjo kratkostične moči v dani točki omrežja in z napetostnim nivojem omrežja. Pri tem upoštevamo tudi razmerje med upornostjo in reaktanco, ki se določi glede na vrsto voda ali pa ga poda sistemski operater omrežja. V modelu omrežja lahko uporabimo kratkostično impedanco v eksplicitni obliki ali pa jo podamo posredno v implicitni obliki s kratkostično močjo. Kratkostično moč tujega omrežja S_k določimo s kratkostičnim tokom I_k ob tripolni okvari na primarni strani transformatorja (1):

$$S_k = k\sqrt{3}U \cdot I_k \quad (1)$$

Pri tem je U efektivna vrednost medfazne napetosti in k faktor povišane napetosti, katerega vrednost je 1,1 za 110 kV omrežje. Ob znani vrednosti toka kratkega stika na sekundarni strani transformatorja lahko preverimo ustreznost uporabljenih vrednosti kratkostične moči omrežja in parametrov transformatorja 110/21 kV. To naredimo s primerjavo z modelom omrežja izračunanih vrednosti tokov transformatorja pri kratkem stiku na 21 kV sponkah transformatorja s podanimi vrednostmi kratkostičnih tokov na sekundarni strani transformatorja. Če pride do neskladnosti med izračunanimi in podanimi kompleksnimi kazalci kratkostičnega toka, se uporabljene vrednosti parametrov modela

transformatorja prilagodijo tako, da se neskladnost odpravi. Pri tem po navadi prilagodimo izgube transformatorja.

Potrjena ustreznost uporabljenih vrednosti kratkostične impedance (ali moči tujega omrežja) in parametrov modela transformatorja 110/21 kV je osnova za preverjanje ustreznosti drugih parametrov uporabljenega modela omrežja.

4.2 Kapacitivnosti vodov

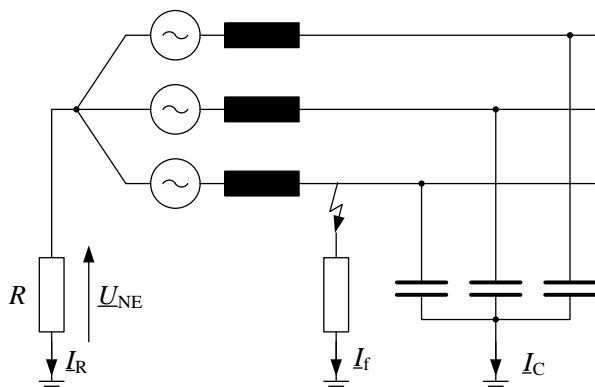
Kapacitivnosti vodov vplivajo predvsem na delovanje sistema zaščite ob zemeljskih stikih in na nastavitve parametrov zvezdiščne dušilke. Postopek preverjanja ustreznosti uporabljenih vrednosti kapacitivnosti električnih vodov v modelu omrežja temelji na primerjavi izmerjenega in izračunane induktivnega toka zvezdiščne dušilke v resonančno ozemljeni nevtralni točki transformatorja. Induktivnost dušilke za resonančno ozemljitev zvezdišča transformatorja je v modelu treba nastaviti tako, da se izračunana stopnja kompenzacije kapacitivnega toka okvare (okrog 5 % nadkompenzacije) ujema z izmerjeno.

Za model dušilke lahko uporabimo zaporedno ali vzporedno vezavo tuljave in upora ali idealno tuljavo, če nimamo podatka o upornosti dušilke. Upornost tuljave lahko določimo iz znanih izgub dušilke. Postopek za določitev induktivnosti je naslednji:

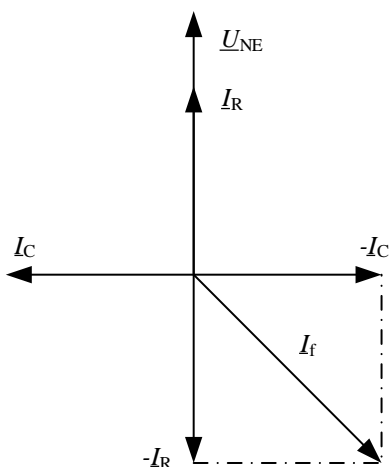
1. V modelu omrežja se izvede zemeljski stik na zbiralkah transformatorja ob ozemljenem zvezdišču z uporom R (glej sliko 4).
2. S simulacijskim izračunom določimo kompleksna kazalca tokov I_R in I_f , ki sta prikazana na sliki 4.
3. Kazalčni diagram na sliki 5 ponazarja izračun kapacitivnega toka I_C z enačbo (2).
4. Pri izračunu induktivnosti L ob popolni kompenzaciji (3) uporabimo napetost na uporu U_{NE} .
5. Za stabilno obratovanje upoštevamo od 5 do 10 % nadkompenzacije ali podkompenzacije kapacitivnega toka omrežja [9].

$$I_C = -I_f - I_R \quad (2)$$

$$L = \frac{X_C}{\omega} = \frac{U_{NE}}{\omega I_C} \quad (3)$$



Slika 4: Zemeljski stik v omrežju, ozemljen z uporom



Slika 5: Kazalčni diagram tokov ob zemeljskem stiku

Simulacijski izračun zemeljskega stika se ponovi z modelom, ki upošteva resonančno ozemljitev nevtralne točke transformatorja. Pri tem je zvezdiščni upor R (slika 4) nadomeščen z dušilko z izračunano induktivnostjo L (3). Pri tem se preveri ustreznost kompenziranega toka okvare I_f , hkrati pa se izvede primerjava izračunanega induktivnega toka dušilke z izmerjenim. Razlika med izmerjeno in izračunano vrednostjo amplitude toka dušilke nastopi zaradi uporabe neustreznih vrednosti kapacitivnosti vodov v modelu omrežja. Če je z modelom omrežja izračunan induktivni tok dušilke večji od izmerjenega, so v modelu uporabljene vrednosti kapacitivnosti vodov večje od dejanskih in nasprotno. Največ k celotni kapacitivnosti omrežja prispevajo kabli, zato je smiselno najprej preveriti, ali so podatki o kapacitivnosti slednjih pravilni.

4.3 Upornost in induktivnost vodov

Amplituda in fazni kot toka kratkega stika, ob okvarah daleč od napajalne točke, sta odvisna od upornosti in induktivnosti vodov. Preverjanje ustreznosti v modelu uporabljenih vrednosti omenjenih parametrov je tretji korak sistematičnega pristopa. Ta temelji na primerjavi izmerjenega in z modelom izračunanega toka v primeru dvopolnega ali tripolnega kratkega stika v omrežju.

Za zmanjšanje vpliva načrtovane, nadzorovane in kratkotrajno izvedene okvare v omrežju je najprej treba poiskati točko v omrežju, kjer je vrednost toka ob kratkem stiku minimalna. Razen tega je treba določiti točko kratkega stika tako, da ustrezno obremeni najpomembnejše vode. Pri omrežju s slike 1 so to vodi, ki tvorijo zanko. Okvaro v obliki kratkega stika, ki je osnova za primerjavo rezultatov meritev in simulacijskih izračunov, je mogoče izvesti v več točkah.

Ob pravilni določitvi kratkostične moči (ali impedance) tujega omrežja so vzrok za neskladje med izmerjenimi in z modelom omrežja izračunanimi časovnimi poteki tokov med okvaro po navadi napačne vrednosti parametrov vodov, uporabljene v modelu omrežja. Pri tem se dogaja, da po izvedbi sprememb v omrežju te spremembe niso pravočasno vnesene v bazo GIS. Slednja tako vsebuje podatke o tipih in parametrih vodov, ki ne ustrezajo tistim v dejanskem omrežju. Problemi nastanejo, ko se izračuni z modeli s parametri vodov iz baze GIS ne ujemajo z meritvami. Postopek odpravljanja neskladnosti med rezultati izračunov in meritev zahteva pregled vseh tipov vodov in njihovih parametrov v bazi GIS in fizični pregled lokacij, na katerih so vodi nameščeni. Pri tem si lahko pomagamo tako, da najprej preverimo vode in pripadajoče lokacije, na katerih prihaja do največjih odstopanj med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi.

5 UPORABA SISTEMATIČNEGA PRISTOPA

V nadaljevanju je prikazan primer uporabe predlaganega sistematičnega pristopa k odpravljanju neskladnosti med rezultati simulacijskih izračunov in meritev. Kot primer je uporabljeno omrežje, opisano v poglavju 2 in predstavljeno na sliki 1.

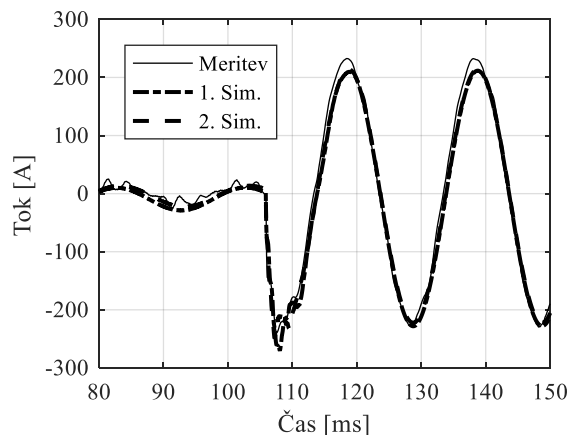
Pri preverjanju ustreznosti uporabljene vrednosti kratkostične moči (impedance) podatka o kratkostičnem toku na sekundarni strani transformatorja nismo imeli, zato parametrov transformatorja 110/21 kV ni bilo mogoče potrditi. Kratkostični tok pri trifaznem kratkem stiku na primarni strani transformatorja je znašal 9,679 kA in kratkostična moč omrežja je v skladu z (1) znašala 2,0285 GVA. Upoštevano razmerje reaktance in upornosti tujega omrežja je bilo $X/R = 4$. Podatke je podal Sistemski operater prenosnega omrežja. Z modelom omrežja izračunan tok kratkega stika je bil skladen s podano vrednostjo kratkostičnega toka na primarni strani transformatorja 110/21 kV.

Večja odstopanja so se pokazala pri preverjanju ustreznosti uporabljenih vrednosti kapacitivnosti vodov v modelu omrežja. Skladno z opisi iz podpoglavja 4.2 slika 6 kaže primerjavo izmerjenih in z modelom izračunanih časovnih potekov toka v točki zemeljskega stika. Slika 7 kaže primerjavo med izmerjenim in z modelom izračunanim časovnim potekom toka zvezdiščne dušilke. Vsi rezultati so podani za primer zemeljskega stika na sekundarnih, 21 kV sponkah, transformatorja 110/21 kV v RTP Slovenj Gradec (slika 1). Slika 6 kaže primerjavo toka okvare kratkega

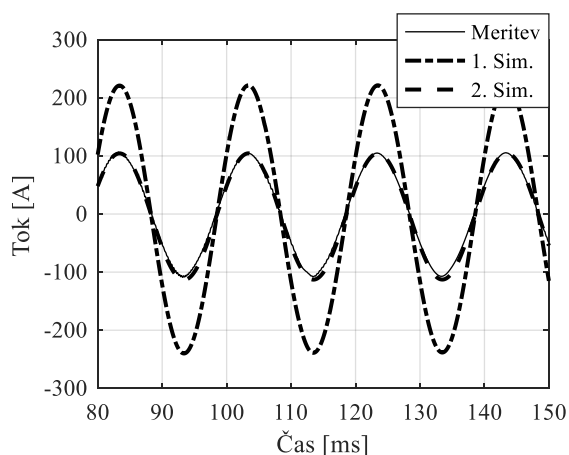
stika, ki je bil kompenziran z dušilko. Pri tem "Meritev" označuje izmerjeni tok, "1. Sim." označuje z modelom izračunan tok z začetnim naborom parametrov, "2. Sim." pa označuje z modelom izračunan tok po opravljeni korekciji parametrov (kapacitivnosti) modela. Vsi podani rezultati kažejo dovolj majhno odstopanje toka na mestu okvare.

Za doseganje enakega toka zemeljskega stika so bili potrebni različni kompenzacijski toki zvezdiščne dušilke, ki jih kaže slika 7. Tok, izračunan z modelom omrežja z osnovnimi parametri, označen z "1. Sim.", znatno presega merjeni tok dušilke, označen z "Meritev". To pomeni, da je zaradi prevelikih vrednosti kapacitivnosti v modelu omrežja prevelik tudi kapacitivni tok, ki za kompenzacijo zahteva tudi večji induktivni kompenzacijski tok dušilke. Ker k celotni kapacitivnosti omrežja največ prispevajo kabli, smo najprej preverili vrednosti njihovih kapacitivnosti. Podane vrednosti kapacitivnosti kablov smo primerjali z vrednostmi različnih tipov kablov v katalogih. Izkazalo se je, da so bili prvotni nabori parametrov kablov podani za nivo napetosti 10 kV, ne za 20 kV.

Po izvedeni korekciji vrednosti kapacitivnosti vodov v modelu omrežja in po ponovni nastavitvi induktivnosti zvezdiščne dušilke je bilo doseženo sprejemljivo ujemanje med izračunanimi (2. Sim.) in izmerjenimi ("Meritev") časovnimi poteki toka zvezdiščne dušilke in toka okvare na mestu zemeljskega stika, ki jih kažeta sliki 6 in 7.



Slika 6: Primerjava izmerjenega in s simulacijskim izračunom določenega časovnega poteka toka zemeljskega stika (I_f na sliki 4)



Slika 7: Primerjava izmerjenega in s simulacijskim izračunom določenega časovnega poteka toka zvezdiščne dušilke.

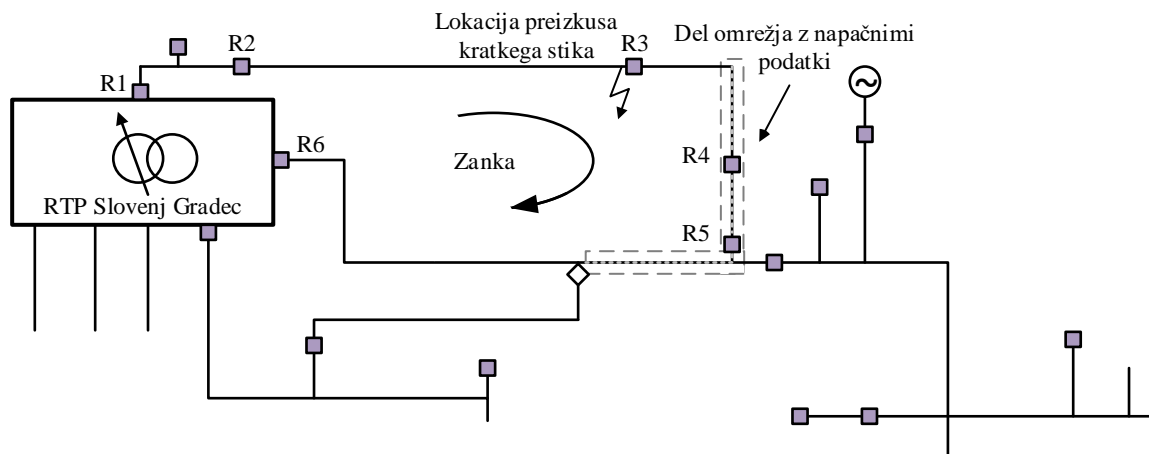
Za preverjanje uporabe ustreznih vrednosti upornosti in induktivnosti vodov v modelu omrežja je bil izveden nadziran in časovno omejen dvopolni kratek stik. Zaradi dovolj majhne vrednosti toka okvare je bil izveden v relejni točki R3 med obratovanjem v zanki, kot kaže slika 8.

Tabela 1 kaže izmerjene in z modelom omrežja izračunane efektivne vrednosti kratkostičnih tokov v relejnih točkah omrežja. Izračunane vrednosti so podane za prvotno stanje parametrov in po njihovi korekciji.

Tabela 1: Izmerjene in izračunane vrednosti tokov relejnih točk od R1 do R6 pri dvopolnem kratkem stiku vodnikov L2 in L3

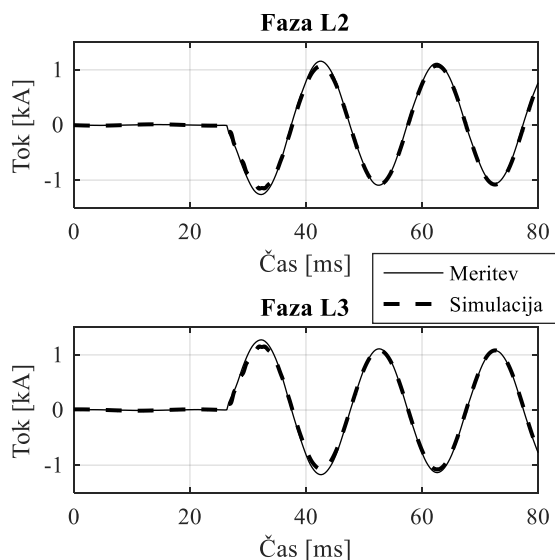
Lokacija	Tok v vodniku L2 [A]		
	Meritev	Simulacija	
		Prvotno stanje	Po korekciji
R1	890	868	909
R2	875	862	902
R3	760	920	763
R4	755	920	763
R5	757	921	765
R6	705	880	727

Tabela 1 in slika 3 kažeta neskladnost med izmerjenimi in z modelom izračunanimi vrednostmi tokov kratkega stika predvsem v relejnih točkah od R3 do R6. Na podlagi natančnega pregleda parametrov in topologije omrežja in primerjave s podatki baze GIS ni bilo mogoče najti vzroka za neskladje med rezultati meritev in izračunov. Šele fizični pregled odsekov vodov vzdolž trase od relejne točke R3 do relejne točke R6 je pokazal, da se v omrežju nameščeni vodi razlikujejo od tistih, ki so zavedeni v bazi GIS. V omrežju so bili nameščeni vodniki Al/Fe 35/6 mm², v bazi pa so bili zavedeni vodniki tipa Al/Fe 70/12 mm².



Slika 8: Enopolna shema omrežja z označeno lokacijo kratkega stika in lokacijami odsekov vodov z napačnimi podatki

Ponovni simulacijski izračuni z modelom omrežja, v katerem so bile upoštewane korigirane vrednosti parametrov vodov, so pokazali sprejemljivo skladnost med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi, kar kažejo rezultati, podani v tabeli 1. Slika 9 podaja primerjavo časovnih potekov izmerjenih in z modelom izračunanih linijskih tokov v fazah L2 in L3 pri kratkem stiku med linijskimi vodniki L2 in L3 v relejni točki R3, ki je najbližje okvari.



Slika 9: Primerjava izmerjenih in s simulacijskim izračunom določenih časovnih potekov linijskih tokov v fazah L2 in L3 pri dvopolnem kratkem stiku v relejni točki R3

6 SKLEP

V delu je opisan postopek odpravljanja odstopanj med rezultati meritev in z modelom izračunanih vrednosti tokov v omrežju med normalnim obratovanjem in med okvarami. V danem primeru je zadovoljivo ujemanje rezultatov nujno, saj je bil model omrežja uporabljen pri snovanju naprednega zaščitnega sistema za trajno

obratovanje v 20 kV zanki. Ta je bil v okviru projekta NEDO tudi implementiran v omrežju distribucijskega podjetja Elektro Celje, d.d. Odstopanja med izmerjenimi in z modelom izračunanimi vrednostmi neposredno vplivajo na selektivnost in zanesljivost delovanja sistema zaščite. Za odpravljanje neskladnosti med rezultati meritev in rezultati izračunov z modelom omrežja je bil uporabljen v tem prispevku predstavljen sistematičen pristop.

Podan sistematičen pristop obsega tri korake, ki temeljijo na primerjavi izmerjenih in z modelom omrežja izračunanih vrednosti tokov ob okvarah. Prvi korak obsega preverjanje ustreznosti uporabljene vrednosti kratkostične moči (impedance) tujega omrežja. Drugi korak obsega preverjanje ustreznih uporabljenih vrednosti kapacitivnosti vodov, tretji korak pa obsega preverjanje ustreznosti uporabljenih vrednosti upornosti in induktivnosti vodov v modelu omrežja.

Opisani postopek je bil uporabljen kot orodje za odpravljanje neskladnosti med rezultati meritev in izračunov z modelom omrežja pri realnem omrežju, ki je bilo vključeno v projekt NEDO. Z uporabo opisanega pristopa je bilo ugotovljeno, da so bili podani izhodiščni podatki o kapacitivnosti kablov ter ohmskih upornostih in induktivnostih na nekaterih odsekih vodov napačni. Pri določitvi odsekov z neustreznimi parametri smo si pomagali z rezultati meritev toka zvezdiščne dušilke ob zemeljskem stiku kot tudi z rezultati meritev linijskih tokov v vseh razpoložljivih relejnih točkah med kratkotrajno in nadzorovano izvedbo kratkega stika.

Ker pristop temelji na primerjavi kratkostičnih tokov, je treba imeti možnost za izvedbo kratkega stika v omrežju ter izvesti meritve tokov in napetosti. Če so v omrežju razporejeni zaščitni releji z možnostjo snemanja oscilografij, je s pristopom lažje ugotoviti lokacijo neustreznih parametrov, če pa teh v omrežju ni, se primerjava izvede le na podlagi meritev na izvodih v RTP-ju.

V danem primeru je bila uporaba opisane metode uspešna. Model s korigiranimi vrednostmi parametrov je bil uporabljen pri določanju parametrov posameznih

relejev zaščitne sheme. Razviti zaščitni sistem je bil v omrežju tudi implementiran. Omrežje od 25.1.2019 trajno obratuje v zanki. Prednost razvitega zaščitnega sistema se je pokazala ob padcu drevesa na vod 25.3.2019, kjer je zaradi ustrezne selektivnosti delovanja zaščite ostalo brez napajanja samo 49 odjemalcev, brez implementacije zaščitnega sistema z ustrezno selektivnostjo pa bi jih brez napajanja ostalo 1571.

LITERATURA

- [1] P. H. J. Nardello, N. Rubido, C. Wang, M. S. Baptista, C. Pomalaza-Raez, P. Cardieri in M. Latva-aho, „Models for the modern power grid,“ *The European Physical Journal Special Topics*, Izv. 223, št. 12, 2014.
 - [2] J. Voršič, T. Zorič in T. Horvat, Izračun obratovalnih stanj v elektroenergetskih omrežjih, Maribor: Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, 2012.
 - [3] R. Singh, B. Pal in R. A. Jabr, „Distribution system state estimation through Gaussian mixture model of the load as pseudo-measurement,“ *IET Generation, Transmission & Distribution*, Izv. 4, št. 1, pp. 50–59, 2009.
 - [4] R. Lukomski in K. Wilkosz, „Identification of Topology Errors with Use of Unbalance Indices and Neural Networks,“ v *IEEE Bucharest Power Tech Conference*, Bucharest, Romania, 2009.
 - [5] K. Wilkosz, „Utilization of multi-agent system for power system topology verification,“ v *15th International Scientific Conference of Electric Power Engineering (EPE)*, Brno, Czech Republic, 2014.
 - [6] A. M. Othman in A. Y. Abdelaziz, „Enhanced backtracking Search Algorithm for Optional Coordination of Directional Over-current Relays Including Distributed Generation,“ *Electric Power Components and Systems*, Izv. 44, št. 3, pp. 278–290, 2016.
 - [7] Mathworks Inc., Simscape, 01 03 2019. [Elektronski]. Available: <https://uk.mathworks.com/products/simscape.html>.
 - [8] H. Elisabeth, F. Lothar in S. Ernst, „A simplified Procedure to determinate the Earth-fault Currents in Compensated Networks,“ *Elektrotehniški vestnik*, Izv. 83, št. 3, pp. 122–130, 2016.
 - [9] G. Druml, A. Kugi in B. Parr, „Control of Petersen Coils,“ *XI. International Symposium on Theoretical Electrical Engineering*, 2001.
- Matej Pintarič** je diplomiral leta 2014 in magistriral leta 2016 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru. Zaposlen je kot asistent na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo pametna omrežja in upravljanje z energijo.
- Miran Rošer** je diplomiral leta 2004 na oddelku FERI Tehniške fakultete Univerze v Mariboru. V letu 2014 je doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Zaposlen je v družbi Elektro Celje, d. d., kjer se ukvarja z meritvami in relejnimi zaščitnimi sistemi ter sistemi za vodenje in analize pri obratovanju in razvoju distribucijskega omrežja.
- Boštjan Polajžer** je diplomiral leta 1997 in doktoriral leta 2002 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru. Na isti ustanovi je od leta 2010 zaposlen kot izredni profesor. Njegovo raziskovalno delo vključuje vodenje električnih strojev in naprav, kakovost električne energije ter vodenje in zaščito elektroenergetskih sistemov.
- Gorazd Štumberger** je diplomiral leta 1989, magistriral leta 1992 in doktoriral leta 1996 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru. Na isti ustanovi je od leta 2008 zaposlen kot redni profesor. Njegovo raziskovalno delo, med drugim, obsega proizvodnjo, prenos, razdeljevanje in rabo električne energije, pametna omrežja in upravljanje z energijo.