

Pronalazak mjesta zemljospoja u neuzemljenim srednjenaponskim mrežama primjenom injekcije niskofrekvencijskoga signala

Stipetić, Nina

Doctoral thesis / Disertacija

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:973872>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-04**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)





Sveučilište u Zagrebu
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Nina Stipetić

**PRONALAZAK MJESTA ZEMLJOSPOJA U
NEUZEMLJENIM SREDNJENAPONSKIM
MREŽAMA PRIMJENOM INJEKCIJE
NISKOFREKVENCIJSKOGA SIGNALA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2023.



Sveučilište u Zagrebu
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Nina Stipetić

**PRONALAZAK MJESTA ZEMLJOSPOJA U
NEUZEMLJENIM SREDNJENAPONSKIM
MREŽAMA PRIMJENOM INJEKCIJE
NISKOFREKVENCIJSKOGA SIGNALA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Božidar Filipović-Grčić

Zagreb, 2023.



University of Zagreb

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING

Nina Stipetić

**EARTH FAULT LOCALIZATION IN ISOLATED
MEDIUM-VOLTAGE NETWORKS BASED ON
LOW-FREQUENCY SIGNAL INJECTION**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Associate Professor, Božidar Filipović-Grčić, PhD

Zagreb, 2023.

Doktorski rad izrađen je na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu elektrotehnike i računarstva,
na Zavodu za visoki napon i energetiku

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Božidar Filipović-Grčić

Doktorski rad ima: 133 stranica

Doktorski rad br.: _____

O mentoru

Božidar Filipović-Grčić rođen je u Sinju 1983. godine, gdje je završio opću gimnaziju. Diplomirao je 2007. godine, a doktorirao 2013. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. Od 2007. godine zaposlen je na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu na Zavodu za visoki napon i energetiku. 2019. izabran je u znanstveno-nastavno zvanje docent, a 2023. u znanstveno-nastavno zvanje izvanredni profesor. Od 2023. godine voditelj je istraživačkog Laboratorija za visoki napon na i tehnički upravitelj za akreditirane djelatnosti laboratorija. Nositelj je predmeta i sudjeluje u nastavi na prijediplomskom, diplomskom, doktorskom i specijalističkom studiju. Trenutno je voditelj 2 znanstvena projekta (EFRR-IRI II Odlučivanje u upravljanju elektroenergetskim sustavom u uvjetima nesigurnosti uvjetovanih klimatskim promjenama i HRZZ Projekt razvoja karijera mladih istraživača - izobrazba novih doktora znanosti).

Glavna područja znanstveno-istraživačkog i stručnog rada su tehnika visokog napona, visokonaponska laboratorijska ispitivanja, prijenos električne energije, prijelazne pojave u elektroenergetskom sustavu, elektromagnetska kompatibilnost, prenaponska zaštita te koordinacija izolacije. Autor je velikog broja znanstvenih i stručnih radova objavljenih u međunarodnim časopisima te na znanstvenim i stručnim skupovima. Bio je voditelj velikog broja stručnih i znanstvenih projekata, elaborata i studija te autor mjernih i ispitnih izvješća izrađenih u Laboratoriju visokog napona.

Recenzent je u časopisima „Electric Power Systems Research“, „International Journal of Electric Power & Energy Systems“ i „IEEE Transactions on Power Delivery“. U nekoliko navrata bio je gost urednik specijalnih izdanja u međunarodnim časopisima Electric Power Systems Research i Journal of Energy. Član je uređivačkog odbora časopisa Journal of Energy. Član je tehničkog odbora međunarodne konferencije „International Conference on Power Systems Transients (IPST)“. Član je IEEE-a te HRO CIGRE i međunarodne CIGRÉ unutar kojeg je član nekoliko studijskih odbora i radnih grupa.

About the Supervisor

Božidar Filipović-Grčić was born in Sinj in 1983, where he completed his high school education. He completed his master studies in 2007 and his PHD studies in 2013 at the Faculty of Electrical Engineering and Computing in Zagreb. Since 2007, he has been employed at the same Faculty at the Department of Energy and Power Systems. In 2019, he became an assistant professor, and in 2023, an associate professor. Since 2023, he is the head of the High Voltage Laboratory and technical manager for accredited laboratory activities related to high voltage testing, measuring, and electromagnetic field calculation in accordance with the ISO/IEC 17025 standard. He participates in lectures and laboratory exercises in various subjects at bachelor and master study programmes as well as PHD and specialistic study programmes. Currently, he is a leading person in two scientific projects.

His main areas of scientific research and professional work include high voltage techniques, high voltage laboratory testing, power transmission, transient phenomena in the electrical power system, electromagnetic compatibility, overvoltage protection, and insulation coordination. He has authored numerous scientific and professional papers published in international journals and presented at scientific and professional conferences. He has led a significant number of professional and scientific projects, reports, and studies, and authored measurement and test reports.

He has reviewed papers for journals such as "Electric Power Systems Research", "International Journal of Electric Power & Energy Systems", and "IEEE Transactions on Power Delivery". He was a guest editor several times for special editions in international journals. He is a member of the editorial board of the Journal of Energy. He is a member of technical committee of the "International Conference on Power Systems Transients (IPST)".

He is a member of IEEE, HRO CIGRE and international CIGRÉ, where he participates in several study committees and work groups.

Zahvala

Zahvaljujem se mentoru, izv. prof. dr. sc. Božidaru Filipoviću-Grčiću, na poticanju, usmjeravanju i raspravama. Moj problem za svako rješenje i njegovo rješenje za svaki problem su uspješno došli do kraja jednog doktorskog studija. Najviše od svega, zahvaljujem mu što svojim znanjem, radom, odnosom prema poslu i kolegama postavlja primjer koji je vrijedan slijeđenja te što mi je omogućio rad na zanimljivim projektima kroz koje sam mogla učiti.

Posebnu zahvalu za pomoć pri provedbi eksperimentalnog dijela istraživanja, upućujem Končar - Mjernim transformatorima - na otvorenosti za suradnju, savjetima i izradi naponskih mjernih transformatora; Končar - Institutu za elektrotehniku - na vremenu i prostoru u Visokonaponskom laboratoriju te Zavodu za elektrostrojarstvo i automatizaciju i Zavodu za osnove elektrotehnike i električka mjerenja na posuđenoj mjernoj opremi.

Na kraju, zahvaljujem svojoj obitelji na pruženoj potpori i razumijevanju tijekom krivudavih godina doktorskog studija, a najviše Stipi, Andriji i Marku koji su moja sreća, moja snaga i moja stijena.

Šta je iduće?

Sažetak

Srednjenaponske mreže industrijskih postrojenja često imaju neuzemljeno zvjezdište zbog mogućnosti nastavka pogona tijekom zemljospoja. Unatoč kontinuiranom pogonu, brz pronalazak mjesta kvara je važan zbog prenapona i opasnosti od nastajanja višepolnog kvara. Dostupna rješenja za određivanje voda na kojem je nastao zemljospoj, kao npr. osjetljiva usmjerena homopolarna nadstrujna zaštita, ponekad nisu ekonomski opravdana. Dodatno, u manjim mrežama s vrlo niskim strujama zemljospoja takva rješenja mogu biti nedovoljno osjetljiva.

Injektiranje signala je jedna od metoda lociranja kvara koja se koristi u niskonaponskim izoliranim mrežama, a razvijena rješenja temeljena na injektiranju signala su komercijalno dostupna. Međutim, mogućnost primjene ove metode na srednjem naponu nije dovoljno istražena, a ne postoje komercijalno dostupna rješenja za pronalazak zemljospoja primjenom injektiranja signala. Uzrok tome je otežano injektiranje signala u mrežu u kojoj je zvjezdište nedostupno, a fazni vodiči su pod naponom koji iznosi od 5 kV do 35 kV.

U ovom istraživanju je predloženo injektiranje signala preko primarnih namota grupe od tri jednopolno izolirana induktivna naponska mjerna transformatora, koji se tipično postavljaju u izolirane mreže za priključenje mjernih i zaštitnih uređaja. Provjeren je mogućnost injektiranja niskofrekvencijskoga signala preko induktivnih naponskih mjernih transformatora u svrhu pronalaska odcjepa na kojem je nastao zemljospoj i utjecaj injektiranja na naponske transformatore. Niska frekvencija umanjuje utjecaj kapacitivne reaktancije mreže na grananje injektiranog signala te se on zatvara kroz mjesto kvara, što je moguće otkriti praćenjem sadržaja injektiranog signala u rezidualnim strujama po odcjepima u mreži. Simulacije pri istovremenom zemljospoju i injektiranju signala provedene su na modelu industrijske i distribucijske mreže. Provjeren je učinkovitost metode pri otkrivanju visokoomskih kvarova te utjecaj veličine mreže i parametara injektiranog signala na mogućnost određivanja odcjepa u kvaru. Na temelju rezultata predložena je moguća izmjena dizajna induktivnog naponskog mjernog transformatora, kako bi, uz očuvanje njegove primarne funkcije, bila unaprijeđena mogućnost injektiranja niskofrekvencijskoga signala.

U okviru istraživanja, mogućnost injektiranja niskofrekvencijskog signala preko primarnih namota grupe od tri induktivna naponska mjerna transformatora potvrđena je laboratorijskim mjerenjem.

Ključne riječi: neuzemljena srednjenaponska mreža, zemljospoj, induktivni naponski mjerni transformator, injektiranje signala

Earth fault localization in isolated medium-voltage networks based on low-frequency signal injection

Neutral earthing directly affects systems' behavior regarding the maximum level of earth-fault current and overvoltages. Isolated neutral is used where continuity of power supply is essential, which is often the case in industrial power utilities. The earth-fault current in such network finds its path through systems' capacitances to ground and does not lead to a high fault current. Although the system can remain in service during a single-phase earth fault, it is important to locate the fault as soon as possible, without disrupting the operation of the loads, in order to restrain the overvoltage stress of the healthy phases and to prevent the occurrence of a second fault that would require switching.

In practice, in isolated networks, sensitive directional homopolar overcurrent protection (67N) based on fundamental frequency phasor measurements is widely used to identify the faulty line. However, this earth fault protection requires numerical relays and sensitive core-balance current transformers installed on each line. This is sometimes not economically justified and it can be insufficiently sensitive, especially in smaller networks. The conventional solution in smaller networks is to use the classical residual overvoltage relay or permanent insulation monitors (PIMs). The classical earth fault protection indicates the fault upon the occurrence of the residual voltage, but the faulty line remains unknown. The PIM continuously monitors the total systems' insulation resistance and indicates its decrease when an earth fault occurs. The location of the fault also remains unknown. When using classical earth fault protection or a PIM, upon the fault indication, detecting the faulty line is done by sequentially opening of the line breakers, which is time consuming and inconvenient for industrial networks where continuity of supply is of great importance. Sequential opening of the line breakers produces switching overvoltages which might have negative effects on insulation systems of equipment or even lead to fault caused by resonant overvoltages.

Signal injection is one of the known fault location methods applied in unearthed low-voltage networks, and commercially available solutions based on signal injection exist. Pulse or low-frequency sinusoidal signals are used. However, this method has received limited attention at medium-voltage level, and there are no commercially available solutions for earth-fault detection based on signal injection for medium-voltage networks. The possibility of application of this method at medium-voltage level is dependent on how to inject the signal into unearthed phases with voltages ranging from 5 kV to 35 kV.

In this research, low-frequency signal injection through the primary windings of a group of three single-phase insulated voltage transformers is proposed. A group of three single-phase insulated inductive voltage transformers is normally installed in isolated networks, for connection of protection and measuring devices. The proposed signal injection circuit is similar to

the connection circuit for a PIM. The influence of the signal injection on voltage transformers is analyzed. The low frequency is used to maximize the capacitive reactance of healthy phases and increase the probability for the injected signal to close its path through fault location. The injected signal is traceable in the frequency spectrum of residual currents throughout the network. Simulations of simultaneous earth fault and signal injection are conducted on a model of small, industrial network and larger, distribution network. The possibility of high-impedance fault detection is analysed as well as the influence of the network size and the injected signal parameters on the method efficiency. Based on the simulation results, a possible modification of the voltage transformer design is proposed, to achieve better low-frequency signal injection performance, while preserving the primary function and characteristics of voltage transformers. The method is experimentally verified in laboratory environment.

The thesis is divided into seven chapters. The first chapter briefly describes the problem of earth fault detection and gives the motivation, hypothesis, research goals and the structure of the thesis. The second chapter gives the theoretical background about earthing of power systems networks, the formation of an earth fault in an isolated network and the mathematical model for earth fault current calculation. An overview of earth fault detection methods is given, with an emphasis on available solutions that are applied in practice. In this chapter, the general working principle of the signal injection method for fault localization is described, as well as the possibility of adapting the method for applicability in medium-voltage networks. In low-voltage networks, the signal generator is connected directly between the system neutral point and the earth. The pulse or sinusoidal signals are injected into the system, and the detection of a faulty line is automated, or it is done by tracing the signal by portable sensors tuned to the frequency of the injected signal. At medium-voltage level, the obvious problem is how to inject the signal in the system with inaccessible neutral and phases under relatively high voltage. The proposed circuit for signal injection consists of three standard voltage transformers with two secondary windings. One secondary winding is used for connection of measuring and protection devices, and the other is used to create the tertiary winding delta connection of all three voltage transformers, and the connection of the resistor for ferroresonance damping, that is usually needed in isolated medium-voltage networks. The primary windings are connected to phase conductors, and their other ends create a star connection that serves for signal generator connection, and it is grounded over a capacitor to avoid injected current being shunted. The voltage transformers are therefore the critical component in the proposed circuit, and its performance and parameters during the signal injection have to be analysed. Several considerations are important for sinusoidal injection, which was chosen for the research covered by this thesis. Low-frequency is used to reduce the influence of network capacitances on the injected signal distribution. Since the capacitive reactance of the network is high at low frequencies, the lower the frequency of the injected signal, the higher the possibility it will close its path through the resistance at fault

location. On the other hand, the higher the injection signal amplitude, the easier the detection and traceability by current sensors. Hence, the higher amplitude and lower frequency of the injected signal are favorable for the performance of the method. However, it is necessary to analyse how they affect the voltage transformers. The magnetic flux in the transformers core depends on the ratio of the applied voltage and its frequency, which directly affects the transformer saturation. Increasing the magnetic flux over the knee point of the current-flux curve will lead to core saturation. The core saturation increases the current through the primary winding and it should generally be avoided. Therefore, the injection signal parameters should be carefully chosen to avoid excessive flux increase. If the saturation occurs occasionally, care should be taken to ensure that the primary current does not thermally overload the primary windings. The advantage of this method is that the parameters of the injected signal are controllable and can be adjusted on-site. Another advantage is that the injection is not permanent, but lasts from the fault indication to fault location, and it is assumed that any short-term saturations will not affect the transformers' condition.

In the third chapter, the injection circuit model is described. The real data of standard 4VPA1-12 inductive voltage transformer are used, including the magnetization curve which is critical for saturation description. The dimensioning procedure of resistors for ferroresonance damping is conducted. With the injection circuit model completed, the simulations of simultaneous earth fault and signal injection were performed on different networks model in order to study its performance and limitations.

The fourth chapter describes the simulations conducted on a model of a real, 10 kV cable radial industrial network, which consists of six buses, nine short cable feeders, four longer connection cables and eight asynchronous machines. The method was tested on two different topologies of the same network - the full and the reduced topology. The signal parameters were chosen following the practice in low-voltage networks, and the first simulations were conducted using the signal 2,5 Hz and 100 V. During the simultaneous metallic earth fault and the 2,5 Hz, 100 V signal injection it is shown that there is no saturation or specific inductive voltage transformer stress, and that the injected signal is traceable in the frequency spectrum of residual currents throughout the network. Regarding the faults with a fault resistance, in the case of reduced topology, method efficiency in detecting high-impedance faults is better due to different distribution of the injected signal. When increasing the fault resistance, the impedance to ground changes. At some point the 2,5 Hz component in the residual current on a faulty line becomes similar to the one on other healthy lines in the network. For the example of a fault on the shortest cable in the network, it is possible to detect earth faults with the fault resistance up to 55 k Ω in the reduced topology, while in full topology it drops to 20 k Ω . The analysis of different signal amplitudes and frequencies and their influence on voltage transformers and method performance are also performed and described in this chapter. Up to the frequency

of 10 Hz, the injected signal is traceable in residual currents. Theoretically, the injection of a DC signal is the most favorable for the signal detection throughout the network, however, the DC signal brings the voltage transformer to saturation easy, and the primary winding currents exceed the maximal permissible continuous current. Although the idea is to have temporary injection, to avoid any possibility for excessive thermal stress of the windings, the increase of the primary winding conductor cross-section can be done. In order to completely avoid the saturation problem, changes in the design of the transformer core are proposed to achieve different magnetization curve. The increase of the core cross-section will lead to the increase of the flux at the knee point and adding one or more air gaps in the main magnetic circuit will change the curve slope. Three different variations of the magnetization curves are proposed in the thesis. The first one is with the increased knee point, the second one with a different slope and the knee point at the same flux value as for the original curve, and the third one combines changes in both the slope and the flux value at knee point. The baseline condition for recalculation of the original magnetization curve is to preserve the saturation conditions in the iron core (i.e. flux density B and magnetic field strength H), and calculate new U , I points using different core cross-sections and air gaps the equations. By repeating the simulations of an earth fault and signal injection by using all the proposed variations, it was shown that applying the third curve never brings the voltage transformer to saturation during the signal injection. It was considered as the suitable curve for performing the signal injection. Further simulations on an example of a distribution network were done using the new magnetization curve.

In the fifth chapter, the possibility of applying the signal injection method in a larger distribution network, which consists of cable and overhead lines and contains both radial and ring sections, is presented. The simulations are performed by applying the proposed changes in the magnetization curve and injecting the signal with parameters 2,5 Hz and 500 V. There was no saturation in any simulated case. The possibility of detecting a fault on the ring part of the network and the possibility of detecting an intermittent fault on the overhead line section are analysed as special cases. The conducted simulations in a distribution network were done for two different topologies - with and without the ring connection. Again, the better method performance in detecting high-impedance faults was shown in the reduced topology, without the ring connection, due to different distribution of the injected signal. For detecting an intermittent fault, it is shown that the persisting intermittent fault with the earth fault current built-up effect can be detected by the injection method. The 2,5 Hz component in the residual current on a line with intermittent fault is increasing with time, while on other healthy feeders it simultaneously drops, which is indicative for faulty line determination. For the faults on the ring part of the network, it is shown that it can always be concluded whether an earth fault occurred on the ring part or in the radial part. However, for better determination of the ring section with an earth fault, the strategic installation of current sensors sensitive to the injected signal frequency should

be performed.

The last part of the research covers the experimental verification of the injection method, which is described in the sixth chapter. The experimental verification was performed in High voltage laboratory, on a three-phase set-up consisting of one unloaded 10 kV line. A three-phase regulating and test transformer are used for rising the voltage to 10 kV. The capacitors are used for representation of network to ground capacitance. An equivalent of approximately 1 km long cable is used. An earth fault is intentionally made by shorting the capacitor in one of the phases to ground. The signal-injection circuit is connected to phases through the three inductive voltage transformers. Standard inductive voltage transformers are used in the experiment, the same as modeled in chapter three. During the experimental earth fault and signal injection, the phase voltages were measured using capacitive dividers, the primary winding currents were measured using shunts, and the currents through phases and capacitors are measured by flux-gate current sensors. The residual current was calculated mathematically based on measured phase currents. Additionally, the injection voltage and current were measured as well as the current in the tertiary delta winding. Both AC and DC injection were tested in four different cases: a metallic earth fault and an earth fault with three different fault resistances. The injected signal frequency and amplitude were changed, respecting the limitations of the equipment that was used. In all cases, it was proved that the injected signal is traceable in the frequency spectrum of the residual current. Although the temporary saturation did occur, no specific stress for inductive voltage transformers was detected. The experimental set-up was modeled in simulation environment in order to compare the measured and simulated results. In all cases, good overlapping of the results is shown, which proves the correctness of the conclusions based on prior simulations conducted on models of industrial and distribution networks.

The main conclusion of the research is that the signal injection method for earth fault localization can be applied in isolated medium-voltage networks and that the standard, existing inductive voltage transformers can be used for signal injection. Simple changes in the voltage transformer core can be done to achieve injection without any saturation. The scientific contribution achieved in this thesis consists of:

- the method for earth fault localization in isolated medium-voltage networks based low-frequency injection,
- the model for calculation of currents and voltages in the network during an earth fault and the simultaneous injection of a low-frequency signal through the primary windings of inductive voltage transformers,
- determination of the influential parameters on the method, its limitations and efficiency.

Keywords: isolated medium-voltage network, earth-fault, inductive voltage transformer, signal injection

Sadržaj

| | |
|--|-----------|
| 1. Uvod | 1 |
| 1.1. Opis problema | .1 |
| 1.2. Motivacija | .2 |
| 1.3. Hipoteza i cilj istraživanja | .3 |
| 1.4. Struktura rada i izvorni znanstveni doprinos istraživanja | .3 |
| 2. Teorijski opis nastanka zemljospoja | 5 |
| 2.1. Mogućnosti uzemljenja elektroenergetskih mreža | .5 |
| 2.2. Zemljospoj u neuzemljenoj mreži | .7 |
| 2.2.1. Matematički model mreže za izračun struje zemljospoja | .10 |
| 2.3. Metode detekcije zemljospoja | .14 |
| 2.3.1. Metode korištene u praksi | .15 |
| 2.3.2. Metoda injektiranja signala | .18 |
| 2.3.3. Metoda injektiranja signala u srednjenaponskoj izoliranoj mreži | .20 |
| 3. Model kruga za injektiranje signala | 23 |
| 3.1. Model induktivnog naponskog transformatora | .24 |
| 3.2. Krivulja magnetiziranja | .26 |
| 3.3. Dimenzioniranje otpornika za sprječavanje ferorezonancije | .29 |
| 4. Simulacijska provjera metode injektiranja u srednjenaponskoj industrijskoj mreži | 31 |
| 4.1. Model neuzemljene srednjenaponske kabelaške mreže | .31 |
| 4.2. Simulacija zemljospoja u modeliranoj mreži | .33 |
| 4.3. Injektiranje istosmjernog signala | .37 |
| 4.4. Injektiranje izmjeničnog signala | .40 |
| 4.5. Usporedba s usmjerenom homopolarnom nadstrujnom zaštitom | .44 |
| 4.5.1. Simulacije pri minimalnom uklopnom stanju | .44 |
| 4.5.2. Metoda injektiranja signala pri minimalnom uklopnom stanju | .46 |
| 4.6. Utjecajni faktori na injektiranje i detekciju signala | .50 |
| 4.6.1. Utjecaj amplitude injektiranog signala | .50 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 4.6.2. | Utjecaj frekvencije injektiranog signala | .51 |
| 4.6.3. | Utjecaj otpora na mjestu kvara i veličine mreže | .54 |
| 4.6.4. | Utjecaj krivulje magnetiziranja | .59 |
| 5. | Mogućnost primjena metode injektiranja u distribucijskoj mreži | 63 |
| 5.1. | Model distribucijske mreže | .64 |
| 5.2. | Preliminarni rezultati simulacija | .65 |
| 5.2.1. | Simulacije u mreži bez spoja upetljanog dijela mreže | .68 |
| 5.3. | Mogućnost detekcije intermitirajućeg kvara | .71 |
| 5.4. | Mogućnost injektiranja u upetljanoj mreži | .73 |
| 6. | Ekperimentalna provjera principa rada metode injektiranja signala | 77 |
| 6.1. | Podatci o korištenim induktivnim naponskim mjernim transformatorima | .77 |
| 6.1.1. | Mjerenje krivulje magnetiziranja | .78 |
| 6.2. | Ekperimentalni mjerni krug | .79 |
| 6.2.1. | Preliminarna mjerenja | .83 |
| 6.3. | Model ekperimentalnog mjernog kruga u EMTP-u | .89 |
| 6.4. | Usporedba izmjerenih i izračunatih rezultata | .91 |
| 6.4.1. | Metalni zemljospoj i injektiranje niskofrekvencijskog izmjeničnog signala | 93 |
| 6.4.2. | Metalni zemljospoj i injektiranje istosmjernog signala | .96 |
| 6.4.3. | Zemljospoj s otporom 690 Ω na mjestu kvara i injektiranje niskofrek- vencijskog izmjeničnog signala | .96 |
| 6.4.4. | Zemljospoj s otporom 690 Ω na mjestu kvara i injektiranje istosmjernog signala | .99 |
| 6.4.5. | Zemljospoj s otporom 1440 Ω na mjestu kvara i injektiranje niskofrek- vencijskog izmjeničnog signala | .100 |
| 6.4.6. | Zemljospoj s otporom 1440 Ω na mjestu kvara i injektiranje istosmjer- nog signala | .102 |
| 6.4.7. | Zemljospoj s otporom 2150 Ω na mjestu kvara i injektiranje niskofrek- vencijskog izmjeničnog signala | .103 |
| 6.4.8. | Zemljospoj s otporom 2150 Ω na mjestu kvara i injektiranje istosmjer- nog signala | .106 |
| 6.4.9. | Diskusija o usporedbi mjerenja i simulacija | .107 |
| 7. | Zaključak i buduće istraživanje | 109 |
| | Literatura | 113 |
| | Popis slika | 121 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| Popis tablica | 129 |
| Životopis | 130 |
| Biography | 133 |

Poglavlje 1

Uvod

1.1 Opis problema

Način uzemljenja zvjezdišta ima veliku važnost za pogon mreže. S obzirom na različite vrste uzemljenja, prilikom jednopolnog kratkog spoja mogu se pojaviti različite vrijednosti i valni oblici struja kvara i prenapona. Uzrok velikog broja korištenih načina uzemljenja zvjezdišta su dva glavna, ali međusobno suprotna zahtjeva:

- smanjivanje amplitude struje zemljospoja, što uzrokuje poteškoće pri otkrivanju kvara i
- smanjivanje prenapona u zdravim fazama i posljedično manje naprezanje izolacije i odvodnika prenapona, što znači veće amplitude struje zemljospoja i lakšu detekciju kvara, ali može uzrokovati opasne napone dodira [1–4].

U neuzemljenim mrežama zbog malih struja zemljospoja nema potrebe za isklapanjem, što je glavna prednost neuzemljenog zvjezdišta. Ono se zbog toga koristi u mrežama u kojima je neprekinutost napajanja neophodna, primjerice u manjim kabelskim mrežama industrijskih postrojenja, termoelektrana, nuklearnih elektrana, kolektorske mreže vjetroelektrana, pogonima u rudarstvu ili na platformama za crpljenje nafte. S druge strane, u neuzemljenim mrežama su unutarnji prenaponi za vrijeme kvara najviši: iako zemljospoj smije trajati relativno dugo, poželjna je što brža eliminacija kvara. Male industrijske mreže su značajno manje od distribucijskih sustava, pa su u njima i struje zemljospoja manje. Za otkrivanje zemljospoja uglavnom se koristi klasična zemljospojna zaštita koja samo signalizira kvar ili usmjerena zemljospojna nadstrujna zaštita, koja zahtjeva instalaciju numeričkih releja na svaki odcjep. Zbog vrlo niskih iznosa struje zemljospoja, u takvim mrežama uglavnom postoji potreba za vrlo osjetljivom zemljospojnom zaštitom, odnosno za relejima s osjetljivim ulazima i obuhvatnim strujnim mjernim transformatorima za mjerenje rezidualnih struja. Navedena oprema je skupa, a u slučaju malih mreža, iako ugrađena, može biti neosjetljiva na kvar, naročito u slučaju visoko-impedantnih kvarova. Ako u mreži nije ugrađena usmjerena zemljospojna nadstrujna zaštita, uglavnom postoji oprema samo za indicaciju zemljospoja [5]. Zemljospoj se može otkriti mjerenjem nultog

napona u mreži ili mjerenjem ukupnog otpora izolacije uređajem za nadzor izolacije (engl. PIM - *Permanent Insulation Monitor*), [6–8]. Nakon indikacije zemljospoja navedenim uređajima, mjesto kvara ostaje nepoznato, a otkriva se metodom pokušaja i pogreške, slijednim isklapanjem vodova. Ova metoda je zastarjela te povećava vjerojatnost nastanka dvofaznog kvara jer uzrokuje dodatne sklopne prenapone, što utječe na smanjenje pouzdanosti i raspoloživosti pogona postrojenja.

Pregledavanjem prakse u niskonaponskim neuzemljenim mrežama, nailazi se na metodu pronalaska mjesta kvara injektiranjem niskofrekvencijskog signala [6, 9, 10] i praćenjem injektiranog signala do mjesta kvara. U srednjenaponskim mrežama se navedena metoda ne koristi zbog dosad nerazvijenog tehničkog rješenja za injektiranje signala. U ovom radu je istražena mogućnost primjene metode injekcije signala u srednjenaponskoj mreži u svrhu pronalaska odcjepa na kojem je nastao zemljospoj, koristeći induktivne naponske transformatore za injektiranje niskofrekvencijskog signala. Ako bi se za injektiranje mogli koristiti postojeći induktivni naponski transformatori u mrežama, navedena metoda bi predstavljala ekonomičniji pristup za pronalazak zemljospoja, naročito u starijim srednjenaponskim postrojenjima u kojima nema ugrađene usmjerene zemljospojne zaštite.

1.2 Motivacija

U neuzemljenim mrežama zbog malih struja zemljospoja nema potrebe za isklapanjem uslijed jednofaznog kvara. Prilikom jednofaznog zemljospoja naponi tzv. zdravih faza prema zemlji mogu narasti do iznosa linijskog napona pa raste vjerojatnost nastanka proboja izolacije u zdravim fazama i pojave dvostrukog zemljospoja. Zbog toga je, unatoč mogućnosti pogona za vrijeme kvara, što brže pronalaženje i eliminiranje zemljospoja vrlo važno. Jednofazni kvarovi su statistički najčešći u svim mrežama, pa je tako zemljospoj najčešći u pogonu izoliranih mreža. Budući da se s porastom i grananjem distribucijskih mreža prelazi na neki od indirektnih načina uzemljenja, izolirane ostaju uglavnom manje industrijske mreže. U takvim mrežama postoji rizik da su premale da bi usmjerena zemljospojna zaštita uopće bila primjenjiva ili ona predstavlja preveliku investiciju u maloj mreži. Kako bi se izbjeglo slijedno isklapanje vodova pri traženju mjesta zemljospoja, predlaže se primjena nove metode injektiranja izmjeničnog sinusoidalnog signala preko primarnih namota grupe od tri naponska transformatora, u svrhu određivanja voda na kojem je nastupio kvar. Metoda injektiranja signala zahtijeva naponske transformatore, uz mogućnost korištenja postojećih mjernih transformatora u mreži, krug za injektiranje signala i strujne senzore postavljene na strateške lokacije, a pronalazak odcjepa u kvaru provodio bi se bez dodatnih sklopnih operacija uz očekivanu prednost pri otkrivanju visokoomskih kvarova.

1.3 Hipoteza i cilj istraživanja

U pogonu neke srednjenaponske izolirane mreže, za indikaciju zemljospoja se može koristiti klasična zemljospojna zaštita za indikaciju porasta nultog napona ili uređaj za nadzor izolacije koji alarmira zemljospoj pri određenom padu ukupnog otpora izolacije. Nakon indikacije zemljospoja, moguće je primijeniti metodu injektiranja signala u svrhu određivanja voda u kvaru. Koristeći primarne namote induktivnih naponskih transformatora moguće je injektirati niskofrekvencijski signal u izoliranu mrežu. Injektirani signal može biti istosmjerni ili izmjenični. Prema praksi u niskonaponskim mrežama, uglavnom se koristi izmjenični sinusoidalni niskofrekvencijski signal zbog principa rada strujnih transformatora, obuhvatnih transformatora ili Rogowski svitaka koji se koriste za detektiranje signala i njihova detekcija se temelji na promjenjivom magnetskom polju. Što je niža frekvencija injektiranog signala, to se više umanjuje utjecaj dozemnih kapaciteta vodova te je veća vjerojatnost da se injektirani signal zatvori preko lokacije kvara. Najveća vjerojatnost zatvaranja injektiranog signala kroz mjesto kvara teoretski je pri injektiranju istosmjernog signala, ali mogućnost detektiranja ili izračuna istosmjerne komponente struje u mreži ovisi o dostupnom načinu mjerenja rezidualnih struja u mreži. Povećanje amplitude injektiranog signala olakšava njegovu detekciju u mreži.

Cilj ovog istraživanja je utvrditi prilike u mreži pri istovremenoj pojavi zemljospoja i injektiranju signala i razvoj metode za pronalaženje mjesta kvara u neuzemljenim srednjenaponskim mrežama koristeći princip injekcije niskofrekvencijskog signala. Utvrđivanjem utjecaja injektiranja signala na naponske mjerne transformatore potrebno je provjeriti je li moguće koristiti postojeće naponske transformatore za injektiranje signala ili postoji potreba za dimenzioniranjem specijalnih naponskih mjernih transformatora prigodnima za injektiranje signala. Cilj je također odrediti ograničavajuće faktore u primjeni ove metode u smislu veličine mreže i otpora na mjestu kvara.

1.4 Struktura rada i izvorni znanstveni doprinos istraživanja

Ova doktorska disertacija je podijeljena na sedam poglavlja. Prvo poglavlje kratko opisuje problem detekcije zemljospoja te daje motivaciju, hipotezu, cilj istraživanja i strukturu rada. U drugom poglavlju je opisana teorijska podloga. Opisane su mogućnosti uzemljenja elektroenergetskih mreža, nastajanje zemljospoja u neuzemljenoj mreži i matematički model za izračun struje zemljospoja. Dan je pregled metoda detekcije zemljospoja s naglaskom na dostupna rješenja koja se primjenjuju u praksi. Opisan je općeniti princip rada metode injektiranja signala u svrhu pronalaska kvara te mogućnost prilagodbe metode za primjenjivost u srednjenaponskim mrežama. U trećem poglavlju opisan je model kruga za injektiranje signala u srednjenaponsku mrežu. Opisano je modeliranje induktivnih naponskih transformatora, prilagodba izmjerene

krivulje magnetiziranja za unos u simulacijski softver i dimenzioniranje otpornika za sprječavanje ferorezonancije. U četvrtom poglavlju je opisana simulacijska provjera metode injektiranja signala na primjeru stvarne kableske radijalne industrijske mreže. Opisan je model mreže i mogućnost injektiranja istosmjernog i izmjeničnog signala. Prikazana je mogućnost praćenja injektiranog signala do tri karakteristična mjesta kvara u mreži. Prikazan je utjecaj injektiranog signala na induktivne naponske transformatore, utjecaj krivulje magnetiziranja induktivnih naponskih transformatora na mogućnost injektiranja, utjecaj otpora na mjestu kvara i utjecaj veličine mreže na mogućnost otkrivanja odcjepa na kojem je nastao kvar. U petom poglavlju prikazana je mogućnost primjene metode injektiranja signala u većoj distribucijskoj mreži koja se sastoji od kableskih i nadzemnih vodova te sadrži i radijalni i prstenasti dio. Opisana je mogućnost detektiranja kvara na prstenastom dijelu mreže te mogućnost otkrivanja intermitirajućeg kvara. U šestom poglavlju je opisana eksperimentalna provjera principa rada metode injektiranja signala. Opisan je eksperimentalni laboratorijski postav, korištena oprema i rezultati mjerenja za četiri različita slučaja - metalni zemljospoj i tri različita otpora na mjestu kvara. Prikazana je usporedba izmjerenih rezultata s rezultatima simulacijskih proračuna. U sedmom poglavlju su pregledno nabrojani osnovni zaključci provedenog istraživanja.

U ovom istraživanju znanstveni doprinos je razvoj metode za otkrivanje i pronalaženje mjesta zemljospoja u neuzemljenim srednjenaponskim mrežama na temelju injekcije niskofrekvencijskog signala preko induktivnih naponskih transformatora. Na modelu za proračun strujno-naponskih prilika u mreži pri zemljospoju i istovremenoj injekciji niskofrekvencijskog signala pokazan je utjecaj injektiranog signala na induktivne naponske mjerne transformatore, te mogućnost otkrivanja visokoomskih kvarova. Prikazana je mogućnost izmjene dizajna jezgre u svrhu mogućnosti injektiranja signala viših amplituda. Princip injektiranja signala preko induktivnih naponskih transformatora potvrđen je eksperimentalnim mjerenjima.

Poglavlje 2

Teorijski opis nastanka zemljospoja

2.1 Mogućnosti uzemljenja elektroenergetskih mreža

Način uzemljenja zvjezdišta energetskih transformatora ima veliki utjecaj na pogon visokonaponskih mreža. Utječe na prilike za vrijeme kvarova, broj prekida opskrbe i pouzdanost pogona, vrstu i podešenja zaštite te kompleksnost izvedbe uzemljivača. Zvjezdište transformatora može biti izolirano prema zemlji, izravno spojeno sa zemljom ili neizravno spojeno sa zemljom preko otpora, prigušnice ili preko kombinacije otpora i prigušnice. Dodatno, uzemljenje se može izvesti preko specijalnog transformatora za uzemljenje kojim se stvara umjetno zvjezdište kada zvjezdište energetskog transformatora nije dostupno. Umjetno zvjezdište se onda tretira na neki od spomenutih načina [3], [4], [6].

S obzirom na vrstu uzemljenja, u mreži se prilikom kratkih spojeva sa zemljom mogu pojaviti različite vrijednosti i valni oblici prenapona i struja kvara. Prema statističkim podacima, u električnim mrežama se najčešće događaju jednopolni kratki spojevi [6], [11], [12]. Jednopolni kratki spoj sa zemljom se javlja u mrežama s uzemljenim zvjezdištem energetskog transformatora. U mreži s izoliranim zvjezdištima spoj faznog vodiča sa zemljom predstavlja zemljospoj.

Raznovrsnost načina uzemljenja je posljedica utjecaja tog načina na prihvatljive iznose struje jednopolnog kratkog spoja i unutarnjih prenapona koji za vrijeme kvara nastaju u zdravim fazama. S jedne strane, pri jednopolnom kratkom spoju u mreži s izravnim uzemljenjem, unutarnji prenaponi su najniži, a struja kratkog spoja najviša. Visoka struja kvara dovodi do potencijalno opasnih napona dodira i koraka, isklapanje i prekid u opskrbi su nužni, ali je otkrivanje i lociranje kvara olakšano. S druge strane, pri zemljospoju u izoliranoj mreži unutarnji prenaponi su najviši, a amplituda struje zemljospoja relativno niska. Zbog niske amplitude struje kvara, nema potrebe za brzim isklapanjem pa mreža može nastaviti s pogonom, ali je otkrivanje kvara otežano. Visoki unutrašnji prenaponi naprežu izolaciju i odvodnike prenapona u zdravim fazama te postoji opasnost od nastanka dvopolnog kvara.

Svi neizravni načini uzemljenja predstavljaju rješenja između navedena dva ekstrema, koja

za neku mrežu, uzimajući u obzir njezin tip, namjenu i ugrađenu opremu, daju ravnotežu između prihvatljivog iznosa struje jednopolnog kratkog spoja i amplitude unutarnjih prenapona. Osim ravnoteže između ove dvije veličine, razvoj načina uzemljenja ide u smjeru smanjivanja potrebe za prestankom pogona pri jednopolnom kvaru i jednostavnijoj izvedbi zaštite i pronalaska kvara. Ovisno o načinu uzemljenja zvjezdišta koriste se različite relejne zaštite, pa se u uzemljenim mrežama najčešće susreće homopolarna nadstrujna zaštita, a u izoliranim mrežama zemljospojna zaštita. U tablici 2.1 navedene su glavne prednosti i nedostaci osnovnih načina uzemljenja.

Tablica 2.1: Načini uzemljenja zvjezdišta

| Način uzemljenja | Primjena | Prednost | Nedostatak |
|------------------|--|---|---|
| Izravno | Prijenosne mreže | Jednostavna detekcija jednopolnih kvarova. Nema unutrašnjih prenapona. | Veliki iznosi struje kvara. Porast potencijala uzemljivačkog sustava. Opasni naponi dodira i koraka, posebno na područjima s visokim specifičnim otporom tla. |
| Preko otpora | Distribucijske mreže. Veličina otpornika na temelju dozvoljene struje jednopolnog kratkog spoja. | Smanjeni unutarnji prenaponi. Struja jednopolnog kratkog spoja ostaje na vrijednostima koje releji prepoznaju bez većih problema. | Svaki kvar se mora isključiti. Prekidi opskrbe. |
| Preko prigušnice | Djelomična ili potpuna kompenzacija u većim distribucijskim mrežama s velikim udjelom kabela. | Prilikom jednopolnog kvara nema potrebe za isklapanjem. Kontinuiranost pogona. Samogašenje intermitirajućih kvarova. Struja kvara, naponi dodira i koraka ograničeni. | Znatan investicijski trošak. Otežano određivanje smjera kvara. Slaba osjetljivost na visokoomske kvarove, potreba za sofisticiranijom zaštitom. |
| Neuzemljeno | Manje distribucijske i industrijske SN mreže relativno malog ukupnog kapaciteta mreže. | Prilikom jednopolnog kvara nema potrebe za isklapanjem. Kontinuiranost pogona. Samogašenje luka kod intermitirajućih kvarova. | Unutrašnji prenaponi. Otežana detekcija visokoomskih kvarova. |

U prijenosnim mrežama su zvjezdišta transformatora uglavnom izravno uzemljena, dok se u distribucijskim mrežama nailazi na različita rješenja. Na početku razvoja elektroenergetskog sustava, zvjezdišta energetskih transformatora u distribucijskim mrežama su bila izolirana. U takvim sustavima sa zvjezdištem galvanski odvojenim od zemlje, spoj sa zemljom se ostvaruje preko dozemnih kapaciteta. Struja zemljospoja se zatvara preko dozemnih kapaciteta zdravih faza, a njen iznos ovisi o ukupnom kapacitetu mreže i otporu na mjestu kvara. Pri ovakvom pogonu ustanovljen je velik broj kvarova uzrokovanih unutarnjim prenaponima tijekom zem-

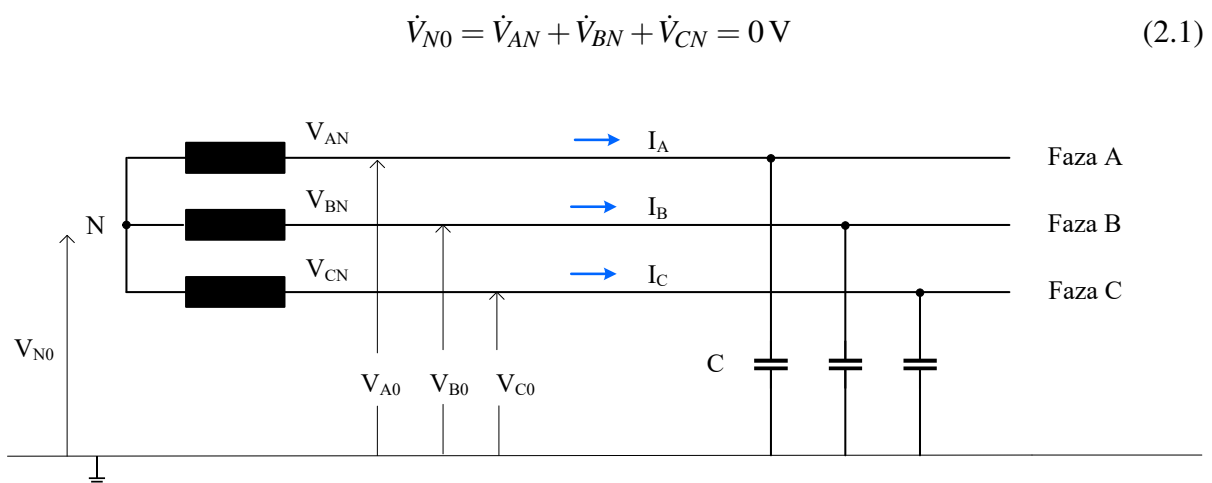
ljospoja. Postepeno širenje distribucijskih mreža i porast duljine kabljske mreže vodi povećanju ukupnog kapaciteta mreže, a time i povećanju struje zemljospoja. Budući da povećanje struje zemljospoja utječe na povećanje napona dodira i onemogućuje samostalno gašenje luka na mjestu kvara, distribucijske mreže uglavnom prelaze na neizravne načine uzemljenja zvjezdišta.

Neprekinutost pogona za vrijeme kvara je kao glavna prednost izoliranih mreža za neke mreže vrlo važna i presudna u odabiru načina uzemljenja. Tako su primjerice manje distribucijske mreže industrijskih postrojenja, termoelektrana, nuklearnih elektrana, kolektorske mreže vjetroelektrana, pogoni u rudarstvu i na platformama za vađenje nafte često neuzemljeni.

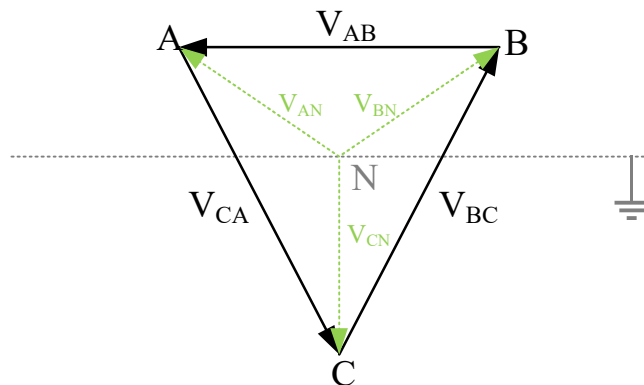
2.2 Zemljospoj u neuzemljenoj mreži

Jednopolni kratki spoj u neuzemljenim mrežama se naziva zemljospoj i statistički je najčešća vrsta kvara. Zemljospoj u neuzemljenoj mreži može biti intermitirajući ili stalni. Intermitirajući zemljospoj je često prolaznog karaktera jer dolazi do samogašenja luka koji izaziva zemljospoj. Intermitirajući kvarovi su nepredvidivi u smislu periodičnosti i mogućnosti ponovnog paljenja luka. U nekim slučajevima intermitirajući kvar s vremenom prelazi u stalni zemljospoj. Stalni zemljospoj može imati dodatan otpor prema zemlji na mjestu kvara. Kada nema dodatnog otpora na mjestu kvara, radi se o metalnom ili čvrstom zemljospoju.

Slike 2.1 i 2.2 prikazuju prilike u neuzemljenoj mreži i fazorski dijagram napona pri normalnom pogonu. U idealnom slučaju pri simetričnom opterećenju, fazni naponi su jednakih iznosa i međusobno fazno pomaknuti za 120° , a nulti napon, odnosno potencijal zvjezdišta transformatora N prema zemlji, prema jednadžbi 2.1 iznosi 0 V.

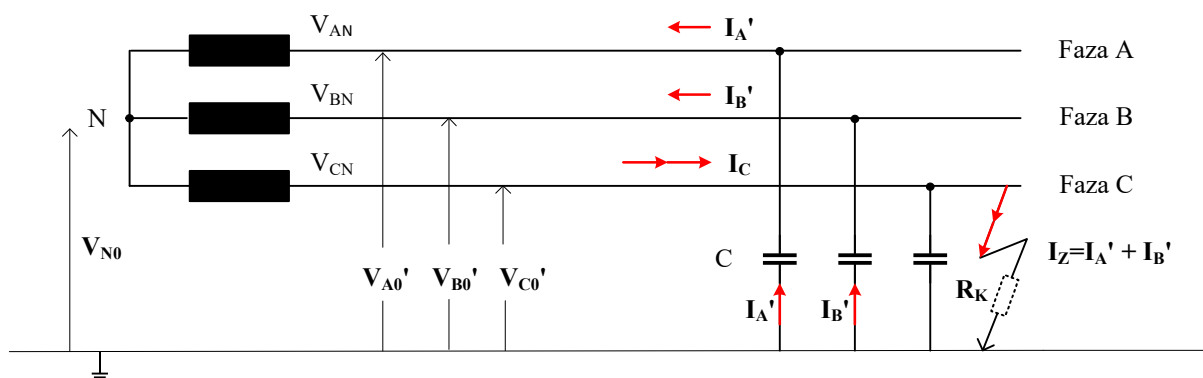


Slika 2.1: Prilike u izoliranoj mreži u normalnom pogonu



Slika 2.2: Fazorski dijagram napona u normalnom pogonu

Pri nastanku metalnog zemljospoja, potencijal zvjezdišta poprima iznos faznog napona. Struje teku preko mjesta kvara dozemnim kapacitetima zdravih faza, a naponi u zdravim fazama poprimaju linijske vrijednosti, kako je prikazano slikom 2.3 i pripadajućim fazorskim dijagramom na slici 2.4.



Slika 2.3: Prilike u izoliranoj mreži pri zemljospoju

Smjer struje u fazi u kojoj se dogodio zemljospoj je suprotan od smjera struja u zdravim fazama. Fazni naponi nakon nastanka metalnog zemljospoja opisani su jednadžbama 2.2a - 2.2c.

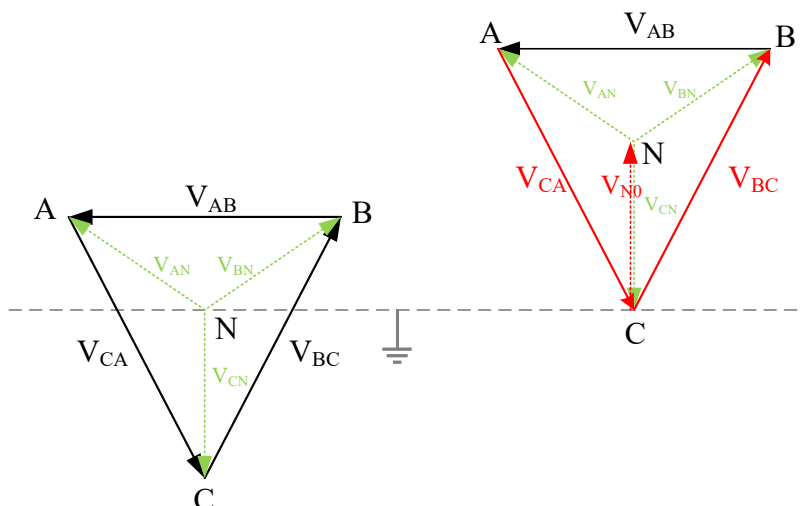
$$\dot{V}'_{A0} = \dot{V}_{AN} - \dot{V}_{CN} = \dot{V}_{AC} \quad (2.2a)$$

$$\dot{V}'_{B0} = \dot{V}_{BN} - \dot{V}_{CN} = \dot{V}_{BC} \quad (2.2b)$$

$$\dot{V}'_{C0} = \dot{V}_{CN} - \dot{V}_{N0} = 0V \quad (2.2c)$$

Fazne struje i struja zemljospoja opisane su jednadžbama 2.3a - 2.3d, pri čemu oznaka C predstavlja ukupni dozemni kapacitet jedne faze.

$$\dot{I}'_A = -j\omega C \dot{V}'_{A0} = -j\omega C (\dot{V}_{AN} - \dot{V}_{CN}) \quad (2.3a)$$



Slika 2.4: Fazorski dijagram napona pri metalnom zemljospoju

$$\dot{I}'_B = -j\omega C\dot{V}_{B0} = -j\omega C(\dot{V}_{BN} - \dot{V}_{CN}) \quad (2.3b)$$

$$\dot{I}_z = \dot{I}'_A + \dot{I}'_B = j\omega C \underbrace{(\dot{V}_{AN} + \dot{V}_{BN} + \dot{V}_{CN} - 3\dot{V}_{CN})}_0 \quad (2.3c)$$

$$\dot{I}_z = 3j\omega C\dot{V}_{CN} = -3j\omega C\dot{V}_{N0} \quad (2.3d)$$

Nulti napon i nulta struja mreže mogu se izraziti preko potencijala zvjezdišta i struje zemljospoja prema jednadžbama 2.4a i 2.4b.

$$\dot{V}_0 = \dot{V}_{N0} = \frac{1}{3}(\dot{V}'_{A0} + \dot{V}'_{B0} + \dot{V}'_{C0}) = \dot{I}_z \cdot \frac{1}{3\omega C} \quad (2.4a)$$

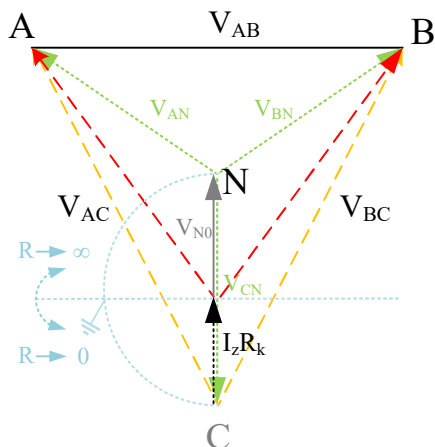
$$I_0 = \frac{1}{3}I_z = \omega C V_0 \quad (2.4b)$$

Uz zanemarenje odvoda (G) i uzdužnih impedancija (R , L), struja na mjestu kvara ovisi samo o kapacitetu mreže. Dodatan utjecaj ima otpor na mjestu kvara R_k koji, ako postoji, smanjuje amplitudu struje zemljospoja I_z , napone u zdravim fazama i potencijal zvjezdišta V_{N0} , a povećava napon faze u kojoj se dogodio kvar. Utjecaj otpora na mjestu kvara prikazan je fazorskim dijagramom na slici 2.5.

Za visoke otpore na mjestu kvara, struje i naponi u mreži se približavaju vrijednostima pri normalnom pogonu. Zato je visokoomske kvarove naročito teško detektirati. Utjecaj otpora na mjestu kvara na potencijal zvjezdišta i struju zemljospoja opisan je jednadžbama 2.5a-2.5b.

$$\frac{I_{zR_k}}{I_z} = \frac{1}{\sqrt{1 + (3\omega CR_k)^2}} \quad (2.5a)$$

$$\frac{V_0}{V_f} = \frac{1}{\sqrt{1 + (3\omega CR_k)^2}} \quad (2.5b)$$



Slika 2.5: Utjecaj otpora na mjestu kvara na fazorski dijagram napona

2.2.1 Matematički model mreže za izračun struje zemljospoja

Pri nesimetričnom kvaru kao što je zemljospoj, strujne i naponske prilike po fazama nisu jednake. Stanje mreže je nemoguće opisati kako je uobičajeno, prilikama u jednoj fazi. Za izračun strujnih i naponskih prilika pri nesimetričnim stanjima koristi se metoda simetričnih komponenti. Za trofazne mreže, koriste se tri simetrična sustava: direktni, inverzni i nulti, a preračunavanje vrijednosti iz sustava nesimetričnih fazora u sustav simetričnih komponenti i obrnuto vrši se pomoću Fortescueove matrice, odnosno njenog inverza. Za analizu struje kvara, kruga kojim se ona zatvara te izračun njenoga iznosa koriste se nadomjesne sheme direktnog, inverznog i nultog sustava [13], [14].

Slika 2.6 prikazuje jednostavan primjer radijalne neuzemljene mreže s tri odcjeka u kojoj je na odcjepu ① u fazi C nastao zemljospoj. Struja zemljospoja zatvara se preko kapaciteta zdravih faza, a njena raspodjela po odvodima je prema izrazima 2.7a - 2.7c proporcionalna kapacitetu pojedinog voda. Ukupna struja zemljospoja ovisi o ukupnom dozemnom kapacitetu mreže po fazi C_{uk} , koji je jednak zbroju dozemnih kapaciteta po fazi u pojedinim odcjepima.

$$C_{uk} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (2.6)$$

Raspodjela struje kvara po odvodima je važna jer se upravo ona mjeri i koristi u zaštitnim funkcijama. Mjerene struje po odvodima mreže zovu se rezidualne struje, odgovaraju vektorskoj sumi faznih struja i jednake su trostrukoj nultoj struji na odgovarajućemvodu. Rezidualne struje mogu se mjeriti direktno, obuhvatnim strujnim transformatorima ili sumarnim spojem tri strujna mjerna transformatora odnosno mogu se izračunavati iz izmjerenih faznih veličina.

$$\dot{I}_{res2} = j3\omega C_2 \dot{V}_0 \quad (2.7a)$$

$$\dot{I}_{res3} = j3\omega C_3 \dot{V}_0 \quad (2.7b)$$

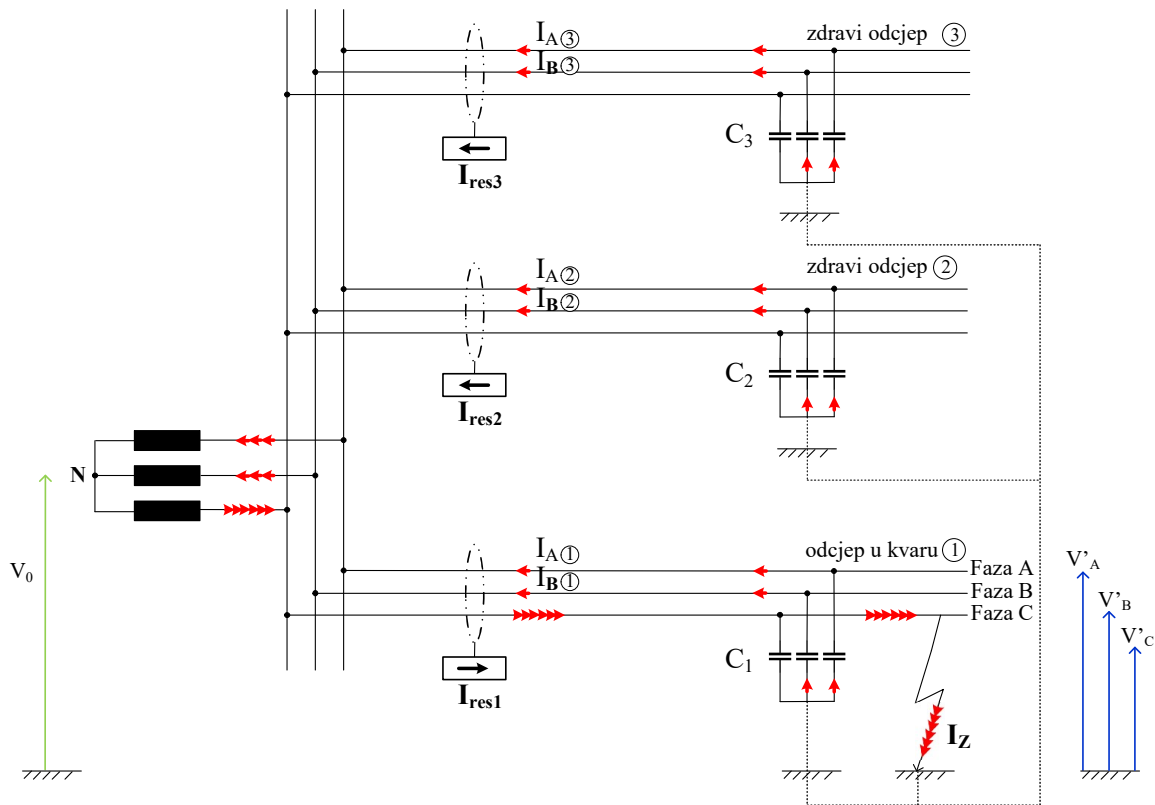
$$\dot{I}_{res,i} = j3\omega C_i \dot{V}_0 \quad (2.7c)$$

Za odcjep u kvaru, suma struja po fazama, prema izrazu 2.8a i slici 2.6, odgovara razlici ukupne struje zemljospoja I_z i faznih struja odcjeka u kvaru $I_{A(1)}$ i $I_{B(1)}$. Prema izrazima 2.8b i 2.8c, rezidualna struja odcjeka u kvaru ovisi o razlici ukupnog kapaciteta mreže i kapaciteta voda u kvaru. Općenito, izrazi za rezidualne struje zdravih odcjeka i odcjeka u kvaru dani su izrazima 2.7c i 2.8c.

$$\dot{I}_{res1} = \dot{I}_z - \dot{I}_{A(1)} - \dot{I}_{B(1)} \quad (2.8a)$$

$$\dot{I}_{res1} = j3\omega C_{uk} \dot{V}_0 - j3\omega C_1 \dot{V}_0 = j3\omega (C_{uk} - C_1) \dot{V}_0 \quad (2.8b)$$

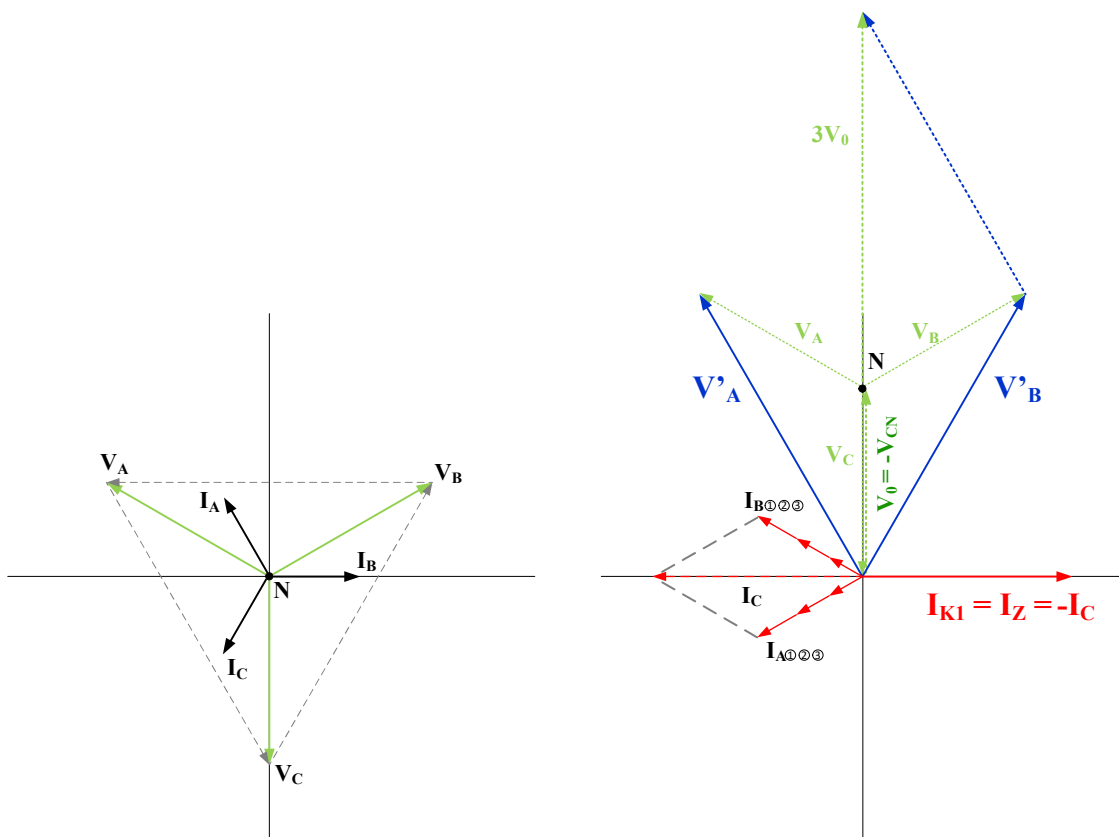
$$\dot{I}_{res,k} = j3\omega (C_{uk} - C_k) \dot{V}_0 \quad (2.8c)$$



Slika 2.6: Primjer zemljospoja u mreži s tri odcjeka

Slika 2.7 prikazuje fazorski dijagram struja i napona prije i nakon kvara, za slučaj metalnog zemljospoja. Prije nastanka zemljospoja, sustav je u ravnoteži, trokut napona simetričan, a struje induktivne. Nakon nastanka kvara, struja zemljospoja se zatvara preko dozemnih kapaciteta zdravih faza, pa su struje kapacitivnog karaktera. Rezidualna struja na vodu u kvaru je suprotnog smjera od rezidualnih struja zdravih odcjeka. Slika 2.8 prikazuje nadomjesnu shemu sastavljenu od direktnog, inverznog i nultog sustava koja se koristi za izračun struje kvara za primjer mreže na slici 2.6.

Budući da u izoliranoj mreži zvjezdite transformatora nije spojeno sa zemljom, u nultoj



Slika 2.7: Pripadajući fazorski dijagram napona i struja za primjer mreže s tri odcjepa

shemi se spoj između nultočke i povratnog voda prikazuje beskonačnom impedancijom. Zbog toga se struja kvara u nultom sustavu može zatvoriti jedino preko poprečnih grana nadomjesne sheme. Budući da je impedancija poprečnih grana puno veća od impedancije uzdužnih grana odcjepa, poprečne grane se u nadomjesnim shemama odcjepa uobičajeno zanemaruju. U ovom slučaju se u nultoj shemi ne mogu zanemariti jer čine jedini put za zatvaranje struje kvara.

U direktnoj i inverznoj nadomjesnoj shemi se struja može zatvoriti preko uzdužnih impedancija. Budući da su one puno manje od poprečne impedancije u nultoj shemi, njihov iznos možemo zanemariti, a nadomjesna shema za izračun struje kvara se pojednostavljuje i svodi na krug sa slike 2.9.

Prema pojednostavljenoj shemi vrijedi:

$$I_0 \approx \frac{E_d}{X_{C0uk}} \approx \frac{E_d}{\frac{1}{\omega C_{uk}}} = \omega C_{uk} E_d \quad (2.9)$$

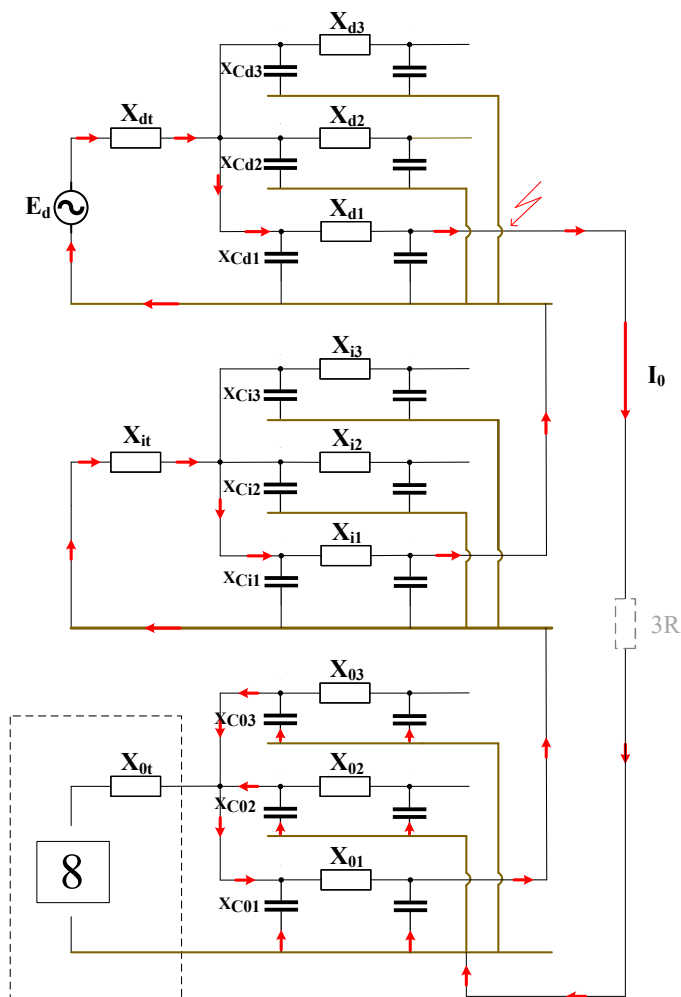
odnosno:

$$I_z \approx \frac{E_d}{\frac{1}{3} X_{C0uk}} \approx \frac{E_d}{\frac{1}{3\omega C_{uk}}} = 3\omega C_{uk} E_d \quad (2.10)$$

gdje su:

C_{uk} ukupni dozemni kapacitet mreže po fazi,

E_d nadomjesni izvor koji je jednak $\frac{cU_n}{\sqrt{(3)}} = cU_f$, gdje je c naponski faktor koji iznosi 1,0 ili 1,1, ovisno o tome računa li se maksimalna ili minimalna struje kvara.



Slika 2.8: Nadomjesna shema mreže s tri odcjepa i izoliranim zvjezdištem



Slika 2.9: Pojednostavljena nadomjesna shema mreže s izoliranim zvjezdištem

Ovako izvedeni izrazi podudaraju se s već prikazanim izrazom 2.3d i 2.4b. Uzimajući u obzir otpor na mjestu kvara prema nadomjesnoj shemi sa slike 2.9, izraz za izračun struje kvara prelazi u:

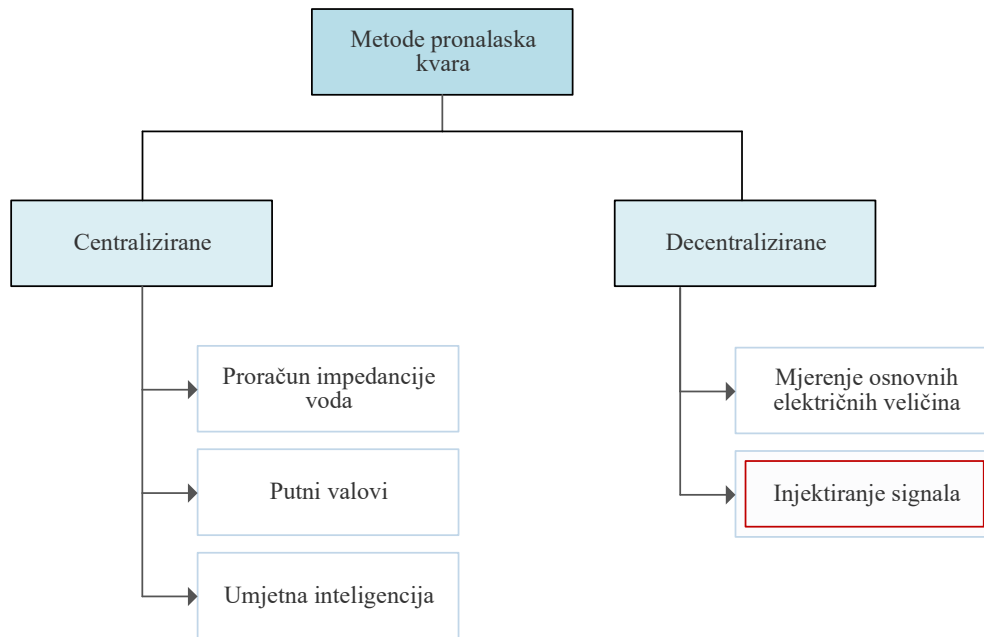
$$I_{K1} = I_z = \frac{E_d}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(3\omega C_{uk})^2}}} \quad (2.11)$$

2.3 Metode detekcije zemljospoja

S obzirom na relativno male iznose struje zemljospoja i činjenicu da je za vrijeme kvara zvjezdište na nekom potencijalu, ali je trokut faznih napona očuvan, mreža za vrijeme zemljospoja može ostati u pogonu. Prema tome, u izoliranim mrežama nema potrebe za brzim isklapanjem već se zemljospoj prvenstveno signalizira, a naknadno se dio mreže s kvarom isključuje. Iako mreža može nastaviti s pogonom, pronalaženje i eliminiranje zemljospoja je vrlo važno zbog naponskih naprezanja u zdravim fazama, gdje naponi pri metalnom zemljospoju dosežu linijske vrijednosti. Dugotrajna naponska naprezanja povećavaju vjerojatnost nastanka proboja izolacije u zdravim fazama i nastanak dvostrukog zemljospoja.

Za pronalazak zemljospoja u izoliranim mrežama ne postoji univerzalno prihvaćeno, pouzdano, komercijalno dostupno i ekonomski isplativo rješenje koje je prikladno za korištenje na svim tipovima i veličinama mreže [15]. Veliki broj istraživanja se bavi pronalaskom mjesta zemljospoja u izoliranim ili rezonantno uzemljenim većim distribucijskim mrežama [15–17]. U takvim mrežama su neprekinuta opskrba i brzo otklanjanje kvara važni zbog krajnjih korisnika mreže koji očekuju neprekinutu isporuku električne energije. Veliki broj istraživanja i problematika lociranja kvara posljedica su činjenice da je u distribucijskim mrežama impedanciju i admitanciju odcjepa teško jednoznačno unijeti kao parametar zaštitne funkcije zbog nehomogenosti odcjepa, grananja mreže i prijelaza kabel-nadzemni vod. Dodatno, postavke je potrebno prilagođavati pri svakom širenju mreže, a razgranatost mreže doprinosi većem broju izračunatih potencijalnih mjesta kvara [18]. Zato se lokatori kvara bazirani na impedanciji voda, temeljeni ili na koncentriranom modelu voda ili na valnim jednadžbama, koriste u prijenosnoj mreži. Dodatan problem u distribucijskim mrežama novije vrijeme stvaraju decentralizirani izvori koji uzrokuju dvosmjerne tokove snaga, što utječe na zaštitne funkcije [19–23]. Osnovna podjela postojećih predloženih rješenja je na centralizirana i decentralizirana (slika 2.10).

Centralizirane metode podrazumijevaju estimaciju mjesta kvara koristeći informacije s jednog mjernog mjesta. Temelje se na proračunu udaljenosti do mjesta kvara na osnovi impedancije ili admitancije voda [24–34], refleksiji putnih valova [35, 36], analizi prijelaznih pojava pri nastanku kvara [37, 38] ili, u novije vrijeme, na umjetnoj inteligenciji gdje uz neku od metoda strojnog učenja zaštitna funkcija releja nauči prepoznavati stanja u mreži, klasificirati i pozicionirati kvar [39–43]. Metode temeljene na putnim valovima teoretski daju dobre rezultate, međutim izazovne su za praktičnu primjenu zbog kompleksnosti distribucijskih mreža i potrebe za sofisticiranom mjernom opremom s velikim brzinama uzorkovanja. Metode koje podrazu-



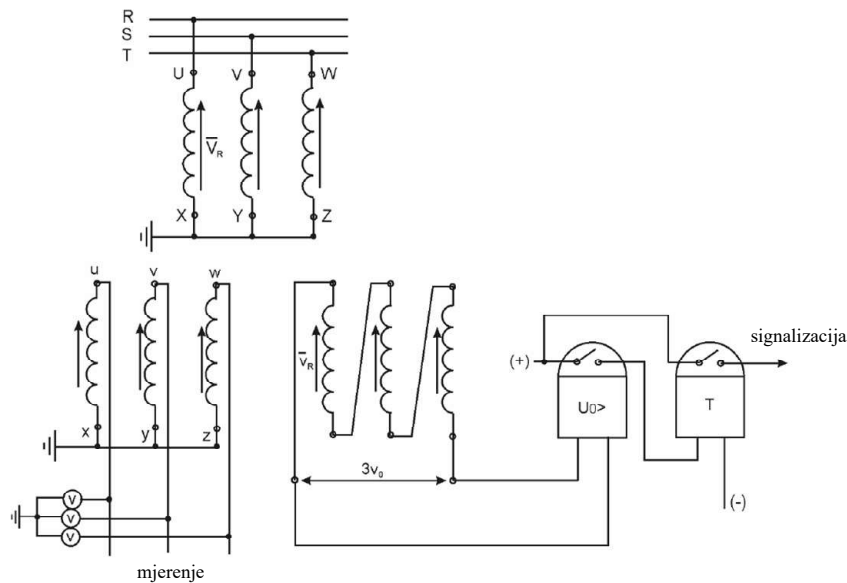
Slika 2.10: Metode pronalaska kvara

mijeavaju mjerenje i analizu prijelaznih pojava koje nastaju s kvarovima dijele jednaki problem mjerne opreme i mjerenja visokofrekvencijske pojave. Metode temeljene na umjetnoj inteligenciji su privukle puno pažnje, ali primjere stvarne primjene je teško pronaći. Iako zastupljene u istraživanjima, niti jedna od navedenih metoda ne prevladava u praksi i ne obećava buduću zastupljenost u praktičnoj primjeni. Decentralizirane metode koriste više mjernih mjesta, indikatore prolaska kvara i njihovu međusobnu komunikaciju [44–50], a baziraju se na proradi releja na temelju mjerenih fazora struja i napona, rezidualnih struja i napona ili injektiranju i detekciji posebnog signala u mreži.

2.3.1 Metode korištene u praksi

U praksi se uglavnom koriste zaštitni releji čije su funkcije temeljene na mjerenju osnovnih električnih veličina [51]. U izoliranim mrežama je široko raširena zemljospojna zaštita IEC oznake $U_0 >$, odnosno ANSI oznake 64 [52]. Za priključak zemljospojne zaštite koriste se tri naponska mjerna transformatora s po dva sekundarna namota. Primarni namoti takvih naponskih transformatora jednaki su nazivnom naponu mreže, a sekundarni namoti uobičajeno imaju nazivni napon 100 V. Tercijari grupe triju transformatora spojeni su u tzv. otvoreni trokut na kojem se mjeri trostruki nulti napon, $3V_0$, kako je prikazano na slici 2.11.

Kod metalnog zemljospoja, zbog nesimetrije uzrokovane kvarom na otvorenom trokutu naponskih transformatora mjeri se napon iznosa 100 V koji se dovodi relejnom uređaju zemljosp-

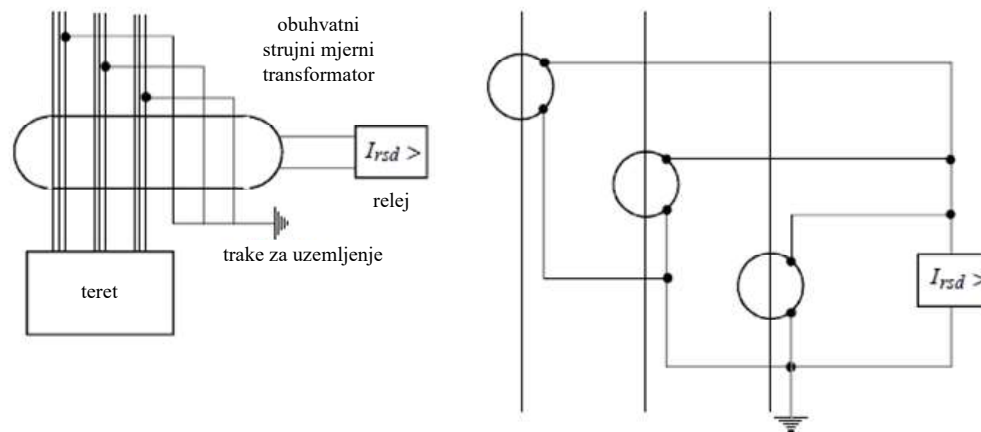


Slika 2.11: Trofazna shema spoja zemljospojne zaštite na otvoreni trokut sekundarnih namota naponskih transformatora [53]

pojne zaštite ($U_0 >$). Da bi zemljospojni relej djelovao i kod zemljospojeva s otporima na mjestu kvara, prorađni napon nadnaponskog člana zemljospojne zaštite mora biti podešen na niže vrijednosti. Kako prorađni napon ne bi bio podešen prenisko, u mreži se analiziraju nesimetrije kako bi se ustanovili iznosi nultog napona pri pogonu bez kvara. Tipično podešenje prorađnog napona zemljospojnog releja je 10 V. Da bi se izbjeglo nepotrebno signaliziranje kratkotrajnih prolaznih zemljospojeva, koristi se vremenski član s vremenskim zatezanjem podešenim uobičajeno na 3-10 s [53]. Koristeći samo zemljospojnu zaštitu, kvar se signalizira kada nulti napon prijeđe podešeni prorađni napon. Mjesto kvara ostaje nepoznato, a određivanje mjesta kvara se svodi na slijedno isklapanje odcjeka dok se ne ustanovi koji je u kvaru. Ova metoda je još uvijek vrlo zastupljena, naročito u starijim postrojenjima, traženje kvara je dugotrajno, a izaziva sklopne prenapone koji dodatno mogu utjecati na brže stvaranje sekundarnog kvara, što utječe na smanjenje pouzdanosti i raspoloživosti pogona postrojenja. U novijim mrežama se koristi uređaj za nadzor izolacije (PIM), koji neprekidno u vremenu računa ukupni otpor izolacije mreže. Pri sniženju ukupnog otpora izolacije ispod predodređene vrijednosti, signalizira se oslabljena izolacija i mogući zemljospoj. Mjesto oslabljenja izolacije ili kvara također ostaje nepoznato.

Osim klasične zemljospojne zaštite, u praksi se koristi i osjetljiva usmjerena homopolarna nadstrujna zaštita IEC oznake $I_0 >$, odnosno ANSI oznake 67N [52]. Osjetljiva usmjerena homopolarna nadstrujna zaštita koristi činjenicu da se pri zemljospoju razvija trostruka nulta komponenta struje, rezidualna struja $3I_0$, koja je različita na svakom odcjepu, te trostruka nulta komponenta napona, $3V_0$ koji je jedinstven u cijeloj mreži. Za direktno mjerenje rezidualne

struje $3I_0$ se koristi sumarni spoj triju strujnih transformatora ili obuhvatni transformator (slika 2.12). Osim direktnih mjerenja, numerički releji mogu računski doći do iznosa trostruke nulte struje iz mjerenih faznih vrijednosti struja. U normalnom pogonu obje vrijednosti $3I_0$ i $3V_0$ imaju iznos blizak nuli.



Slika 2.12: Direktno mjerenje rezidualne struje: obuhvatnim mjernim transformatorom (lijevo) i grupom od tri strujna transformatora (desno) [53]

Uređaji za mjerenje rezidualne struje nalaze se na svakom odcjepu, a pri nastanku kvara, u zdravim odcjepima s priključenom zaštitom $\vec{I}_0 >$ teku samo kapacitivne struje usmjerene od odcjepa k glavnim sabirnicama postrojenja. Na odvodu na kojem je nastao kvar, struja zemljospoja napaja mjesto kvara i ima smjer od sabirnica prema vodu, a uz kapacitivnu komponentu može sadržavati i djelatnu komponentu ako je mreža uzemljena preko otpora i dodatno zbog otpora na mjestu kvara. Ovisno o tome koja komponenta struje kvara je mjerodavna za proradu zaštite koriste se $\sin\varphi$ ili $\cos\varphi$ spoj. Kod $\sin\varphi$ spoja mjerodavna je kapacitivna komponenta struje kvara, pa se ona koristi u mrežama s izoliranim zvjezdištem gdje su struje kvara kapacitivnog karaktera. $\vec{I}_0 >$ zaštita se može podesiti vrlo osjetljivo jer istodobno koristi podatke o iznosu i kutu nultog napona i rezidualnih struja. Na temelju smjera rezidualne struje u odnosu na nulti napon i iznosa rezidualne struje donosi se zaključak je li određeni odcjep onaj na kojem je nastao kvar. Kako bi se izbjegle neželjene prorade osjetljive usmjerene homopolarne nadstrujne zaštite, proradna struja se uobičajeno postavlja iznad 12 % nazivne struje strujnih transformatora kada se koristi direktno mjerenje rezidualne struje pomoću tri strujna transformatora, odnosno proradna struja može iznositi 1 A ako se koriste obuhvatni transformatori i releji s posebnim osjetljivim ulazima [52]. Proradna struja releja mora biti veća od maksimalne struje koja se zatvara kroz neki od zdravih odcjepa, a manja od minimalne moguće struje kvarnog kabela. Prenisko podešenje proradne struje može uzrokovati nepotrebne prorade zaštite uslijed nesimetričnog opterećenja ili prijelaznih pojava u mreži, a previsoko podešenje ograničava detekciju visokoomskih kvarova. Podešenje zaštite također ovisi o uklopnom stanju mreže, budući da se struja zemljospoja povećava s brojem uklopljenih odcjepa. Osjetljiva usmjerena homopolarna

nadstrujna zaštita je najraširenije rješenje u izoliranim mrežama, ali u praksi postoje problemi s njezinom osjetljivošću i proradama. Najveća moguća osjetljivost postiže se upravo kombinacijom obuhvatnih transformatora i numeričkih releja s osjetljivim ulazima koji se moraju ugraditi na svaki vod. Ovakvo rješenje nije uvijek ekonomski opravdano, te se uglavnom planira pri revitalizaciji ili izgradnji novih postrojenja. Rezidualna struja na kvarnom odcjepu mora biti veća od navedene minimalne proradne struje (1 A), što znači da je za primjenjivost i maksimalnu osjetljivost ove zaštite potrebno imati dovoljnu duljinu mreže. Primjerice, za 5,5 kV kabelsku mrežu potrebna je minimalna ukupna duljina kabela od približno 670 m, odnosno za 10 kV mrežu od približno 370 m. Ako se radi o manjim mrežama, ova zaštita nije primjenjiva, pa se i dalje koristi klasična zemljospojna zaštita ili uređaji za nadzor izolacije. Navedeni problemi vezani uz zemljospojnu zaštitu mogu se izbjeći korištenjem metode injektiranja niskofrekvencijskog signala.

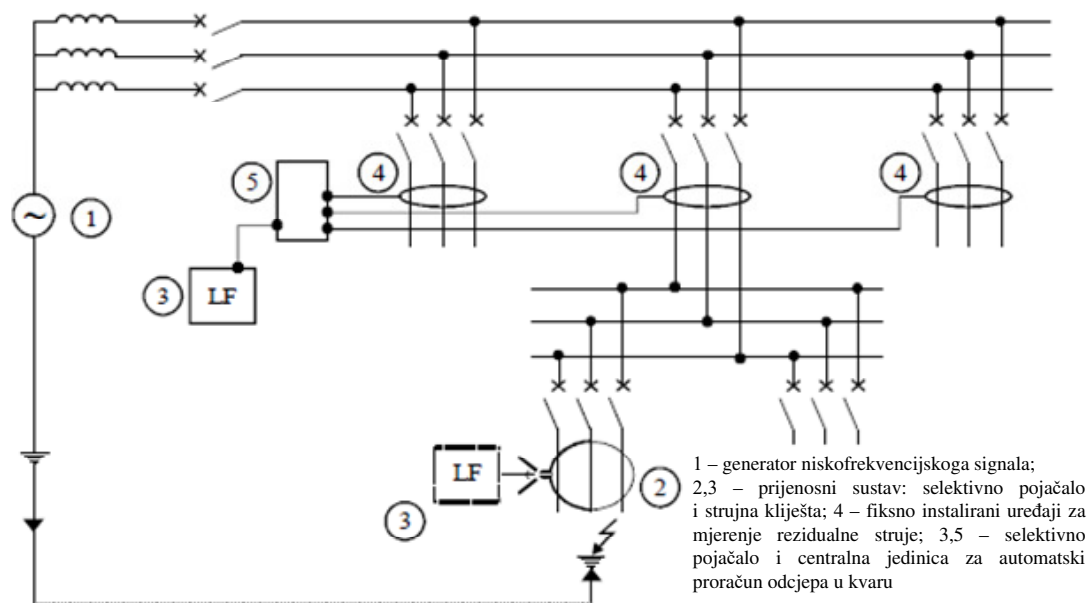
2.3.2 Metoda injektiranja signala

Metode injektiranja signala za pronalazak mjesta kvara funkcioniraju na principu praćenja injektiranog testnog signala kroz mrežu koji se zatvara na mjestu kvara (slika 2.13). Koriste se sinusni signali frekvencije različite od frekvencije mreže ili impulsi signali [6, 10]. Što je niža frekvencija injektiranog signala, veća je vjerojatnost da će se injektirani signal zatvoriti kroz mjesto kvara, jer je pri nižoj frekvenciji kapacitivna reaktancija veća pa se veći dio injektiranog signala zatvara kroz mjesto kvara nego kroz dozemne kapacitete zdravih faza. Detektiranje signala po mreži se može obavljati prijenosnim uređajem ili optimalno raspoređenim i fiksno instaliranim mjernim uređajima u mreži, kao što su posebni indikatori prolaska kvara, strujni transformatori, obuhvatni transformatori ili Rogowski svitci.

Metoda injektiranja niskofrekvencijskog signala koristi se u niskonaponskim izoliranim mrežama u kojima je moguće izravno spajanje signalnog generatora i injektiranje signala između nul-vodiča i zemlje. Komercijalna rješenja za niskonaponske mreže koja koriste ovu metodu uz automatizirano određivanje odcjepa u kvaru već su dostupna na tržištu. Na srednjenaponskoj razini, metoda injektiranja signala je u fazi istraživanja [54]. Iako nije privukla posebnu pažnju, predložena je i testirana u kompenziranim mrežama u kojima je injektiranje izvedeno preko kompenzacijske prigušnice za uzemljenje - Petersenove prigušnice [55–57].

U [55] je opisano injektiranje sinusoidalnog signala frekvencije 183 Hz, amplitude 10 A, u jednu fazu preko pomoćnog namota Petersenove prigušnice. Eksperimentalni test je napravljen u svrhu testiranja prototipnog senzora za detekciju injektiranog 183 Hz signala. Detekcija je uspješno provedena, međutim nisu istražena potencijalna ograničenja ove metode vezana uz injektiranje preko kompenzacijske prigušnice. Ovaj nedostatak je naglašen od strane autora uz predviđenu potrebu za daljnjim istraživanjem.

U [56] je opisano injektiranje signala u kompenziranu 20 kV mrežu. Injektiran je signal koji



Slika 2.13: Princip injektiranja i praćenja signala u mreži [6]

se sastoji od periodičnih pravokutnih impulsa koji se jednostavno proizvodi uključivanjem i isključivanjem kondenzatora paralelno spojenog s Petersenovom prigušnicom, a odcjep u kvaru određuje se na temelju efektivne vrijednosti rezidualnih struja po odcjepima. Nedostaci ove metode navedeni od strane autora su primjerice da mreža mora biti prekompenzirana, kvar mora biti stabilan i trajati preko 25 sekundi da bi impulsi bili detektirani zbog punjenja i pražnjenja kapaciteta odcjepa i vremenske konstante nabijanja, a ograničena je na primjenu u malim mrežama jer se namjerna prekompenzacija može izvršiti samo do određene veličine mreže. Nakon rada opisanog u [56], ista grupa autora je razvila sličnu metodu opisanu u [57]. U ovom slučaju impulsi injektiranog signala su proizvedeni posebnim impulsnim generatorom koji je tiristorski kontroliran. Proizvodnja signala s bržim impulsima omogućila je detektiranje kvarova do 400Ω , a u kombinaciji s informacijom o nultom naponu i do $10 \text{ k}\Omega$ [57].

U [58] je predloženo injektiranje signala frekvencije 80 Hz, amplitude 5 A, koristeći naponski mjerni transformator. Opisano injektiranje vrši se samo u fazu u kojoj je kvar nastao, a radi se o mreži čije je zvjezdište indirektno uzemljeno (preko otpora ili kompenzacijske prigušnice, što nije posebno naglašeno u radu). Metoda je korištena u kombinaciji s proračunom udaljenosti kvara koristeći poznatu duljinu i kapacitet voda te fazore napona i struje na početku odcjepa. Proračun udaljenosti kvara je potvrđen na simulacijskom modelu, no praktična ograničenja i karakteristike naponskog transformatora nisu spomenuti pri modeliranju.

Metoda injektiranja signala u izoliranu mrežu u literaturi nije zastupljena, a u [15] i [26] autori spominju kako je metoda injektiranja signala ograničena na indirektno uzemljene mreže te da u izoliranim mrežama nije primjenjiva. U [59] je predloženo injektiranje nultih struja preko strujnih transformatora, a metoda je primjenjiva i u kompenziranim i u izoliranim mre-

žama. Valni oblici nultih struja modulirani su na sekundarima strujnih transformatora koristeći različite frekvencije. Takozvani "modulirani nosivi signal nulte struje" injektira se u mrežu i prenosi se do transformatorske stanice u kojoj je uređaj za filtriranje i detekciju signala specifične frekvencije. Simulacije i laboratorijski testovi potvrdili su ispravnost predložene metode. Međutim, različite visoke frekvencije za modulaciju signala na različitim strujnim transformatorima čine se prilično složenima za implementaciju.

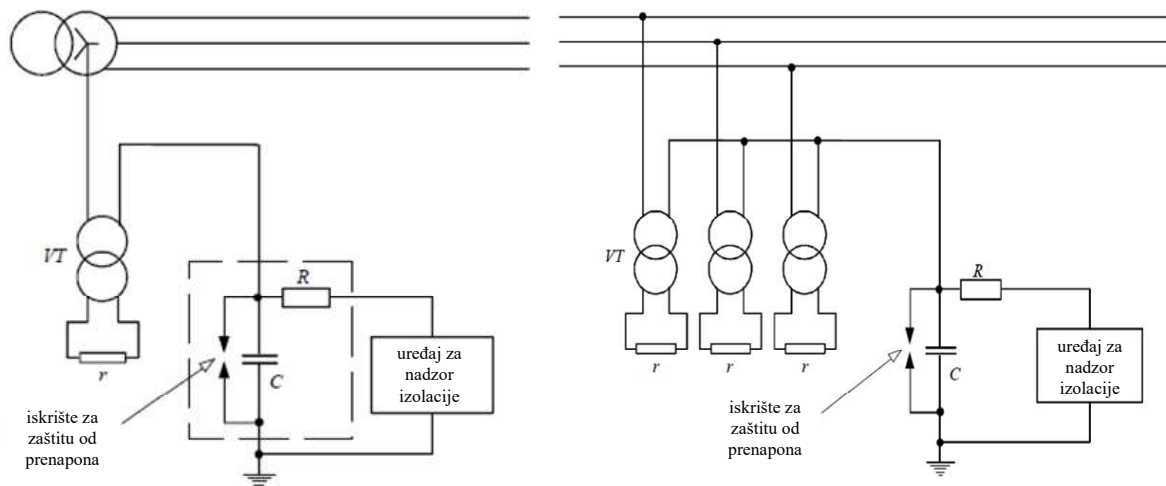
U [60] je predložena metoda detekcije mjesta kvara u 20 kV distribucijskoj mreži koristeći injektiranje impulsnog naponskog signala. Uređaj za injektiranje proizvodi i injektira impuls svake sekunde u svaku fazu, te istovremeno analizira reflektirane signale. Kada dođe do kvara, pojavljuje se novi diskontinuitet što uzrokuje promjenu reflektiranog signala. Usporedbom signala prije i nakon kvara se donosi zaključak o nastanku kvara. Iz rezultata usporedbe, prema vremenskoj razlici u signalima se estimira udaljenost kvara, a nadalje se rezultat vremenske razlike i udaljenosti kvara analizira koristeći algoritam baziran na neuronskoj mreži, te je konačni rezultat poboljšana procjena udaljenosti do mjesta kvara. Iako se koristi metoda injektiranja, u ovom članku je predstavljena stvarna 20 kV mreža uzemljena preko otpora te su dani rezultati simulacija. Konkretna način injektiranja i mjerenja reflektiranog signala nije opisan.

2.3.3 Metoda injektiranja signala u srednjenaponskoj izoliranoj mreži

S obzirom na nedostatke osjetljive usmjerene homopolarne nadstrujne zaštite koja nije primjenjiva u vrlo malim mrežama, a u većim mrežama je njezina primjena skupa, odnosno s obzirom na nedostatke klasične zemljospojne zaštite koja samo signalizira kvar, u izoliranim mrežama se može primijeniti metoda injektiranja signala.

Problem spajanja signalnog generatora na mrežu srednjeg napona moguće je riješiti istim pristupom kojim se u mreže srednjeg napona spajaju uređaji za nadzor izolacije. Uređaj za nadzor izolacije na mrežu se spaja indirektno, između zemlje i primarnih namota grupe od tri jednopolno izolirana mjerna naponska transformatora, kako je prikazano na slici 2.14. Uređaj za nadzor izolacije radi na principu injektiranja istosmjernog signala koji se zatvara kroz odvođe u mreži. Na temelju napona generiranog uređajem za nadzor izolacije i istosmjerne struje računa se ukupni otpor izolacije mreže. Kapacitet spojen paralelno uređaju za nadzor izolacije služi za sprječavanje prolaska istosmjerne struje prema zemlji, a otpor spojen serijski s uređajem ograničava napon na kojeg je spojen sam uređaj. Iskrište u krugu služi za zaštitu od prenapona. Proradom iskrišta uslijed prenapona, premoštava se i štiti uređaj za nadzor izolacije.

Jednak princip injektiranja signala preko primarnih namota grupe od tri naponska transformatora može se iskoristiti za injektiranje izmjeničnog sinusoidalnog ili istosmjernog signala čiju je putanju moguće pratiti u mreži do odcjepa na kojem je nastao kvar. Za provođenje injektiranja na ovaj način, kritičan element je naponski mjerni transformator. Kako se preko primarnih namota obavlja injektiranje, potrebno je provjeriti efekt injektiranja signala preko



Slika 2.14: Shema spoja uređaja za nadzor izolacije u uzemljenim (lijevo) i neuzemljenim (desno) mrežama [6]

primarnih namota. Istovremeni zemljospoj i injekcija signala ne bi smjeli izazvati nedozvoljene struje u namotima transformatora niti izazvati dugotrajno zasićenje jezgre transformatora.

Provođenje ove metode zahtijeva naponske transformatore koji ionako moraju postojati u mrežama, ali zahtijeva i korištenje generatora signala te senzore za detekciju injektiranog signala koji mogu biti prijenosni ili trajno postavljeni po odcjepima u mreži. Dostupnost i tip opreme za detekciju signala uvjetovat će tip injektiranog signala (izmjenični, istosmjerni) odnosno njegove karakteristike (frekvencija, amplituda).

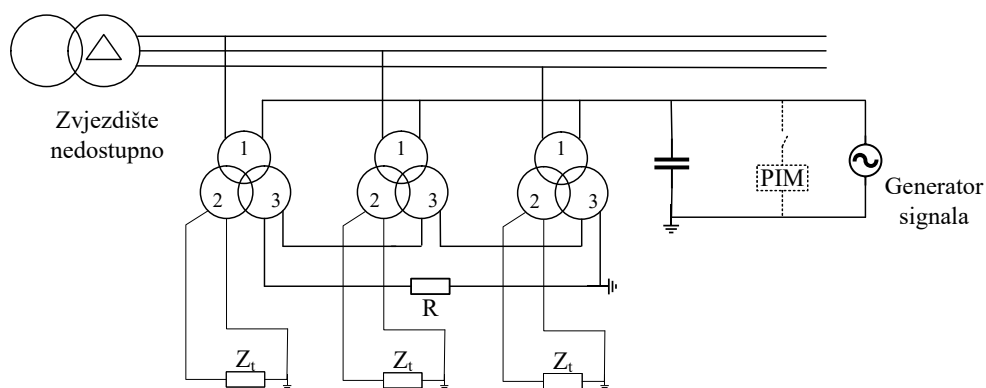
Uz ekonomičniji pristup koji eliminira potrebu za numeričkim relejima na svakom odcjepu, pri metodi injekcije signala se očekuje prednost pri pronalasku visokoomskih kvarova. Naime, injektiranom signalu je moguće podizati amplitudu kako bi se olakšalo njegovo praćenje u mreži. Klasične zaštitne funkcije koriste 50 Hz komponentu nultih struja i napona za odluku o djelovanju, koje ovise o naponima, strujama, teretima i stanju mreže te se na njim ne može utjecati.

Za provjeru principa rada metode injektiranja signala modeliran je krug za injektiranje, a istovremeni zemljospoj i injektiranje signala testirani su na različitim modelima neuzemljene mreže, što je prikazano u narednim poglavljima.

Poglavlje 3

Model kruga za injektiranje signala

Za injektiranje signala potrebno je modelirati krug sa slike 3.1. Krug za injektiranje sadrži tri jednopolno izolirana naponska mjerna transformatora. Mjerni transformatori se, osim u posebnim izvedbama, sastoje od jezgre izrađene od magnetskog materijala te od primarnog i jednog ili više sekundarnih namota koji su međusobno odvojeni i izolirani, ovisno o visini napona u mjerenom krugu.



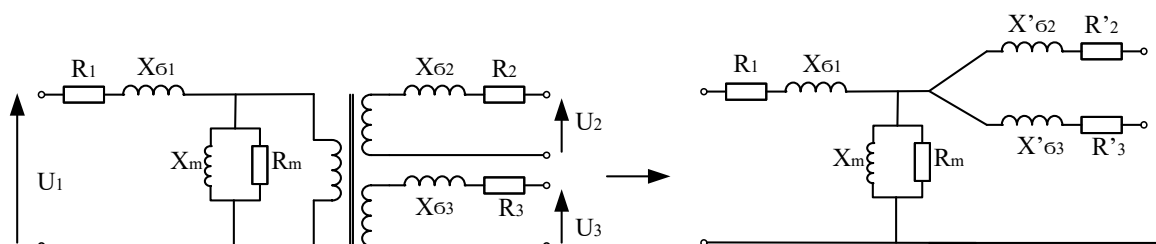
Slika 3.1: Shema kruga za injektiranje signala preko grupe od tri naponska transformatora

Primarni namoti grupe od tri naponska transformatora su jednim krajem priključeni na faze trofaznog sustava, preostali krajevi se spajaju u jednu točku (zvezdište). U ovom slučaju, za potrebe injektiranja signala, između zemlje i zvezdišta primarnih namota se spaja generator signala. Sekundarni namoti služe za spajanje tereta Z_t , odnosno mjerne ili zaštitne opreme. Jednopolno izolirani naponski transformatori predviđeni za rad u izoliranoj mreži, uz primarni i sekundarni namot, redovito imaju i pomoćni namot nazivnog napona 100/3 V. U otvoreni trokut pomoćnih namota se spaja otpornik koji služi za sprječavanje ferorezonancije koja se u izoliranim mrežama srednjeg napona često događa potaknuta prolaznim zemljospojevima ili strujama uklapanja naponskih transformatora. Razlog tome je što fazni naponi nisu čvrsti te je dovoljno da prolazni zemljospoj ili nejednake struje uklapanja zatitraju potencijal izolirane mreže prema zemlji pa da se dogodi ferorezonancija [61–67]. Budući da je u normalnom pogonu napon na

otvorenom trokutu jednak nuli, otpornik ne opterećuje naponske transformatore i ne utječe na točnost, sve dok ne dođe do translacije trokuta napona prema zemlji. Iako nije svaki izolirani sustav sklon ferorezonanciji, već to ovisi o krivulji magnetiziranja naponskih transformatora i o kapacitetu mreže prema zemlji, nije ekonomično uvijek zasebno istraživati je li neko postrojenje u određenoj konfiguraciji sklono ferorezonanciji. Jednostavnije je u otvoreni trokut pomoćnih namota grupe od tri jednopolno izolirana naponska transformatora uvijek ugraditi otpornik. Ferorezonancija prestaje sama odnosno traje do isključenja zbog dojava lažnog zemljospoja ili do uništenja većine mjernih transformatora priključenih na iste sabirnice.

3.1 Model induktivnog naponskog transformatora

Nadomjesna shema transformatora koja se koristi pri modeliranju prikazana je na slici 3.2 [68, 69]. To je jednopolna T nadomjesna shema realnog induktivnog naponskog transformatora, na kojoj elementi R_1 , R_2 i R_3 predstavljaju omske otpore primarnog i sekundarnih namota, a $X_{\sigma 1}$, $X_{\sigma 2}$ i $X_{\sigma 3}$ njihove rasipne reaktancije koje opisuju utjecaj rasipnih magnetskih tokova.



Slika 3.2: Jednopolna nadomjesna shema induktivnog naponskog transformatora

Reaktancija X_m predstavlja glavni magnetski tok, a gubici histereze i vrtložnih struja u jezgri se nadomještaju otporom R_m . Oba elementa spojena su paralelno idealnom transformatoru na slici 3.2 lijevo. S obzirom na vanjske priključnice, u shemi se neće ništa promijeniti, ako se izostavi element idealnog transformatora uz reduciranje svih vrijednosti na primjerice sekundarnu stranu (slika 3.2 desno).

Napon induciran glavnim tokom koji je zajednički primarnom, sekundarnom i tercijarnom namotu, prema zakonu elektromagnetske indukcije, uz zanemarenje Lenzovog pravila, iznosi:

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.1)$$

Ako je magnetski tok sinusna funkcija $\phi = \phi_m \sin(\omega t)$, inducirani napon je kosinusna funkcija vremena:

$$e = \omega N \phi_m \cos(\omega t), \quad (3.2)$$

a efektivna vrijednost induciranog napona iznosi:

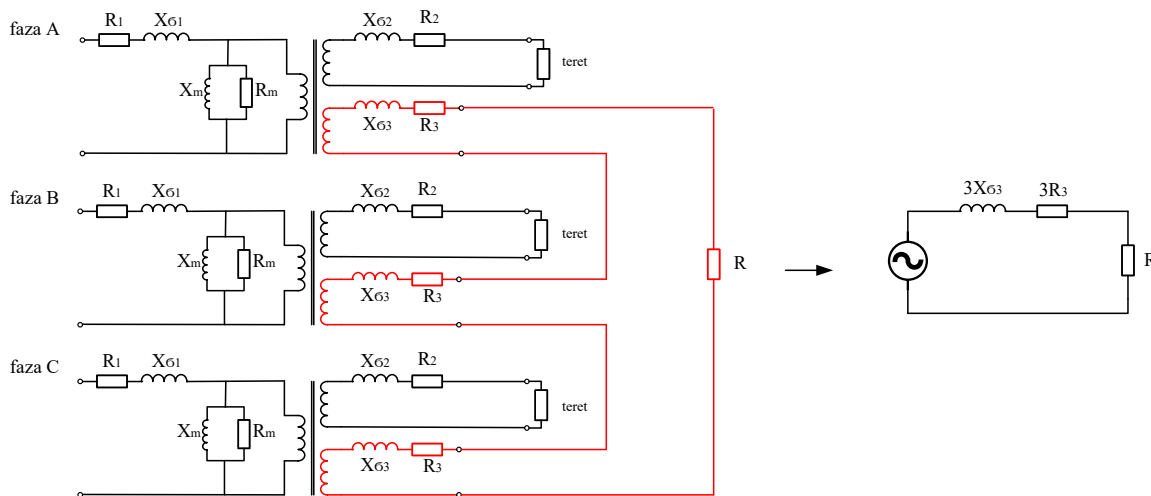
$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N \phi_m = \pi \sqrt{2} f N \phi_m = 4,44 f N \phi_m \quad (3.3)$$

Ako se prema jednadžbi 3.3 izrazi vršna vrijednost magnetskog toka ϕ_m :

$$\phi_m = \frac{E}{4,44 f N} \quad (3.4)$$

jasno je da će magnetski tok u jezgri biti proporcionalan naponu, a obrnuto proporcionalan njegovoj frekvenciji. Pri injektiranju sinusoidalnog signala prema tome treba odabrati takve parametre da magnetski tok u jezgri ne dovede jezgru u zasićenje. Za praćenje injektiranog signala u mreži, povoljnija je viša amplituda napona na generatoru signala, a za veću vjerojatnost zatvaranja injektiranog signala kroz mjesto kvara, povoljnija je niža frekvencija.

Koristeći nadomjesne sheme transformatora, prema shemi na slici 3.1, potrebno je modelirati grupu od tri jednopolno izolirana transformatora koji imaju spojen otpornik u otvoreni trokut pomoćnih namota. Shema grupe od tri naponska transformatora koju je potrebno modelirati za proračun u EMTP-u je prikazana je na slici 3.3, na kojoj je crvenom linijom označen spoj pomoćnih namota, a s desne strane ekvivalentna shema pomoćnih namota spojenih u trokut.



Slika 3.3: Nadomjesna shema grupe od tri jednopolno izolirana naponska transformatora s otpornikom spojenim u otvoreni trokut pomoćnih namota

Za modeliranje induktivnih naponskih transformatora su korišteni dostupni podaci standardnog 10,5 kV induktivnog naponskog mjernog transformatora tipa 4VPA1-12, proizvođača Končar - Mjerni transformatori. U oznaci mjernog transformatora, broj 4 označava tip konstruktivne izvedbe, V naponski transformator, P potporni transformator, A izolaciju epoksidnom smolom (araldit), 1 jednopolnu izolaciju, a 12 stupanj izolacije. Podaci o transformatoru dani su u tablici 3.1.

U uvjetima zemljospoja u jednoj fazi suma napona u otvorenom trokutu pomoćnih namota jednaka je trostrukom nazivnom naponu i iznosi 100 V. Taj se napon uobičajeno koristi za indikaciju zemljospoja. Budući da izolirana mreža pri zemljospoju može nastaviti s pogonom, jednopolno izolirani naponski transformatori za izoliranu mrežu se dimenzioniraju za naponski faktor $V_f = 1,9/8$ sati. Oni se tijekom 8 sati, opterećeni nazivnim teretom i priključeni na 1,9 p.u. nazivnog napona ne smiju pregrijati. Zato je nazivna indukcija takvih naponskih transformatora relativno niska i kreće se oko 0,8 T.

Tablica 3.1: Podaci o induktivnom naponskom transformatoru

| | U_{nRMS} | S_n | I_{nRMS} | R | L''_{σ} | X''_{σ} | Nazivna sekundarna trajna termička struja |
|----------|--------------------|-------|------------|-------------------|----------------|-----------------|---|
| Primar | $10500/\sqrt{3}$ V | | 8,248 mA | 1753,12 Ω | | | |
| Sekundar | $100/\sqrt{3}$ V | 50 VA | 8,866 A | 126,6 m Ω | 0,75 mH | 235,82 Ω | 6 A |
| Tercijar | $100/3$ V | 25 VA | 0,75 A | 166,26 m Ω | 0,36 mH | 111,71 Ω | 4 A |

3.2 Krivulja magnetiziranja

U modelu transformatora krivulja magnetiziranja je prikazana nelinearnim induktivitetom u poprečnoj grani. Krivulje magnetiziranja dostupne od proizvođača su uglavnom u obliku ovisnosti efektivnog napona o efektivnom iznosu struje. U modelima transformatora je u model nelinearnog induktiviteta potrebno unijeti ovisnost magnetskog toka o struji. U programskim paketima za simulaciju prijelaznih pojava u vremenskoj domeni, pretvorba $U_{rms} - I_{rms}$ krivulje koja sadrži efektivne vrijednosti struja i napona u $\phi - i$ krivulju koja predstavlja međusobnu ovisnost trenutnih vrijednosti magnetskog toka i struje provodi se uz određena pojednostavljenja:

- gubitci zbog histereze i vrtložnih struja se zanemaruju,
- otpor namota se zanemaruje i
- $\phi - i$ krivulja se generira točku po točku na takvim udaljenostima da je prihvatljivo koristiti linearnu interpolaciju između susjednih točaka,
- $\phi - i$ krivulja je skup točaka $\phi_m - i_m$ koje odgovaraju valnim oblicima iz kojih su izmjerene vrijednosti $U_{rms} - I_{rms}$.

Za pretvorbu je nužno pretpostaviti da je magnetski tok u jezgri promjenjiv prema sinusnoj funkciji osnovne frekvencije, jer je krivulja magnetiziranja od strane proizvođača najvjerojatnije izmjerena pri čistom sinusnom naponu [70]. Napon je uz zanemarenje primarne impedancije jednak induciranom naponu odnosno derivaciji magnetskog toka u vremenu:

$$u = e = \frac{d\phi}{dt} \quad (3.5)$$

Prema tome i magnetski tok mora biti sinusoidalan, a pretvorba vrijednosti napona U_{rms} u odgovarajuću vršnu vrijednost magnetskog toka se vrši prema:

$$\phi_m = \frac{U_{rms}\sqrt{2}}{\omega} \quad (3.6)$$

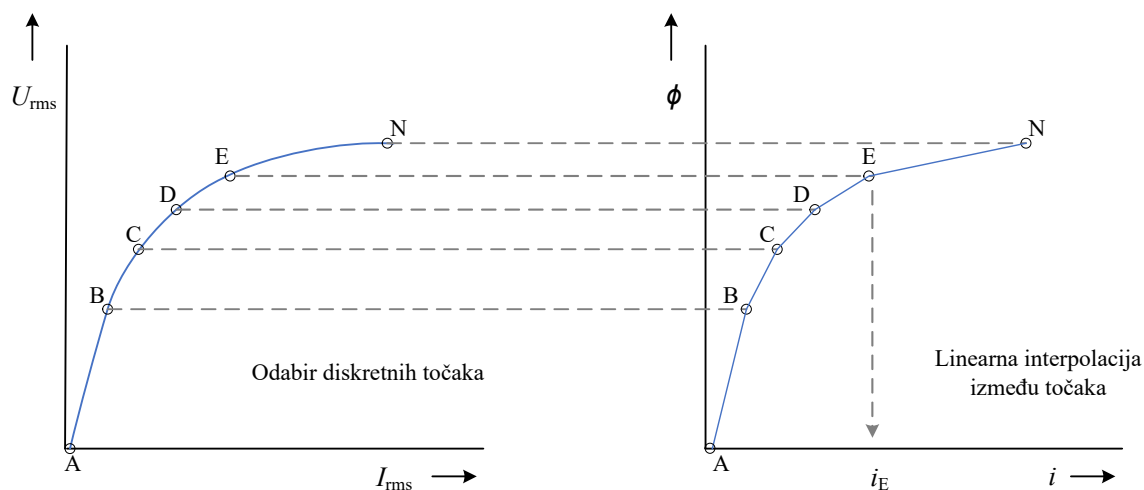
Zbog nelinearnosti krivulje magnetiziranja, sinusni magnetski tok u nelinearnom području neće biti stvoren sinusnom strujom, već će ona biti nesinusna s izraženim neparnim harmoničima. Za mjerene, efektivne vrijednosti struje, ne može se unaprijed znati je li valni oblik iz kojeg je izmjerena zahvatio nelinearno područje.

Stoga je određivanje vršnih vrijednosti struja i_m koje odgovaraju vršnim vrijednostima magnetskog toka ϕ_m nešto složenije, osim u linearnom dijelu krivulje (dio od točke A do točke B na slici 3.4) za kojeg vrijedi izraz:

$$i_B = i_{rms-B}\sqrt{2} \quad (3.7)$$

Daljnje točke, i_C, i_D, \dots , u području koljena krivulje i zasićenja određuju se rekursivnim postupkom. Pretpostavlja se da je točka i_E sljedeća točka i pretpostavlja se da sinusoidalni tok u toj točki ima vršnu vrijednost ϕ_E :

$$\phi = \phi_E \sin(\omega t) \quad (3.8)$$



Slika 3.4: Rekursivni postupak pretvorbe $U_{rms} - I_{rms}$ krivulje u $\phi - i$ krivulju

U svakom linearnom segmentu krivulje (A-B, B-C, C-D), struja i je poznata i kao funkcija toka ϕ , odnosno prema Amperovom zakonu i jednadžbi 3.8 kao funkcija vremena. Samo posljednji segment ostaje nedefiniran jer je iznos struje u točki E, i_E , nepoznat. Prema tome je

Tablica 3.2: U_{rms} - I_{rms} i ϕ - i karakteristika induktivnog naponskog transformatora izračunate za primarnu stranu

| Točke s U_{rms} - I_{rms} krivulje | | Izračunate točke ϕ - i krivulje | |
|--|----------------|--|------------|
| U_{rms} (V) | I_{rms} (mA) | ϕ_m (Wb) | i_m (mA) |
| 1000 | 3 | 4,5 | 4,2 |
| 2000 | 5 | 9,0 | 6,7 |
| 11000 | 23 | 49,5 | 32,4 |
| 12000 | 26,5 | 54,0 | 41,1 |
| 12100 | 27 | 54,5 | 42,8 |
| 12200 | 28 | 54,9 | 49,3 |
| 12300 | 29 | 55,4 | 51,6 |
| 12400 | 30 | 55,8 | 54,1 |
| 12500 | 31 | 56,3 | 56,2 |
| 12600 | 34 | 56,7 | 77,2 |
| 12700 | 38 | 57,2 | 90,9 |
| 12800 | 55 | 57,6 | 189,4 |
| 12900 | 80 | 58,1 | 272,6 |
| 13000 | 100 | 58,5 | 304,5 |
| 13100 | 130 | 59,0 | 420,4 |
| 13300 | 350 | 59,9 | 1274,4 |

potrebno odrediti struju u posljednjem segmentu, $i = f(t, i_E)$. Ako se integral kojim se određuje efektivna vrijednost struje

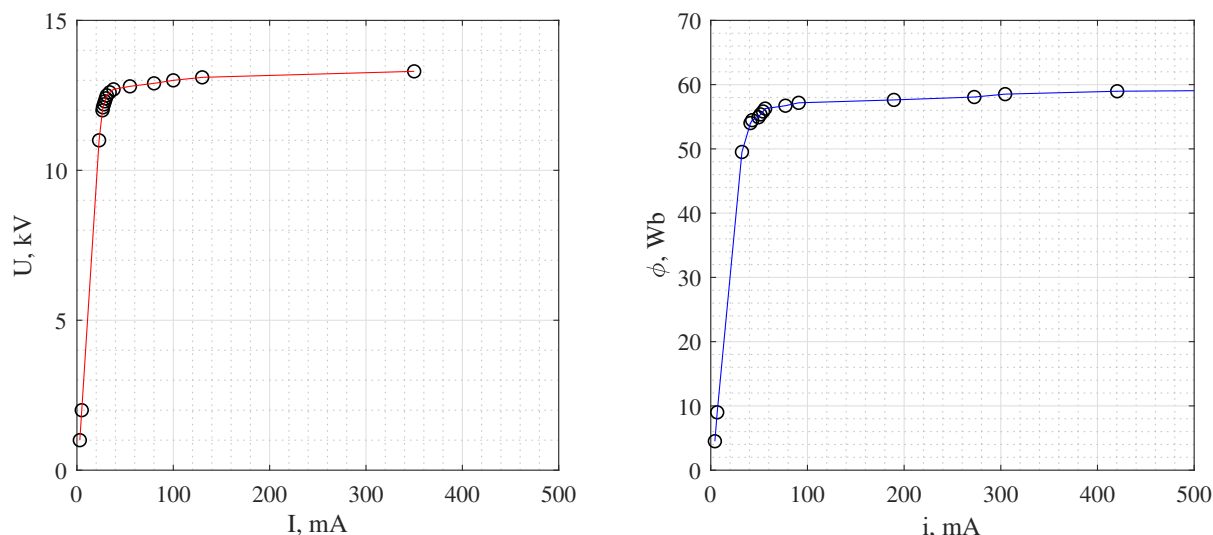
$$F = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} i^2 d(\omega t) \quad (3.9)$$

računa za svaki segment, rezultat će sadržavati i_E kao nepoznatu varijablu. Koristeći trapezno pravilo integracije s korakom integracije 1° , integral F poprima oblik:

$$F = a + bi_E + c(i_E)^2, \quad (3.10)$$

gdje su a , b i c poznati. Budući da je integral F prema definiciji jednak $(I_{rms-e})^2$, iz jednadžbe 3.10 se može izračunati i_E . Ovakav proračun se rekurzivno ponavlja dok se ne pronađe posljednja točka i_N .

Točke U_{rms} - I_{rms} krivulje magnetiziranja dobivene od proizvođača i preračunate točke ϕ - i krivulje za razmatrani naponski transformator dane su u tablici 3.2, a grafički su prikazane na slici 3.5.



Slika 3.5: Krivulja magnetiziranja za naponski mjerni transformator 4VPA1-12

3.3 Dimenzioniranje otpornika za sprječavanje ferorezonancije

Za dimenzioniranje otpornika u otvorenom trokutu postoje dva kriterija. Prvi kriterij je da pri trajnom zemljospoju, kada je u otvorenom trokutu pomoćnih namota napon od 100 V, struja ne smije biti veća od trajne termičke struje pomoćnog namota. U Končarevim epoksidnim naponskim transformatorima trajna termička struja pomoćnih namota iznosi 3,5 A. Prema tom kriteriju iznos otpora ne smije biti manji od $100/3,5 = 28,6 \Omega$. Drugi kriterij slijedi iz uvjeta da energiju koja bi sustav mogla dovesti do ferorezonancije treba što prije potrošiti. Nakon prolaznog zemljospoja ili uklopa transformatora u sustav je dovedena poticajna energija koja može izazvati ferorezonanciju, a troši se na spomenutom otporniku i tako izbjegava dovođenje mreže u stanje ferorezonancije. Gubici u grupi naponskih transformatora zbog zatvaranja otvorenog trokuta pomoćnih namota preko otpora, prema slici 3.3 su određeni izrazom:

$$P_g = I^2 \cdot R_{uk} = \frac{U_{\Delta}^2}{Z^2} \cdot R_{uk} = \frac{U_{\Delta}^2 \cdot (R + 3R_3)}{|(R + 3R_3) + j3\omega L_{3\sigma}|^2} = \frac{U_{\Delta}^2 \cdot (R + 3R_3)}{(R + 3R_3)^2 + (3\omega L_{3\sigma})^2}, \quad (3.11)$$

gdje je:

U_{Δ} napon otvorenog trokuta pomoćnih namota,

R_3 radni otpor tercijarnog namota,

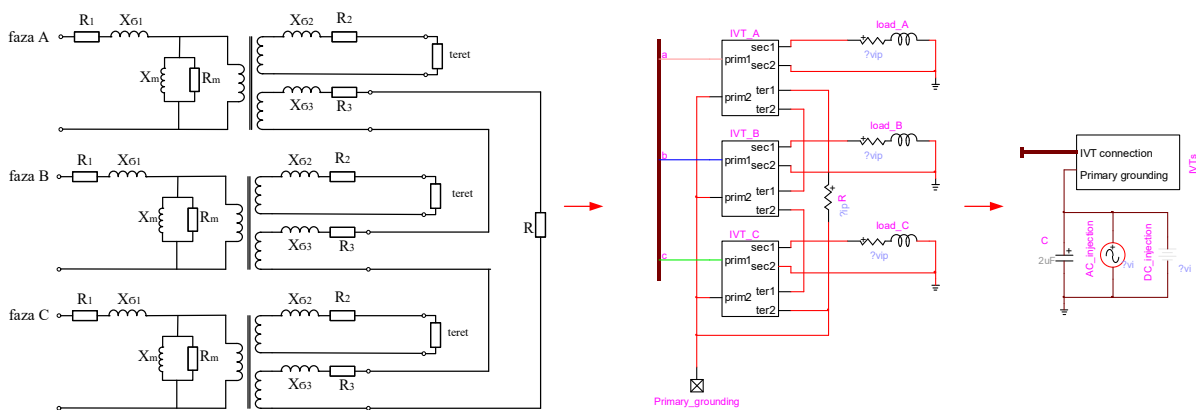
$L_{3\sigma}$ rasipni induktivitet naponskog transformatora sa strane pomoćnog namota.

Izraz 3.11 postiže maksimum za:

$$R = 3\omega L_{3\sigma} - 3R_3 \quad (3.12)$$

Prema drugom kriteriju i prema izrazu 3.12, energija poticaja bi se najbrže trošila kada bi otpor R bio jednak nuli, odnosno kada bi se trokut pomoćnog namota direktno zatvorio. Prema tome pri dimenzioniranju otpornika za sprječavanje ferorezonancije koristi se prvi kriterij. Uobičajeno je snagu tog otpornika izraziti u vatima koji na njemu nastaju pri naponu od 100 V koji je prisutan u otvorenom trokutu tijekom zemljospoja. Prema [71], za efikasno prigušenje ferorezonancije dovoljan je otpor na kojem pri 100 V nastaje 25 W po kilogramu jezgre. Mase jezgara ovakvih naponskih transformatora ne prelaze 13 kg, pa je ispravno modelirati otpornik za utrošak 325 W pri 100 V. Tome odgovara otpor od 30Ω uz poštivanje uvjeta da nije prijeđena trajna termička struja pomoćnih namota.

Konačno, opisani model triju jednopolno izoliranih naponskih mjernih transformatora koji sadrži krivulju magnetiziranja i otpornik za sprječavanje ferorezonancije, modeliran je u EMTP-u i prikazan na slici 3.6.



Slika 3.6: Model grupe od tri jednopolno izolirana naponska transformatora u EMTP-u

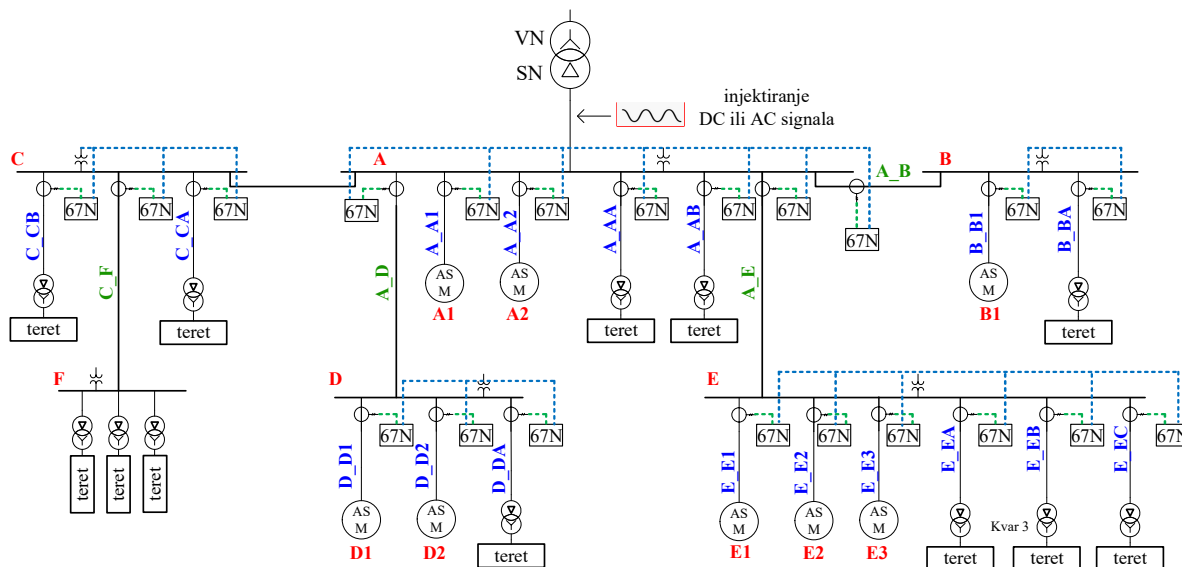
Poglavlje 4

Simulacijska provjera metode injektiranja u srednjenaponskoj industrijskoj mreži

Praktičnu potvrdu rada metode u realnoj trofaznoj mreži je vrlo teško eksperimentalno ostvariti. Zato je važno da se mogućnosti metode ispituju na realnoj mreži i na što točnijem modelu. Za modeliranje testne mreže odabran je *Electromagnetic Transient Program* - EMTP. EMTP je programski alat vrlo široke primjene koji proračunima u vremenskoj domeni omogućava simulaciju pojava u širokom frekvencijskom opsegu, podržava modeliranje nelinearnih elemenata i analizu nesimetričnih stanja mreže te je idealan za modeliranje kruga za injekciju signala koji uzima u obzir nelinearnu karakteristiku jezgre naponskih transformatora i istovremenu simulaciju zemljospoja.

4.1 Model neuzemljene srednjenaponske kableske mreže

Za provjeru primjene metode injektiranja signala odabrana je 10 kV kableska radijalna mreža, čija shema je prikazana na slici 4.1. To je izolirani srednjenaponski dio mreže nuklearne elektrane, čiji su podatci za modeliranje bili dostupni pri istraživanju [72, 73]. Mreža se sastoji od šest sabirnica, devet kraćih kableskih odcjepa i četiri dulja povezujuća kabela. Na mrežu je također kableskim priključkom spojeno osam asinkronih motora. Ukupno, postoji 17 kableskih odcjepa ukupne duljine kabela od 3660 m. U modelu su uzeti u obzir kapacitet i odvod kabela te dozemni kapacitet priključenih asinkronih motora. Ukupni dozemni kapacitet razmatrane mreže iznosi $3,8 \mu\text{F}$. Kabeli su predstavljeni π ekvivalentom voda uzimajući u obzir odvođe. Energetski transformator, tereti i asinkroni motori su modelirani niskofrekvencijskim modelima koji su dostupni u EMTP-u. Mreža je spojena na ekvivalent 400 kV mreže preko transformatora 400/10,5 kV. Korišteni podatci o energetskom transformatoru, asinkronim motorima i kabelima dani su redom u tablicama 4.1, 4.2 i 4.3.



Slika 4.1: Modelirana radijalna 10,5 kV kabelska mreža unutar elektrane

Tablica 4.1: Podaci o energetskom transformatoru

| | |
|--|-----------------------------|
| Spoj | YNd |
| Prijenosni omjer | 400/10,5 kV |
| Snaga | 100 MVA |
| Otpor VN namota R_1 | 1,5207 Ω |
| Rasipna reaktancija VN namota, $X_{1\sigma}$ | 0,1600 Ω |
| Otpor NN namota, R_2 | 0,0176 Ω |
| Rasipna reaktancija NN namota, $X_{2\sigma}$ | 0,0025 Ω |
| Nadomjesni otpor gubitaka u jezgri, R_m | 10 022 Ω |
| Glavni induktivitet, L_m | zadan nelinearnom krivuljom |

Tablica 4.2: Podaci o asinkronim motorima

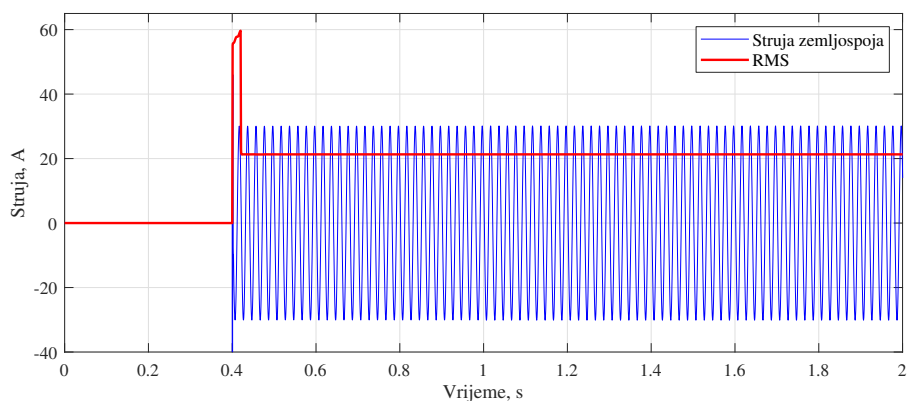
| Motor | S_n (MVA) | C (μF) | Motor | S_n (MVA) | C (μF) |
|-------|-------------|-----------------|-------|-------------|-----------------|
| A1 | 3,0 | 0,100 | D2 | 0,9 | 0,8 |
| A2 | 13,4 | 0,457 | E1 | 0,5 | 0,085 |
| B1 | 9,0 | 0,152 | E2 | 0,9 | 0,085 |
| D1 | 9,0 | 0,160 | E3 | 0,8 | 0,152 |

Tablica 4.3: Podaci o kabelima

| Kabel | R (Ω /km) | L (mH/km) | C (μ F/km) | G (S/m) | Duljina (m) | Broj kabela po fazi |
|-------|----------------------|--------------|--------------------|-----------------------|----------------|---------------------------|
| A_A1 | 0,21 | 0,318 | 0,38 | $6,40 \cdot 10^{-14}$ | 180 | 1 |
| A_A2 | 0,06 | 0,287 | 0,65 | $2,17 \cdot 10^{-14}$ | 105 | 2 |
| A_AA | 0,41 | 0,350 | 0,29 | $1,05 \cdot 10^{-14}$ | 36 | 1 |
| A_AB | 0,41 | 0,350 | 0,29 | $1,05 \cdot 10^{-14}$ | 22 | 1 |
| A_E | 0,06 | 0,287 | 0,65 | $2,17 \cdot 10^{-14}$ | 260 | 2 |
| A_B | 0,06 | 0,287 | 0,65 | $2,17 \cdot 10^{-14}$ | 300 | 1 |
| A_D | 0,06 | 0,287 | 0,65 | $2,17 \cdot 10^{-14}$ | 260 | 2 |
| B_B1 | 0,41 | 0,287 | 0,29 | $2,17 \cdot 10^{-14}$ | 109 | 1 |
| B_BA | 0,41 | 0,350 | 0,29 | $1,05 \cdot 10^{-14}$ | 14 | 1 |
| E_E1 | 0,41 | 0,350 | 0,29 | $1,05 \cdot 10^{-14}$ | 470 | 1 |
| E_E2 | 0,41 | 0,350 | 0,29 | $1,05 \cdot 10^{-14}$ | 50 | 2 |
| E_E3 | 0,41 | 0,350 | 0,29 | $1,05 \cdot 10^{-14}$ | 80 | 1 |
| E_EA | 0,41 | 0,350 | 0,29 | $1,05 \cdot 10^{-14}$ | 23 | 2 |
| E_EB | 0,41 | 0,350 | 0,29 | $1,05 \cdot 10^{-14}$ | 29 | 2 |
| E_EC | 0,41 | 0,350 | 0,29 | $1,05 \cdot 10^{-14}$ | 27 | 2 |
| D_D1 | 0,06 | 0,287 | 0,65 | $2,17 \cdot 10^{-14}$ | 160 | 2 |
| D_D2 | 0,16 | 0,250 | 0,22 | $2,17 \cdot 10^{-14}$ | 80 | 1 |
| D_DA | 0,41 | 0,350 | 0,29 | $1,05 \cdot 10^{-14}$ | 32 | 2 |
| C_CA | 0,41 | 0,350 | 0,29 | $1,05 \cdot 10^{-14}$ | 38 | 1 |
| C_CB | 0,41 | 0,350 | 0,29 | $1,05 \cdot 10^{-14}$ | 260 | 1 |
| C_F | 0,06 | 0,287 | 0,65 | $2,17 \cdot 10^{-14}$ | 179 | 1 |

4.2 Simulacija zemljospoja u modeliranoj mreži

U modeliranoj mreži simuliran je zemljospoj koji nastupa u trenutku $t = 0,4$ s, u fazi A. Bez otpora na mjestu kvara, za modeliranu mrežu ukupna struja zemljospoja iznosi $21,3 A_{rms}$, što odgovara za ukupni dozemni kapacitet vodova i motora od $3,80 \mu$ F. Valni oblik struje zemljospoja prikazan je na slici 4.2. Doprinosne kapacitivne struje po odcjepima, odnosno rezidualne struje po odcjepima dobivene simulacijom prikazane su u tablici 4.4.



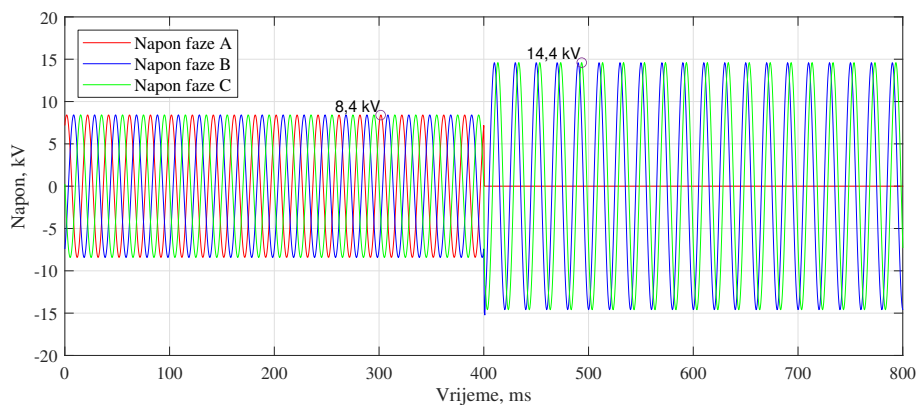
Slika 4.2: Valni oblik struje zemljospoja, $I_m = 30,12 \text{ A}$, $I_{rms} = 21,30 \text{ A}$

Tablica 4.4: Podaci o rezidualnim strujama po odcjepima

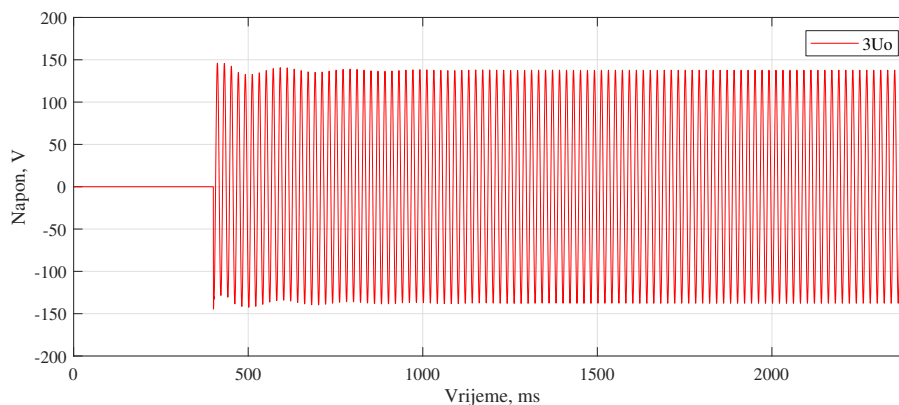
| Kabel | Rezidualna struja $3I_0$ kada odcjep nije u kvaru, A | Rezidualna struja $3I_0$ kada je odcjep u kvaru, A |
|-------|--|--|
| A_A1 | 0,946 | 20,360 |
| A_A2 | 3,334 | 17,971 |
| A_AA | 0,059 | 21,247 |
| A_AB | 0,036 | 21,269 |
| A_E | 5,026 | 16,275 |
| A_B | 1,056 | 19,155 |
| A_D | 8,667 | 12,638 |
| B_B1 | 1,033 | 20,274 |
| B_BA | 0,022 | 21,284 |
| E_E1 | 1,620 | 19,685 |
| E_E2 | 0,641 | 20,661 |
| E_E3 | 0,608 | 20,688 |
| E_EA | 0,075 | 21,226 |
| E_EB | 0,095 | 21,205 |
| E_EC | 0,088 | 21,212 |
| D_D1 | 2,068 | 19,236 |
| D_D2 | 4,595 | 16,709 |
| D_DA | 0,104 | 21,196 |
| C_CA | 0,062 | 21,239 |
| C_CB | 0,424 | 20,860 |
| C_F | 0,654 | 20,633 |

Rezidualne struje na odcjepima na kojima nema kvara proporcionalne su iznosima ukupnih dozemnih kapaciteta tih odcjepa. Dulji kabeli ili kabelske veze s više od jednog kabela po fazi rezultiraju višim rezidualnim strujama zbog većih dozemnih kapaciteta. S druge strane, na odcjepu na kojem nastane kvar, rezidualna struja će biti to niža što je veći dozemni kapacitet tog odcjepa. Rezultati u tablici 4.4 potvrđuju računski određene rezidualne struje prema izrazima 2.7c i 2.8c.

U nastavku su prikazani valni oblici napona u mreži te valni oblici veličina vezanih za naponske mjerne transformatore: magnetski tokovi u jezgrama te struje primara, sekundara i tercijara pri simulaciji zemljospoja. Slika 4.3 prikazuje napone u mreži. Metalni zemljospoj nastupa u $t = 0,4$ s. Prije zemljospoja naponi su simetrični, s faznom vršnom vrijednosti od 8,4 kV. Nakon zemljospoja, napon u fazi u kojoj se događa metalni zemljospoj pada na nulu, a u ostale dvije faze raste na linijsku vrijednost napona s amplitudom 14,4 kV. S obzirom na dimenzioniranje naponskih transformatora za naponski faktor 1,9 / 8 sati, ovakav faktor prenapona ne ugrožava naponske transformatore.



Slika 4.3: Naponi po fazama. Prije zemljospoja $U_m = 8,35$ kV. Nakon zemljospoja napon u fazi A je nula, a u fazama B i C iznosi 14,47 kV.

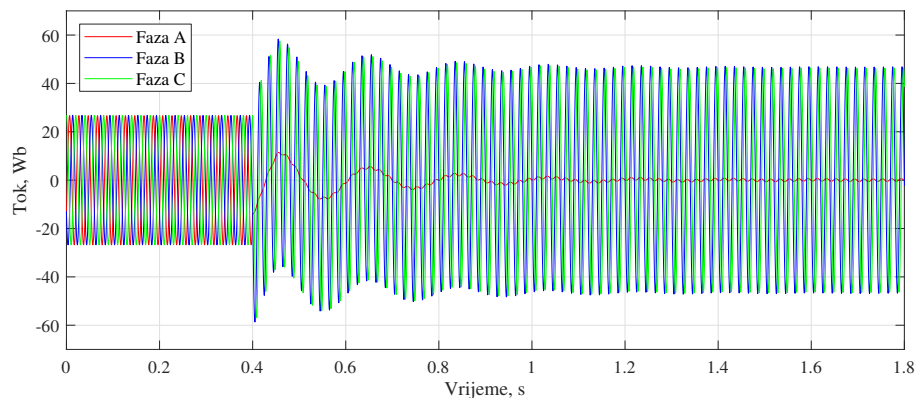


Slika 4.4: Trostruki nulti napon na otporniku u spoju pomoćnih namota naponskih mjernih transformatora u trokut. Prije zemljospoja pri simetričnom pogonu nulti napon je nula, a nakon zemljospoja napon iznosi $98,6 V_{rms}$.

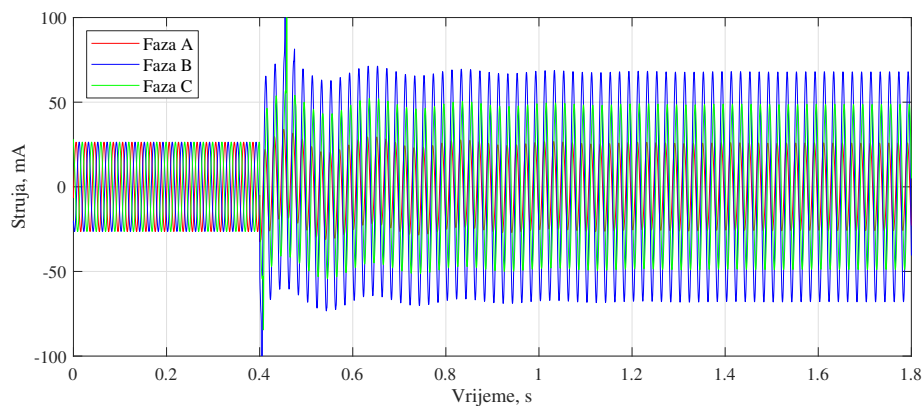
Slika 4.4 prikazuje napon na otporniku u spoju pomoćnih namota naponskih transformatora u trokut. Nakon zemljospoja, napon očekivano poraste na vrijednost blizu 100 V. Porast napona u zdravim fazama na linijsku vrijednost i indikacija nultog napona u spoju naponskih transformatora u trokut karakteristični su pokazatelji zemljospoja.

Magnetski tokovi u jezgrama transformatora pri zemljospoju prikazani su na slici 4.5, a struje primara, sekundara i tercijara na slikama 4.6, 4.7 i 4.8. Struja primara nakon zemljospoja nije izobličena, što znači da jezgre transformatora ne ulaze u zasićenje. Vršna vrijednost magnetskog toka u jezgrama iznosi 46 Wb, što je ispod koljena $\phi - i$ karakteristike, a efektivne vrijednosti struja primara, sekundara i tercijara iznose redom 50 mA, 1,4 A i 3,2 A, što ne prelazi nazivne trajne termičke struje. Rezultati simulacije pokazali su tipične i očekivane uvjete u izoliranoj mreži za vrijeme metalnog zemljospoja.

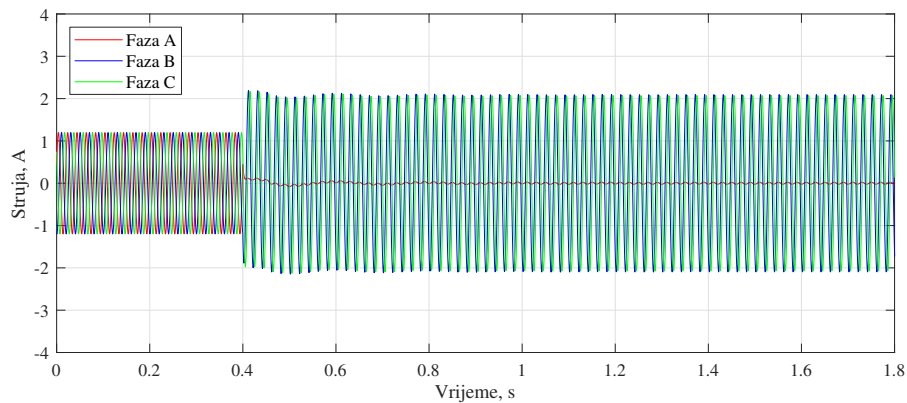
Nakon simulacije metalnog zemljospoja, u model mreže je dodan krug za injektiranje signala, a simulacije su ponovljene za istovremeni zemljospoj i injektiranje istosmjernog i izmjeničnog signala.



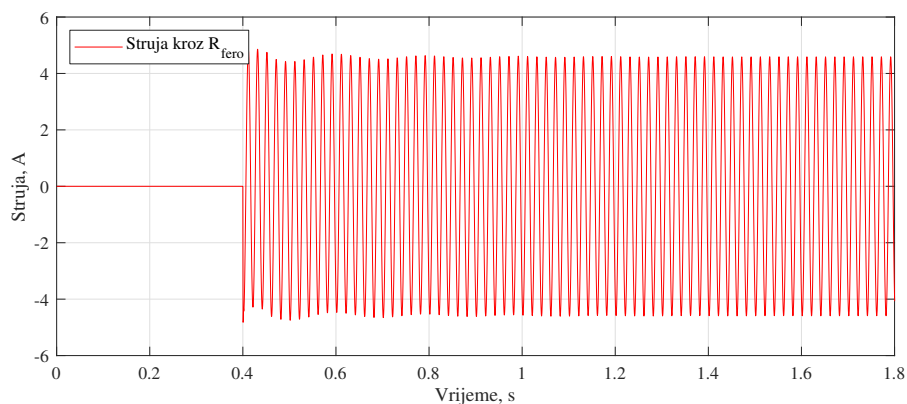
Slika 4.5: Tokovi u jezgrama naponskih transformatora. Vršna vrijednost toka u jezgrama naponskih transformatora priključenih u faze u kojima nije nastupio kvar iznosi 46 Wb.



Slika 4.6: Struje primarnih namota naponskih transformatora



Slika 4.7: Struje sekundarnih namota naponskih transformatora. Nakon zemljospoja vršna vrijednost ne prelazi 2 A.



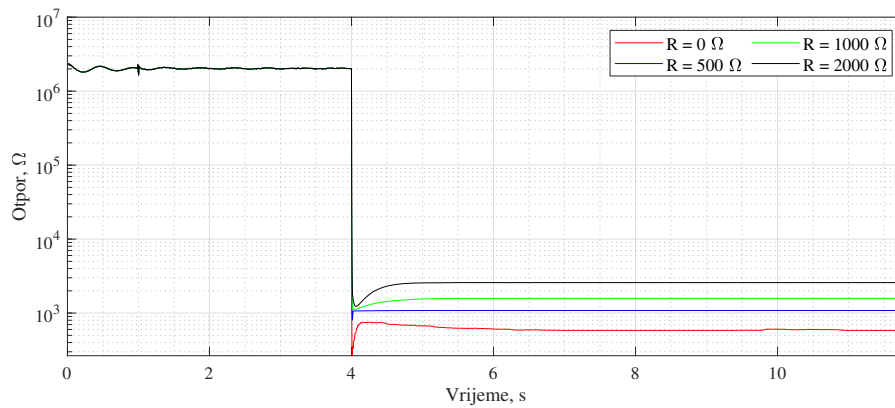
Slika 4.8: Struja u spoju trokut pomoćnih namota. Vršna vrijednost ne prelazi 4,5 A.

4.3 Injektiranje istosmjernog signala

Za injektiranje istosmjernog signala odabran je istosmjerni naponski izvor s izlaznom razinom napona podešenom na 30 V. Tijekom cijelog vremena trajanja simulacije injektira se istosmjerni signal preko primarnih namota naponskih transformatora, a zemljospoj nastupa u fazi A u 4. sekundi trajanja simulacije. Slika 4.9 prikazuje izračunati ukupni otpor izolacije mreže za otpore na mjestu kvara u iznosu od 0, 500, 1000 i 2000 Ω . Prije zemljospoja ukupni otpor izolacije je vrlo visok i iznosi preko 2 M Ω , a nakon nastanka zemljospoja njegov iznos značajno pada i ovisi o otporu na mjestu kvara.

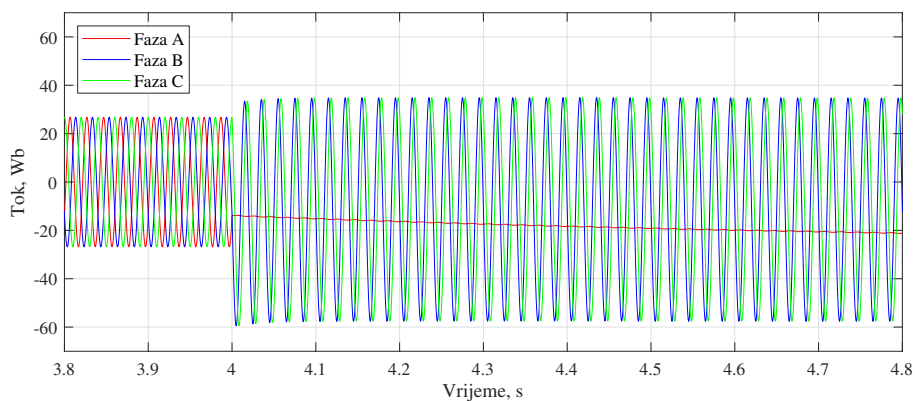
U slučaju metalnog zemljospoja ukupni otpor izolacije nakon kvara iznosi 584 Ω , što odgovara ekvivalentnom otporu primarnih namota naponskih transformatora koji pri metalnom zemljospoju predstavljaju jedine otpore na putu injektiranog testnog signala. U slučaju kada postoji i otpor na mjestu kvara, ukupni otpor izolacije je veći za njegov iznos.

Ova simulacija je potvrdila princip rada uređaja za nadzor izolacije. Parametri vezani za naponske transformatore pri injektiranju istosmjernog signala prikazani su na slikama 4.10 - 4.11.



Slika 4.9: Ukupni otpor izolacije izračunat na temelju injektiranog istosmjernog signala preko primarnih namota naponskih transformatora za različite otpore na mjestu kvara

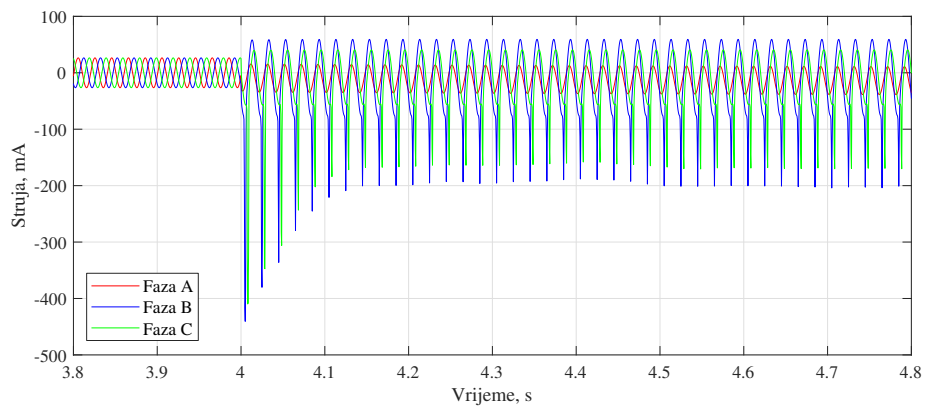
Slika 4.10 prikazuje magnetski tok u jezgrama naponskih transformatora za vrijeme injektiranja istosmjernog signala za slučaj metalnog zemljospoja.



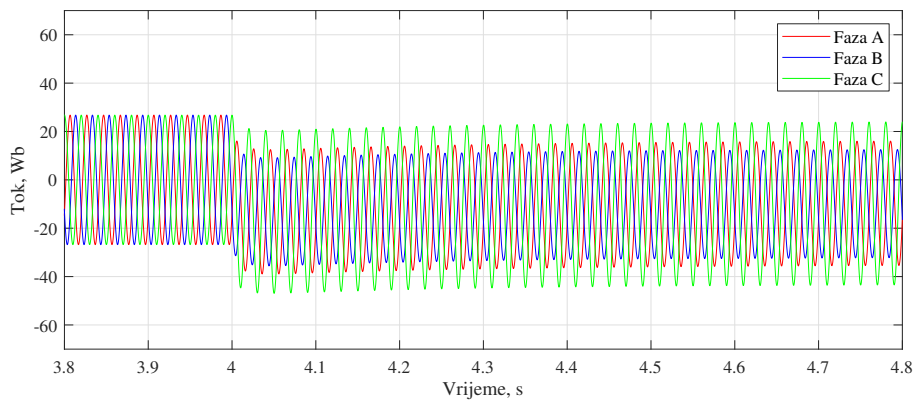
Slika 4.10: Magnetski tok u jezgrama naponskih transformatora pri injektiranju DC struje, za otpor na mjestu kvara $R = 0 \Omega$

Nakon zemljospoja, magnetski tok u jezgri naponskog transformatora u fazi u kojoj se dogodio kvar nije jednak nuli već mu je vrijednost definirana istosmjernom strujom koja teče kroz primarni namot. Magnetski tok u zdravim fazama također je rezultat superpozicije istosmjernog i izmjeničnog magnetiziranja. Zbog toga, ako usporedno sa zemljospojem postoji i injektiranje istosmjernog signala, naponski transformatori u zdravim fazama mogu ući u zasićenje, što je vidljivo i na valnim oblicima struja primara na slici 4.11.

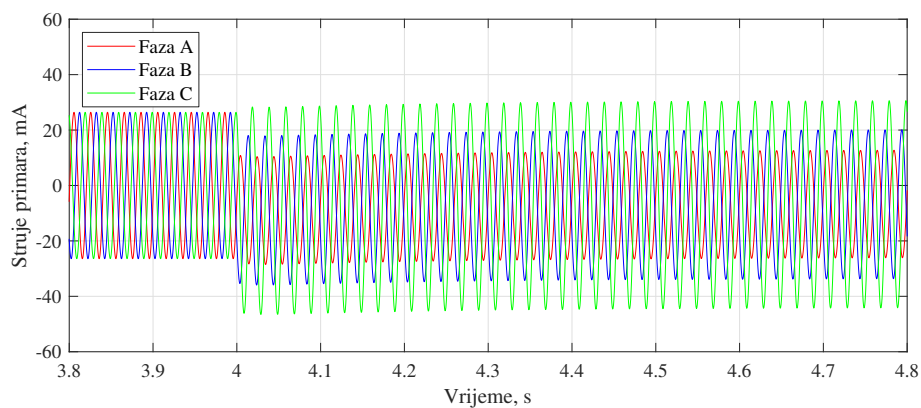
Struje primara u zdravim fazama su izobličene jer maksimalna amplituda magnetskog toka doseže iznos od -58 Wb što prelazi iznos magnetskog toka pri koljenu krivulje magnetiziranja ovih naponskih transformatora. Postojanje otpora na mjestu kvara povoljno utječe na naponske transformatore u slučaju injektiranja istosmjernog signala. Slike 4.12 i 4.13 prikazuju tokove i struje primara za slučaj zemljospoja s otporom na mjestu kvara od 1000Ω pri kojem ne dolazi do ulaska u zasićenje.



Slika 4.11: Struje primara naponskih transformatora pri injektiranju DC struje, za otpor na mjestu kvara $R = 0 \Omega$



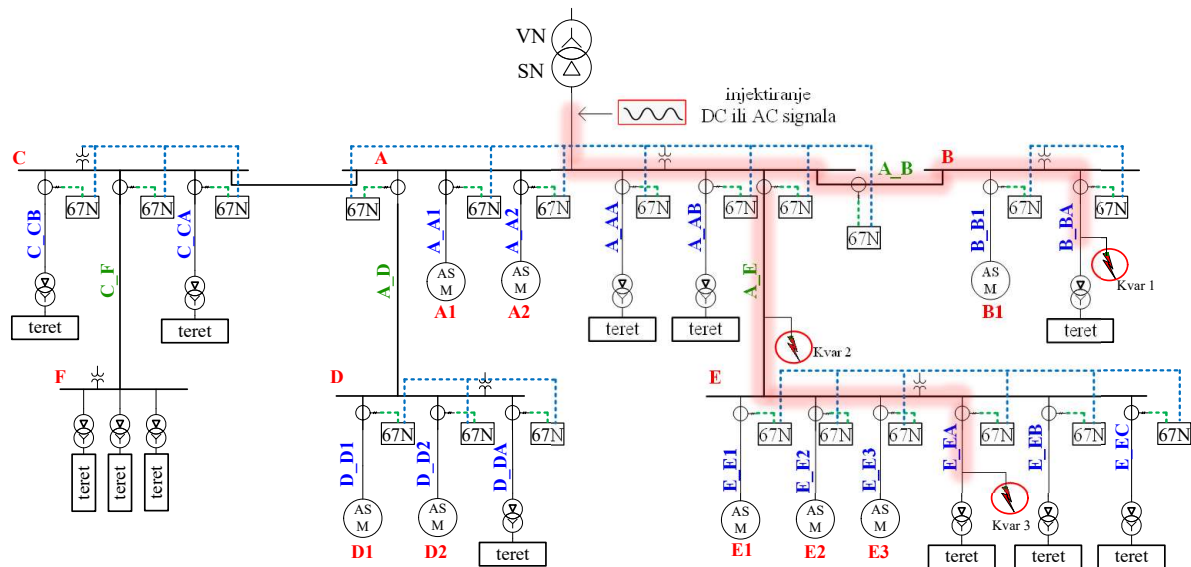
Slika 4.12: Tok u jezgrama naponskih transformatora pri injektiranju DC struje, za otpor na mjestu kvara $R = 1000 \Omega$



Slika 4.13: Struje primara naponskih transformatora pri injektiranju DC struje, za otpor na mjestu kvara $R = 1000 \Omega$

4.4 Injektiranje izmjeničnog signala

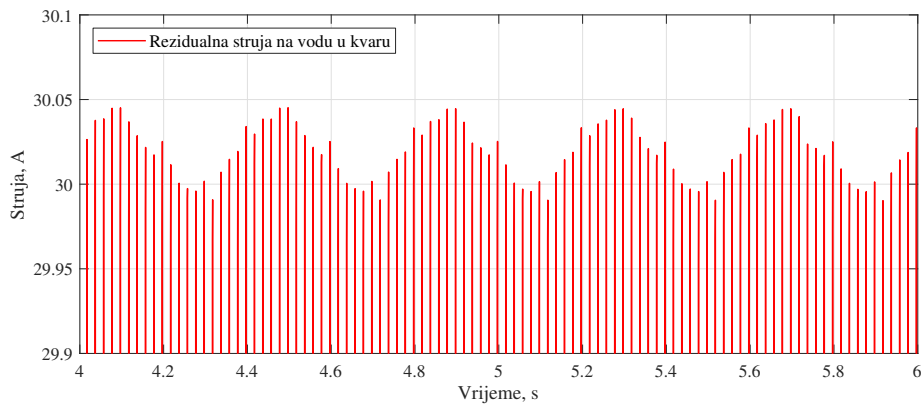
Nakon provjere injektiranja istosmjernog signala, napravljena je simulacija injektiranja izmjeničnog signala. Odabrana frekvencija testnog signala iznosi 2,5 Hz, sukladno praksi korištenoj na niskom naponu. Za provjeru principa rada injekcije izmjeničnog signala simuliran je metalni zemljospoj na tri karakteristična mjesta označena na slici 4.14.



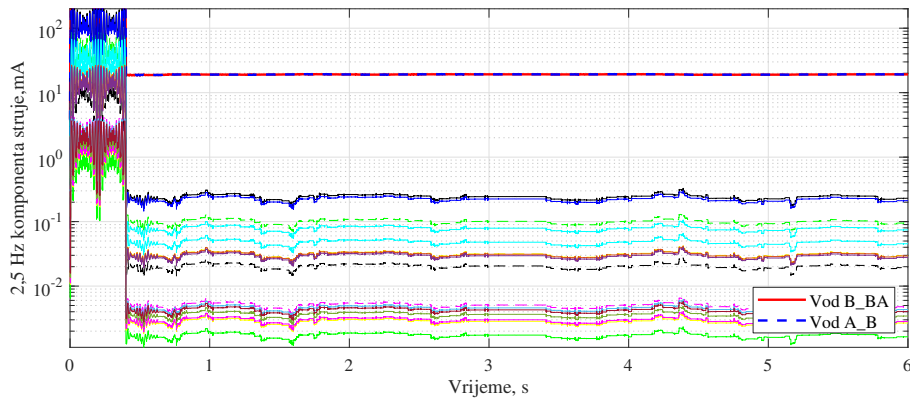
Slika 4.14: Tri karakteristična mjesta kvara u mreži - kvar 1 na najkraćem kabeu, kvar 2 na povezujućem kabeu i kvar 3 na krajnjem odcjepu

Kvar 1 je zemljospoj na kraju najkraćeg kabela u mreži čija duljina iznosi 14 m. Kvar 2 je zemljospoj na kraju duljeg, povezujućeg kabela između dviju sabirnica. Kvar 3 je zemljospoj koji nastaje dublje u mreži, na samom kraju jednog od odcjepa. Odabrana amplituda niskofrekvencijskog 2,5 Hz signala koji se injektira iznosi 100 V. Slika 4.15 prikazuje uvećani prikaz rezidualne struje na odcjepu na kojem je nastao kvar, za slučaj kvara 1. Osim 50 Hz komponente, u valnom obliku rezidualne struje jasno se vidi i sadržaj 2,5 Hz komponente.

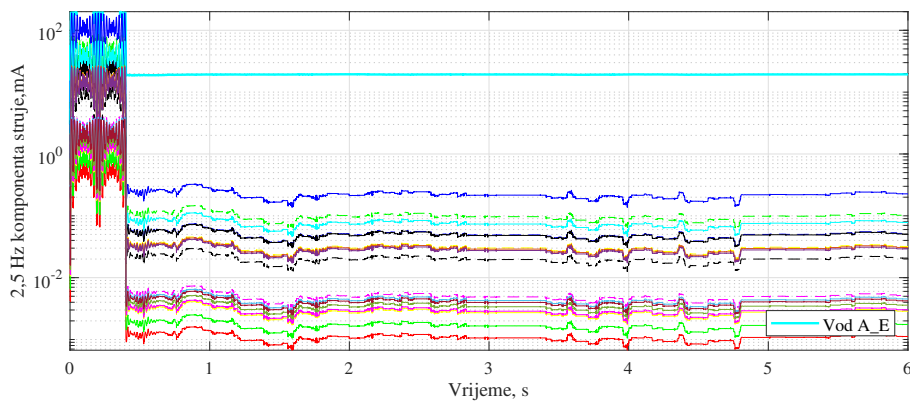
Slike 4.16 - 4.18 prikazuju izračunate 2,5 Hz komponente u rezidualnim strujama svih odcjepa u razmatranoj mreži. Komponenta 2,5 Hz u rezidualnoj struji izračunata je na temelju pomičnog prozora (engl. *moving window*) od 2,5 Hz, stoga se odstupanja tijekom prvih 0,4 s i 0,4 s nakon pojave zemljospoja u svim simulacijama, a relevantne su stacionarne vrijednosti. Za sva tri kvara može se primijetiti da je 2,5 Hz komponenta rezidualne struje uvijek najviša upravo na odcjepu na kojem je nastao kvar. U slučaju metalnog zemljospoja, neovisno o mjestu kvara, amplituda injektiranog signala u rezidualnog struji na kabeu u kvaru iznosi 19 mA. Dodatno, 2,5 Hz komponenta se može pratiti kroz mrežu do mjesta kvara što se vidi na primjeru kvara 1 i 3, na slikama 4.16 i 4.18. U tim slučajevima, 2,5 Hz komponenta u rezidualnoj struji je visoka i na povezujućim odcjepima koji vode do kvara.



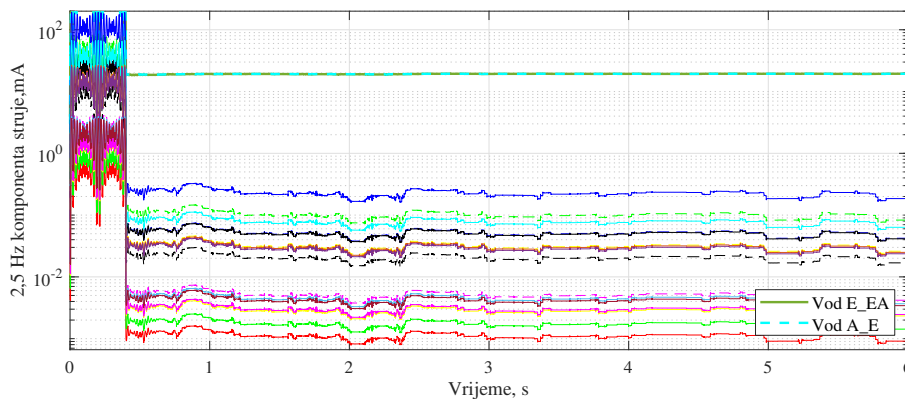
Slika 4.15: Valnik oblik rezidualne struje na odcjepu B_BA. Osim dominantne 50 Hz komponente rezidualna struja sadrži i 2,5 Hz komponentu zbog injektiranog signala



Slika 4.16: 2,5 Hz komponente rezidualnih struja po odcjepima pri injektiranju signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz, za kvar 1 - zemljospoj na odcjepu B_BA



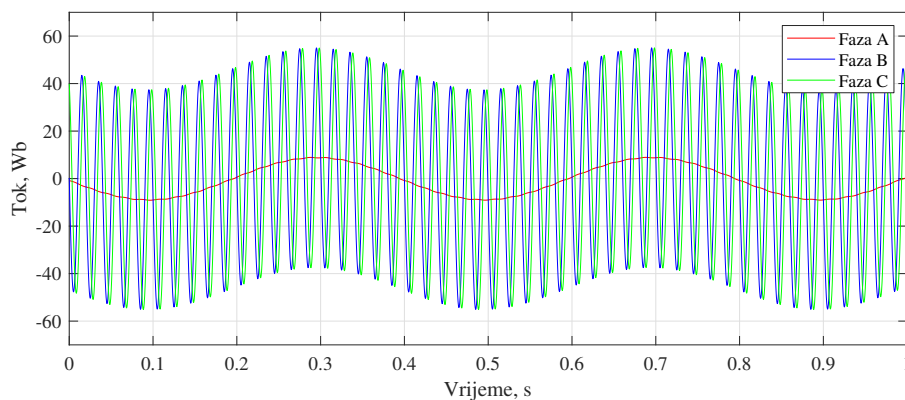
Slika 4.17: 2,5 Hz komponente rezidualnih struja po odcjepima pri injektiranju signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz, za kvar 2 - zemljospoj na odcjepu A_E



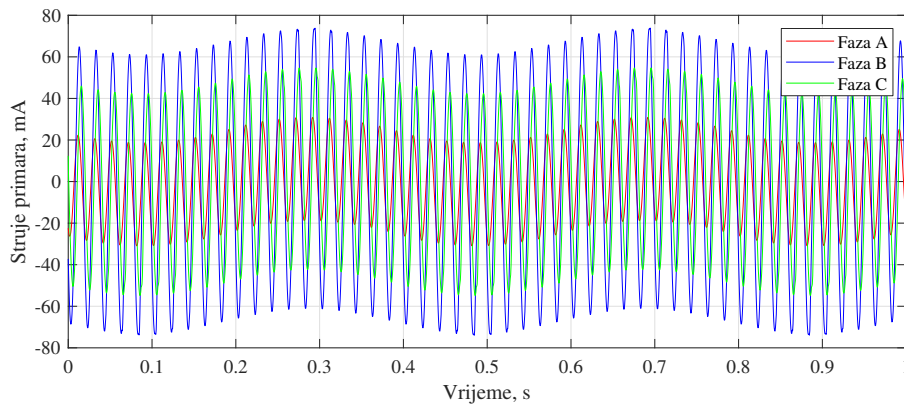
Slika 4.18: 2,5 Hz komponente rezidualnih struja po odcjepima pri injektiranju signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz, za kvar 3 - zemljospoj na odcjepu E_EA

Valni oblici veličina vezanih za naponske mjerne transformatore tijekom zemljospoja u fazi A i istovremenog injektiranja izmjeničnog 2,5 Hz, 100 V signala prikazani su na slikama 4.19 - 4.22. Slika 4.19 prikazuje magnetske tokove u jezgrama naponskih mjernih transformatora. Maksimalna vrijednost toka u jezgrama iznosi 55 Wb te nema zasićenja jezgre. Slika 4.20 prikazuje struje primara, koje nisu izobličene uslijed zasićenja. Slika 4.21 prikazuje valne oblike sekundarnih struja koje imaju maksimalnu vrijednost približno 2 A. Slika 4.22 prikazuje struju u spoju trokut pomoćnih namota naponskih transformatora, koja ne prelazi iznos od 4,5 A.

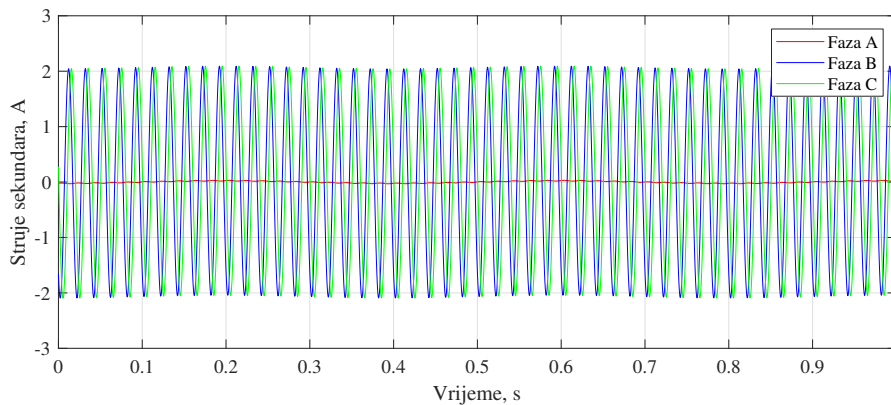
Valni oblici tokova u jezgrama te struja primara, sekundara i tercijara su slični kao i u situaciji bez injektiranja te u slučaju injektiranja signala 2,5 Hz, 100 V ne pokazuju da su naponski transformatori preopterećeni ili ugroženi zbog istovremenog injektiranja. Preliminarne simulacije potvrđuju da je injektirani signal moguće pratiti u mreži prema iznosu 2,5 Hz komponente u rezidualnim strujama po odcjepima te tako zaključiti koji je odcjep u kvaru. Povećavanje amplitude generatora signala povećat će amplitudu 2,5 Hz komponente u rezidualnim strujama te olakšati njezinu detekciju, ali će utjecati na ulazak naponskih transformatora u zasićenje.



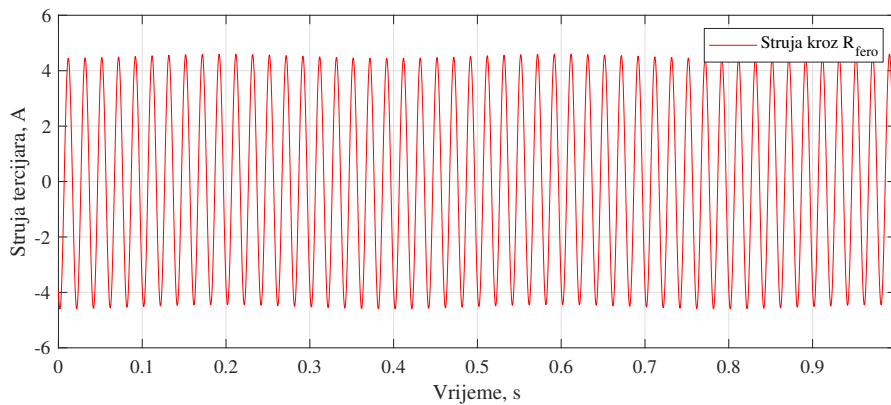
Slika 4.19: Tok u jezgrama naponskih transformatora pri istovremenom zemljospoju i injektiranju izmjeničnog signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz. Maksimalan iznos toka doseže 55 Wb



Slika 4.20: Struje primara naponskih transformatora pri istovremenom zemljospoju i injektiranju izmjeničnog signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz



Slika 4.21: Struje sekundara naponskih transformatora pri istovremenom zemljospoju i injektiranju izmjeničnog signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz



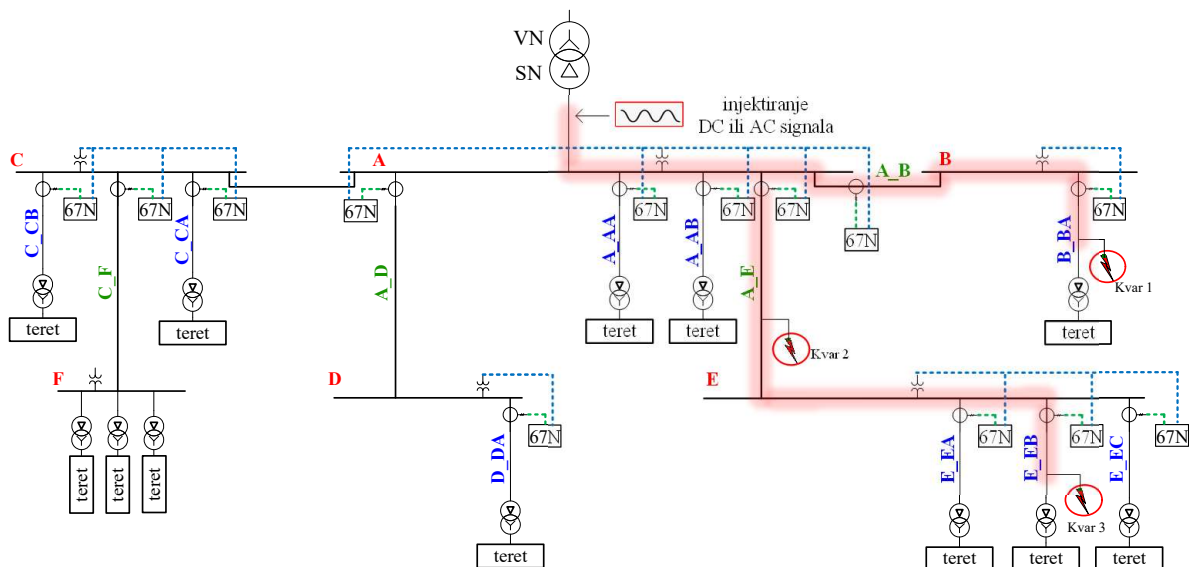
Slika 4.22: Struja u spoju trokut pomoćnih namota naponskih transformatora pri istovremenom zemljospoju i injektiranju izmjeničnog signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz

4.5 Usporedba s usmjerenom homopolarnom nadstrujnom zaštitom

Prethodne simulacije napravljene su na primjeru industrijske mreže s potpunim uklopnim stanjem. Budući da su za primjenu klasične usmjerene zemljospojne nadstrujne zaštite kritične male mreže s niskom ukupnom duljinom odcjepa, u nastavku su prikazane simulacije na istoj industrijskoj mreži, ali s reduciranom topologijom, odnosno za minimalno uklopno stanje razmatrane mreže. Na reduciranoj topologiji, prikazani su izazovi vezani za klasičnu zemljospojnu zaštitu te je napravljena usporedba mogućnosti detekcije visokoomskih kvarova primjenom klasične zemljospojne zaštite i primjenom metode injektiranja pri kritičnim kvarovima za obje metode.

4.5.1 Simulacije pri minimalnom uklopnom stanju

Za razmatranu industrijsku mrežu, minimalno uklopno stanje je prikazano na slici 4.23. Pri minimalnom uklopnom stanju, mreža se sastoji od 9 kablskih odcjepa i 4 povezujuća kabla duljina između 14 m i 300 m. Ukupna duljina kablске mreže iznosi 1480 m, a ukupna struja zemljospoja 6,5 A. Tablica 4.5 prikazuje rezidualne struje po odcjepima u slučaju metalnog zemljospoja u slučaju kada je pojedini kabel u kvaru i bez kvara.



Slika 4.23: Reducirana topologija razmatrane industrijske mreže

Najniža amplituda rezidualne struje na kabelu na kojem je nastao zemljospoj u nekoj mreži očekuje se na kabelu s najvećim kapacitetom. U slučaju reducirane mreže, najveću duljinu i kapacitet ima povezujući kabel A_E (2 x 260 m), jednako kao i povezujući kabel A_D. Budući da kabel A_E spaja veći dio daljnje radijalne mreže, na njemu je, prema tablici 4.5, rezidu-

alna struja u slučaju bez kvara najveća. Međutim, kada kvar nastupi na kabelu A_E, na njemu je rezidualna struja najniža. Prema tome, za primjenu usmjerene nadstrujne zemljospojne zaštite, kvar na kabelu s najvećim kapacitetom je relevantan za podešenje usmjerene nadstrujne zemljospojne zaštite.

Tablica 4.5: Rezidualne struje po odcjepima bez kvara i u slučaju kvara

| Kabel | Duljina | Rezidualna struja bez kvara | Rezidualna struja u slučaju kvara |
|------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| A_AA | 1 x 36 m | 0,059 A | 6,461 A |
| A_AB | 1 x 22 m | 0,036 A | 6,484 A |
| A_B | 1 x 300 m | 1,120 A | 5,400 A |
| A_D | 2 x 260 m | 2,006 A | 4,513 A |
| A_E | 2 x 260 m | 2,160 A | 4,360 A |
| B_BA | 1 x 14 m | 0,023 A | 6,497 A |
| C_CA | 1 x 38 m | 0,062 A | 6,090 A |
| C_CB | 1 x 260 m | 0,424 A | 6,090 A |
| D_DA | 2 x 32 m | 0,106 A | 6,414 A |
| E_EA | 2 x 23 m | 0,075 A | 6,444 A |
| E_EB | 2 x 29 m | 0,095 A | 6,424 A |
| E_EC | 2 x 27 m | 0,088 A | 6,431 A |

Pri podešenju okidanja zemljospojne zaštite, važni su osjetljivost ulaza releja te klasa točnosti strujnog mjernog transformatora. Uobičajena razina osjetljivosti ulaznih signala na relejima iznosi 30 mA, ili 1 mA, ako se koriste posebni osjetljivi ulazi u kombinaciji s obuhvatnim mjernim transformatorima [52]. Ovisno o iznosu rezidualne struje na primarnoj strani, strujni mjerni transformatori unose strujnu i faznu pogrešku mjerenja na sekundaru. IEC norma 61869-2 Mjerni transformatori: Dodatni zahtjevi za strujne transformatore [74] definira osam klasa točnosti za mjerne strujne transformatore (0,1, 0,2, 0,2S,0,5,0,5S, 1, 3, 5) te nekoliko klasa za zaštitne jezgre. Primjerice, klase 0,1, 0,2, 0,5 i 1 imaju strujnu pogrešku do 5 % nazivne struje. Bolje klase 0,2S i 0,5S imaju pogrešku sniženu do 1 % nazivne struje. Za razmatranu industrijsku mrežu, u tablici 4.6 je dan pregled iznosa struja na sekundaru i ulazu u relej, ovisno o opcijama upotrebe nekoliko različitih standardnih prijenosnih omjera klasičnih strujnih mjernih transformatora (SMT) i obuhvatnih strujnih mjernih transformatora.

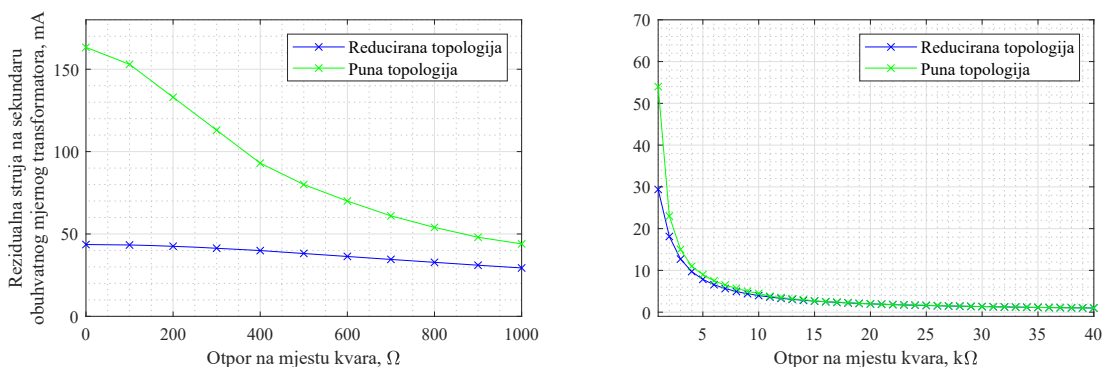
Prema tablici 4.6, pri najnepovoljnijem slučaju metalnog zemljospoja u punoj topologiji mreže, vrijednosti na sekundaru SMT-a su dovoljno visoke za ulaze releja s osjetljivošću od 30 mA, ali su iznosi struja preniski te nisu unutar područja koje obuhvaća klasa točnosti mjernih jezgri. Prema tome, za razmatranu mrežu je za primjenu usmjerene homopolarne nadstrujne zemljospojne zaštite nužna upotreba obuhvatnih strujnih mjernih transformatora i releja s osjet-

Tablica 4.6: Rezidualne struje po odcjepima bez kvara i u slučaju kvara

| Vrijednosti na primaru | | Vrijednosti na sekundaru | | | |
|------------------------|-------------------------|--------------------------|------------|----------------|-----------------|
| | Minimalna $3I_0$ struja | SMT 2500:1 | SMT 2500:5 | Obuhvatni 70:1 | Obuhvatni 100:1 |
| Potpuno uklopno stanje | 16,3 A | 6,5 mA | 32,7 mA | 233,3 mA | 163,3 mA |
| Reducirana topologija | 4,4 A | 1,7 mA | 8,7 mA | 62,3 mA | 43,6 mA |

ljivim ulazima na svakom odcjepu. Navedena analiza napravljena je za metalni zemljospoj. U slučaju otpora na mjestu kvara, rezidualne struje bi bile dodatno snižene.

Ovisnost otpora na mjestu kvara o iznosu 50 Hz-komponente rezidualne struje na sekundaru obuhvatnog mjernog transformatora s prijenosnim omjerom 100:1, za najkritičnije mjesto kvara u mreži (kabela A_E) je prikazana na slici 4.24. Za podešenja proradne struje od najosjetljivijih 30 mA, odnosno 1 mA, uz rezervu predviđenu zbog potencijalnih strujnih pogrešaka od 10 %, detekcija visokoomskog zemljospoja bila bi moguća do 860 Ω , odnosno 35 k Ω za kvar na kabelu A_E.

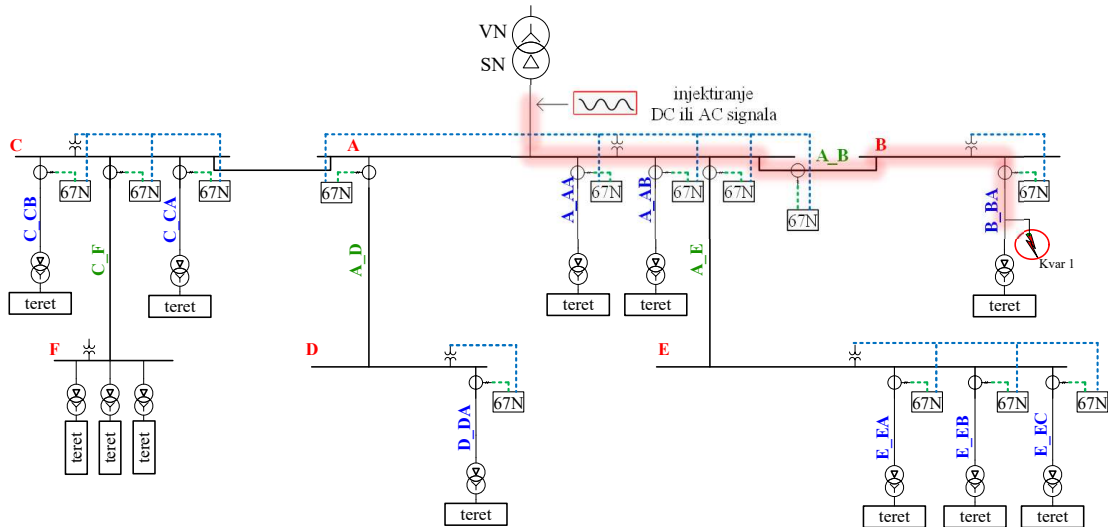


Slika 4.24: Utjecaj otpora na mjestu kvara na rezidualnu struju kvarnog kabela za slučaj kvara na kabelu A_E (slika lijevo - otpori do 1 k Ω , slika desno - otpori od 1 k Ω do 40 k Ω)

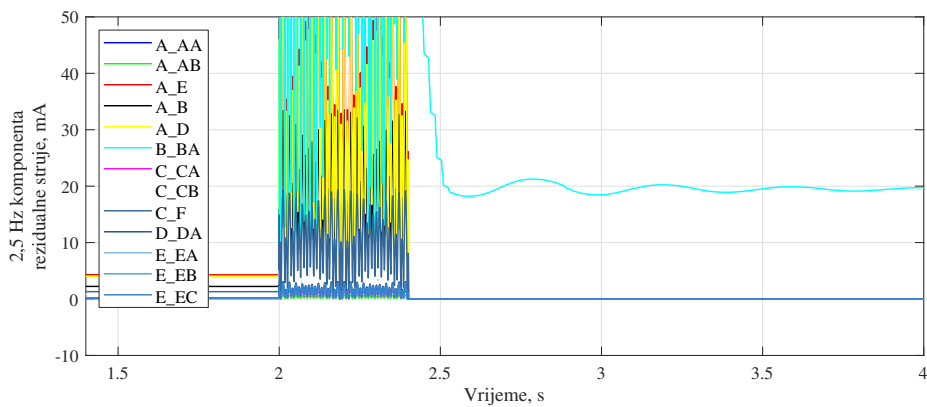
U nastavku je prikazano predloženo rješenje injektiranja signala na istoj mreži. Dodatno, prikazan je pregled utjecajnih faktora i mogućnost detekcije visokoomskih kvarova.

4.5.2 Metoda injektiranja signala pri minimalnom uklopnom stanju

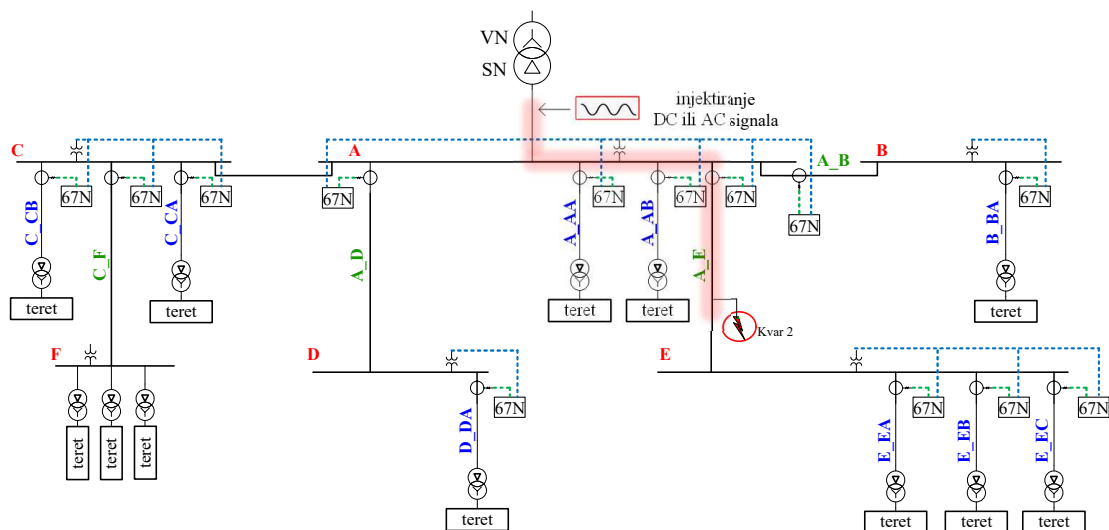
Jednako kao i za punu topologiju mreže, provjereno je injektiranje izmjeničnog signala pri metalnom spoju na tri karakteristična mjesta kvara označena na slici 4.23. Također je ustanovljena mogućnost praćenja injektiranog signala do mjesta kvara, kako je prikazano na slikama u nastavku. Slike 4.25 - 4.26 prikazuju mjesto prvog kvara u reduciranoj mreži i odgovarajuće iznose 2,5 Hz komponente rezidualnih struja po kabelima za slučaj metalnog zemljospoja. Slike 4.27 - 4.28 i 4.29 - 4.30 prikazuju iste vrijednosti za drugi i treći kvar.



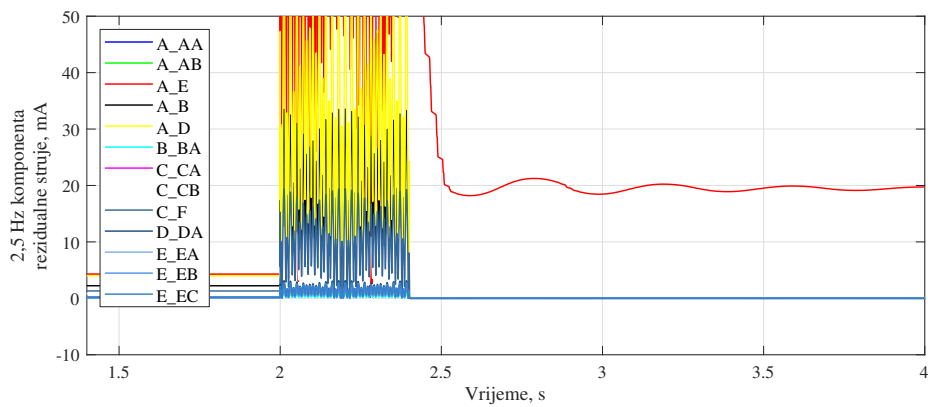
Slika 4.25: Reducirana topologija razmatrane industrijske mreže, kvar 1 na kabelu B_BA



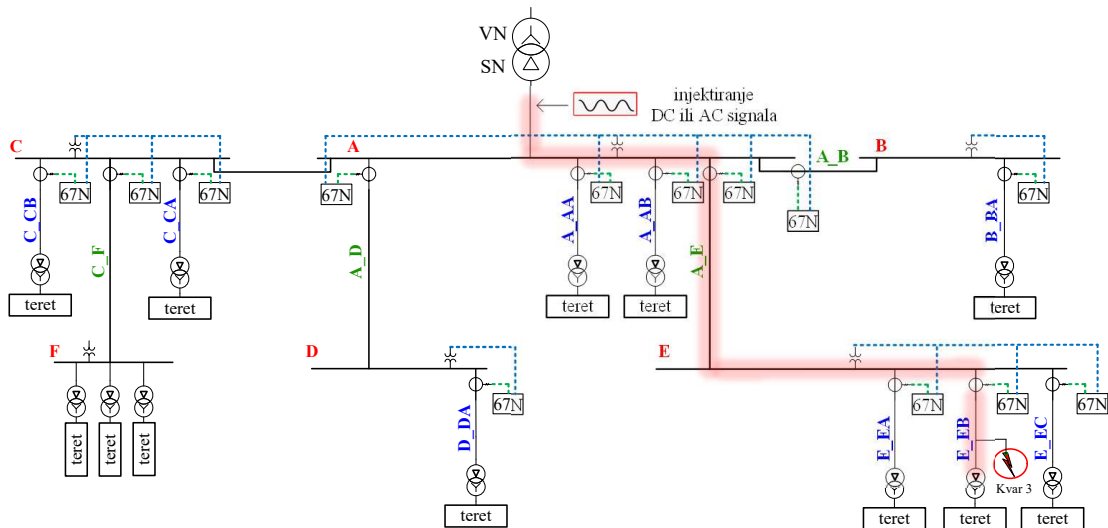
Slika 4.26: Rezidualne struje po odcjepima u slučaju metalnog zemljospoja na kabelu B_BA



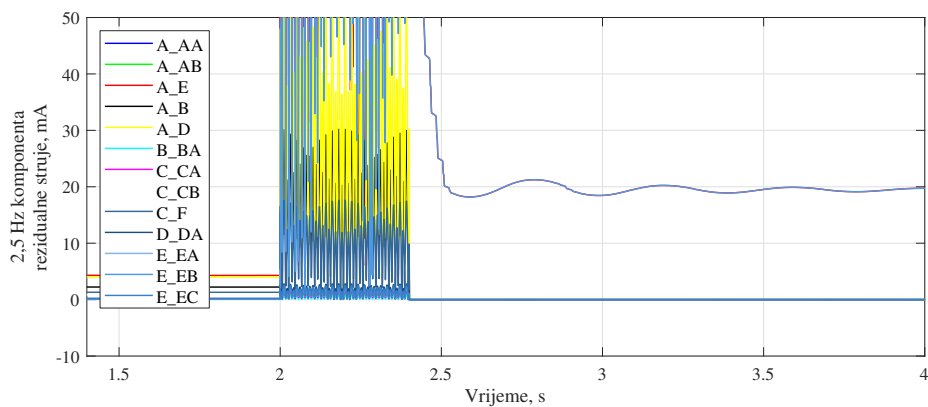
Slika 4.27: Reducirana topologija razmatrane industrijske mreže, kvar 2 na kabelu A_E



Slika 4.28: Rezidualne struje po odcjepima u slučaju metalnog zemljospoja na kabelu A_E



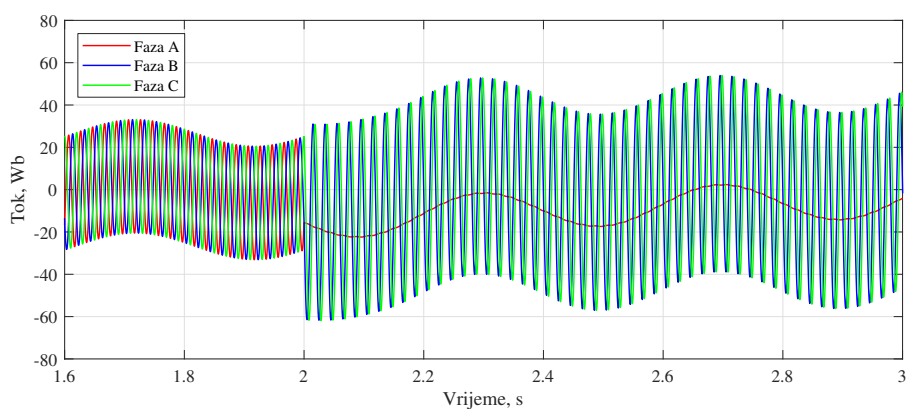
Slika 4.29: Reducirana topologija razmatrane industrijske mreže, kvar 3 na kabelu E_EB



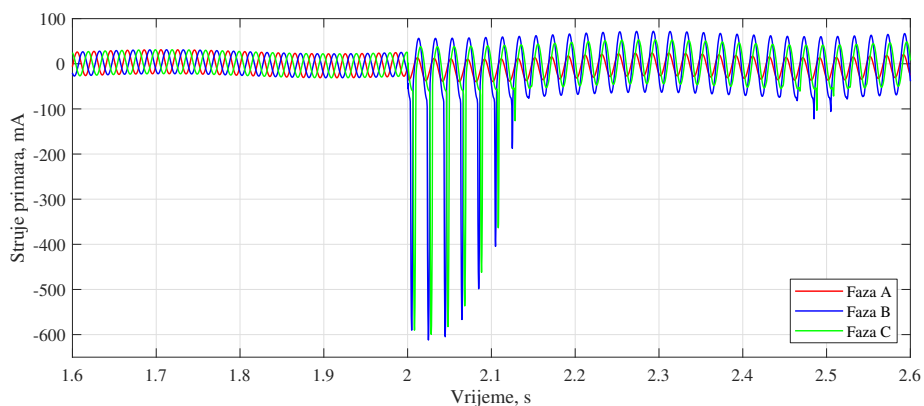
Slika 4.30: Rezidualne struje po odcjepima u slučaju metalnog zemljospoja na kabelu E_EB

Prema rezultatima simulacija može se primijetiti da u slučaju metalnog zemljospoja, neovisno o mjestu kvara, pri injektiranju 2,5 Hz, 100 V signala detektirani injektirani signal u rezidualnoj struji uvijek iznosi 19 mA.

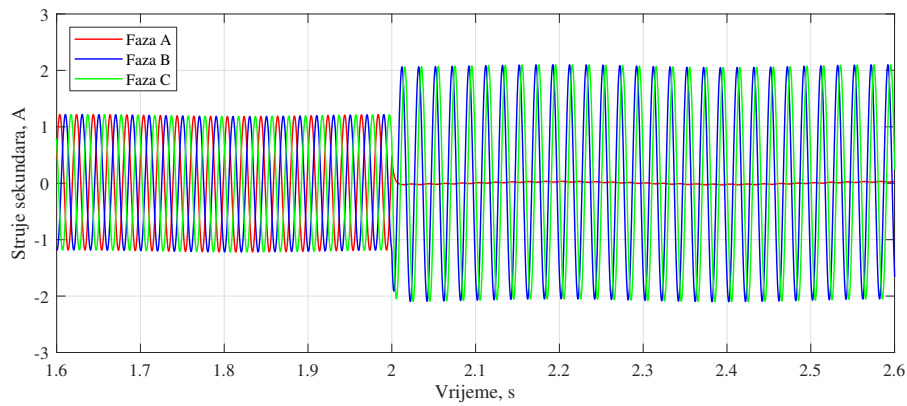
Magnetski tok, struje primara, sekundara i tercijara (slike 4.31 - 4.34) za vrijeme istovremenog injektiranja 2,5 Hz, 100 V signala i metalnog zemljospoja u slučaju reducirane topologije mreže također ne pokazuju posebno toplinsko i naponsko opterećenje za naponske transformatore. Magnetski tok u jezgrama ne prelazi iznos od 55 Wb, struje primara su izobličene tijekom prijelazne pojave, a u stacionarnom stanju nema znatnog izobličenja. Struje sekundara i tercijara ne prelaze $1,4 A_{rms}$, odnosno $3,8 A_{rms}$.



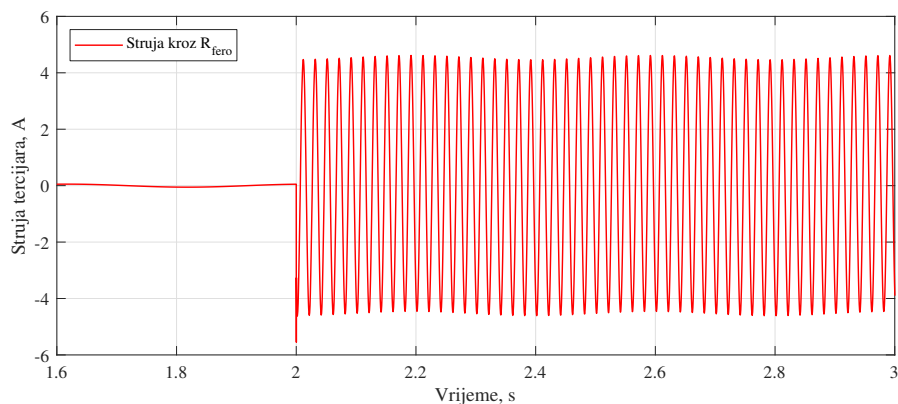
Slika 4.31: Magnetski tok u jezgrama naponskih transformatora pri istovremenom zemljospoju i injektiranju izmjeničnog signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz. Maksimalan iznos magnetskog toka u stacionarnom stanju doseže 55 Wb.



Slika 4.32: Struje primara naponskih transformatora pri istovremenom zemljospoju i injektiranju izmjeničnog signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz. U stacionarnom stanju nema značajnih izobličenja



Slika 4.33: Struje sekundara naponskih transformatora pri istovremenom zemljospoju i injektiranju izmjeničnog signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz. Vršna vrijednost struja sekundara je 2 A.



Slika 4.34: Struja u spoju pomoćnih namota naponskih transformatora u trokut pri istovremenom zemljospoju i injektiranju izmjeničnog signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz. Vršna vrijednost struje tercijara je 4,5 A.

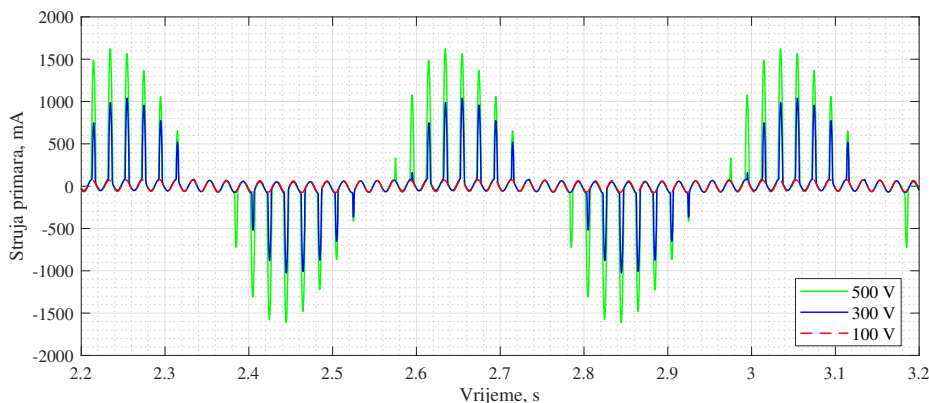
4.6 Utjecajni faktori na injektiranje i detekciju signala

4.6.1 Utjecaj amplitude injektiranog signala

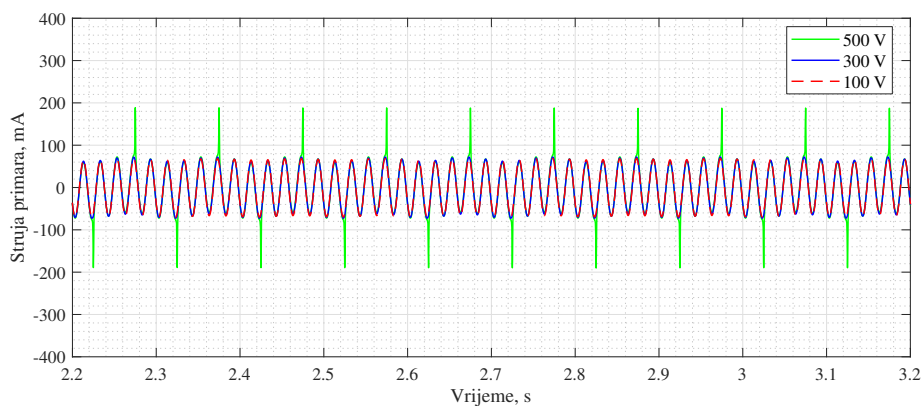
U dosadašnjim simulacijama razmatrano je injektiranje signala amplitude 100 V. Povećanjem amplitude injektiranog signala očekuje se lakša detekcija injektiranog signala s obzirom na povećanu amplitudu određene injektirane komponente u frekvencijskom spektru rezidualne struje na odcjepu u kvaru. Međutim, potrebno je provjeriti utjecaj povišene amplitude na naponske transformatore. Utjecaj promjene amplitude napona na generatoru signala na struju primara, uz stalne frekvencije od 2,5 Hz i 10 Hz, prikazan je na slikama 4.35 i 4.36.

Za odabranu stalnu frekvenciju injektiranog signala od 2,5 Hz, izobličenje struje primara se ne događa za injektiranje signala amplitude 100 V. Pri povećanju amplitude injektiranog signala na 300 V i 500 V, izobličenje postaje veće i dužeg trajanja (tablica 4.7), što može oštetiti primarne namote pri dugotrajnom injektiranju. Za odabranu stalnu frekvenciju od 10 Hz, izobličenje se javlja tek pri injektiranju signala amplitude 500 V, što je povoljno za naponski

transformator, ali povećana frekvencija će utjecati na raspodjelu injektiranog signala u mreži.



Slika 4.35: Struje primara u fazi B pri injektiranju signala 2,5 Hz različitih amplituda



Slika 4.36: Struje primara u fazi B pri injektiranju signala 10 Hz različitih amplituda

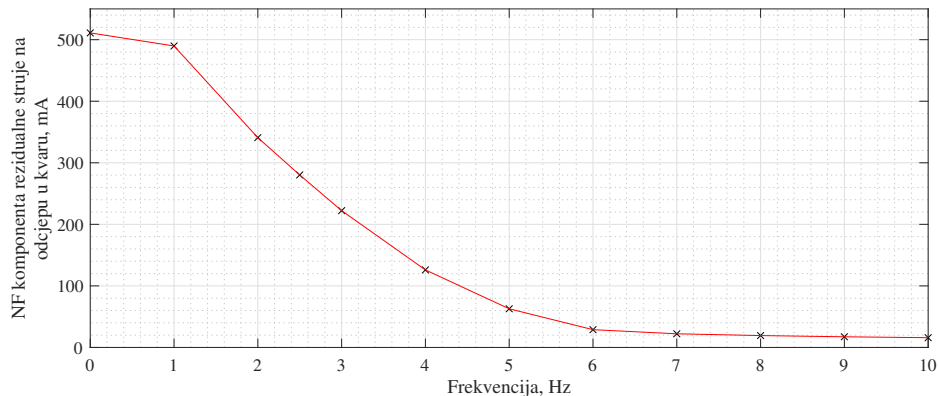
Tablica 4.7: Usporedba parametara naponskih transformatora pri injektiranju 2,5 Hz amplituda 100, V, 300 V i 500 V

| Amplituda injektiranog signala | 2,5 Hz komponenta u $3I_0$ struji | Najveća struja primara | Najveća struja sekundara | Najveća struja tercijara | Najveći tok | Zasićenje |
|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-------------------|
| 100 V | 19 mA | 74 mA | 2,09 A | 4,6 A | 55,1 Wb | ne |
| 300 V | 280 mA | 1005 mA | 2,15 A | 4,76 A | 67,38 Wb | periodički |
| 500 V | 596 mA | 1600 mA | 2,19 A | 4,90 A | 75,10 Wb | periodički, dulje |

4.6.2 Utjecaj frekvencije injektiranog signala

Niska frekvencija umanjuje utjecaj ostalih kapaciteta u mreži na injektirani signal jer za niske frekvencije kapaciteti predstavljaju visoke kapacitivne reaktancije. Odabir niže frekvencije injektiranog signala prema tome povećava vjerojatnost prolaska injektiranog signala kroz

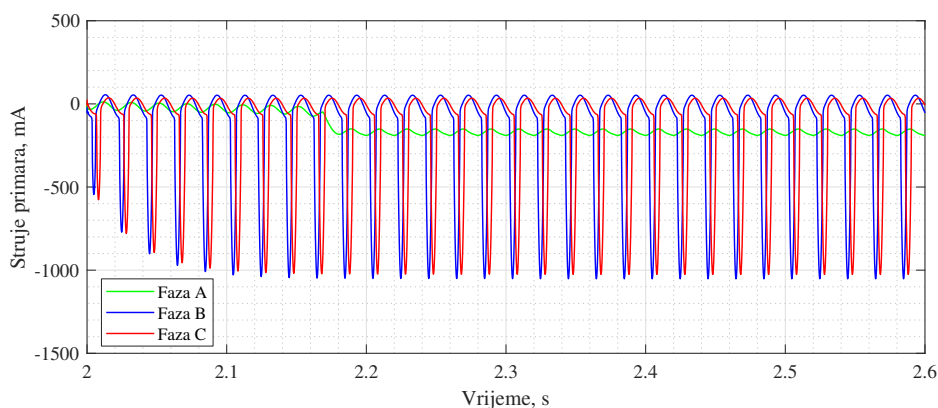
mjesto kvara. Utjecaj promjene frekvencije injektiranog signala u opisanu industrijsku mrežu prikazan je na slici 4.37.



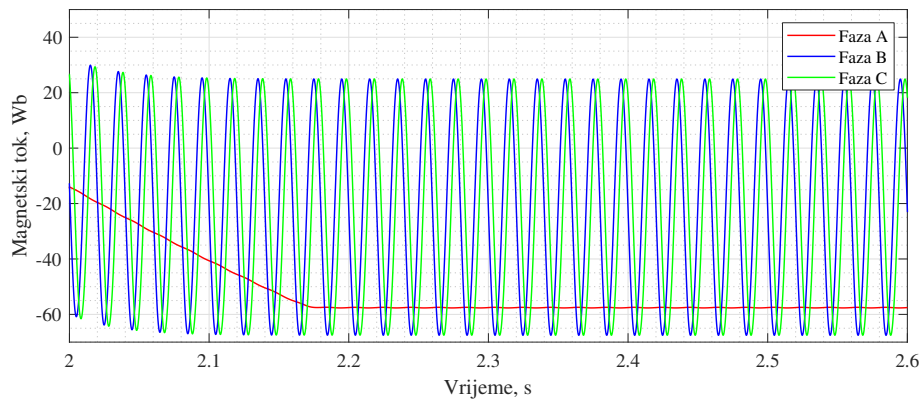
Slika 4.37: Rezidualna struja na kabelu u kvaru pri metalnom zemljospoju i istovremenom injektiranju signala različitih frekvencija, amplitude 300 V

Prikazani rezultati dani su za slučaj metalnog zemljospoja uz amplitudu izvora injektiranog signala efektivne vrijednosti 300 V. Uz injektiranje 300 V signala frekvencije 1 Hz, amplituda injektiranog signala u rezidualnoj struji na odcjepu na kojem nastaje kvar iznosi oko 500 mA. Približna vrijednost ostvaruje se i pri injektiranju istosmjernog signala amplitude 300 V. Za frekvencije signala od 2 Hz i 2,5 Hz, u rezidualnoj struji su amplitude injektiranog signala redom 340 mA i 280 mA. Daljnjim povećanjem frekvencije, uz stalnu amplitudu injektiranja od 300 V, iznos komponente injektiranog signala u rezidualnoj struji se smanjuje. Iako prema slici 4.36 pri injektiranju 10 Hz, 300 V nema zasićenja naponskih transformatora, 10 Hz komponenta u rezidualnoj struji na odcjepu na kojem je nastao kvar postaje teže uočljiva.

Osim iznosa rezidualne struje pri injektiranju signala različitih frekvencija, provjeren je utjecaj različitih frekvencija na naponske transformatore. Slike 4.38 - 4.39 prikazuju valne oblike struja primara i magnetskih tokova za vrijeme metalnog zemljospoja, uz injektiranje istosmjernog signala amplitude 300 V, a slika 4.40 usporedbu valnih oblika struje primara za injektiranje izmjeničnog signala amplitude 300 V različitih frekvencija.

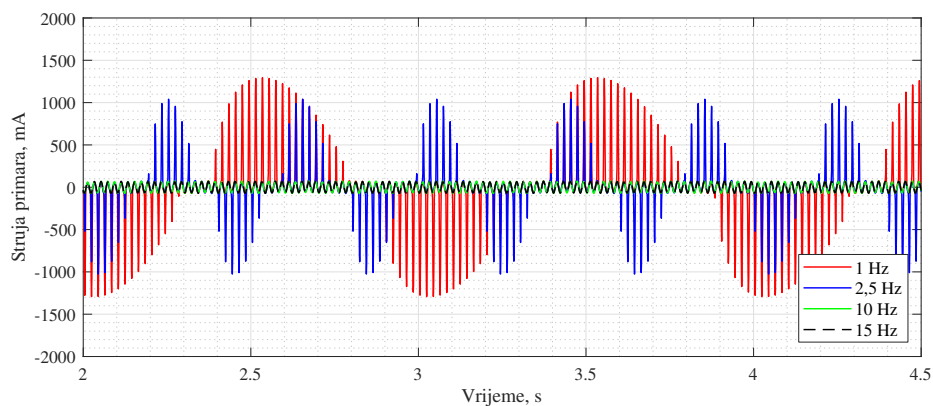


Slika 4.38: Struje primara pri injektiranju istosmjernog signala amplitude 300 V



Slika 4.39: Magnetski tok po fazama pri zemljospoju i injektiranju istosmjernog signala amplitude 300 V

Pri injektiranju istosmjernog signala događa se pomak u magnetskim tokovima i vršne vrijednosti u pozitivnim i negativnim poluperiodama nisu jednake. Kroz namote u fazi u kojoj je nastao kvar teče istosmjerna struja, a u preostale dvije faze dolazi do značajnog izobličenja. Efektivne vrijednosti struja primara po fazama iznose redom 171 mA, 378 mA i 370 mA. S obzirom da je primarni namot namotan lakiranom bakrenom žicom nazivnog promjera 0,224 mm, nije preporučena trajna struja viša od 100 mA. Budući da nije predviđeno da injektiranje bude trajno, i višestruka, ali kratkotrajna povišenja efektivne vrijednosti struje neće oštetiti transformatore. Ukoliko bi se pokazalo potrebno, na problem zagrijavanja primarnih namota može se utjecati povećanjem presjeka namota.



Slika 4.40: Struje primara u fazi B pri injektiranju signala amplitude 300 V, različitih frekvencija

Pri injektiranju izmjeničnog signala, frekvencija 1 Hz je najnepovoljnija s obzirom na naponske transformatore jer izaziva najdulje zasićenje uz najveća izobličenja struja primara (efektivne vrijednosti struja primara redom iznose 67 mA, 338 mA, 331 mA). Injektiranje signala frekvencije 2,5 Hz, 300 V izaziva kraće i manje izobličenje (efektivne vrijednosti struja primara redom iznose 22 mA, 213 mA, 206 mA). Injektiranje signala 300 V frekvencija 10 Hz i 15 Hz ne izazivaju zasićenje naponskih transformatora.

Prema analizi utjecaja amplitude i frekvencije injektiranog signala na njegov sadržaj u rezidualnoj struji odcjepa u kvaru jasno je da odabir omjera amplitude i frekvencije utječe na

naponske transformatore i mogućnost detekcije signala u mreži. Odabir parametara injektiranog signala je određen mogućnostima dostupne opreme za injektiranje i detektiranje signala, što će posljedično utjecati na mogućnost detekcije visokoomskih kvarova za određenu topologiju mreže.

4.6.3 Utjecaj otpora na mjestu kvara i veličine mreže

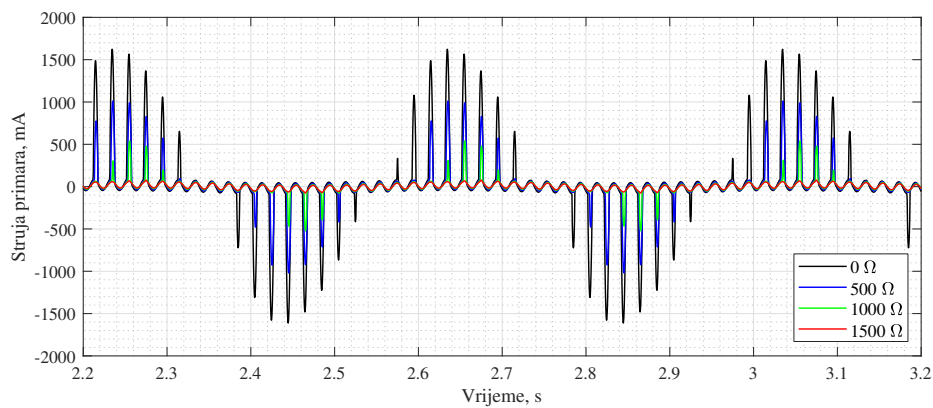
Na zasićenje jezgara naponskih transformatora i izobličenje struja primara dodatno utječe i otpor na mjestu kvara. Prikazane usporedbe na slikama 4.36 i 4.40 podrazumijevaju metalni zemljospoj. Porast otpora na mjestu kvara smanjuje ukupnu struju kvara, pa je umanjena i struja primara koja prestaje biti izobličena. Slika 4.41 prikazuje struju primara pri injektiranju signala frekvencije 2,5 Hz, amplitude 500 V pri zemljospoju s različitim otporima na mjestu kvara. Pri otporu od 1 k Ω izobličenje je znatno umanjeno, a pri 1,5 k Ω izobličenja nema. Slika 4.42 prikazuje jednaki utjecaj otpora na mjestu kvara pri injektiranju signala frekvencije 10 Hz, amplitude 500 V. Izobličenja nema već pri otporu od 500 Ω .

Utjecaj otpora na mjestu kvara pri korištenju usmjerene zemljospojne zaštite je prikazan u poglavlju 4.5.1. U nastavku je prikazan utjecaj otpora na mjestu kvara na mogućnost detekcije visokoomskih kvarova primjenom metode injektiranja signala. Pri porastu otpora na mjestu kvara, distribucija injektiranog signala u mreži se mijenja zbog izmijenjene dozemne impedancije. Povećanjem otpora na mjestu kvara, amplituda 2,5 Hz komponente u rezidualnoj struji se smanjuje. Kako je ranije prikazano, na ovo smanjenje se može utjecati povećanjem napona signalnog generatora koji generira niskofrekvencijski signal, što može olakšati detektiranje signala. Osim utjecaja povećane amplitude napona na generatoru signala, utjecaj na mogućnost detekcije će imati i raspodjela injektiranog signala u mreži, na što utječu svi dozemni kapaciteti i topologija mreže.

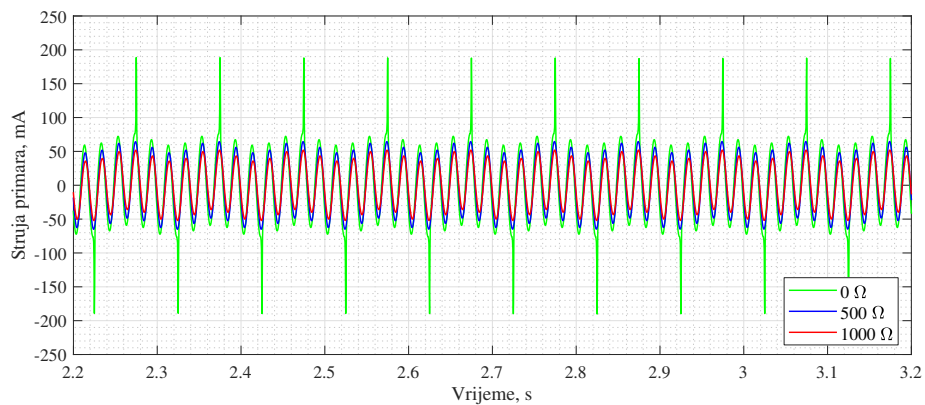
Slika 4.43 prikazuje valni oblik rezidualne struje na kabelu koji je u kvaru, za slučaj kvara na najkraćem kabelu B_BA (14 m) i injektiranje 100 V, 2,5 Hz signala, uz otpor na mjestu kvara od 20 k Ω . U valnom obliku je vidljiv sadržaj 50 Hz i 2,5 Hz komponente. Amplituda 50 Hz komponente iznosi 0,42 A, a amplituda 2,5 Hz komponente iznosi 8,78 mA.

Tablica 4.8 prikazuje usporedbu iznosa 2,5 Hz komponente i 50 Hz komponente u rezidualnoj struji na kabelu na kojem je nastao kvar u slučaju injektiranja signala 2,5 Hz amplituda 100 V i 300 V. Neovisno o injektiranom signalu, komponenta osnovnog harmonika ostaje nepromijenjena te se smanjuje s povećanjem otpora na mjestu kvara. Budući da usmjerena zemljospojna zaštita koristi iznose osnovnih harmonika u rezidualnim veličinama i djeluje na temelju njih, takva zaštitna funkcija ograničena je veličinama temeljenih na 50 Hz komponenti. S druge strane, na amplitudu injektiranog signala se može utjecati povećanjem napona signalnog generatora i povećavati je da se olakša detekcija visokoomskog kvara.

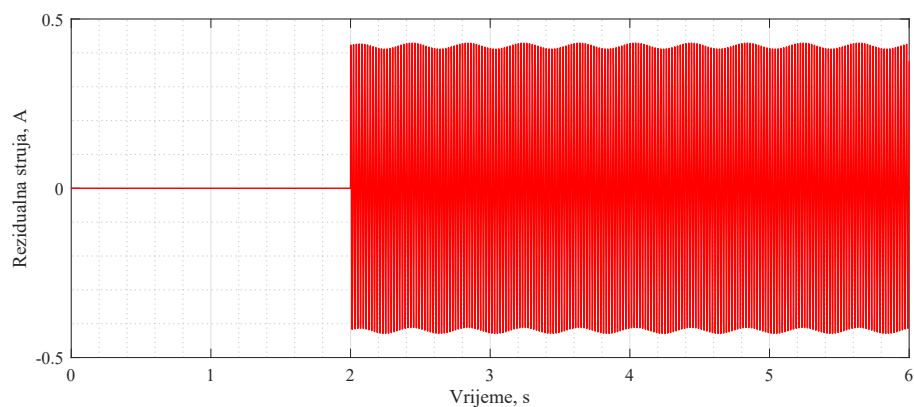
Osim rezidualne struje na kabelu u kvaru u ovisnosti o otporu na mjestu kvara, analizirana je



Slika 4.41: Struje primara u fazi B pri injektiranju signala 2,5 Hz, 500 V i pri različitim otporima na mjestu kvara



Slika 4.42: Struje primara u fazi B pri injektiranju signala 10 Hz, 500 V i pri različitim otporima na mjestu kvara

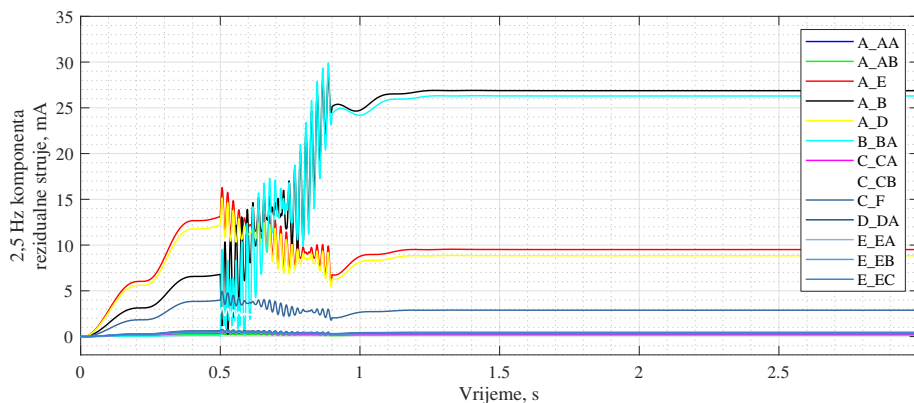


Slika 4.43: Rezidualna struja na kabelu u kvaru pri istovremenom zemljospoju s otporom na mjestu kvara od 20 kΩ i injektiranju izmjeničnog signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz

Tablica 4.8: Usporedba 2,5 Hz i 50 Hz komponente rezidualne struje na kabelu u kvaru

| Zemljospoj na kabelu B_BA | | | | | | | |
|---------------------------|------------------------|----------------------|--------------------------|---------------|------------------------|----------------------|--------------------------|
| 100 V, 2,5 Hz | | | | 300 V, 2,5 Hz | | | |
| R (kΩ) | $I_{rez, 2,5 Hz}$ (mA) | $I_{rez, 50 Hz}$ (A) | $I_{2,5Hz}/I_{50Hz}$ (%) | R (kΩ) | $I_{rez, 2,5 Hz}$ (mA) | $I_{rez, 50 Hz}$ (A) | $I_{2,5Hz}/I_{50Hz}$ (%) |
| 0 | 19,46 | 9,11 | 0,21 | 0 | 280,34 | 9,11 | 3,08 |
| 10 | 12,63 | 0,83 | 1,52 | 10 | 37,88 | 0,83 | 4,56 |
| 20 | 8,78 | 0,42 | 2,09 | 20 | 26,29 | 0,42 | 6,26 |
| 30 | 6,56 | 0,28 | 2,34 | 30 | 19,68 | 0,28 | 7,03 |
| 40 | 5,20 | 0,21 | 2,48 | 40 | 15,6 | 0,21 | 7,43 |
| 50 | 4,30 | 0,17 | 2,53 | 50 | 12,89 | 0,17 | 7,58 |
| 60 | 3,65 | 0,14 | 2,6 | 60 | 10,96 | 0,14 | 7,83 |

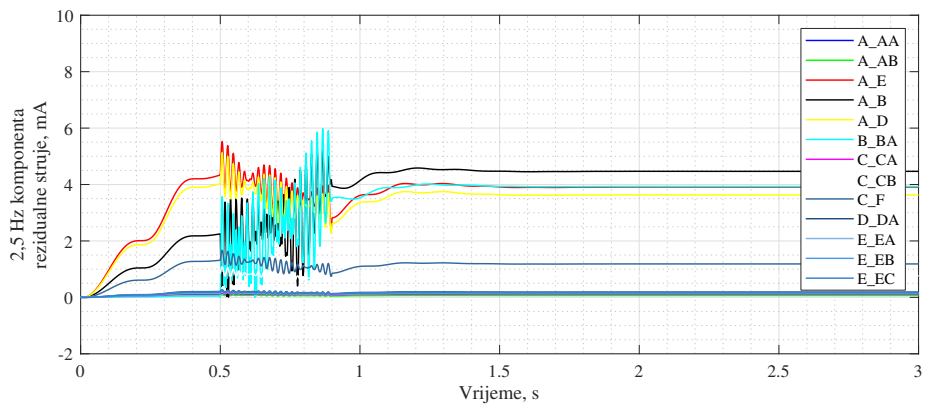
i distribucija injektiranog signala u mreži. Slika 4.44 prikazuje 2,5 Hz komponentu rezidualnih struja na ostalim odcjepima, za slučaj injektiranja signala 300 V, 2,5 Hz, za kvar 1 i otpor na mjestu kvara od 20 kΩ. Najveća amplituda 2,5 Hz komponente u rezidualnoj struji je na kabelu u kvaru i na njegovom povezujućem kabelu (kabel B_BA i povezujući kabel A_B), a iznosi oko 26 mA.



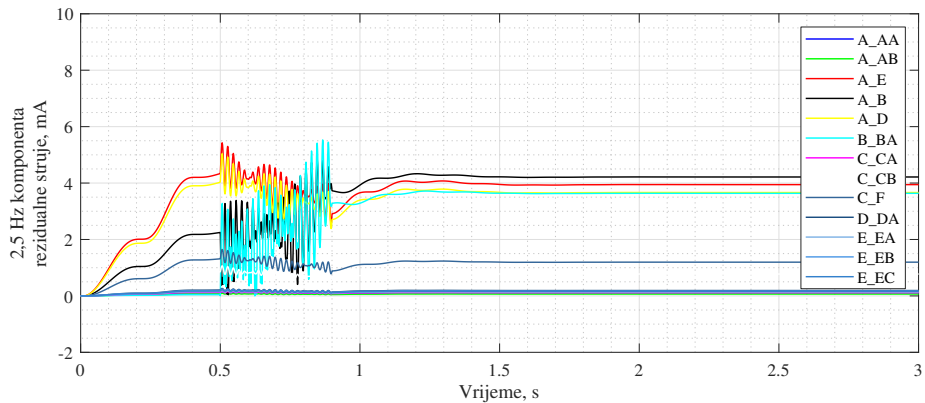
Slika 4.44: Rezidualna struja na kabelu u kvaru pri zemljospoju uz otpor na mjestu kvara od 20 kΩ uz istovremeno injektiranje signala 300 V, 2,5 Hz. Injektiranje traje od početka simulacije, a zemljospoj nastupa u 0,5 s.

Slike 4.45 i 4.46 prikazuju istu usporedbu rezidualnih struja u slučaju otpora na mjestu kvara u iznosu od 55 kΩ i 60 kΩ. Prema navedenim slikama, jasno je da zbog distribucije injektiranog signala po ostalim odcjepima, određivanje kabela u kvaru pri 60 kΩ na temelju injektiranog signala postaje nemoguće.

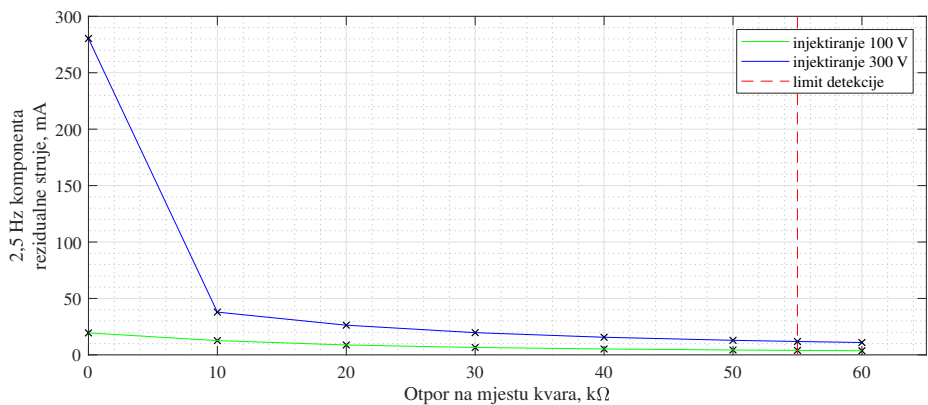
Zbog distribucije injektiranog signala po ostalim odcjepima, uz visoki otpor na mjestu kvara, rezidualne struje zdravih kabela i kabela u kvaru postaju sumjerljive. To potvrđuje da mogućnost detekcije visokoomskih kvarova ovisi o topologiji mreže i međusobnom odnosu dozemnih



Slika 4.45: Rezidualna struja na kabelu u kvaru u slučaju zemljospoja s otporom na mjestu kvara od 55 kΩ, za injektiranje 300 V, 2,5 Hz. U proračunu injektiranje traje od početka simulacije, a zemljospoj nastupa u 0,5 s.



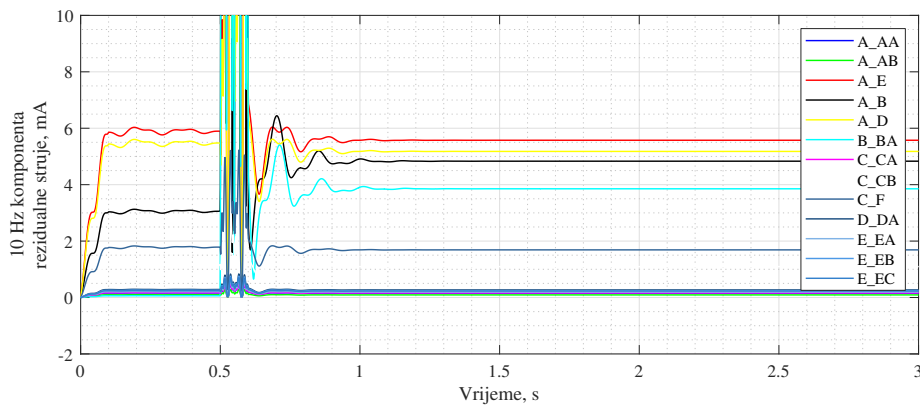
Slika 4.46: Rezidualna struja na kabelu u kvaru u slučaju zemljospoja s otporom na mjestu kvara od 60 kΩ, za injektiranje 300 V, 2,5 Hz. U proračunu injektiranje traje od početka simulacije, a zemljospoj nastupa u 0,5 s.



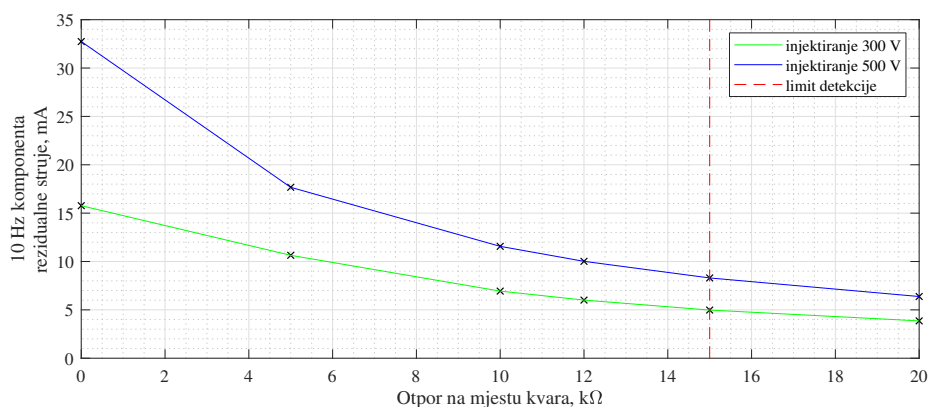
Slika 4.47: Rezidualna struja na kabelu u kvaru za različite otpore na mjestu kvara, za injektiranje 100 V i 300 V, 2,5 Hz

kapaciteta svih odcjepa u nekoj mreži. Slika 4.47 prikazuje teorijski limit detektiranja visokoomskog kvara za reduciranu topologiju industrijske mreže, za najgori slučaj kvara na najkraćem kabelu, pri injektiranju signala 2,5 Hz amplitude 100 V i 300 V. U slučaju homopolarne zemljospojne zaštite, u najkritičnijem slučaju, uz osjetljive releje, za istu mrežu, teorijski limit detekcije visokoomskog kvara iznosio je 35 kΩ.

Pri injektiranju signala od 10 Hz, osim već prikazanog utjecaja na smanjenje iznosa rezidualne struje, mogućnost detekcije visokoomskog kvara je manja zbog većeg utjecaja dozemnih kapaciteta na distribuciju signala. Slika 4.48 prikazuje 10 Hz komponente rezidualnih struja po odcjepima za slučaj kvara 1 uz otpor na mjestu kvara od 20 kΩ. U usporedbi sa slikom 4.44, koja prikazuje rezultate za isti slučaj pri injektiranju signala frekvencije 2,5 Hz, primjećuju se znatno niže amplitude rezidualnih struja i njihova sumjerljivost po odcjepima što onemogućuje određivanje mjesta kvara već pri otporu na mjestu kvara od 20 kΩ.



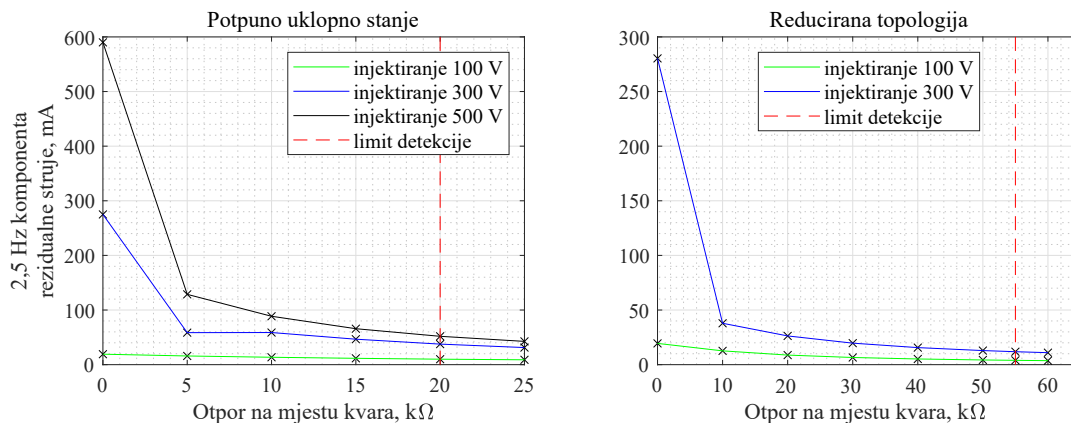
Slika 4.48: Rezidualna struja na kabelu u kvaru pri zemljospoju uz otpor na mjestu kvara od 20 kΩ uz istovremeno injektiranje signala 300 V, 10 Hz



Slika 4.49: Rezidualna struja na kabelu u kvaru za različite otpore na mjestu kvara, za injektiranje 300 V i 500 V, 10 Hz

Za isto mjesto kvara, teorijski limit detekcije pri injektiranju signala 10 Hz, 300 V i 500 V prikazan je na slici 4.49. Zbog povećanja frekvencije injektiranog signala, mogućnost detekcije visokoomskog kvara smanjena je s 55 kΩ na 15 kΩ.

Usporedba teorijskog limita detekcije za isto mjesto kvara, u punoj i reduciranoj topologiji prikazana je na slici 4.50.



Slika 4.50: Usporedba limita detekcije pri punom i reduciranom uklopnom stanju industrijske mreže

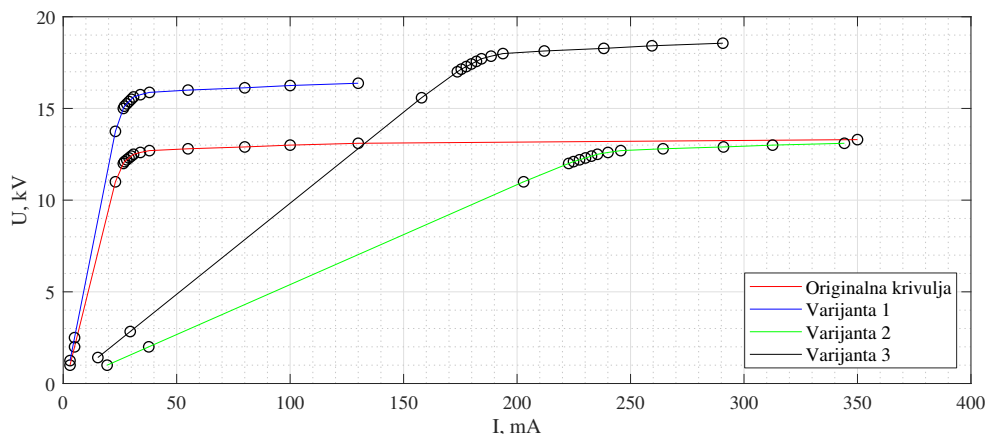
U oba slučaja, limit detekcije dostiže se primarno zbog distribucije injektiranog signala i utjecaja rezidualnih struja na ostalim kabelima. U slučaju reducirane topologije, teorijski limit detekcije visokoomskih kvarova je znatno viši nego u slučaju potpunog uklopnog stanja. Navedeno pokazuje da je primjena metode injektiranja u neuzemljenim mrežama učinkovitija u manjim mrežama, suprotno od klasične zemljospojne zaštite da bi metoda injektiranja preventivno mogla imati prednost za korištenje u manjim industrijskim postrojenjima u kojima klasična zemljospojna zaštita uz poznate probleme nije ekonomski opravdana.

4.6.4 Utjecaj krivulje magnetiziranja

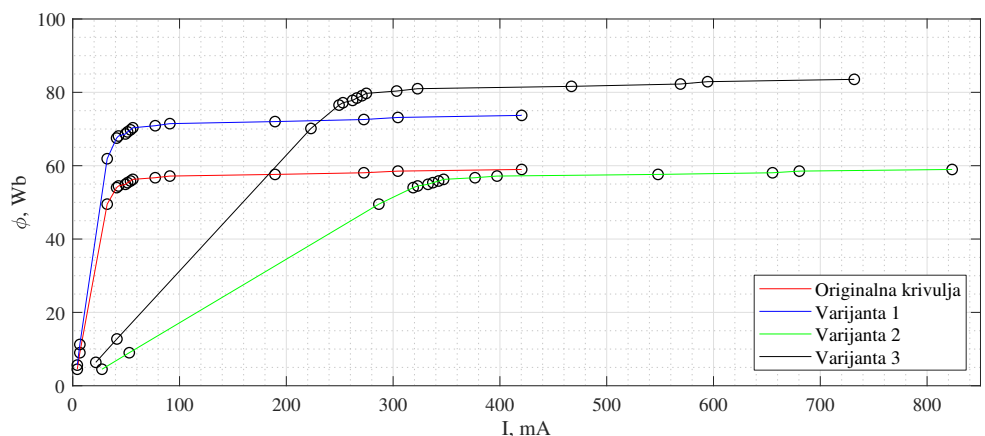
Prema dosadašnjim simulacijama, pokazano je kako pri injektiranju 2,5 Hz signala amplitude 300 V ili 500 V ipak dolazi do zasićenja pri metalnom zemljospoju i niskim otporima na mjestu kvara. Treba naglasiti da su u svim simulacijama korišteni postojeći, standardni induktivni naponski transformatori, dimenzionirani i namijenjeni za mjerenje napona u 10 kV mrežama. Ipak, kako bi se izbjeglo zasićenje pri injektiranju niskofrekvencijskog signala, moguće je prilagoditi krivulju magnetiziranja naponskog transformatora tako da injektiranje signala odabrane frekvencije i amplitude ne uzrokuje zasićenje jezgara te da naponski transformator bude prikladan i za mjerenje i za injektiranje signala u nekoj neuzemljenoj mreži.

U ovom poglavlju su predložene varijante krivulje magnetiziranja te je provjerena njihova prikladnost pri injektiranju signala. Slike 4.51 i 4.52 prikazuju originalnu krivulju magnetiziranja postojećeg naponskog transformatora koja je korištena za modeliranje i prethodne simulacije i tri predložene varijante krivulje magnetiziranja.

Varijanta 1 krivulje magnetiziranja ima povišeno koljeno krivulje u odnosu na originalnu krivulju, odnosno zasićenje jezgre će se dogoditi pri jednakoj struji magnetiziranja, ali pri višem naponu, odnosno magnetskom toku. Koljeno krivulje 2 je pomaknuto udesno u odnosu



Slika 4.51: Varijante krivulje magnetiziranja ($U - I$)



Slika 4.52: Varijante krivulje magnetiziranja ($\phi - I$)

na originalnu krivulju tako da zasićenje postiže pri jednakom naponu kao kod originalne krivulje, ali pri višoj struji magnetiziranja, što čini linearni dio krivulje položenijim u odnosu na originalnu krivulju. Varijanta 3 kombinira izmjenu i koljena i nagiba krivulje.

Navedene izmjene krivulja magnetiziranja se postižu izmjenama u magnetskom krugu naponskog mjernog transformatora, odnosno izmjenom karakteristika jezgre. Povećanje presjeka jezgre utječe na povećanje magnetskog toka i povišenje koljena krivulje magnetiziranja. Dodavanje jednog ili više zračnih raspora u magnetski krug utječe na nagib linearnog dijela krivulje. Provedeni proračun za redizajn jezgre prikazan u nastavku potvrđen je od strane proizvođača naponskih mjernih transformatora. Početni korak pri ponovnom izračunu točaka krivulje magnetiziranja je očuvanje uvjeta zasićenja u željeznoj jezgri, odnosno izračun magnetske indukcije i jakosti magnetskog polja prema $U-I$ parovima točaka originalne krivulje, koristeći sljedeće izraze:

$$B_m = \frac{U}{4.44 \cdot f \cdot N \cdot S} \quad (4.1)$$

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad (4.2)$$

gdje su U i I parovi efektivnih vrijednosti napona i struje prema točkama originalne krivulje magnetiziranja, N broj zavoja, S površina presjeka jezgre, a l srednja duljina magnetskih silnica.

Novi iznosi napona dobiveni su prema izrazu 4.1 uz konstantne iznose magnetske indukcije B_m izračunate za originalnu krivulju. Novi iznosi struja, uzimajući u obzir dodavanje zračnih raspora u jezgru za varijante krivulje 2 i 3, izračunate su prema:

$$I = \frac{H \cdot l}{N} + \frac{B_m \cdot d}{\mu_0 \cdot \sqrt{2} \cdot N} \quad (4.3)$$

gdje je d duljina dodanog zračnog raspora, a μ_0 relativna permeabilnost zraka.

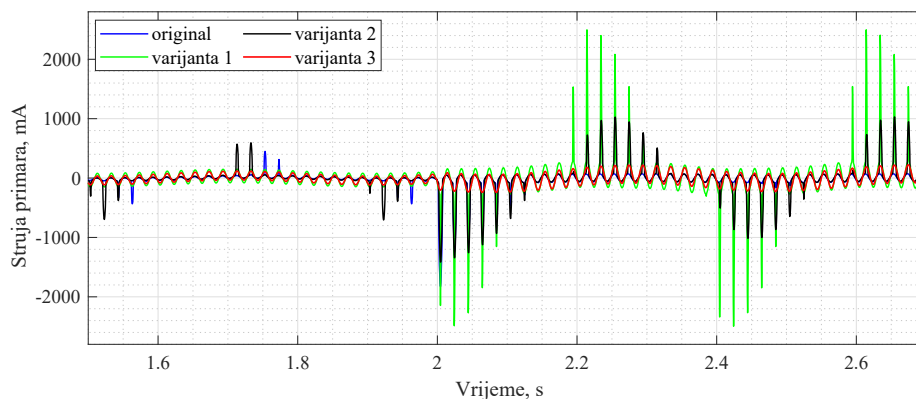
Tablica 4.9 prikazuje preračunate parove vrijednosti struja-napon za sve varijante krivulja magnetiziranja. Krivulja 1 je dobivena povećanjem presjeka jezgre s 24 cm² na 30 cm². Kri-

Tablica 4.9: U - I krivulje za različite varijante krivulje magnetiziranja

| Originalna krivulja | | Varijanta 1 | | Varijanta 2 | | Varijanta 3 | |
|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|-------------|---------|
| I , mA | U , V | I , mA | U , V | I , mA | U , V | I , mA | U , V |
| 3,0 | 1000 | 3,0 | 1250 | 19,4 | 1000 | 15,3 | 1417 |
| 5,0 | 2000 | 5,0 | 2500 | 37,7 | 2000 | 29,5 | 2833 |
| 23,0 | 11000 | 23,0 | 13750 | 202,9 | 11000 | 157,9 | 15583 |
| 26,5 | 12000 | 26,5 | 15000 | 222,7 | 12000 | 173,7 | 17000 |
| 27,0 | 12100 | 27,0 | 15125 | 224,9 | 12100 | 175,4 | 17142 |
| 28,0 | 12200 | 28,0 | 15250 | 227,5 | 12200 | 177,6 | 17283 |
| 29,0 | 12300 | 29,0 | 15375 | 230,1 | 12300 | 179,9 | 17425 |
| 30,0 | 12400 | 30,0 | 15500 | 232,8 | 12400 | 182,1 | 17567 |
| 31,0 | 12500 | 31,0 | 15625 | 235,4 | 12500 | 184,3 | 17708 |
| 34,0 | 12600 | 34,0 | 15750 | 240,0 | 12600 | 188,5 | 17850 |
| 38,0 | 12700 | 38,0 | 15875 | 245,7 | 12700 | 193,8 | 17992 |
| 55,0 | 12800 | 55,0 | 16000 | 264,3 | 12800 | 212,0 | 18133 |
| 80,0 | 12900 | 80,0 | 16125 | 291,0 | 12900 | 238,2 | 18275 |
| 100,0 | 13000 | 100,0 | 16250 | 312,6 | 13000 | 259,4 | 18417 |
| 130,0 | 13100 | 130,0 | 16375 | 344,2 | 13100 | 290,7 | 18558 |
| <i>Raspor, d</i> | 0 mm | 0 mm | 2 mm | 1,5 mm | | | |
| <i>Presjek jezgre, S</i> | 24 cm ² | 30 cm ² | 30 cm ² | 34 cm ² | | | |
| <i>Broj zavoja, N</i> | 11365 | | | | | | |
| <i>Srednja duljina, l</i> | 0,55 m | | | | | | |

vulja 2 se postiže za presjek jezgre od 30 cm^2 uz dodani zračni raspored od 2 mm, a krivulja 3 za presjek od 34 cm^2 i zračni raspored od 1,5 mm. Ovakve izmjene za konstrukciju naponskog transformatora nisu značajne i mogu se lako primijeniti.

Simulacija metalnog zemljospoja u punoj topologiji industrijske mreže je ponovljena za sve četiri varijante krivulje magnetiziranja. Slika 4.53 prikazuje struje primara pri zemljospoju i injektiranju 2,5 Hz, 300 V signala u industrijsku mrežu u slučaju pune topologije. Prema valnim oblicima struja primara se vidi da se izobličenje ne događa pri injektiranju, ni prije ni nakon zemljospoja koji se dogodi u drugoj sekundi, za slučaj varijante 3 krivulje magnetiziranja. Očito je da je krivulja 3 prikladna za primjenu jer nema zasićenja prije ili nakon pojave metalnog zemljospoja. Predložena alternativna krivulja magnetiziranja zahtijeva optimizaciju aktivnog dijela naponskog mjernog transformatora. Međutim, ovakva izmjena neće utjecati na njegovu funkciju i konačne dimenzije, što potvrđuju i iskustva proizvođača mjernih transformatora. Stoga se može induktivni naponski mjerni transformator s krivuljom magnetiziranja prema varijanti 3 može smatrati realnim za konstrukciju i primjenu i kao mjerni uređaj i kao uređaj za injektirane signale.

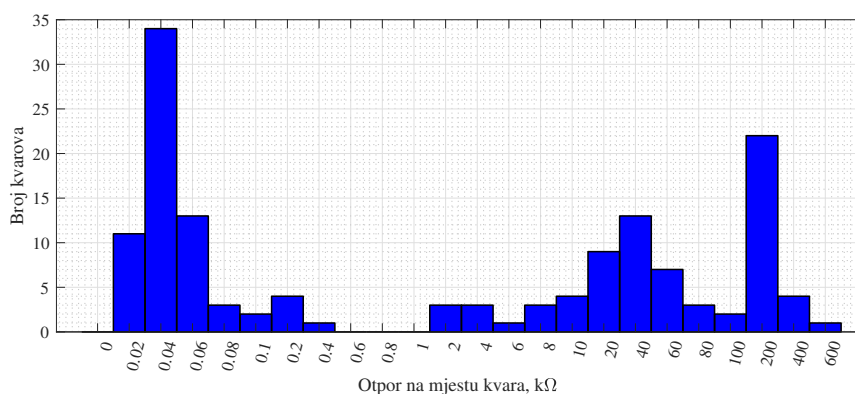


Slika 4.53: Struje primara u fazi B pri istovremenom metalnom zemljospoju i injektiranju 2,5 Hz, 300 V signala u industrijskoj mreži u slučaju pune topologije, za različite varijante krivulje magnetiziranja naponskih transformatora

Poglavlje 5

Mogućnost primjena metode injektiranja u distribucijskoj mreži

U distribucijskim mrežama je praksa uzemljenja neutralne točke različita. Velik broj izoliranih distribucijskih mreža se prema literaturi nalazi u skandinavskim zemljama [11]. One su razgranate i mješovite, odnosno sastoje se i od nadzemnih vodova i od kabela čiji su dozemni kapaciteti različiti. Razgranatost i velik broj točaka diskontinuiteta na kojima se mijenja valna impedancija voda otežava pronalaženje mjesta kvara i primjenu primjerice lokatora kvara. U distribucijskim mrežama, jednopolni kvarovi čine 50 - 90 % svih kvarova [11],[25]. Primjena metode injektiranja signala uz optimalno raspoređene strujne senzore za mjerenje rezidualnih struja može olakšati otkivanje zemljospoja. U distribucijskoj mreži, otpori na mjestu kvara mogu biti različiti, a raspodjela iznosa i učestalost pojavljivanja su različiti za svaku mrežu. Obično su podatci o otporima na mjestu kvara nepoznati ili nedostupni, a u literaturi nema puno objavljenih podataka o raspodijeli iznosa otpora na mjestu kvara. Slika 5.1 prikazuje statistiku otpora na mjestu kvara pri zemljospoju koji su zabilježeni u izoliranoj distribucijskoj mreži u Finskoj tijekom dvije godine. Visokoimpedantni kvarovi u navedenoj mreži dosežu iznose do 600 k Ω .

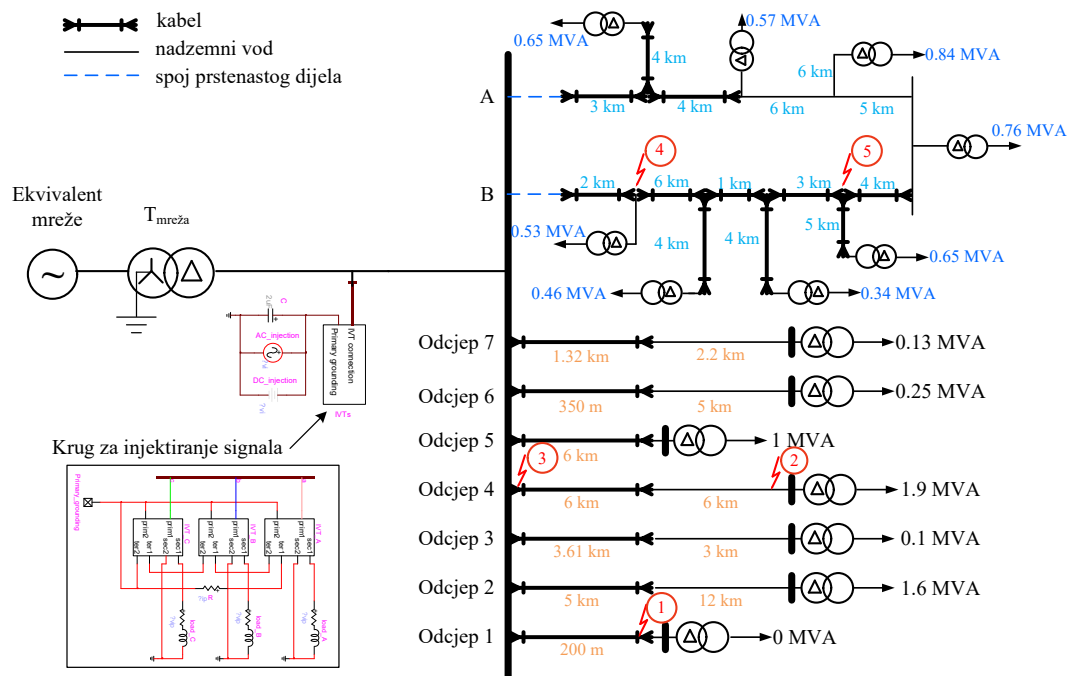


Slika 5.1: Iznosi otpora na mjestu kvara zabilježeni tijekom dvije godine u izoliranoj distribucijskoj mreži u Finskoj [11]

Kako bi se provjerila primjenjivost metode injektiranja niskofrekvencijskog signala u distribucijskoj mreži i mogućnost otkrivanja odcjepa s visokoomskim kvarom, modelirana je tipična mješovita, 10 kV izolirana distribucijska mreža, a rezultati simulacija prikazani su u sljedećim poglavljima [75].

5.1 Model distribucijske mreže

Shema modelirane distribucijske mreže prikazana je na slici 5.2, a topologija i podatci za modeliranje preuzeti su iz [25]. Mreža se sastoji od sedam radijalnih odcjepa i upetljanog dijela, odnosno prstenastog spoja, koji se sastoji od kabela i nadzemnih vodova.



Slika 5.2: Shema modelirane izolirane distribucijske mreže iz [25] za testiranje metode injektiranja signala

Glavni mrežni transformator i distribucijski transformatori su u trokut spoju na SN strani pa je sredjenaponski dio mreže potpuno izoliran. Transformatori su modelirani koristeći dostupne nisko-frekvencijske modele u EMTP-u. Ekvivalent VN mreže je modeliran na temelju VN napona od 132 kV i snage trolnog kratkog spoja od 250 MVA. Kabeli i nadzemni vodovi su modelirani π ekvivalentima, uzimajući u obzir odvode. Simulacije su provedene za dva slučaja - prvo uzimajući u obzir samo radijalni dio, a zatim uzimajući u obzir spoj prstenastog dijela mreže označenog odcjepima A i B, prema slici 5.2. Intermitirajući kvar i kvar na upetljanom dijelu su analizirani kao posebni slučajevi. Podatci korišteni za modeliranje prikazani su u tablici 5.1.

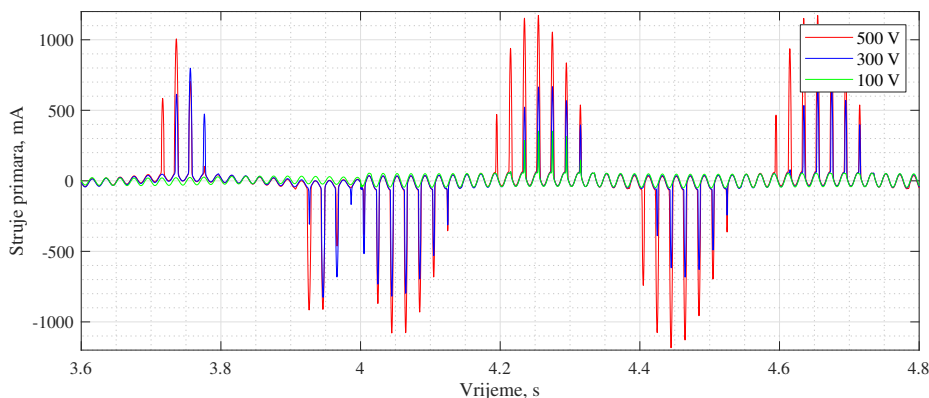
Tablica 5.1: Podaci korišteni za modeliranje 10 kV distribucijske mreže

| | Podaci o mreži |
|------------------------------|---|
| Glavni mrežni transformator | 100 MVA, 132/10,5 kV, YnD1 niskofrekvencijski model dostupan u EMTP-u s tipičnim vrijednostima otpora i induktiviteta namota |
| Distributivni transformatori | 2 MVA, 10,5/0,4 kV, Dyn1 niskofrekvencijski model dostupan u EMTP-u s tipičnim vrijednostima otpora i induktiviteta namota |
| Tereti | Konstantni pasivni tereti PQ model dostupan u EMTP-u |
| Kabeli | 3f π model, $R = 0,41 \Omega/\text{km}$, $X_L = 0,11 \Omega/\text{km}$, $C = 0,29 \mu\text{F}/\text{km}$, $G = 1,052\text{e-}14 \text{ S}/\text{m}$ |
| Nadzemni vodovi | 3f π model, $R = 0,077 \Omega/\text{km}$, $X_L = 0,34 \Omega/\text{km}$, $C = 5,976 \text{ pF}/\text{km}$, $G = 37,55\text{e-}12 \text{ S}/\text{m}$ |
| Kvar | idealni prekidač + otpor na mjestu kvara za trajni zemljospoj model intermitirajućeg kvara s diodama i različitim otporima ovisno o poluperiodi napona s dodatnim nelinearnim otporom za efekt povećanja struje kvara s vremenom |

5.2 Preliminarni rezultati simulacija

Preliminarna simulacija istovremenog zemljospoja i injektiranja signala u distribucijskoj mreži provedena je koristeći model standardnog induktivnog naponskog mjernog transformatora s inicijalnom krivuljom magnetiziranja. Simulacija je napravljena za slučaj 1, bez spoja upetljanog dijela mreže. U ovom slučaju, mreža se sastoji od sedam radialnih odcjeka, a ukupna kapacitivna struja mreže, neovisno o lokaciji zemljospoja, iznosi 36 A. Slika 5.3 prikazuje valne oblike struja primara pri injektiranju 2,5 Hz signala amplituda 100 V, 300 V i 500 V.

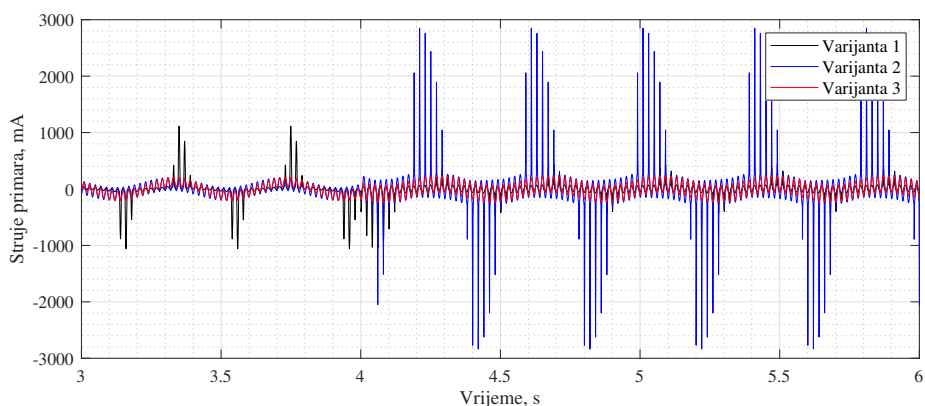
Pri injektiranju 100 V ne dolazi do značajnog izobličenja, kao pri injektiranju 300 V i 500 V. Amplituda 2,5 Hz komponente u struji kvara pri metalnom zemljospoju također ne ovisi o mjestu kvara, ali ovisi o amplitudi injektiranog napona preko naponskih mjernih transformatora, koji se može povećati za olakšanu detekciju signala. Primjerice, za prikazani slučaj injekcija od 100 V, 300 V i 500 V, 2,5 Hz komponenta u rezidualnoj struji odcjeka na kojem je nastao kvar iznosi redom 0,01 A, 0,1 A odnosno 0,24 A. Što se tiče detektiranja injektiranog signala, injektiranje signala amplitude 500 V bi bilo dovoljno visoko i preferirano između navedene tri amplitude. Kako je pokazano ranije, zasićenje naponskih mjernih transformatora pri



Slika 5.3: Struje primara za vrijeme injektiranja niskofrekvencijskog (2,5 Hz) signala i metalnog zemljospoja koji nastupa u 4. sekundi, za model standardnih naponskih mjernih transformatora

injektiranju signala amplitude 500 V se može izbjeći prilagodbom krivulje magnetiziranja.

Ponovljene su simulacije zemljospoja i injektiranja za modificirane krivulje magnetiziranja - varijante 1, 2 i 3 predložene u poglavlju 4.6.4. Valni oblici struja primara pri zemljospoju i injektiranju niskofrekvencijskog signala amplitude 500 V, za tri različite krivulje magnetiziranja prikazane su na slici 5.4.

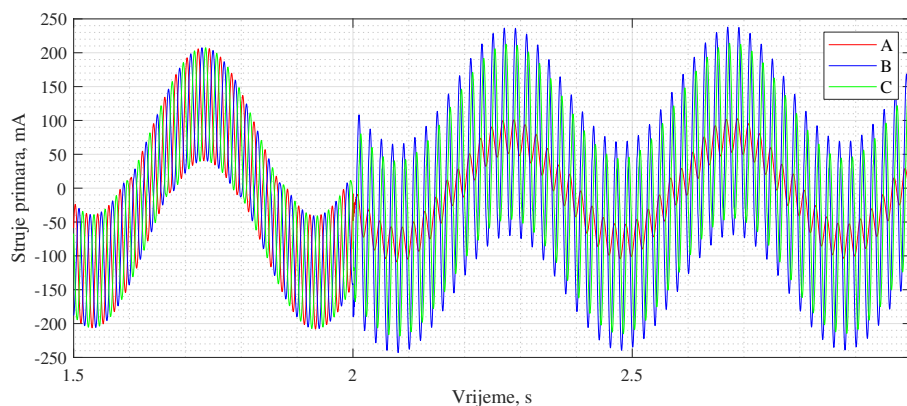


Slika 5.4: Struje primara u fazi B za vrijeme injektiranja niskofrekvencijskog (2,5 Hz) signala amplitude 500 V i metalnog zemljospoja koji nastupa u 4. sekundi, za modele naponskih mjernih transformatora s različitim krivuljama magnetiziranja

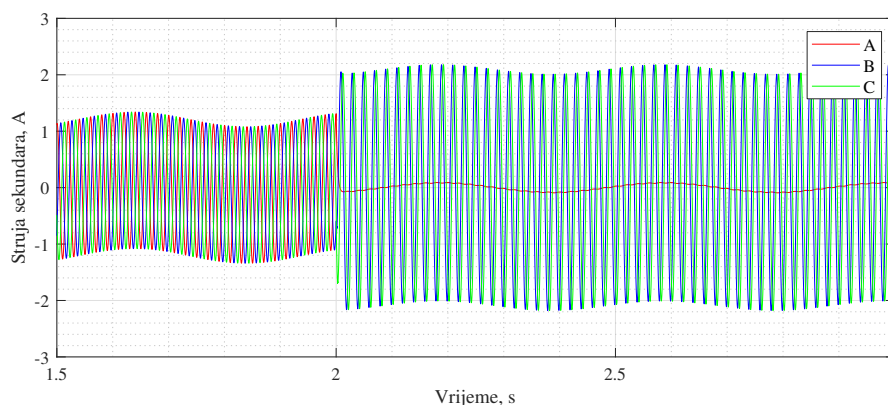
Ponovno je pokazano da je varijanta 3 krivulje magnetiziranja pogodna te za takav naponski mjerni transformator ne dolazi do zasićenja jezgre pri injektiranju niskofrekvencijskog signala, ni prije ni nakon nastanka zemljospoja. Dodatno, pri injektiranju signala 2,5 Hz, 500 V efektivne vrijednosti struja primara iznose oko 100 mA i prije i nakon zemljospoja. To znači da bi se za izmijenjeni dizajn jezgre, za karakteristike signala 2,5 Hz i 500 V, injektiranje moglo vršiti i trajno.

Zbog prikazanog utjecaja krivulje magnetiziranja, daljnje simulacije provedene su s varijantom 3 krivulje magnetiziranja i injektiranjem signala frekvencije 2,5 Hz, amplitude 500 V. Slike 5.5 - 5.8 prikazuju valne oblike vezane za naponske mjerne transformatore - struje primara,

sekundara, tercijara i tok u jezgrama, pri istovremenom injektiranju signala 2,5 Hz, 500 V i metalnom zemljospoju koji nastupa u 2. sekundi. U svim valnim oblicima vidljive su frekvencije 50 Hz i 2,5 Hz. Slika 5.5 prikazuje struje primara pri ovakvom injektiranju. Vršne vrijednosti struja primara u zdravim fazama ne prelaze 230 mA, te nema vidljivog izobličenja. Slika 5.6 prikazuje valne oblike struja sekundara u zdravim fazama ne prelaze 2,2 A. Slika 5.7 prikazuje valni oblik struje kroz trokut spoj tercijarnih namota u kojem struja ne prelazi vršnu vrijednost od 4,8 A. Slika 5.8 prikazuje valne oblike tokova u jezgrama koji ne prelaze vršnu vrijednost od 76 Wb.

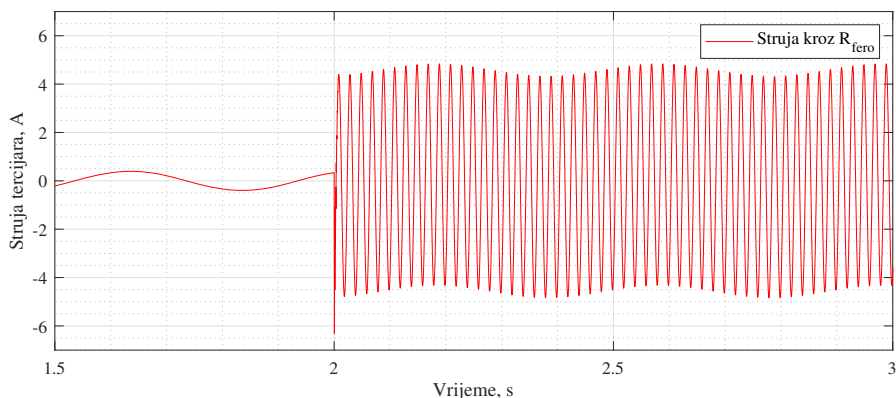


Slika 5.5: Struje primara za vrijeme injektiranja niskofrekvencijskog (2,5 Hz) signala amplitude 500 V i metalnog zemljospoja koji nastupa u 2. sekundi, za model naponskog mjernog transformatora s varijantom 3 krivulje magnetiziranja

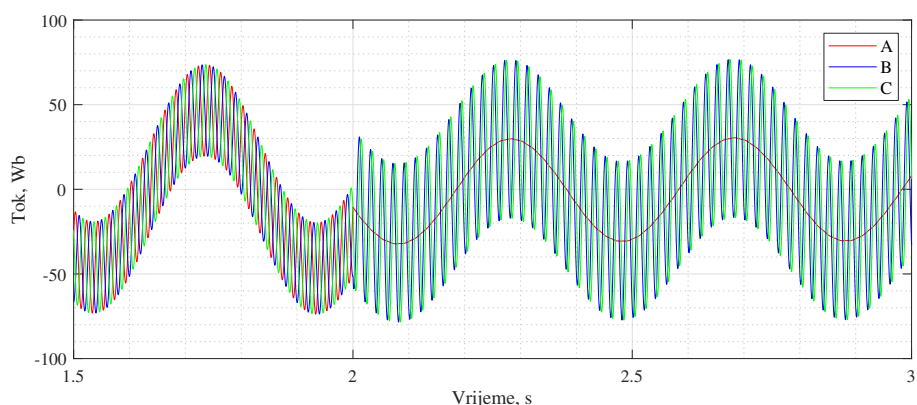


Slika 5.6: Struje sekundara za vrijeme injektiranja niskofrekvencijskog (2,5 Hz) signala amplitude 500 V i metalnog zemljospoja koji nastupa u 2. sekundi, za model naponskog mjernog transformatora s varijantom 3 krivulje magnetiziranja

Budući da je pokazano da je varijanta krivulje 3 prikladna za injektiranje signala prema početnim simulacijama, daljnji proračuni su napravljeni s varijantom 3 krivulje magnetiziranja uključenom u model naponskog mjernog transformatora. Prvo je razmatran slučaj 1 - radialni dio mreže bez spoja upetljanog dijela mreže.



Slika 5.7: Struja tercijara za vrijeme injektiranja niskofrekvencijskog (2,5 Hz) signala amplitude 500 V i metalnog zemljospoja koji nastupa u 2. sekundi, za model naponskog mjernog transformatora s varijantom 3 krivulje magnetiziranja



Slika 5.8: Tokovi u jezgrama naponskih mjernih transformatora za vrijeme injektiranja niskofrekvencijskog (2,5 Hz) signala amplitude 500 V i metalnog zemljospoja koji nastupa u 2. sekundi, za model naponskog mjernog transformatora s varijantom 3 krivulje magnetiziranja

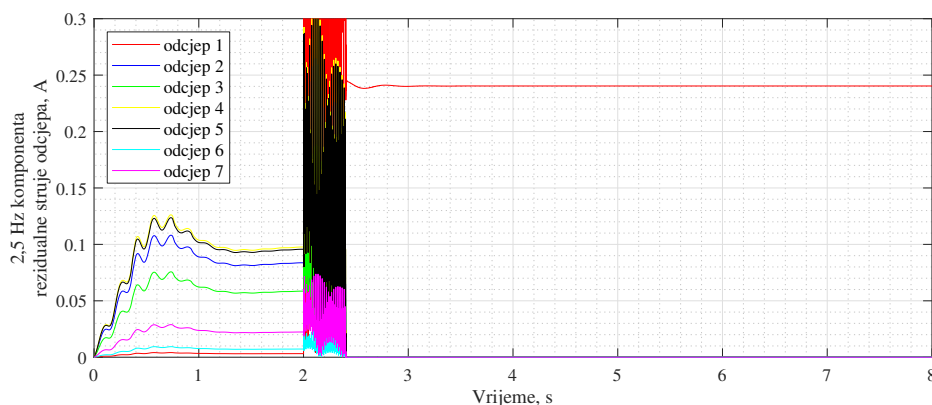
5.2.1 Simulacije u mreži bez spoja upetljanog dijela mreže

Na radijalnom dijelu mreže bez prstenastog spoja su napravljene simulacije kvarova na odcjepima s najmanjim i s najvećim dozemnim kapacitetom. Bez upetljanog dijela, mreža se sastoji od 7 radijalnih odcjepa. Doprinosne kapacitivne struje ovih 7 odcjepa izračunate su za 50 Hz i za 2,5 Hz i prikazane u tablici 5.2. Prema tablici 5.2, odcjep 1 ima najmanju doprinosnu kapacitivnu struju odcjepa, a odcjep 4 najveću. Iako odcjep 4 nije najdulji, većim dijelom se sastoji od kabela koji ima veći kapacitet u odnosu na nadzemni vod, što doprinosi ukupno najvećoj kapacitivnoj struji odcjepa.

Slika 5.9 prikazuje 2,5 Hz komponente u rezidualnim $3I_0$ strujama, izračunate na početku svakog od sedam odcjepa, u slučaju kvara 1 prema shemi 5.2. Kvar 1 odgovara kvaru na kraju odcjepa s najmanjim ukupnim dozemnim kapacitetom. Komponenta 2,5 Hz u rezidualnoj struji izračunata je na temelju pomičnog prozora (engl. *moving window*) od 2,5 Hz, stoga se odstupanja tijekom prvih 0,4 s i 0,4 s nakon pojave zemljospoja u drugoj sekundi zanemaruju, a relevantne su stacionarne vrijednosti nakon 2,4 s.

Tablica 5.2: Doprinosne kapacitivne struje odcjeka radijalnog dijela mreže

| | | 50 Hz | | 2,5 Hz | |
|----------|------------------|--------------------|--------------|--------------------|---------------|
| | $C_{Cuk}, \mu F$ | $X_{Cuk}, k\Omega$ | I_{Cuk}, A | $X_{Cuk}, k\Omega$ | I_{Cuk}, mA |
| Odcjep 1 | 0,058 | 54,909 | 0,155 | 1098,2 | 0,715 |
| Odcjep 2 | 1,521 | 2,093 | 4,066 | 41,9 | 18,754 |
| Odcjep 3 | 1,062 | 2,999 | 2,838 | 60,0 | 13,088 |
| Odcjep 4 | 1,764 | 1,805 | 4,713 | 36,1 | 21,739 |
| Odcjep 5 | 1,74 | 1,83 | 4,65 | 36,6 | 21,445 |
| Odcjep 6 | 0,131 | 24,24 | 0,351 | 484,8 | 1,619 |
| Odcjep 7 | 0,383 | 8,32 | 1,023 | 166,4 | 4,718 |

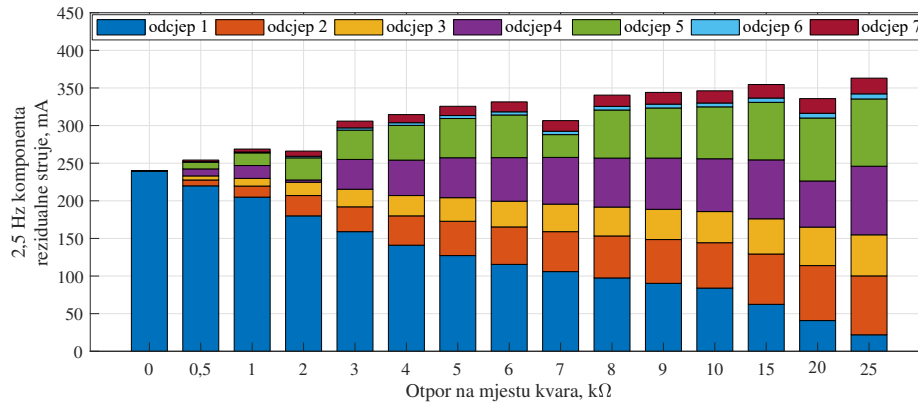


Slika 5.9: Iznosi 2,5 Hz komponente u rezidualnim strujama po odcjepima u slučaju kvara 1, pri injektiranju 2,5 Hz, 500 V signala

Prema slici 5.9 se može uočiti da prije zemljospoja, postoji određeni iznos 2,5 Hz komponente u rezidualnoj struji na svakom odcjepu zbog injektiranja koje se odvija i prije kvara. Inicijalne vrijednosti distribucije injektiranog signala na određenoj frekvenciji se mogu izmjeriti u stvarnoj mreži u stanju bez kvara i smatrati osnovnim mjerenjem i bazom za usporedbu pri zemljospoju i određivanju odcjeka u kvaru. Budući da je vrijednost komponente od 2,5 Hz prije kvara proporcionalna kapacitetu odcjeka, odcjep 4 ima najveću vrijednost 2,5 Hz komponente u rezidualnoj struji, a slijede odcjep 5 i odcjep 2. Nakon pojave zemljospoja, distribucija injektiranog signala se mijenja. Na odcjepu u kvaru, ona raste na 240 mA, a na ostalim zdravim odcjepima istovremeno pada. Ovo pokazuje da se 2,5 Hz komponenta može pratiti u mreži te prema putu zatvaranja najvećeg dijela injektiranog signala otkriti odcjep u kvaru.

Nakon simulacije metalnog zemljospoja, povećavan je otpor na mjestu kvara. Prema statistici prikazanoj slikom 5.1, u neuzemljenim mrežama se javljaju otpori u rasponu od 20 Ω do 400 Ω i 1 k Ω do 600 k Ω . Otpor kvara u rasponu od 30 - 40 Ω je prema navedenoj statistici

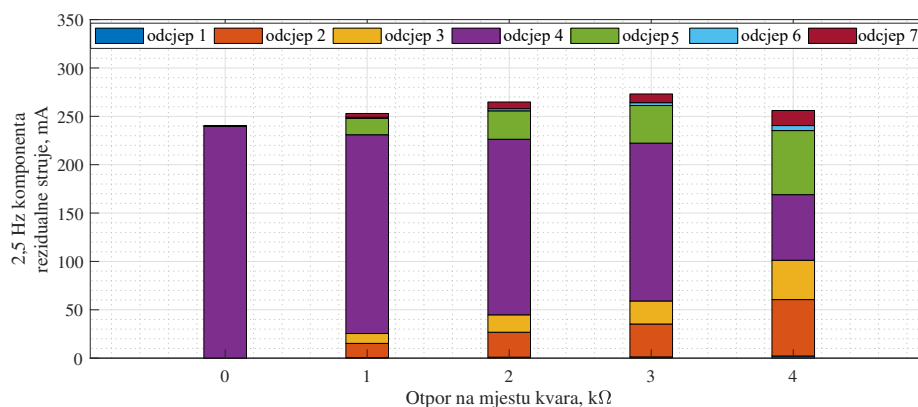
bio najčešći. Slika 5.10 prikazuje rezultate simulacije kvara 1 (kraj odcjepa 1) s otporima kvara od 0 Ω do 25 k Ω . Svaka boja prikazuje 2,5 Hz komponentu u rezidualnoj struji izmjerenu na početku svakog odcjepa.



Slika 5.10: 2,5 Hz komponenta u rezidualnim strujama po odcjepima ovisno o otporu na mjestu kvara, za slučaj kvara 1 (kraju odcjepa 1)

Prema slici 5.10 može se uočiti promjena u distribuciji injektiranog signala s povećanjem otpora na mjestu kvara. Pri otporu na mjestu kvara od 10 k Ω još uvijek se može zaključiti da zemljospoj nastao na odcjepu 1. Pri 15 k Ω , zbog odnosa u dozemnim impedancijama, raspodjela injektiranog signala je takva da 2,5 Hz komponenta ne može poslužiti za određivanje odcjepa u kvaru. U ovom slučaju, kako bi se povećala osjetljivost na visokoomski kvar, može se kratkotrajno sniziti frekvencija injektiranog signala te pratiti 1 Hz komponenta u rezidualnoj struji.

Slika 5.11 prikazuje simulacije provedene za slučaj kvara 2 (kraj odcjepa 4). Budući da je dozemni kapacitet odcjepa 4 inicijalno veći od kapaciteta odcjepa 1, očekuje se da će granica detekcije kvarova na odcjepu 4 biti dostignuta pri nižim otporima kvara u usporedbi sa slučajem kvara 1. Razlog tome je proporcionalnost rezidualne struje na odcjepu u kvaru razlici ukupnog dozemnog mrežnog kapaciteta i kapaciteta odcjepa u kvaru.



Slika 5.11: 2,5 Hz komponenta u rezidualnim strujama po odcjepima ovisno o otporu na mjestu kvara, za slučaj kvara 2 (kraju odcjepa 4)

Slika 5.11 pokazuje da 2,5 Hz komponenta u rezidualnim strujama odcjepa postaje sumjerljiva na odcjepu 4 i odcjepu 5 pri otporu na mjestu kvara od oko 4 k Ω . Stoga je, očekivano, granica detekcije dosegnuta pri nižem otporu na mjestu kvara.

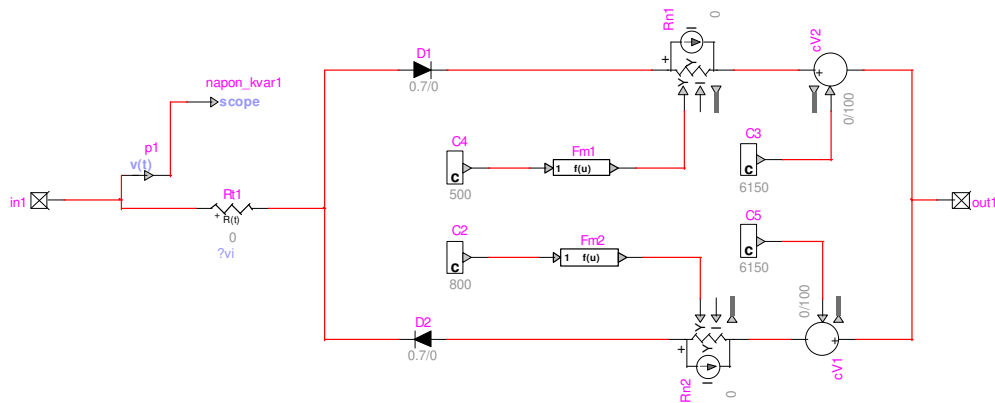
U slučaju kvara 3 označenog na shemi prikazanoj slikom 5.2 (kvar na početku odcjepa 4), dozemni kapacitet ukupne duljine odcjepa 4 nije na putu zatvaranja injektiranog signala. Zbog navedene činjenice, dozemni kapacitet odcjepa 4 kojeg vidi injektirani signal je smanjen, što povećava granicu detekcije visokoomskih kvarova. Uspoređujući kvar 2 i kvar 3, granice detekcije se ostvaruju redom pri otporima na mjestu kvara od 4 k Ω i 6 k Ω . Prema tome se može zaključiti da će mogućnost detekcije visokoomskih kvarova biti veća pri kvarovima koji se dogode bliže početku odcjepa, odnosno trafostanici.

Nakon stacionarnih visokoomskih kvarova, simulacijom je provjerena i mogućnost otkrivanja intermitirajućeg kvara.

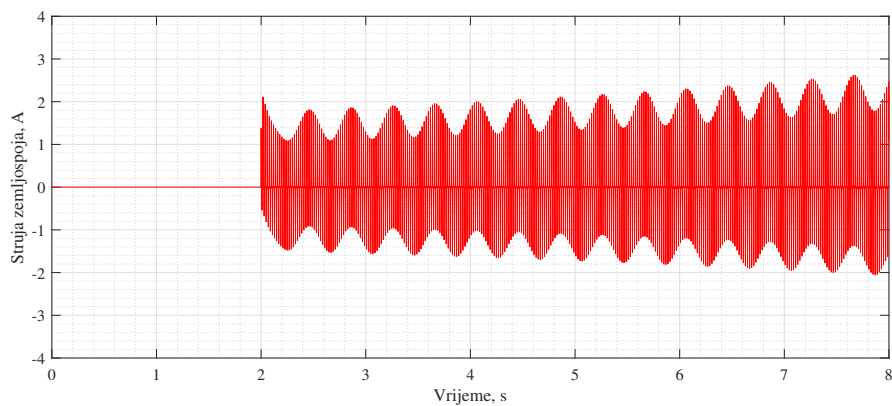
5.3 Mogućnost detekcije intermitirajućeg kvara

Prema [11], 67 % svih snimljenih kvarova tijekom jednog projekta u neuzemljenoj mreži su bili kvarovi intermitirajućeg tipa. Intermitirajući kvarovi iskre te ovisno o iznosu napona na potencijalnom mjestu kvara, periodički propaljuju stvarajući u mreži stanje zemljospoja [76]. Samogašenje luka na mjestu kvara se očekuje kada je struja zemljospoja niža od 5 A. Za veće struje zemljospoja, očekuje se učestalo paljenje luka uz povećanje amplitude struje kvara (engl. *build-up effect* ili *shoulder effect*) do pojavljivanja stacionarnog kvara. Kako bi se provjerila mogućnost detekcije injektiranog signala pri intermitirajućem kvaru, modeliran je poseban intermitirajući kvar. Intermitirajući kvarovi su različiti te se obično modeliraju na temelju mjerenja. Poznato je da su različiti u nadzemnoj i kabelskoj mreži. U nadzemnoj mreži je takav kvar primjerice uzrokovan povremenim kontaktom drveća i vodiča. U kabelskoj mreži se početna izbijanja uglavnom događaju zbog defekta u izolaciji, a takav kvar je teže modelirati i detektirati. U literaturi je dostupno više informacija i modela intermitirajućih kvarova nastalih u nadzemnoj mreži, čiji su modeli generički, ili su temeljeni na mjerenju. Ovdje je razmatran kvar na nadzemnom dijelu mreže, na lokaciji blizu prijelaza kabel - nadzemni vod, a korišten je model intermitirajućeg kvara prema [77] prikazan na slici 5.12. Model se sastoji od nelinearnog, vremenski promjenjivog otpora u seriji s dvije grane koje se inverzno spajaju u paralelu, ovisno o poluvalu napona na mjestu kvara. Svaka od dvije grane se sastoji od dodatnog otpora, istosmjernog naponskog izvora i diode. Vremenski promjenjivi otpor se temelji na eksperimentalnim podacima i predstavlja porast ukupne struje kvara s vremenom. Istosmjerni naponski izvori u granama predstavljaju naponski prag paljenja luka na mjestu kvara, a diode u seriji s izvorima osiguravaju ograničenje struje kvara kada je napon ispod probojnih vrijednosti definiranih izvorima.

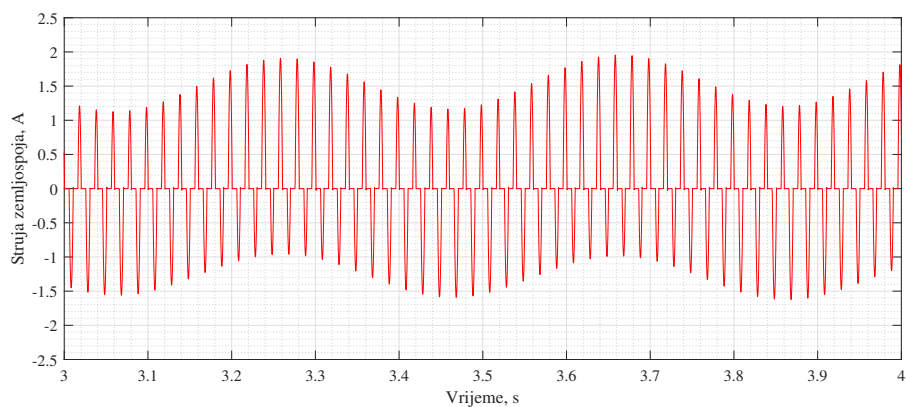
Budući da je opisani model kvara namijenjen za opis intermitirajućih kvarova na nadzemnim vodovima, kvar je simuliran na nadzemnom dijelu odcjepa 4, blizu prijelaza kabel-nadzemni vod. Slika 5.13 prikazuje struju kvara s očitim efektom porasta amplitude struje kvara s vremenom (*build-up effect*) i intermitirajućim efektom vidljivim na uvećanom dijelu struje kvara na slici 5.14.



Slika 5.12: Model intermitirajućeg kvara prema [77]

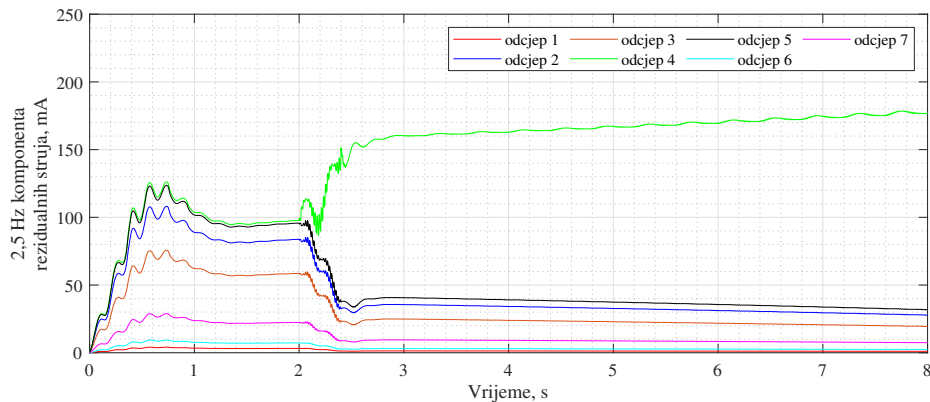


Slika 5.13: Struja kvara pri injektiranju i intermitirajućem zemljospoju



Slika 5.14: Uvećani dio struje kvara za vrijeme injektiranja signala i intermitirajućeg zemljospoja

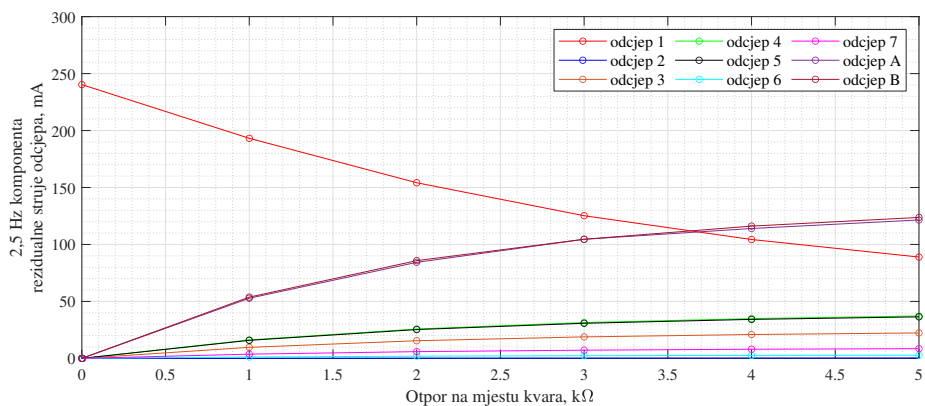
Slika 5.15 prikazuje 2,5 Hz komponentu u rezidualnim strujama svih odcjepa za vrijeme trajanja intermitirajućeg kvara. Injektiranje traje od početka simulacije, a intermitirajući zemljospoj nastupa u 2 s. Ponovno se opaža da je 2,5 Hz komponenta najviša na odcjepu na kojem nastaje zemljospoj. Komponenta frekvencije 2,5 Hz na odcjepu u kvaru se povećava kako ukupna struja kvara raste, dok se istovremeno na ostalim odcjepima smanjuje. Mogućnost detekcije injektiranog signala na odcjepu u kvaru na kraju će ovisiti o fluktuaciji otpora na mjestu kvara i distribuciji injektiranog signala.



Slika 5.15: 2,5 Hz komponenta u rezidualnim strujama svih odcjepa za vrijeme injektiranja signala i intermitirajućeg kvara

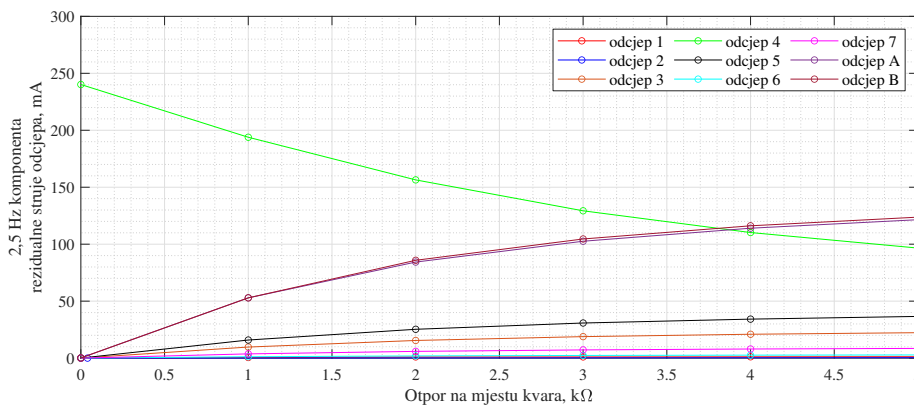
5.4 Mogućnost injektiranja u upetljanoj mreži

Spajanje prstenastog dijela mreže prema shemi sa slike 5.2, s visokim ukupnim dozemnim kapacitetom u usporedbi s radijalnim odcjepima, promijenit će ukupni dozemni kapacitet mreže i distribuciju injektiranog signala. Slike 5.16 i 5.17 prikazuju distribuciju injektiranog signala u slučaju kvara 1 na kraju odcjepa 1, odnosno kvara 2, na kraju odcjepa 4.



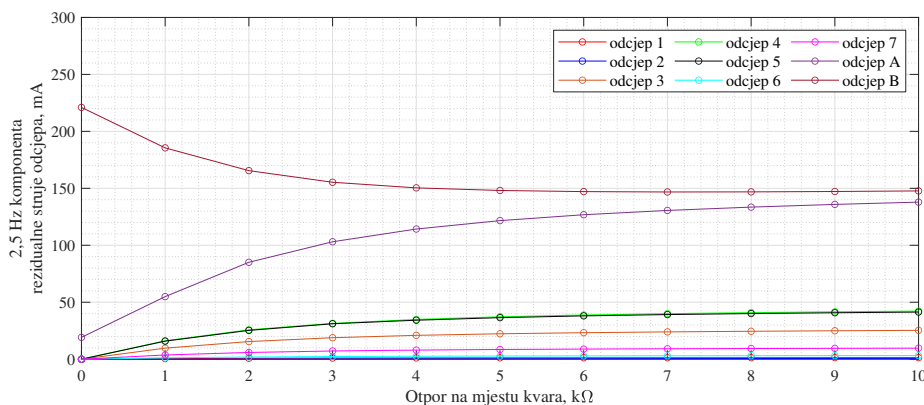
Slika 5.16: Distribucija 2,5 Hz komponente u rezidualnim strujama u slučaju kvara 1 - na kraju odcjepa 1

U usporedbi s prethodnim istim lokacijama kvara, ali bez spoja prstenastog dijela mreže, granica detekcije se pomiče prema nižim iznosima otpora na mjestu kvara, zbog utjecaja velikog

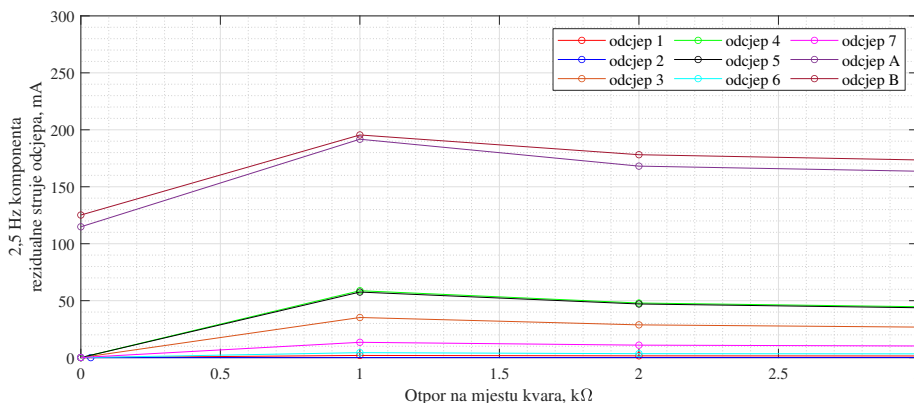


Slika 5.17: Distribucija 2,5 Hz komponente u rezidualnim strujama u slučaju kvara 2 - na kraju odcjepa 4

dozemnog kapaciteta prstena. Ovo pokazuje da je metoda učinkovitija u mrežama s kapacitetom prema zemlji koji je ravnomjernije raspoređen među odcjepima.



Slika 5.18: Distribucija 2,5 Hz komponente u rezidualnim strujama u slučaju kvara 4 - na početku odcjepa B na upetljanom dijelu mreže



Slika 5.19: Distribucija 2,5 Hz komponente u rezidualnim strujama u slučaju kvara 5 - na kraju odcjepa B na upetljanom dijelu mreže

Pri razmatranju zemljospoja koji se javljaju na prstenu, napravljene su simulacije kvarova 4 i 5 prema slici 5.2. Slika 5.18 prikazuje rezultate u slučaju kvara 4 – na odcjepu B, kvar blizu

transformatorske stanice. Injektirani signal u rezidualnoj struji je najveći na odcjepu B na kojem je nastao kvar do približno $7 \text{ k}\Omega$. Na oko $7 \text{ k}\Omega$, dozemna impedancija dvaju puteva do mjesta kvara se izjednačava, a injektirani signal se jednako distribuira na obje grane, odnosno putanje do mjesta kvara. Postaje nejasno je li se kvar dogodio na dijelu A ili B, međutim, uspoređujući $2,5 \text{ Hz}$ komponentu u rezidualnim strujama ostalih odcjepa, sa sigurnošću se može zaključiti da je kvar nastao negdje na upetljanom dijelu mreže. U slučaju kvara 5, bliže kraju odcjepa B, dozemne impedancije obaju puteva do mjesta kvara su sumjerljive čak i pri najnižim otporima na mjestu kvara. Bez dodatne daljnje analize, odcjep u kvaru je nepoznat, ali se opet može zaključiti da je kvar nastao negdje na upetljanom dijelu mreže.

Poglavlje 6

Eksperimentalna provjera principa rada metode injektiranja signala

Nakon proračuna i simulacija napravljena je eksperimentalna provjera principa rada metode injektiranja signala [78]. Za potrebe eksperimentalne provjere bila su dostupna tri nova i tvornički ispitana, standardna induktivna naponska mjerna transformatora tipa 4VPA1-12. Prvo su izmjerene krivulje magnetiziranja, kako bi se u model za proračun unijela točna karakteristika za svaki od tri naponska transformatora. Zatim su na trofaznom eksperimentalnom postavu simulirani metalni i visokoomski zemljospojevi uz istovremeno injektiranje signala preko primarnih namota naponskih transformatora. Prilikom eksperimenta mjereni su fazni naponi, struje kroz dozemne kapacitete, struja kvara te struje primarnih namota naponskih transformatora. Rezultati mjerenja uspoređeni su s rezultatima simulacija.

6.1 Podatci o korištenim induktivnim naponskim mjernim transformatorima

Na slici 6.2 su prikazani naponski mjerni transformatori korišteni u eksperimentalnoj provjeri principa rada metode injektiranja signala, a na slici 6.1 su prikazani podaci s natpisne pločice transformatora tipa 4VPA1-12.

| | | | | | | | | | | |
|---|--------------|--------------|-------------------|-------|-----------|---------|---------|----|---------|--|
| NAPONSKI TRANSFORMATOR VOLTAGE TRANSFORMER | | A-N | 10500/ $\sqrt{3}$ | V | | | | | | |
| Br. No. | 51003096 | a-n | 100/ $\sqrt{3}$ | V | 50 VA | kl. cl. | 0,5/3P | | | |
| Tip Type | 4VPA1-12 | HR T-4-1005 | da-dn | 100/3 | V | 25 VA | kl. cl. | 6P | | |
| | 12 / 28 / 75 | kV | Kl. iz. Cl. ins. | B | | V | | VA | kl. cl. | |
| Vf | 1,9/8h | Frekv. Freq. | 50 | Hz | Masa Mass | 22 | kg | | | |

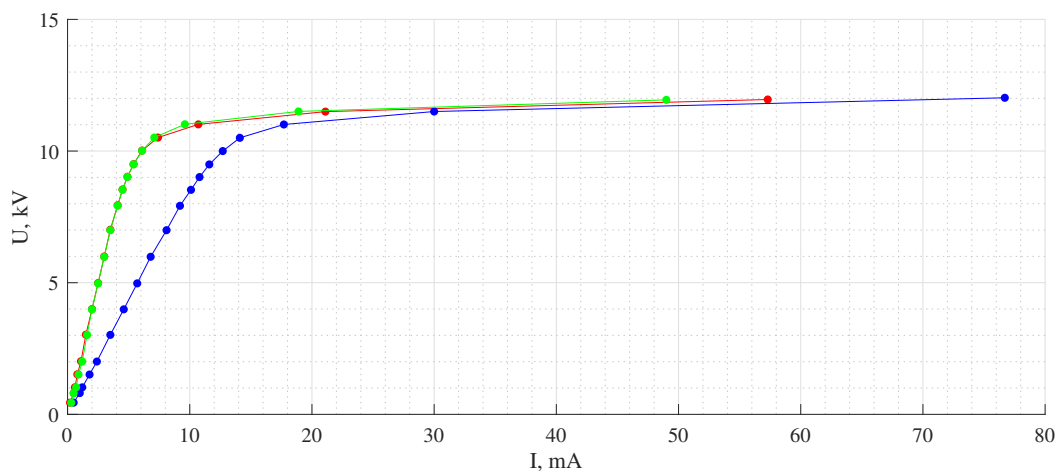
Slika 6.1: Podatci s natpisne pločice mjernog transformatora tipa 4VPA1-12



Slika 6.2: Tri induktivna naponska transformatora korištena za eksperimentalnu provjeru principa rada metode injektiranja signala

6.1.1 Mjerenje krivulje magnetiziranja

Krivulja magnetiziranja izmjerena je za sva tri naponska mjerna transformatora. Mjerenje je provedeno u praznom hodu. Primarni namoti triju transformatora su istovremeno bili priključeni na napon, svaki u odgovarajućoj fazi. Mjerenje je provedeno povisujući napon i snimajući struje primara u odabranim naponskim točkama. U tablici 6.1 su prikazane efektivne vrijednosti napona i struja u 19 odabranih točaka u rasponu od 440 V do 12 kV, a izmjerene krivulje su na slici 6.3 prikazane grafički.



Slika 6.3: Izmjerene krivulje magnetiziranja triju naponskih mjernih transformatora korištenih u eksperimentu

Prema grafičkom prikazu izmjerenih krivulja magnetiziranja, može se primijetiti odstupanje krivulje magnetiziranja naponskog transformatora korištenog u fazi B od krivulja istovjetnih transformatora korištenih u fazama A i B. Razlike u krivuljama magnetiziranja nastaju zbog razlika koje postoje u jezgrama transformatora, koje mogu razmjerno znatno varirati po svojim karakteristikama i kvaliteti materijala [79], [80], [81], [67]. Za proizvedene mjerne transformatore ovakve razlike u krivuljama u principu nisu važne jer je pri ispitivanju u konačnici važno zadovoljavanje zadane klase točnosti, što je redovito ispunjeno.

Tablica 6.1: Izmjerene U - I karakteristike triju naponskih mjernih transformatora

| Faza A | | Faza B | | Faza C | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| I , mA | U , kV | I , mA | U , kV | I , mA | U , kV |
| 0,2 | 0,445 | 0,5 | 0,446 | 0,3 | 0,444 |
| 0,5 | 0,806 | 1,0 | 0,808 | 0,5 | 0,805 |
| 0,6 | 1,027 | 1,2 | 1,026 | 0,7 | 1,026 |
| 0,8 | 1,520 | 1,8 | 1,513 | 0,9 | 1,516 |
| 1,1 | 2,017 | 2,4 | 2,006 | 1,2 | 2,008 |
| 1,5 | 3,027 | 3,5 | 3,019 | 1,6 | 3,020 |
| 2,0 | 3,999 | 4,6 | 3,989 | 2,0 | 3,985 |
| 2,5 | 4,987 | 5,7 | 4,975 | 2,5 | 4,971 |
| 3,0 | 5,994 | 6,8 | 5,985 | 3,0 | 5,978 |
| 3,5 | 7,014 | 8,1 | 6,995 | 3,5 | 6,994 |
| 4,1 | 7,941 | 9,2 | 7,921 | 4,1 | 7,924 |
| 4,5 | 8,541 | 10,1 | 8,527 | 4,5 | 8,529 |
| 4,9 | 9,024 | 10,8 | 9,012 | 4,9 | 9,018 |
| 5,4 | 9,501 | 11,6 | 9,492 | 5,4 | 9,496 |
| 6,1 | 10,019 | 12,7 | 10,000 | 6,1 | 10,015 |
| 7,4 | 10,513 | 14,1 | 10,502 | 7,1 | 10,514 |
| 10,7 | 11,013 | 17,7 | 11,009 | 9,6 | 11,017 |
| 21,1 | 11,497 | 30,0 | 11,502 | 18,9 | 11,505 |
| 57,3 | 11,958 | 76,7 | 12,023 | 49,0 | 11,943 |

6.2 Eksperimentalni mjerni krug

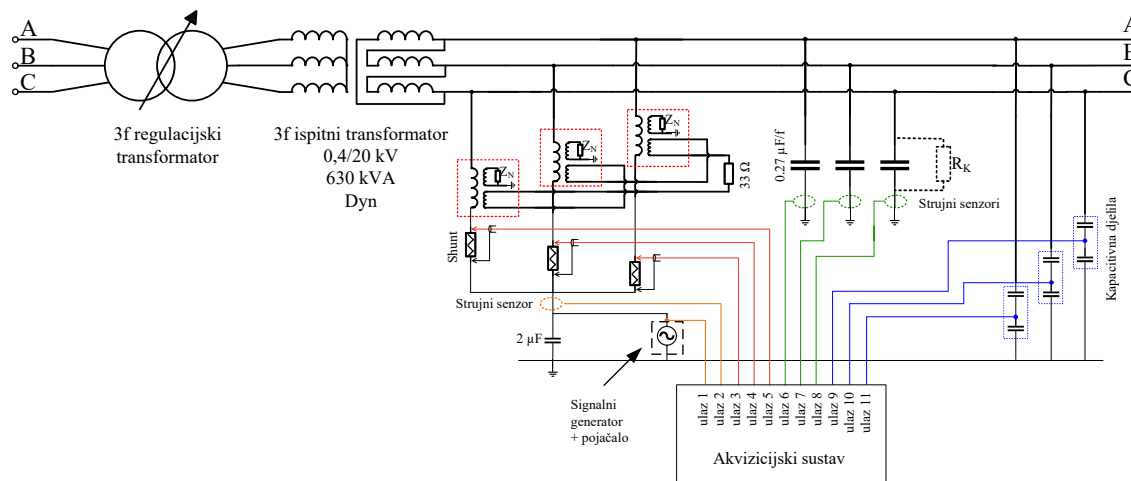
Eksperimentalni mjerni krug sadrži jedan trofazni, neopterećeni odcjep s kondenzatorima koji predstavljaju koncentrirani dozemni kapacitet kabela. Na ovakvom postavu, zemljospoj se postiže kratkim spajanjem jednog od kondenzatora - direktno na zemlju za mjerenje pri metalnom zemljospoju ili preko dodatnog otpora za mjerenje pri visokoomskom zemljospoju.

Popis opreme korištene pri eksperimentu dan je u tablici 6.2. Shema mjernog postava je prikazana na slici 6.4, a fotografije mjernog kruga u visokonaponskom laboratoriju prikazane su na slikama 6.5 i 6.6.

Za podizanje napona do 10,5 kV korišten je trofazni ispitni transformator 0,4/20 kV s viso-

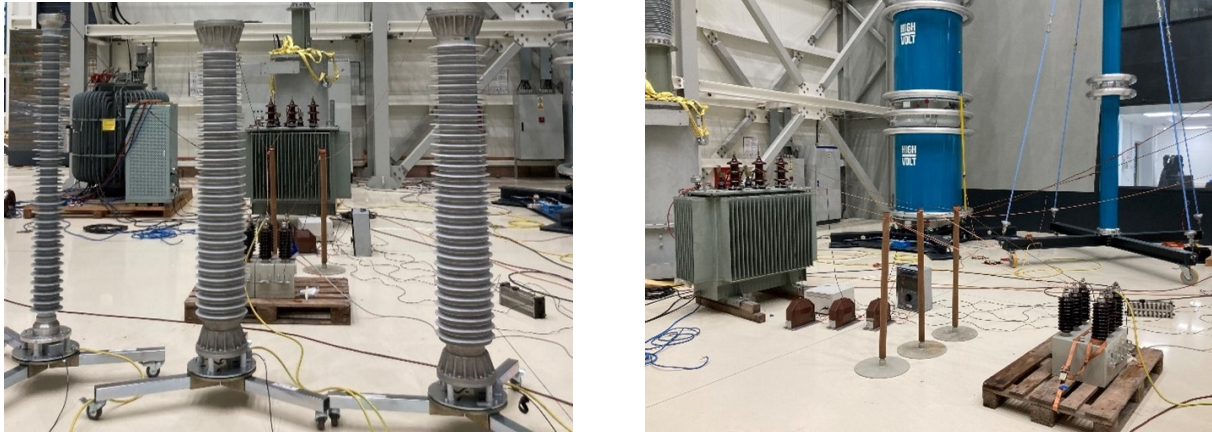
Tablica 6.2: Oprema korištena za mjerenje

| Oprema | Parametri |
|-------------------------------------|---|
| Trofazni regulacijski transformator | 0-420 V, 500 kVA |
| Trofazni ispitni transformator | 0,4/20 kV, 630 kVA, Dyn5, $u_k = 3,8 \%$ |
| Naponski induktivni transformatori | 12 kV, 50/25 VA, $10500/\sqrt{3}$ |
| SN kondenzatori | 0,27 μF , 20,785 kV, 36 kvar, $U_i = 50/125$ kV |
| Kapacitivna djelila | prijenosni omjeri 3595 / 3060 / 3151 |
| NN kondenzator | 2 μF , 2 kV |
| DC izvor | DELTA Elektronika SM500-CP-90, 500 V, 90 A |
| AC generator signala + pojačalo | R&S HMF 2550 + TOELLNER 7621-6, 40 A, 6 V |
| Strujni senzori | LEM IT 205-S ULTRASTAB, 200 A, AC i DC |
| Shunt | 100 m Ω , 1 V/10 A |
| Otpornici | grijači s otporima 690 Ω , 1440 Ω , 1250 Ω |
| Akvizijski sustav | DEWESOFT Sirius XHS + Dewesoft Sirius PWR-MCTS2 |

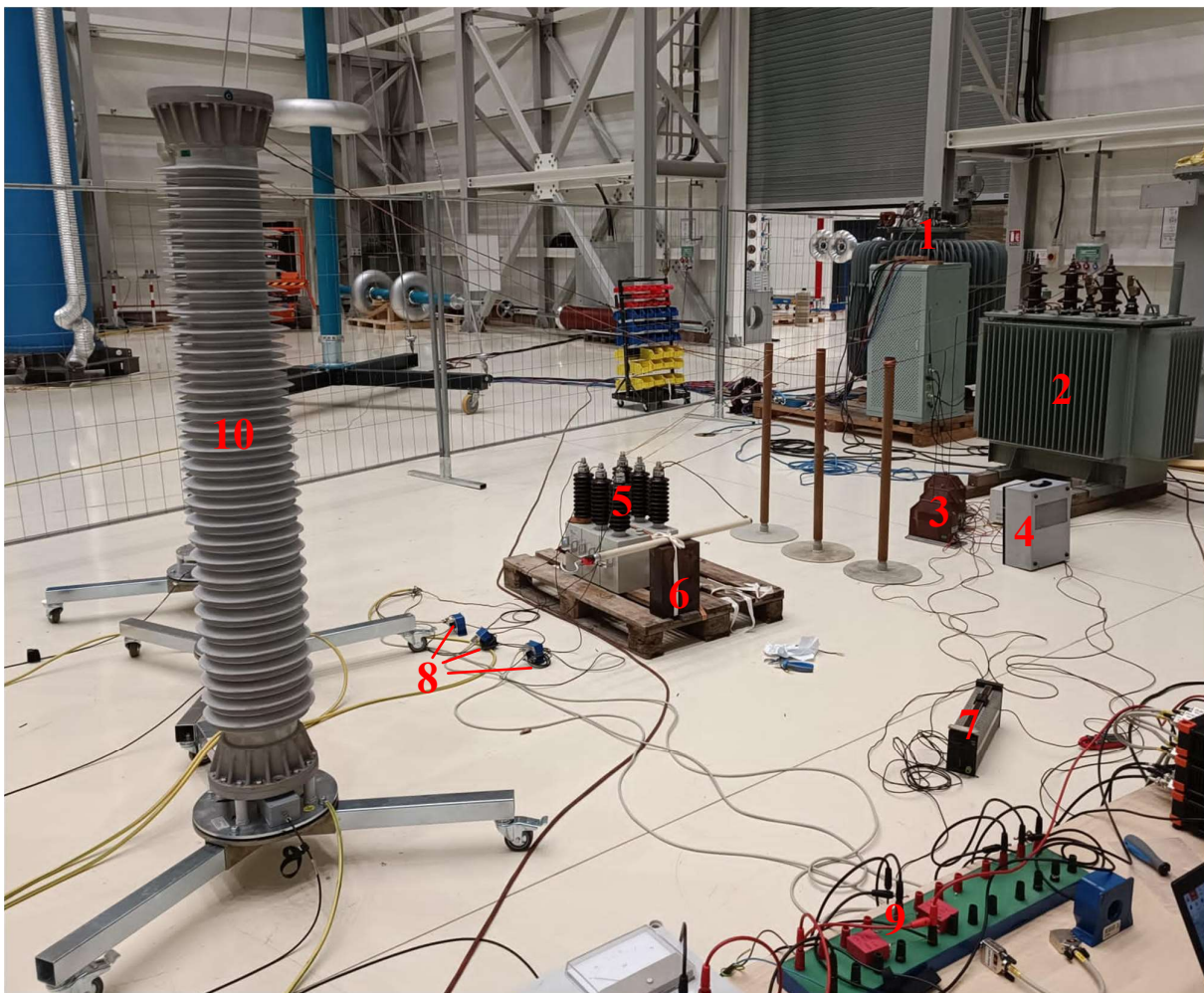


Slika 6.4: Shema mjernog kruga

konaponskim namotom u trokut spoju. Kapaciteti kondenzatora spojenih u sve tri faze iznose $0,27 \mu\text{F}/\text{fazi}$, što otprilike odgovara dozemnom kapacitetu jednog kilometra sredjenaponskog kabela. Za injektiranje izmjeničnog niskofrekvencijskog signala korišten je jednokanalni generator signala Rhode&Schwarz HMF 2550, koji ima mogućnost generiranja sinusoidalnog signala frekvencije od $10 \mu\text{Hz}$ do 50MHz , amplitude 10V . Za povećavanje amplitude takvog signala korišteno je pojačalo TOELLNER 7621-6 izlazne snage 240W (40A , 6V). Pri eksperimentalnoj provjeri principa rada ove metode, navedena oprema omogućila je generiranje niskofrekvencijskog signala maksimalne amplitude 100V . Slika 6.7 prikazuje spoj generatora signala i pojačala.



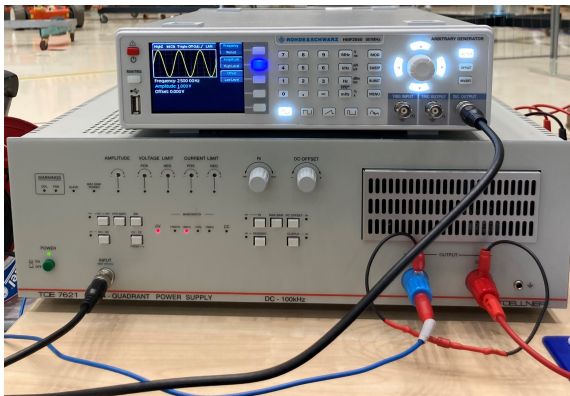
Slika 6.5: Fotografije mjernog postava



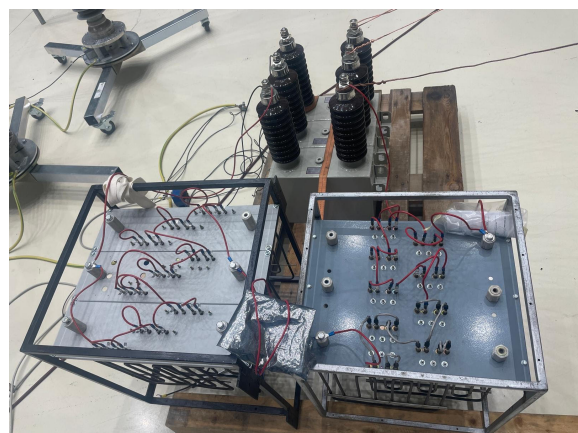
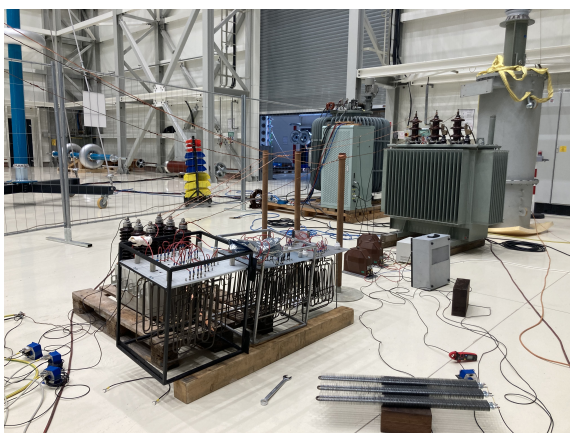
Slika 6.6: Fotografija mjernog postava s označenom opremom. 1 - trofazni regulacijski transformator, 2 - trofazni ispitni transformator, 3 - naponski mjerni transformatori, 4 - nazivni tereti na sekundarima mjernih transformatora, 5 - SN kondenzatori, 6 - mjesto zemljospoja na koje se spajaju različiti otpori na mjestu kvara, 7 - otpornik za sprječavanje ferorezonancije u krugu tercijara, 8 - strujni senzori za mjerenje struje kroz SN kondenzatore, 9 - zvijezda spoj primarnih namota mjernih transformatora i NN kondenzator, 10 - kapacitivna djelila za mjerenje faznih napona

Za generiranje i injektiranje DC signala korišten je DELTA Elektronika SM500-CP-90 istosmjerni izvor (500 V, 90 A). Izvori injektiranog signala spojeni su preko kondenzatora kapaciteta $2 \mu\text{F}$. Napon je mjeran kapacitivnim djelilima, a struje pojedinih primarnih namota preko shunta. Dodatno, struje kroz kondenzatore su mjerene strujnim sensorima čiji rad je temeljen na principu nultog toka (engl. *fluxgate current sensor*), a primjereni su za mjerenje i istosmjerne i izmjenične struje. Zbog broja dostupnih strujnih senzora, struja tercijara nije mjerena stalno, već kontrolno, u nekoliko navrata pri izmjeni tipa zemljospoja.

Za mjerenje u slučaju zemljospoja s otporom na mjestu kvara, odabrani su otpornici koji mogu biti na naponu 3,8 kV i provoditi struju od 1,3 A (slučaj otpora na mjestu kvara od 2150Ω). Od dostupne opreme, navedene uvjete zadovoljili su grijači čijim kombiniranjem su postignuti otpori od 690, 1440 i 2150Ω . Grijači spojeni u na mjesto kvara u mjerni krug prikazani su na slici 6.8, a termografska snimka otpornika tijekom mjerenja na slici 6.9. Prema termografskoj snimci, najviša temperatura otpornika iznosi $64,9 \text{ }^\circ\text{C}$.



Slika 6.7: Generator niskofrekvencijskog signala i pojačalo (lijevo) i akvizicijski sustav Dewesoft (desno)



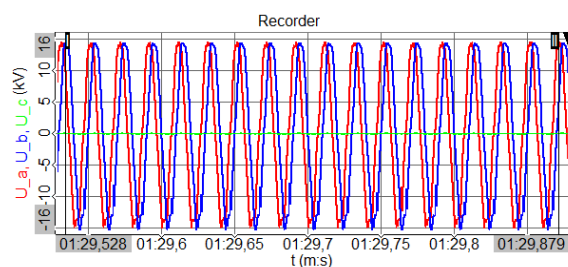
Slika 6.8: Fotografije otpornika korištenih pri mjerenju



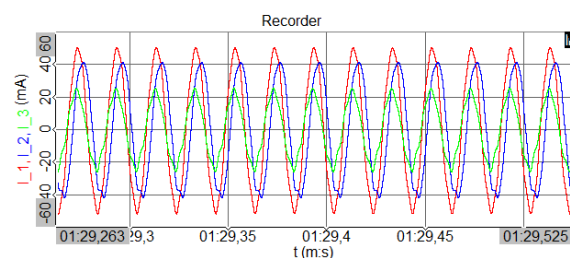
Slika 6.9: Termografika snimka otpornika za vrijeme mjerenja

6.2.1 Preliminarna mjerenja

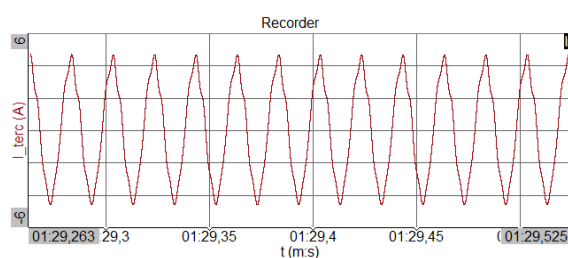
Mjerenje 1 - metalni zemljospoj



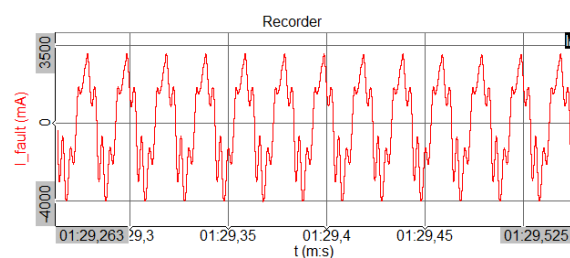
(a) Fazni naponi, u zdravim fazama napon doseže linijsku vrijednost od 10,5 kV, u fazi C u kojoj nastaje kvar napon pada na nulu



(b) Izmjerene struje primarnih namota redom u fazama A, B i C iznose 35 mA_{rms} , 30 mA_{rms} i 16 mA_{rms}



(c) Izmjerena struja tercijara, $3,1 \text{ A}_{rms}$



(d) Izmjerena struja kroz mjesto kvara, $1,6 \text{ A}_{rms}$

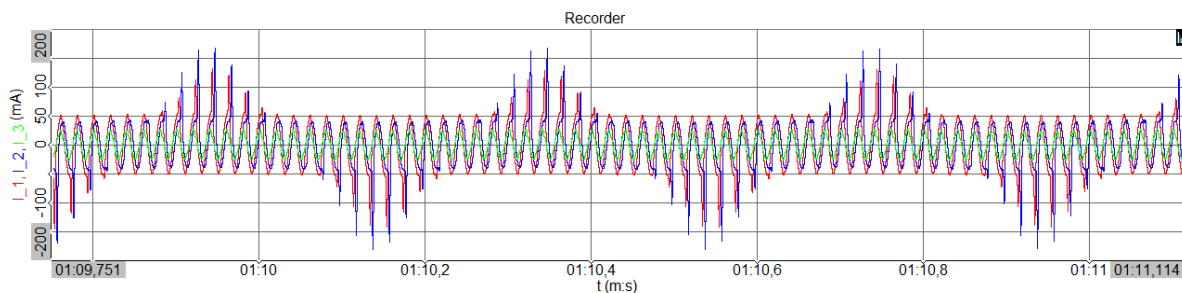
Slika 6.10: Izmjereni valni oblici napona, struja primara, struje tercijara i struje kvara za vrijeme zemljospoja pri naponu mreže 10,5 kV, bez injektiranja signala

Preliminarna mjerenja provedena su za kontrolu i provjeru očekivanih izgleda valnih oblika struja i napona pri zemljospoju. Kako bi se izbjeglo sklapanje i nepotrebni sklopni prenaponi koji u uvjetima izolirane mreže mogu dovesti do ferorezonancije [61], mjerni krug je pripremljen i spojen u stanje zemljospoja prije uklapanja ispitnog transformatora i dovođenja mjernog kruga pod napon. U uvjetima metalnog zemljospoja i bez injektiranja signala, izmjerene ve-

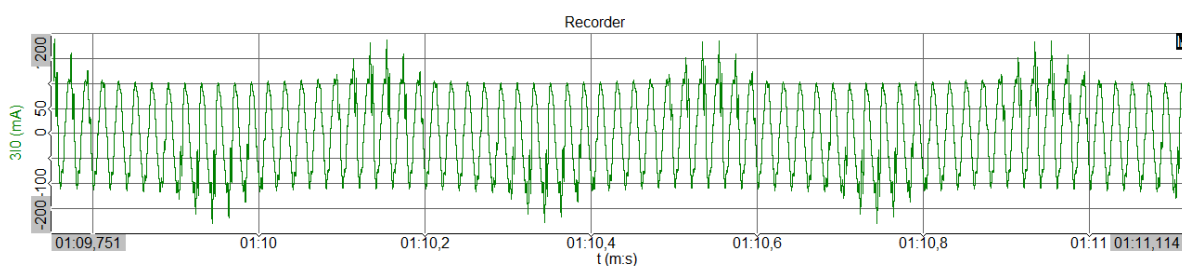
ličine potvrdile su očekivane izgled valnih oblika, što je potvrdilo ispravnost složenog mjernog kruga. Izmjereni fazni naponi, struje primarnih namota naponskih mjernih transformatora, struja tercijara i struja kvara prikazani su na slici 6.10.

Mjerenje 2 - metalni zemljospoj i istovremena injekcija niskofrekvencijskog izmjeničnog signala

Nakon potvrde ispravnosti mjernog kruga i očekivanih mjerenja pri metalnom zemljospoju, generator signala i pojačalo su uključeni u mjerni krug. Valni oblici primarnih struja induktivnih naponskih transformatora i rezidualne struje odvoda tijekom istovremenog metalnog zemljospoja i injektiranja signala frekvencije 2,5 Hz i amplitude 100 V prikazani su na slikama 6.11 i 6.12. U valnim oblicima vidljive su i 50 Hz i 2,5 Hz komponenta. Prema Fourierovoj transformaciji, 2,5 Hz komponenta u rezidualnoj struji jednaka je 19 mA, a 50 Hz komponenta 105 mA.

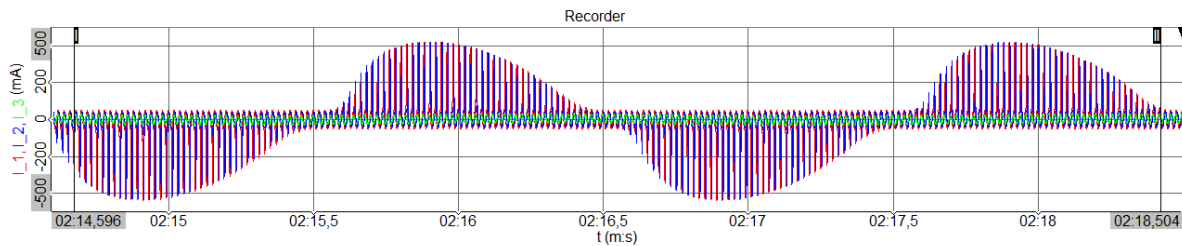


Slika 6.11: Izmjerene struje primarnih namota naponskih mjernih transformatora pri istovremenom zemljospoju i injektiranju signala frekvencije 2,5 Hz i amplitude 100 V

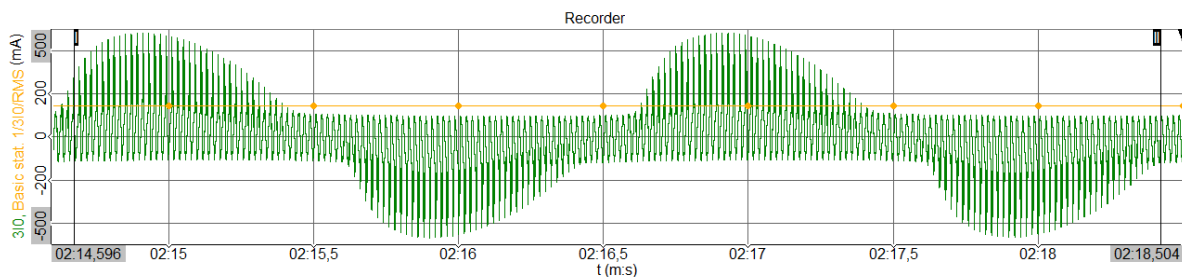


Slika 6.12: Izmjerena rezidualna struja odvoda pri istovremenom zemljospoju i injektiranju signala frekvencije 2,5 Hz i amplitude 100 V

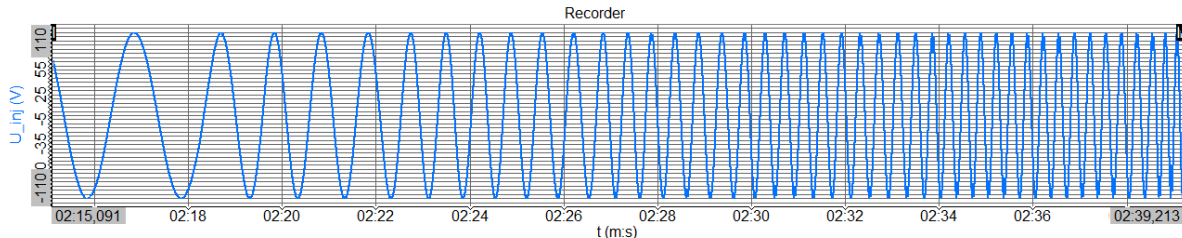
Za istu amplitudu injektiranog signala od 100 V, smanjenje frekvencije signala dovodi do povećanja magnetskog toka u jezgrama naponskih mjernih transformatora, što za posljedicu ima izraženije zasićenje, ali i istovremeno veći iznos niskofrekvencijske komponente u rezidualnoj struji. Primjerice, slike 6.13 i 6.14 prikazuju struje primarnih namota i rezidualnu struju tijekom injektiranja signala 100 V, ali frekvencije snižene na 0,5 Hz, na kojima je izraženije zasićenje u usporedbi s valnim oblicima na slikama 6.11 i 6.12.



Slika 6.13: Izmjerene struje primarnih namota naponskih mjernih transformatora pri istovremenom zemljospoju i injektiranju signala frekvencije 0,5 Hz i amplitude 100 V



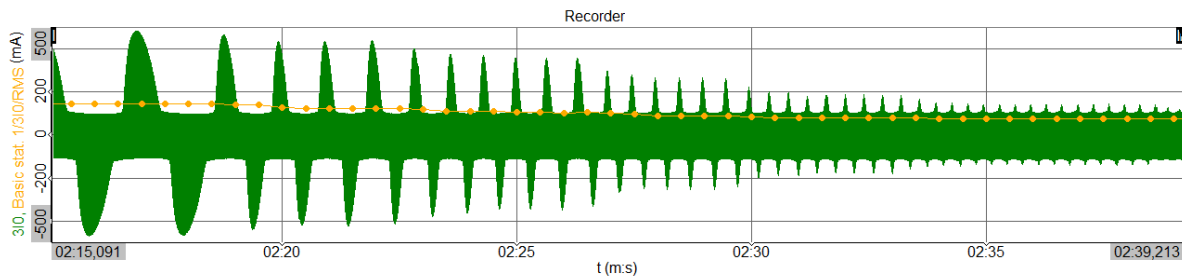
Slika 6.14: Izmjerena rezidualna struja odvoda pri istovremenom zemljospoju i injektiranju signala frekvencije 0,5 Hz i amplitude 100 V



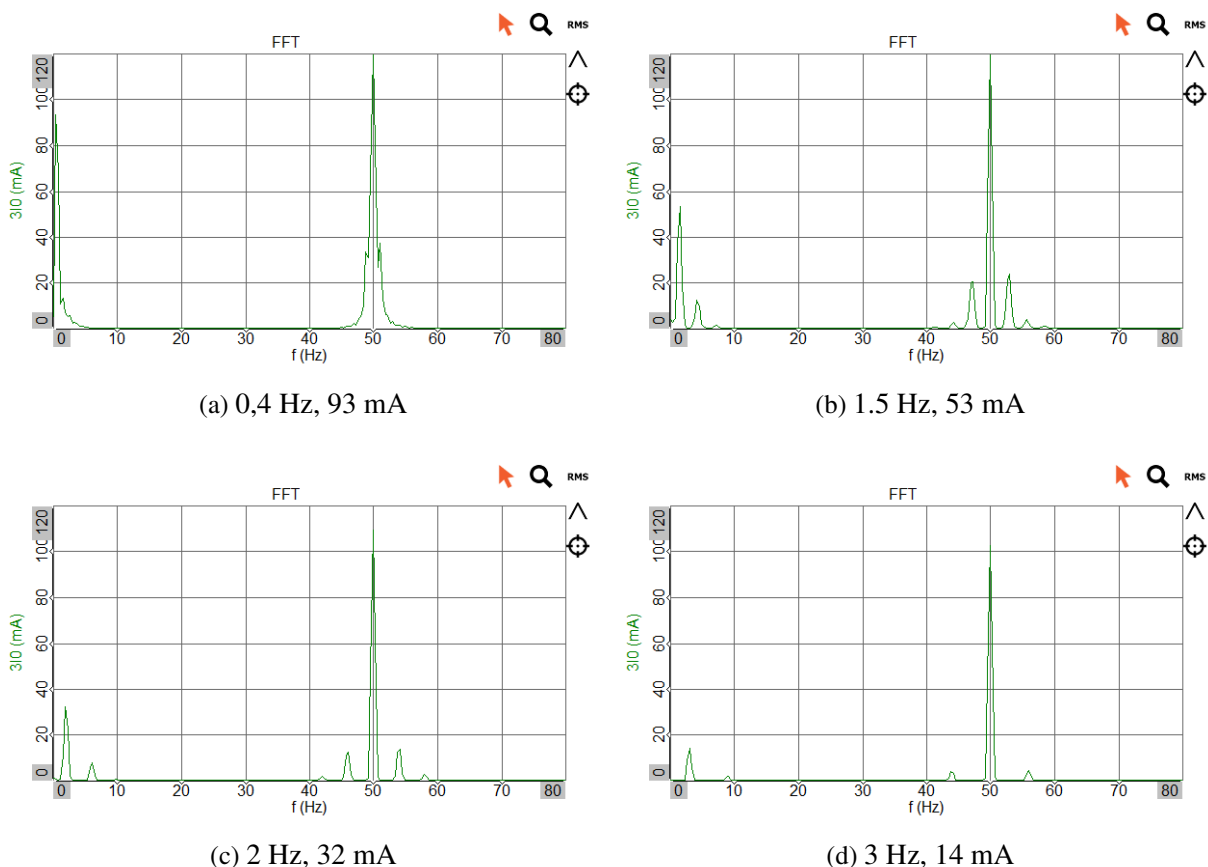
Slika 6.15: Dio snimljenog injektiranog signala amplitude 100 V kojem se frekvencija povećava od 0,5 Hz do 3 Hz

U slučaju injektiranja signala frekvencije 0,5 Hz, amplituda 0,5 Hz komponente u rezidualnoj struji iznosi 89 mA. Utjecaj promjene frekvencije injektiranog signala na valni oblik rezidualne struje dodatno je prikazan na slikama 6.15 - 6.16. Za injektirani signal promjenjive frekvencije (od 0,5 Hz do 3 Hz) prikazan na slici 6.15, promjene u rezidualnoj struji vidljive su na slici 6.16.

Za vrijeme injektiranja signala sa slike 6.15 napravljena je Fourierova transformacija rezidualne struje pri frekvencijama injektiranog signala od 0,4 Hz, 1,5 Hz, 2 Hz i 3 Hz. Slika 6.17 prikazuje frekvencijski spektar rezidualne struje i detektabilnost injektiranog signala različitih frekvencija. S porastom frekvencije injektiranog signala, detektabilnost signala u rezidualnoj struji je sve teža zbog snižavanja amplitude odgovarajuće frekvencijske komponente.



Slika 6.16: Izmjerena rezidualna struja za vrijeme injektiranja signala kojem se povećava frekvencija prikazan na slici 6.15



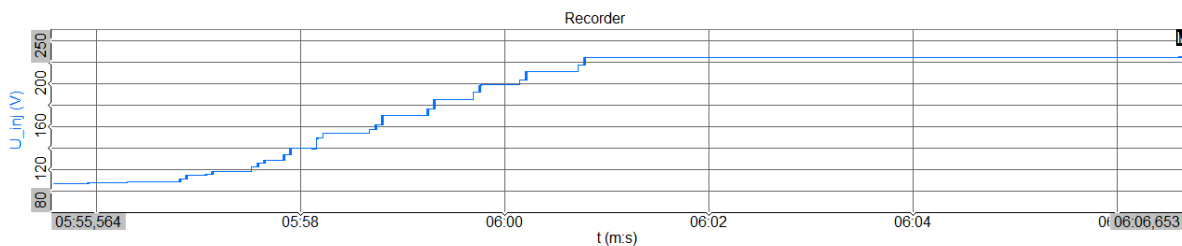
Slika 6.17: Fourierova transformacija tijekom injektiranja signala sa slike 6.15

Mjerenje 3 - metalni zemljospoj i istovremena injekcija istosmjernog signala

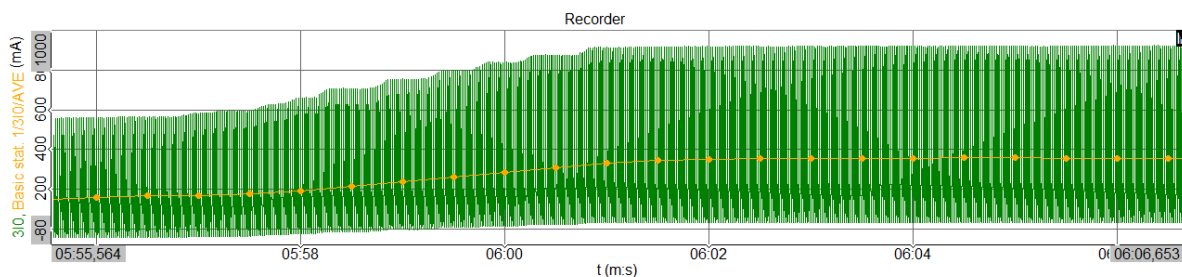
Nakon injektiranja niskofrekvencijskog izmjeničnog signala, provedeno je injektiranje istosmjernog signala. Pri ovom mjerenju, amplituda istosmjernog signala pažljivo je podizana prateći iznose struja primarnih namota. Budući da je visokonaponski namot namotan lakiranom bakrenom žicom nazivnog promjera 0,224 mm, nije preporučena trajna struja viša od 100 mA. Kod istosmjernog napona induktiviteti ne utječu na ustaljenu vrijednost struje pa jedino ograničenje predstavlja otpor primarnih namota (i otpor na mjestu kvara). Zbog toga injektirani istosmjerni signal pri metalnom zemljospoju, u slučaju trajnog injektiranja, ne bi smio prelaziti amplitudu od 180 V. Budući da se pri eksperimentu injektiranje provodi kratkotrajno, istos-

mjerni napon podizan je do 225 V, pri čemu su struje primarnih namota kratkotrajno dosegle 275 mA_{rms} , 267 mA_{rms} i 121 mA_{rms} u fazama A, B i C. Za potrebe trajnog injektiranja ili viših amplituda istosmjernog signala, primarni namoti se mogu redizajnirati i prilagoditi potrebama injektiranja istosmjernog signala.

Utjecaj promjene amplitude injektiranog istosmjernog signala na valni oblik rezidualne struje je prikazan na slikama 6.18 - 6.19. Za injektirani istosmjerni signal promjenjive amplitude (od 100 V do 225 V) prikazan na slici 6.18, promjene u rezidualnoj struji vidljive su na slici 6.19.

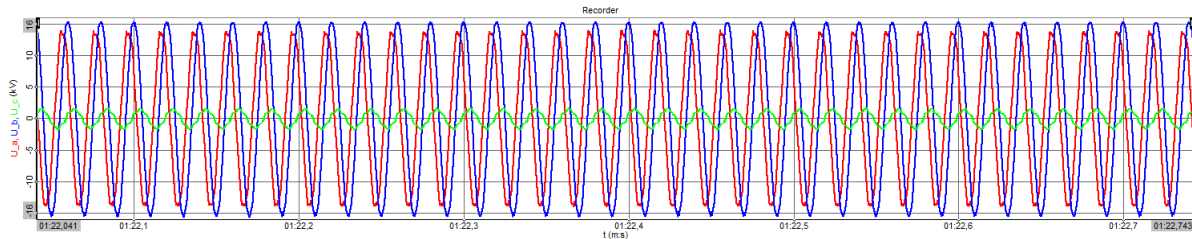


Slika 6.18: Dio snimljenog istosmjernog injektiranog signala amplitude od 100 V do 225 V



Slika 6.19: Izmjerena rezidualna struja za vrijeme injektiranja istosmjernog signala prikazanog na slici 6.18

Injektirani signal u slučaju istosmjerne injekcije se u rezidualnoj struji detektira kao istosmjerna komponenta rezidualne struje, odnosno prosječna vrijednost rezidualne struje izračunata na temelju pomičnog prozora duljine jednog 50 Hz perioda. Istosmjerna komponenta rezidualne struje pri injektiranju 100 V iznosi 160 mA, a pri injektiranju 225 V naraste na 357 mA. U usporedbi s injektiranjem niskofrekvencijskog izmjeničnog signala, istosmjerna komponenta u rezidualnoj struji pri injektiranju istosmjernog signala je viša i time lakše detektibilna. Stoga bi injektiranje istosmjernog signala trebalo biti učinkovitije u detekciji zemljospoja na temelju analize rezidualnih struja. Međutim, tip injektiranja u konačnici ovisi o tome hoće li se za injektiranje koristiti postojeći naponski mjerni transformatori ili oni čije se krivulje magnetiziranja i primarni namoti trebaju prilagoditi injektiranju. Na način injektiranja posebno utječe i način detektiranja injektiranog signala u mreži, budući da postoje strujni senzori koji mogu detektirati samo izmjeničnu struju, ali i oni koji mogu detektirati i izmjeničnu i istosmjernu struju.



Slika 6.20: Izmjereni fazni naponi tijekom zemljospoja s otporom na mjestu kvara u iznosu od 690 Ω i istovremenom injektiranju izmjeničnog signala frekvencije 2,5 Hz i amplitude 100 V

Mjerenje 4 - zemljospoj s otporom na mjestu kvara i istovremena injekcija signala

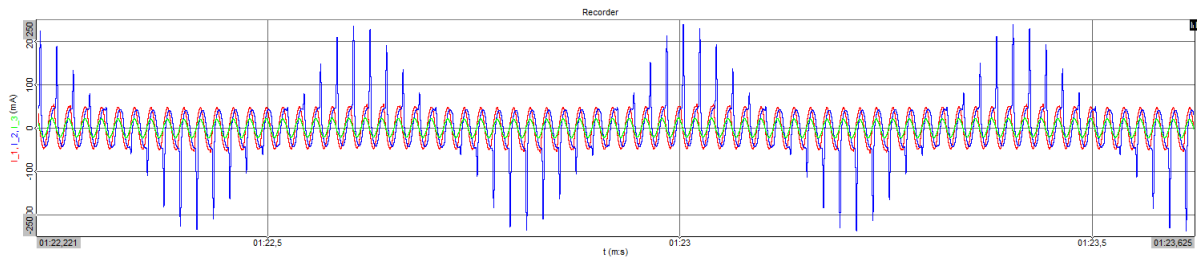
Nakon metalnog zemljospoja, za mjerenje je razmatran zemljospoj s otporom na mjestu kvara. U tu svrhu, u mjerni krug je dodan otpor u iznosu 690 Ω , koji je spojen paralelno kondenzatoru u fazi C. Slika 6.20 prikazuje izmjerene fazne napone. U ovom slučaju, zbog postojanja otpora na mjestu kvara, napon u fazi C u kojoj dolazi do zemljospoja ne pada na nulu, već ima iznos 1,1 kV, posljedično zbog protjecanja struje kvara u iznosu od 1,53 A_{rms} kroz navedeni otpor (postojanje impedancije između nule i zemlje).

Na slikama 6.21 i 6.22 su prikazane izmjerene struje primara i rezidualna struja. Uspoređujući ih sa slučajem metalnog zemljospoja (slike 6.11 - 6.12), valni oblici su slični. Međutim, može se primijetiti da u slučaju s otporom na mjestu kvara, samo naponski mjerni transformator u fazi B ulazi u zasićenje. Trokut napona i iznosi napona u fazama su promijenjeni, a zasićenja mjernih transformatora ovise o iznosima faznih napona. Dodatno, zasićenju samo u fazi B doprinosi i drugačija krivulja magnetiziranja naponskog mjernog transformatora, prikazana na slici 6.3. Otpor na mjestu kvara umanjuje ukupni iznos struje kvara. Prema Fourierovoj transformaciji, u ovom slučaju 2,5 Hz komponenta u rezidualnoj struji iznosi 18,8 mA_{rms} , što je očekivano niže nego u slučaju metalnog zemljospoja.

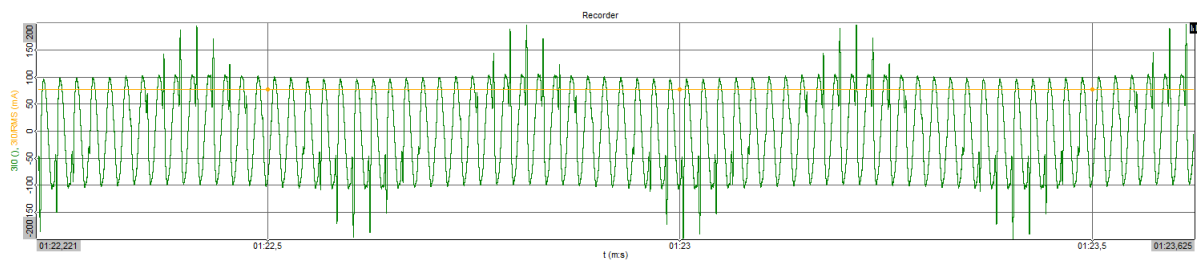
Injektiranje istosmjernog signala je također ponovljeno u slučaju zemljospoja s otporom na mjestu kvara. Zbog postojanja otpora na mjestu kvara, maksimalna amplituda injektiranog signala u ovom mjerenju je bila viša nego pri mjerenju u slučaju metalnog zemljospoja, a dosegnut je iznos od 330 V. Pri injektiranju istosmjernog signala razine 200 V, istosmjerna komponenta u rezidualnoj struji iznosi 141 mA. Pri injektiranju 330 V, istosmjerna komponenta rezidualne struje iznosi 245 mA. Tijekom injektiranja 330 V, struje primarnih namota naponskih mjernih transformatora iznosile su 199,5 mA_{rms} , 195,1 mA_{rms} i 107,9 mA_{rms} .

Navedenim pregledom mjernih rezultata, može se potvrditi princip rada metode injektiranja signala, mogućnost praćenja injektiranog signala frekvencijskom analizom rezidualne struje te utjecaj promjene frekvencije i amplitude injektiranog signala.

U sljedećem poglavlju, prikazana je usporedba izmjerenih rezultata s rezultatima simulacija.



Slika 6.21: Izmjerene struje primara tijekom zemljospoja s otporom na mjestu kvara 690Ω i istovremenog injektiranja signala 2,5 Hz, 100 V

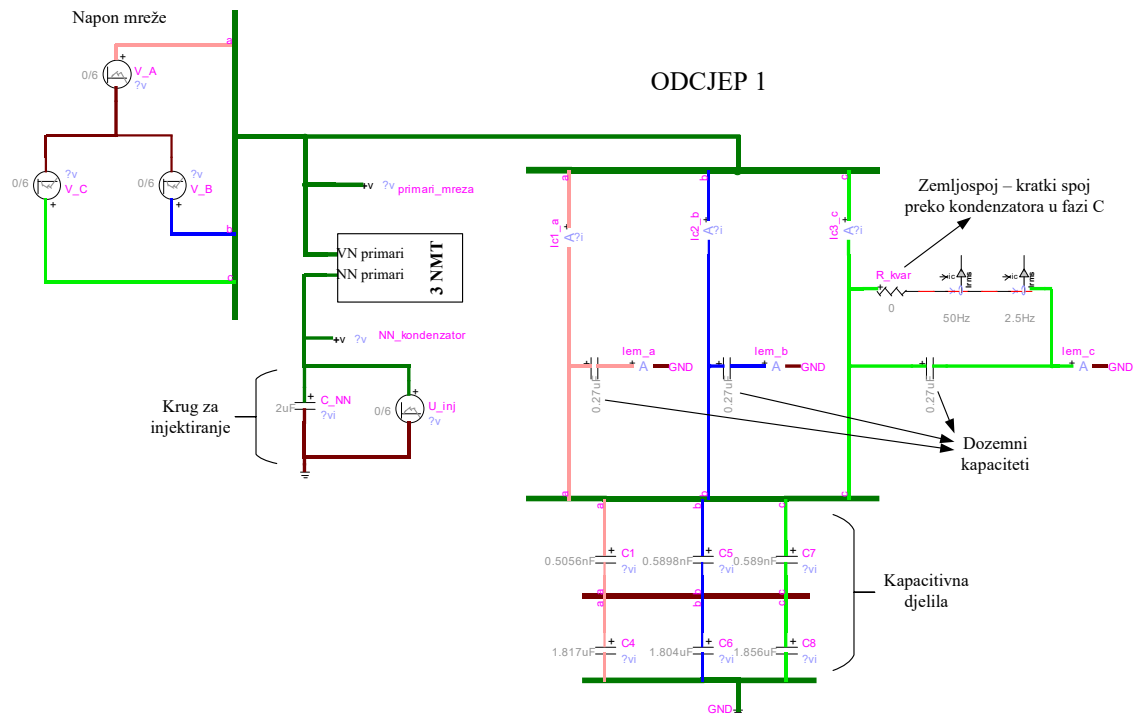


Slika 6.22: Izmjerena rezidualna struja tijekom zemljospoja s otporom na mjestu kvara 690Ω i istovremenog injektiranja signala 2,5 Hz, 100 V

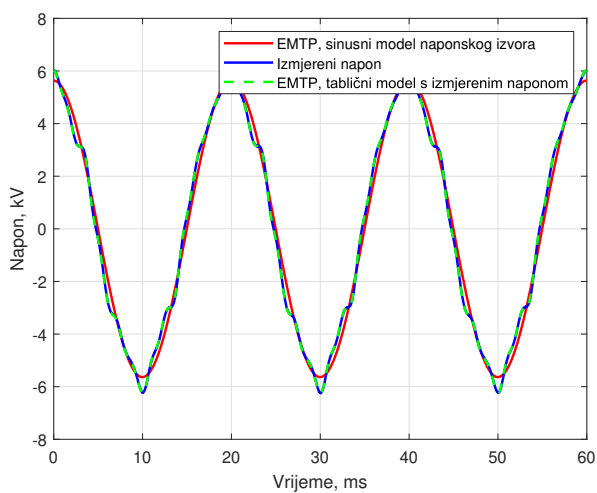
6.3 Model eksperimentalnog mjernog kruga u EMTP-u

U svrhu usporedbe izmjerenih valnih oblika s rezultatima simulacija, u EMTP-u je modeliran simulacijski krug jednak eksperimentalnom mjernom krugu. Za modeliranje naponskih mjernih transformatora korištene su izmjerene krivulje magnetiziranja sa slike 6.3, uz dodatno umanjivanje naponskih točaka za iznos pada napona na otporu primarnog namota. Model mjernog kruga u EMTP-u prikazan je na slici 6.23.

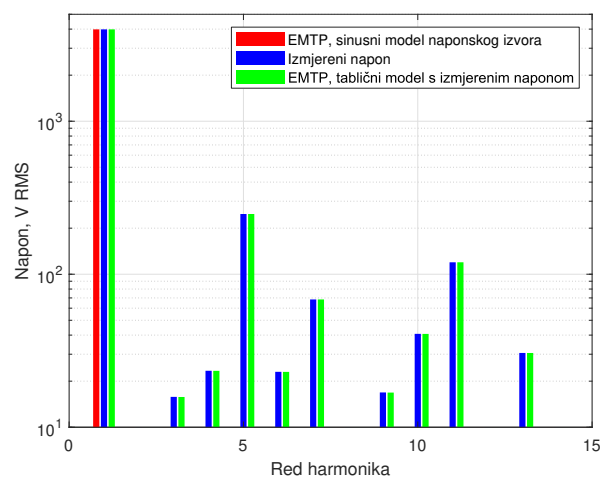
Pri simulacijama je korišten izmjereni napon mreže i izmjereni napon signalnog generatora. Izmjereni naponi uzorkovani su frekvencijom 50 kHz, a izmjerene točke su unesene u tablični model naponskih izvora. U niskofrekvencijskom injektiranom signalu nema izobličenja, generiran je generatorom signala i pojačalom, s precizno odabranom amplitudom i frekvencijom. Izmjereni napon mreže bio je izobličen, a sadržaj viših harmonika ovisi o radnoj točki, odnosno o iznosu podignutog napona. Mjerenje je provedeno u laboratorijskim uvjetima, daleko od nazivne točke rada korištenog ispitnog transformatora čiji je nazivni napon V_N namota 20 kV, a u eksperimentu je korišten napon do 12 kV. Slike 6.24 - 6.25 prikazuju valne oblike izmjerenog napona u točkama 4 kV i 11,5 kV i njihov frekvencijski spektar. Pri nižim naponima, valni oblik je izobličeniji, a pri višim naponima, valni oblik je sličniji čistoj sinusoidi.



Slika 6.23: Model eksperimentalnog mjernog kruga u EMTP-u

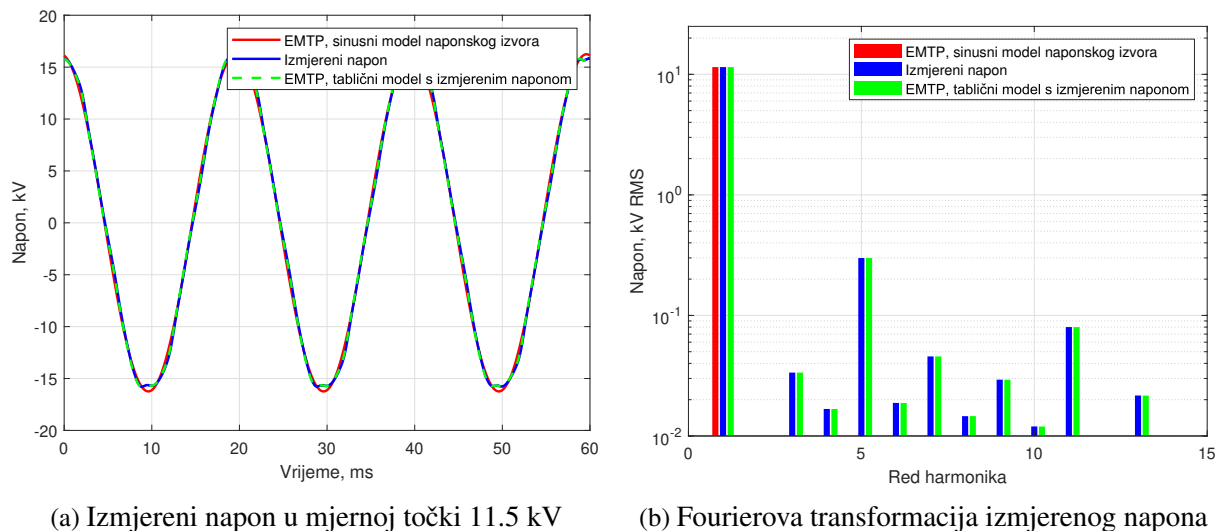


(a) Izmjereni napon u mjernoj točki 4 kV



(b) Fourierova transformacija izmjerenog napona

Slika 6.24: Valni oblik napona u mjernoj točki 4 kV i njegov frekvencijski spektar



Slika 6.25: Valni oblik napona u mjernoj točki 11.5 kV i njegov frekvencijski spektar

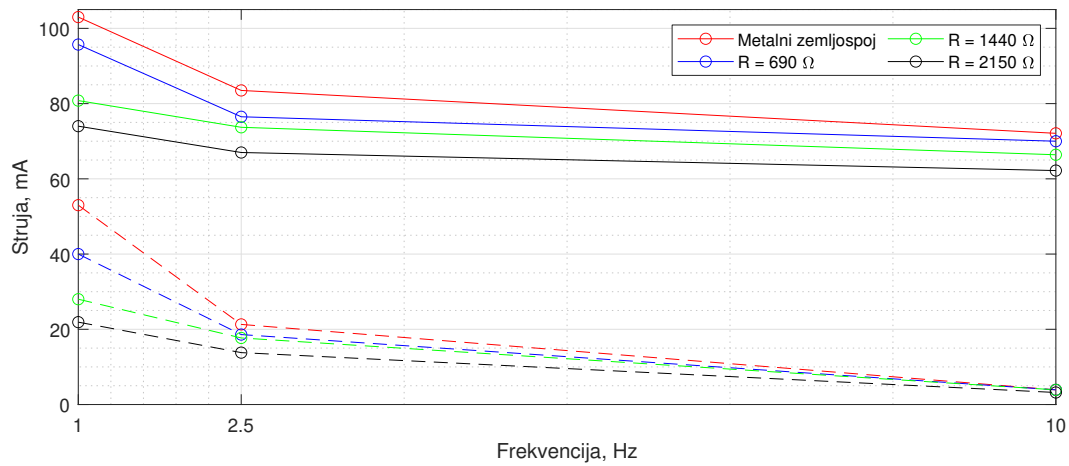
6.4 Usporedba izmjerenih i izračunatih rezultata

U sljedećim poglavljima prikazane su usporedbe valnih oblika dobivenih mjerenjem i simulacijom, za:

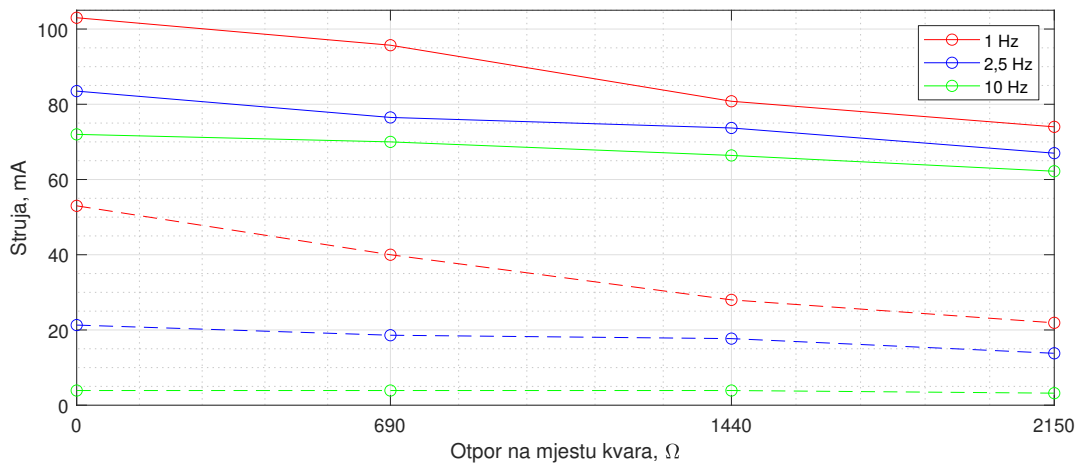
1. Slučaj - metalni zemljospoj,
2. Slučaj - zemljospoj s otporom 690Ω ,
3. Slučaj - zemljospoj s otporom 1440Ω ,
4. Slučaj - zemljospoj s otporom 2150Ω .

Za svaki navedeni slučaj, usporedba je napravljena za injektiranje izmjeničnog signala frekvencije 1 Hz, 2,5 Hz, 10 Hz te za injektiranje istosmjernog signala različite amplitude, ograničene strujama primara naponskih transformatora u pojedinom slučaju. Slike 6.26 - 6.28 prikazuju usporedbu efektivnih vrijednosti rezidualne struje i niskofrekvencijske komponente u rezidualnoj struji za navedena četiri slučaja mjerenja. Prema slikama 6.26 i 6.27 mjerenje jasno potvrđuje niže iznose rezidualne struje i niskofrekvencijske komponente u rezidualnoj struji pri višim frekvencijama injektiranja i pri višim iznosima otpora na mjestu kvara.

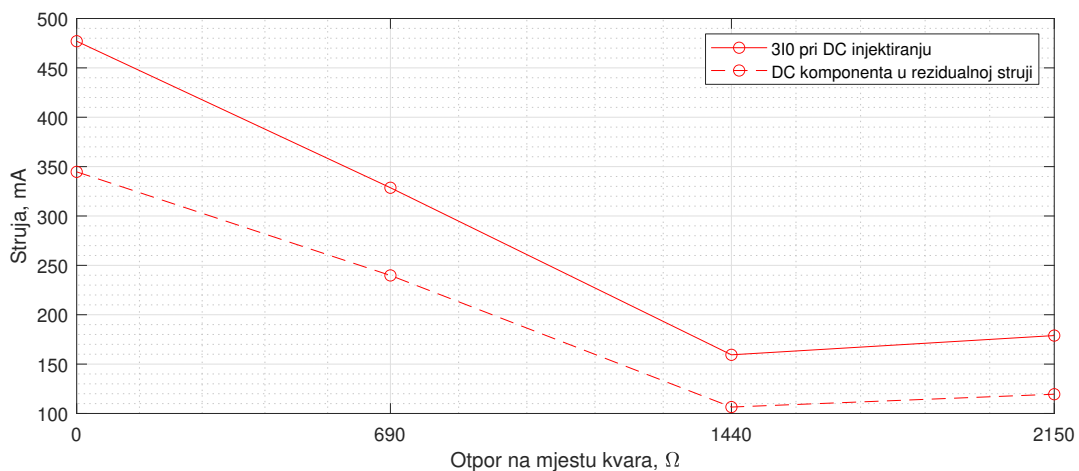
Slika 6.28 jednaki trend potvrđuje i pri injektiranju istosmjernog signala, ali uz općenito više iznose razmatranih struja. Pri injektiranju izmjeničnog signala, izmjerene vrijednosti rezidualne struje i niskofrekvencijske komponente u rezidualnoj struji su niže od 100 mA, dok su pri injektiranju istosmjernog signala iznosi analiziranih struja u rasponu od 100 mA do 500 mA. U zadnjoj mjernoj točki na grafikonu sa slike 6.28, pri otporu na mjestu kvara od 2150Ω , rezidualna struja i DC komponenta rezidualne struje imaju viši iznos nego pri otporu na mjestu kvara od 1440Ω zato što se pri zadnjem mjerenju napon injektiranog signala podigao do višeg iznosa od 388 V, za razliku od prethodnog mjerenja kada je istosmjerni napon podignut do 368 V. Ovo pokazuje kako bi se mogli očekivati i viši iznosi izmjerenih struja pri mogućnosti daljnjeg povišenja napona istosmjernog signala, što bi bilo moguće ukoliko bi se primijenila



Slika 6.26: Iznos efektivne vrijednosti rezidualne struje (puna linija) i niskofrekvencijske komponente rezidualne struje (isprekidana linija) pri različitim frekvencijama injektiranog signala, za različite otpore na mjestu kvara



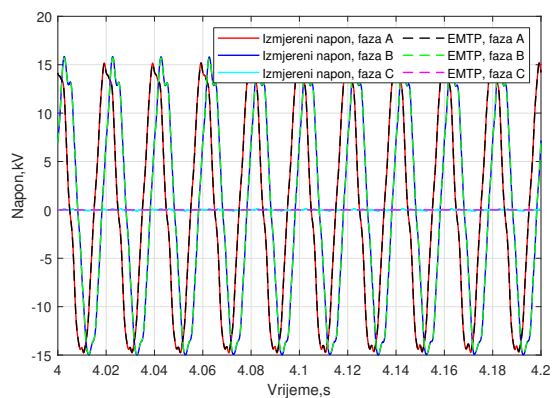
Slika 6.27: Iznos efektivne vrijednosti rezidualne struje (puna linija) i niskofrekvencijske komponente rezidualne struje (isprekidana linija) pri različitim frekvencijama injektiranog signala, za različite otpore na mjestu kvara



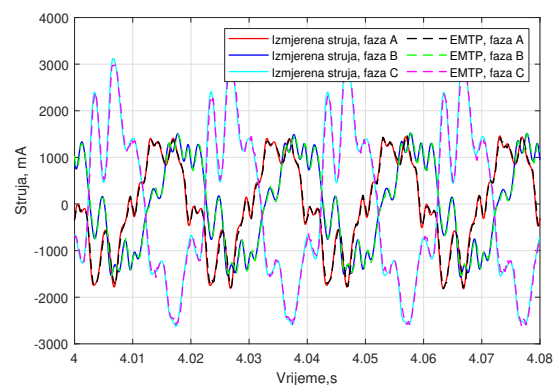
Slika 6.28: Iznos efektivne vrijednosti rezidualne struje (puna linija) i istosmjerne komponente rezidualne struje (isprekidana linija) za različite otpore na mjestu kvara

predložena varijanta krivulje magnetiziranje iz poglavlja 4.6.4, uz kontrolu primarnih struja i termičkog opterećenja primarnih namota.

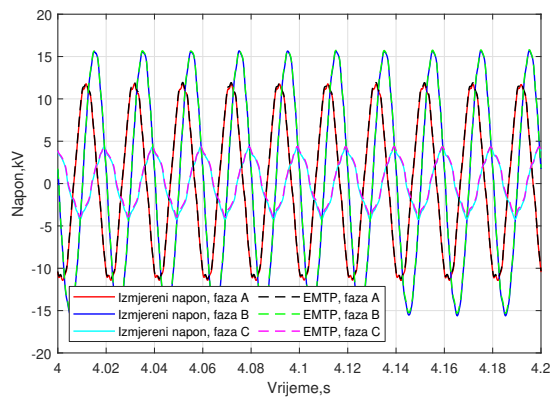
Za svaki navedeni slučaj u nastavku su prikazane usporedbe valnih oblika primarnih struja naponskih transformatora i rezidualne struje odnosa dobivene mjerenjem i simulacijom. Valni oblici struja kroz dozemne kapacitete su vrlo slični u svim slučajevima, a valni oblici napona su tablično uneseni u model te se očekivano potpuno podudaraju. Struje kroz dozemne kapacitete i naponi zato nisu posebno prikazivani za svaki navedeni slučaj, već za slučaj 1 - metalni zemljospoj i injektiranje signala 100 V, 2,5 Hz (slike 6.29a - 6.29b), i slučaj 4 - zemljospoj s otporom 2150 Ω i injektiranje istosmjernog signala (slike 6.29c - 6.29d).



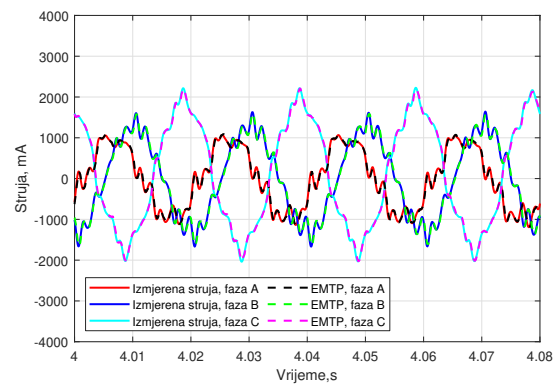
(a) Naponi, slučaj 1, injektiranje 2,5 Hz



(b) Fazne struje, slučaj 1, injektiranje 2,5 Hz



(c) Naponi, slučaj 4, injektiranje DC



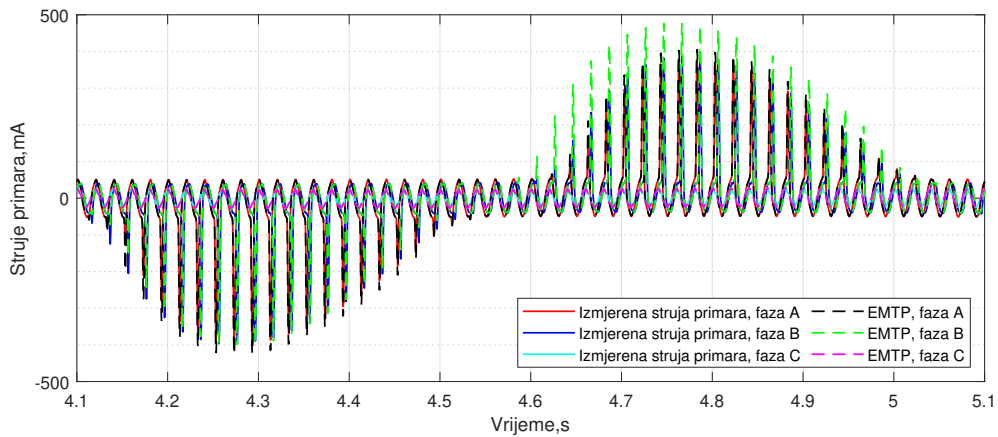
(d) Fazne struje, slučaj 4, injektiranje DC

Slika 6.29: Usporedba valnih oblika napona i faznih struja dobivenih mjerenjem i simulacijama

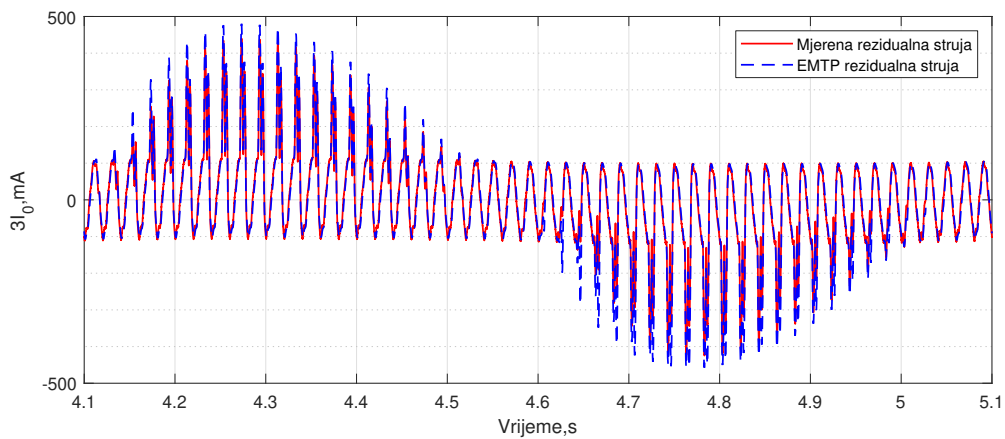
6.4.1 Metalni zemljospoj i injektiranje niskofrekvencijskog izmjeničnog signala

U nastavku su prikazani valni oblici struja primara i rezidualne struje dobiveni mjerenjem i simulacijom, za slučaj metalnog zemljospoja. Slike 6.30 - 6.31 prikazuju valne oblike pri injektiranju signala frekvencije 1 Hz, slike 6.32 - 6.33 pri injektiranju signala frekvencije 2,5 Hz, a slike 6.34 - 6.35 pri injektiranju signala frekvencije 10 Hz.

Injektiranje signala 1 Hz, 100 V

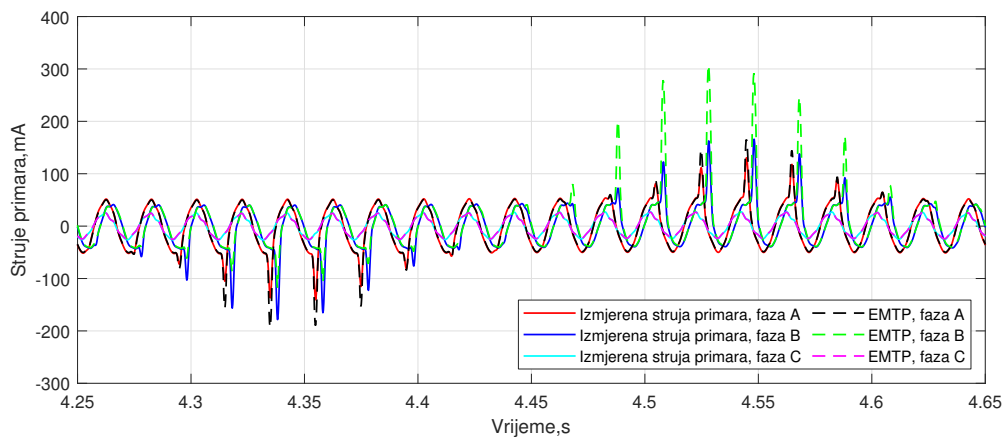


Slika 6.30: Usporedba struja primara pri injektiranju 100 V, 1 Hz

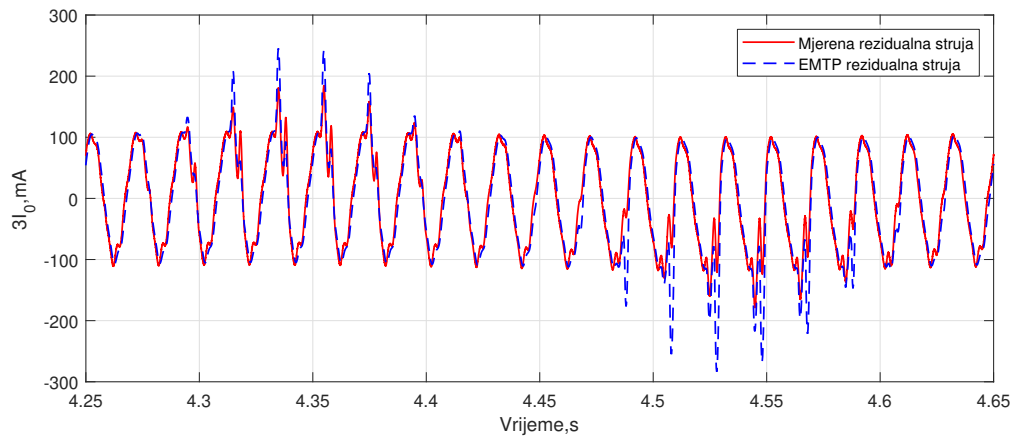


Slika 6.31: Usporedba rezidualne struje pri injektiranju 100 V, 1 Hz

Injektiranje signala 2,5 Hz, 100 V

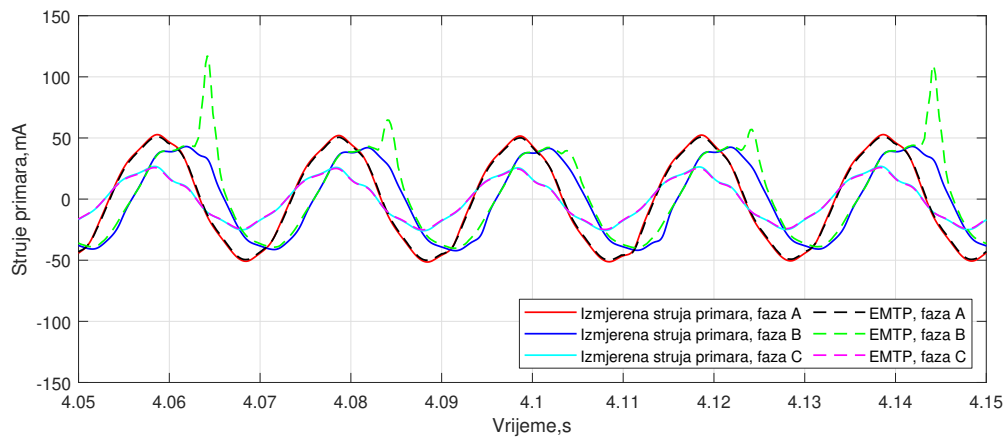


Slika 6.32: Usporedba struja primara pri injektiranju 100 V, 2,5 Hz

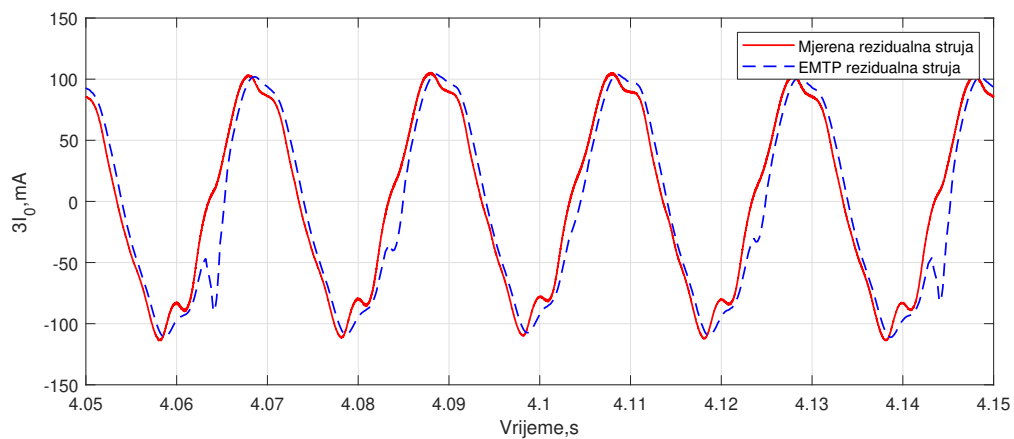


Slika 6.33: Usporedba rezidualne struje pri injektiranju 100 V, 2,5 Hz

Injektiranje signala 10 Hz, 100 V



Slika 6.34: Usporedba struja primara pri injektiranju 100 V, 10 Hz

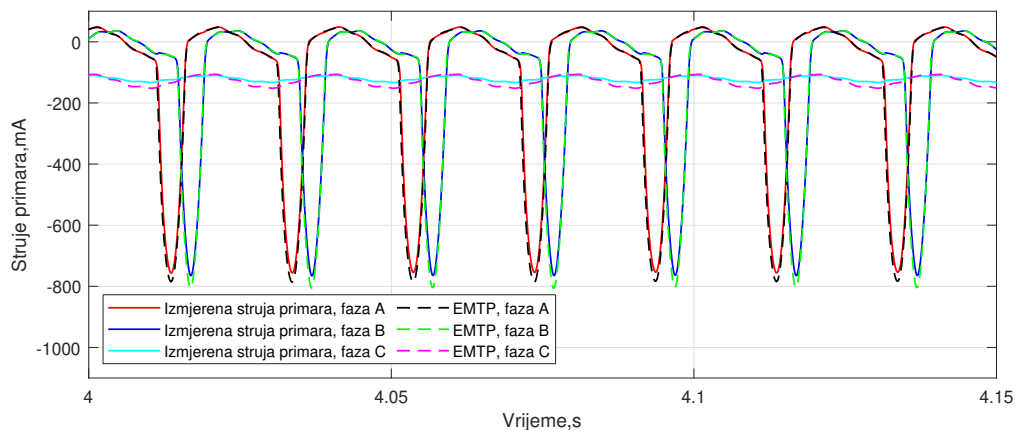


Slika 6.35: Usporedba rezidualne struje pri injektiranju 100 V, 10 Hz

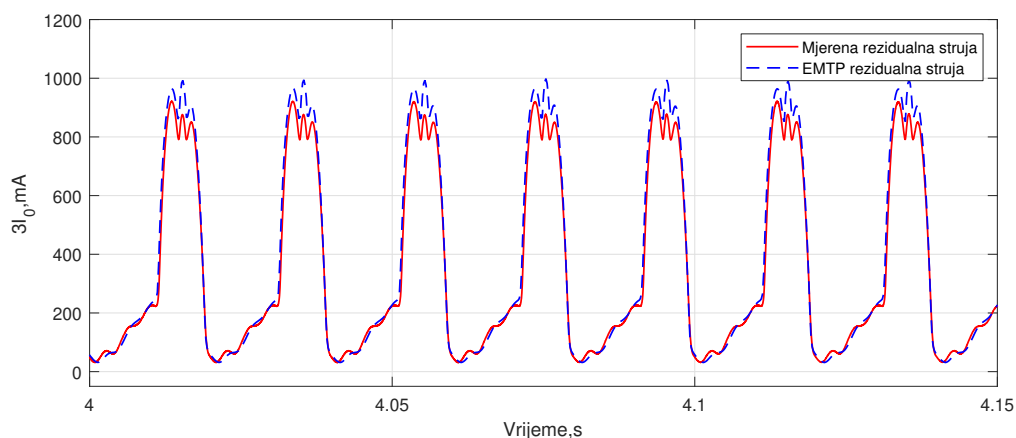
6.4.2 Metalni zemljospoj i injektiranje istosmjernog signala

Slike 6.36 - 6.37 prikazuju valne oblike struja primara i rezidualne struje u slučaju injektiranja istosmjernog signala. Kontrolirajući efektivne vrijednosti struja primara, amplituda injektiranog signala povišena je do 224 V. Usporedba rezultata mjerenja i simulacije pokazuje vrlo dobro preklapanje.

Injektiranje signala 224 V DC



Slika 6.36: Usporedba struja primara pri injektiranju signala 224 V DC



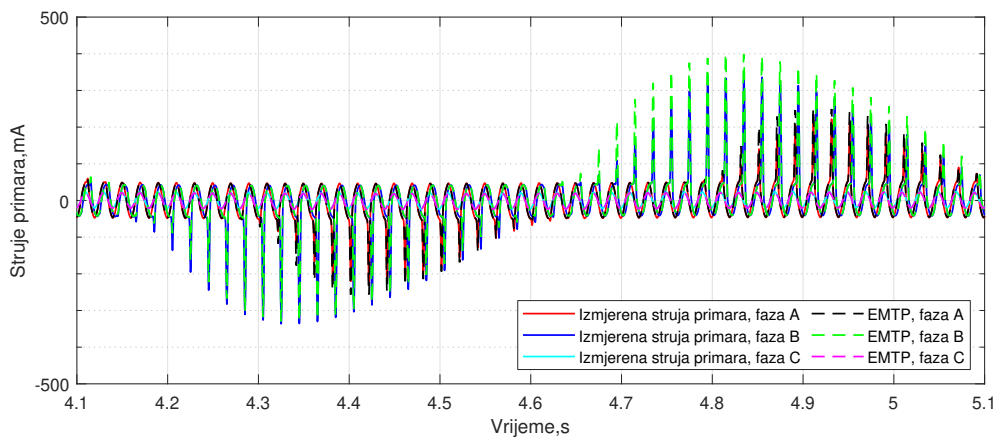
Slika 6.37: Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 224 V DC

6.4.3 Zemljospoj s otporom 690 Ω na mjestu kvara i injektiranje nisko-frekvencijskog izmjeničnog signala

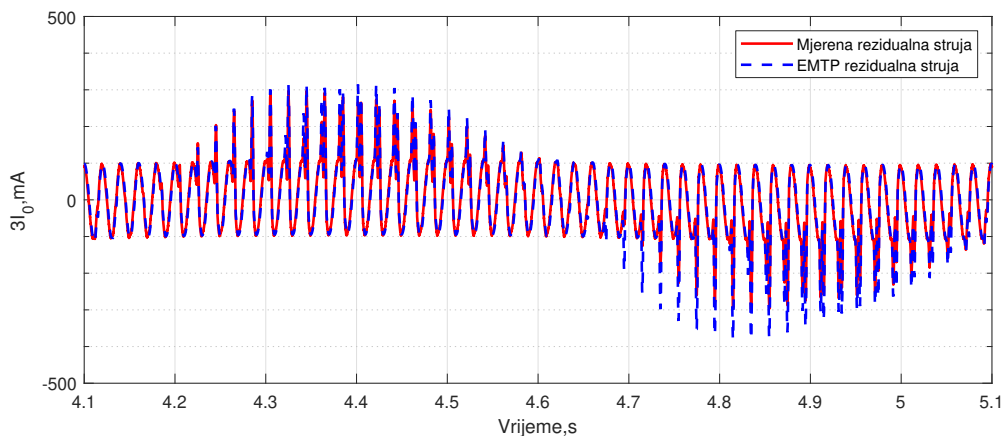
U nastavku su uspoređeni valni oblici struja primara i rezidualne struje dobiveni mjerenjem i simulacijom, za slučaj 2 - zemljospoj s otporom na mjestu kvara od 690 Ω . Slike 6.38 - 6.39 prikazuju valne oblike pri injektiranju signala frekvencije 1 Hz, slike 6.40 - 6.41 pri injektiranju

signala frekvencije 2,5 Hz, a slike 6.42 - 6.43 pri injektiranju signala frekvencije 10 Hz. U usporedbi s injektiranjem pri metalnom zemljospoju mogu se primijetiti niže amplitude struja i niža odstupanja jer je i efekt zasićenja manje izražen zbog postojanja otpora na mjestu kvara.

Injektiranje signala 1 Hz, 100 V

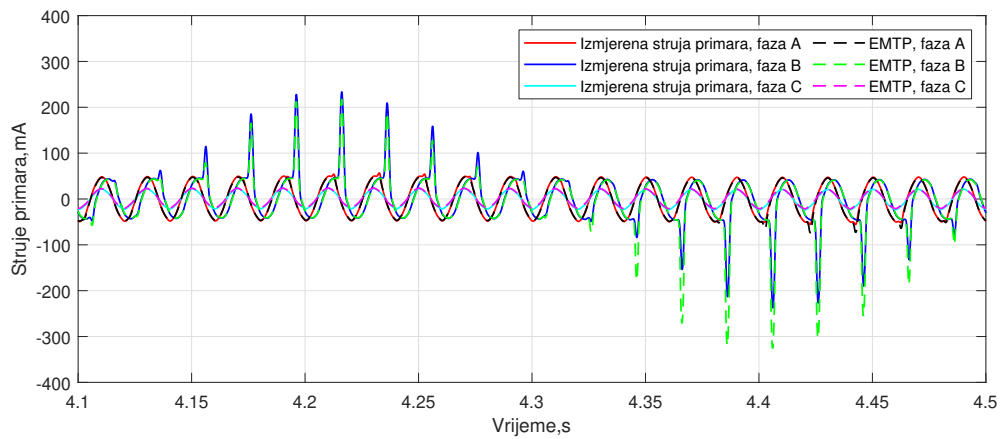


Slika 6.38: Usporedba struja primara pri injektiranju signala 100 V, 1 Hz

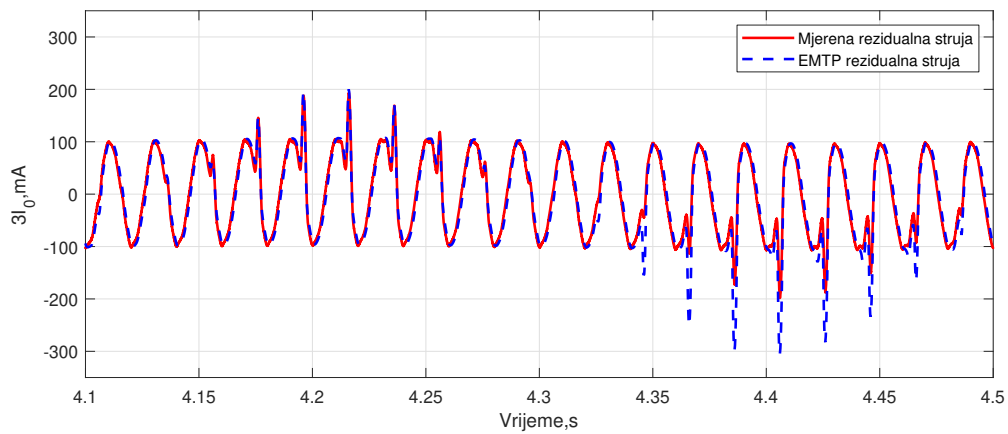


Slika 6.39: Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 100 V, 1 Hz

Injektiranje signala 2,5 Hz, 100 V

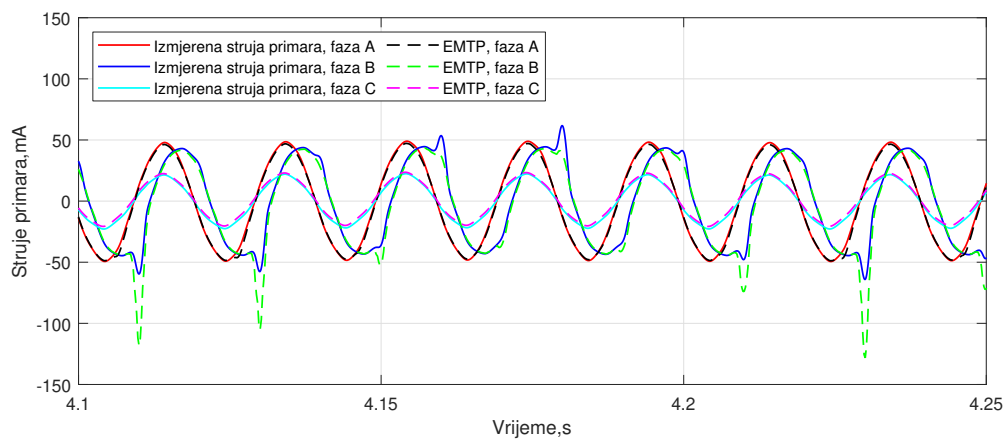


Slika 6.40: Usporedba struja primara pri injektiranju signala 100 V, 2,5 Hz

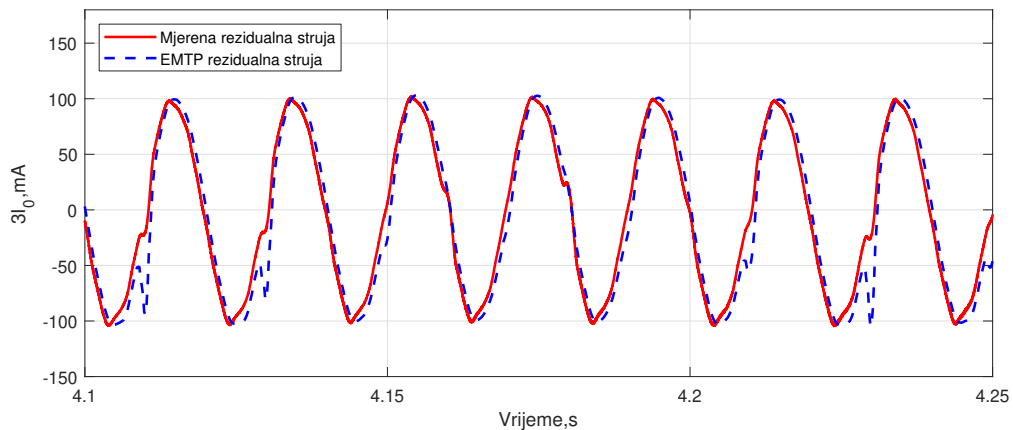


Slika 6.41: Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 100 V, 2,5 Hz

Injektiranje signala 10 Hz, 100 V



Slika 6.42: Usporedba struja primara pri injektiranju signala 100 V, 10 Hz

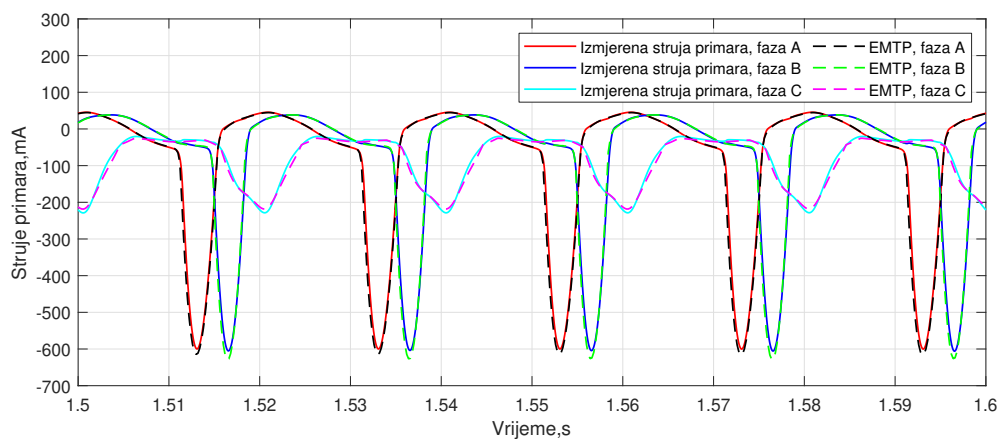


Slika 6.43: Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 100 V, 10 Hz

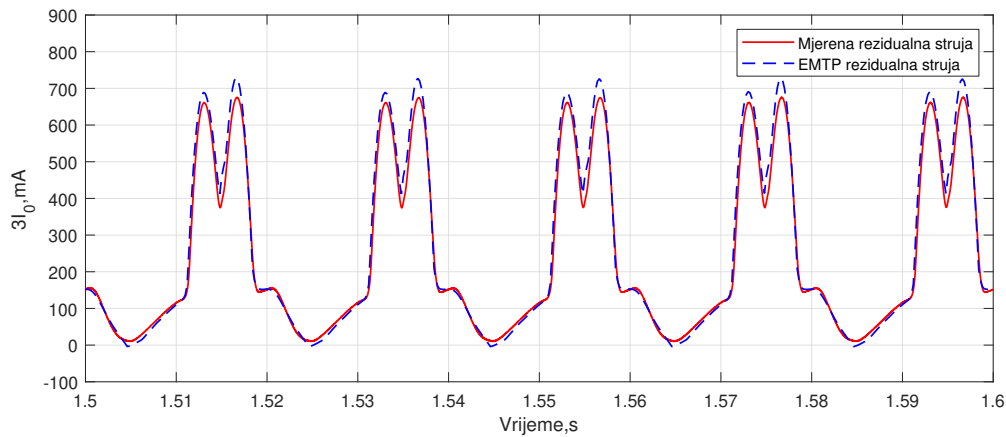
6.4.4 Zemljospoj s otporom 690Ω na mjestu kvara i injektiranje istosmjernog signala

Slike 6.44 - 6.45 prikazuju valne oblike struja primara i rezidualne struje u slučaju injektiranja istosmjernog signala. Kontrolirajući efektivne vrijednosti struja primara, amplituda injektiranog signala povišena je do 300 V. Usporedba rezultata mjerenja i simulacije pokazuje vrlo dobro preklapanje.

Injektiranje signala 300 V DC



Slika 6.44: Usporedba struja primara pri injektiranju signala 300 V DC

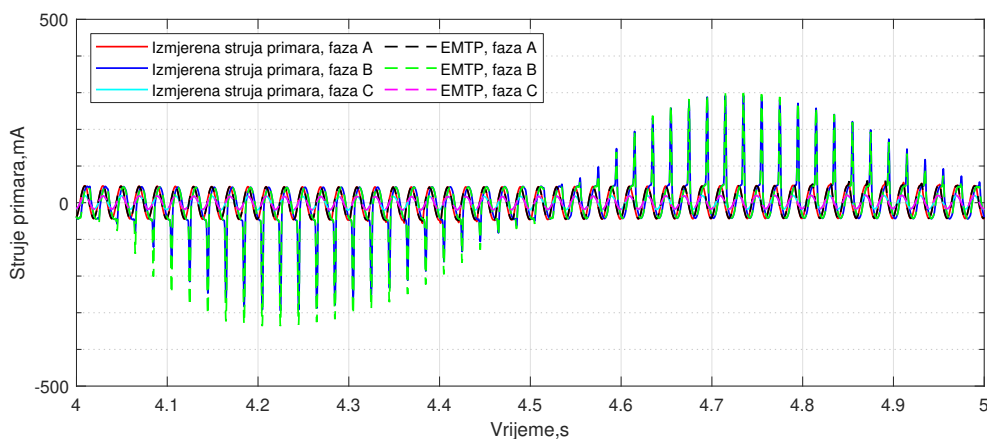


Slika 6.45: Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 300 V DC

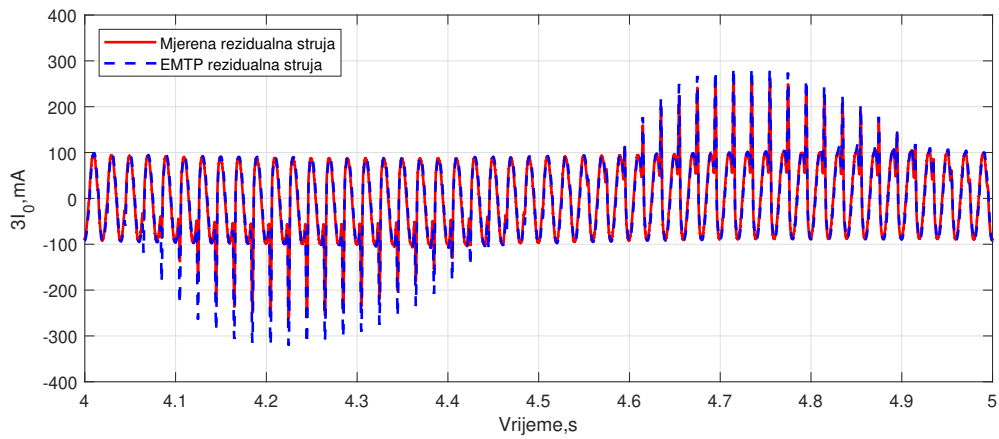
6.4.5 Zemljospoj s otporom 1440 Ω na mjestu kvara i injektiranje nisko-frekvencijskog izmjeničnog signala

U nastavku su uspoređeni valni oblici struja primara i rezidualne struje dobiveni mjerenjem i simulacijom, za slučaj 3 - zemljospoj s otporom na mjestu kvara od 1440 Ω . Slike 6.46 - 6.47 prikazuju valne oblike pri injektiranju signala frekvencije 1 Hz, slike 6.48 - 6.49 pri injektiranju signala frekvencije 2,5 Hz, a slike 6.50 - 6.51 pri injektiranju signala frekvencije 10 Hz. U usporedbi sa slučajem 2 mogu se primijetiti niže amplitude struja i manje izraženo zasićenje zbog većeg iznosa otpora na mjestu kvara.

Injektiranje signala 1 Hz, 100 V

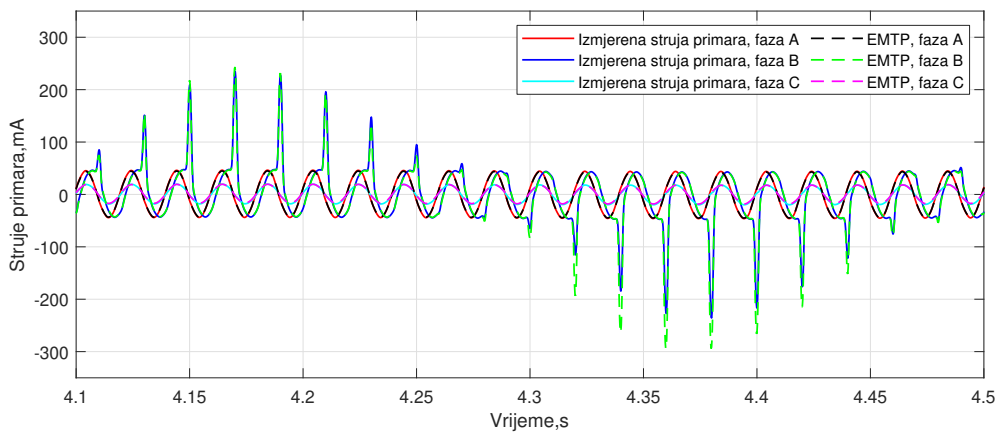


Slika 6.46: Usporedba struja primara pri injektiranju signala 100 V, 1 Hz

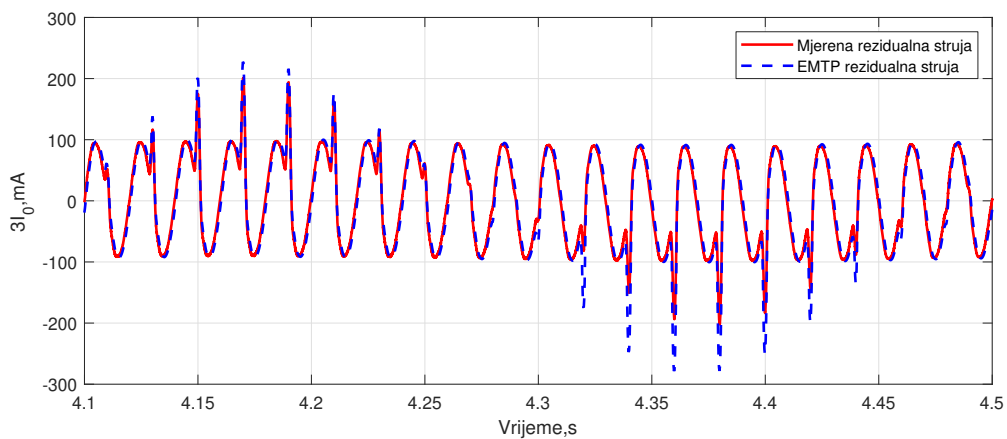


Slika 6.47: Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 100 V, 1 Hz

Injektiranje signala 2,5 Hz, 100 V

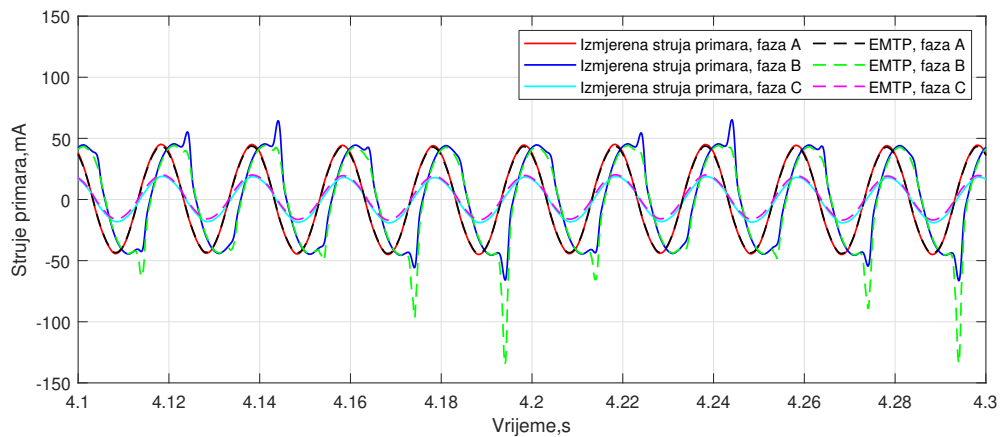


Slika 6.48: Usporedba struja primara pri injektiranju signala 100 V, 2,5 Hz

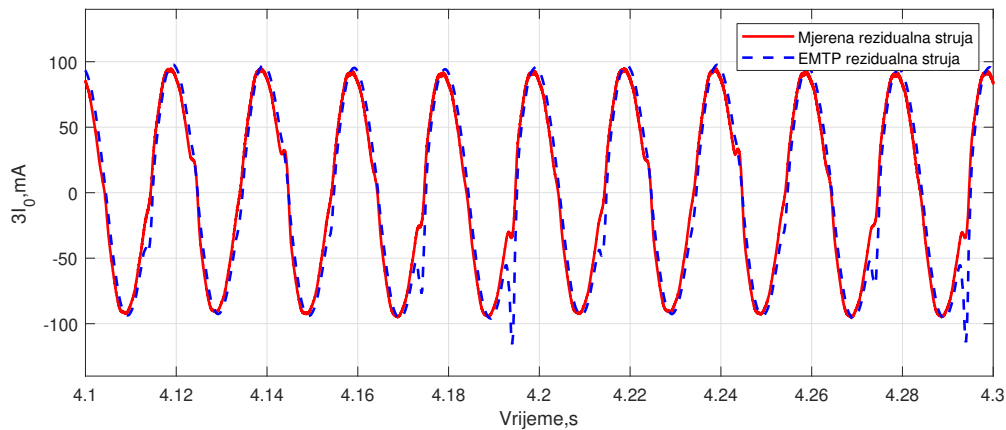


Slika 6.49: Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 100 V, 2,5 Hz

Injektiranje signala 10 Hz, 100 V



Slika 6.50: Usporedba struja primara pri injektiranju signala 100 V, 10 Hz

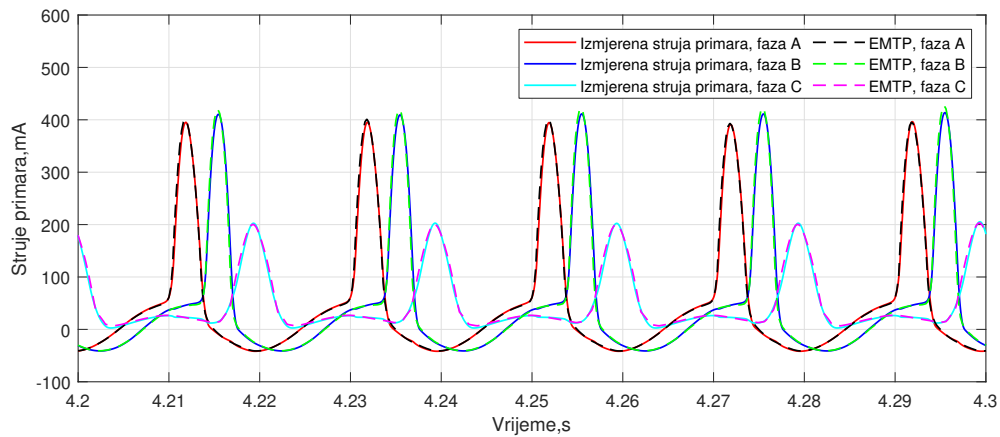


Slika 6.51: Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 100 V, 10 Hz

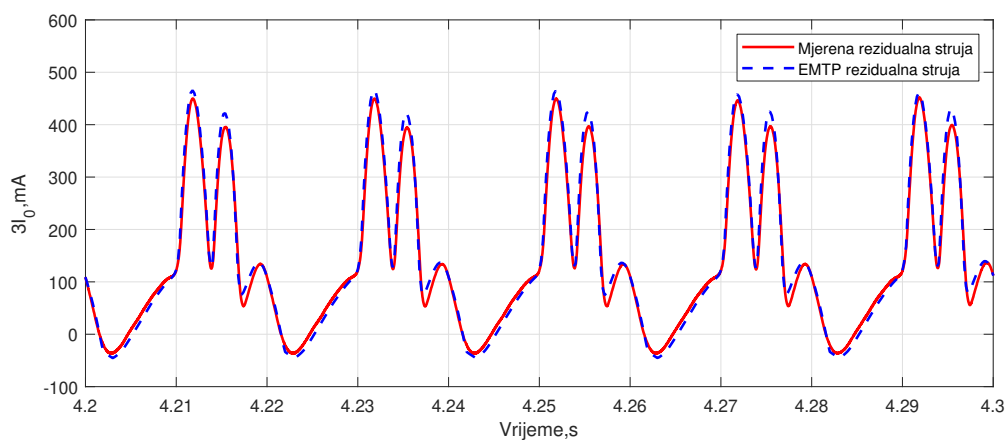
6.4.6 Zemljospoj s otporom 1440 Ω na mjestu kvara i injektiranje istosmjernog signala

Slike 6.52 - 6.53 prikazuju valne oblike struja primara i rezidualne struje u slučaju injektiranja istosmjernog signala. Kontrolirajući efektivne vrijednosti struja primara, amplituda injektiranog signala povišena je do 370 V. Usporedba rezultata mjerenja i simulacije pokazuje vrlo dobro preklapanje.

Injektiranje signala 370 V DC



Slika 6.52: Usporedba struja primara pri injektiranju signala 370 V DC

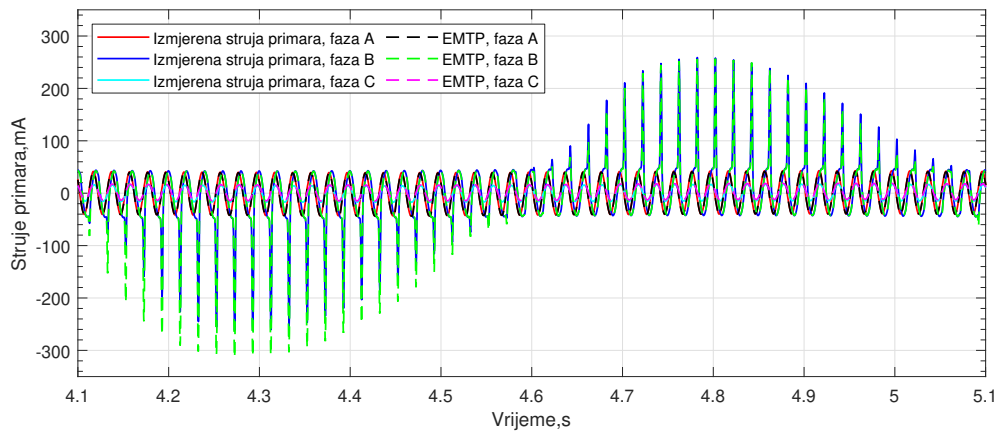


Slika 6.53: Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 370 V DC

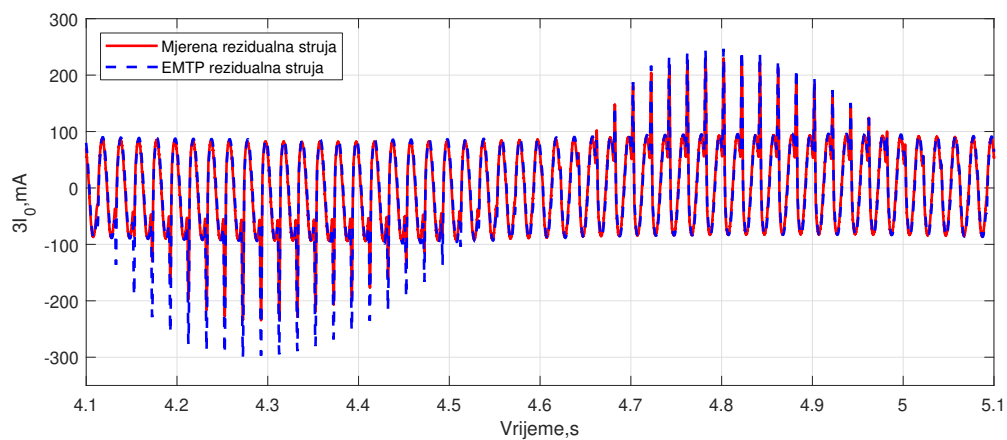
6.4.7 Zemljospoj s otporom 2150Ω na mjestu kvara i injektiranje nisko-frekvencijskog izmjeničnog signala

U nastavku su uspoređeni valni oblici struja primara i rezidualne struje dobiveni mjerenjem i simulacijom, za slučaj 4 - zemljospoj s otporom na mjestu kvara od 2150Ω . Slike 6.54 - 6.55 prikazuju valne oblike pri injektiranju signala frekvencije 1 Hz, slike 6.56 - 6.57 pri injektiranju signala frekvencije 2,5 Hz, a slike 6.58 - 6.59 pri injektiranju signala frekvencije 10 Hz. U usporedbi sa slučajevima 2 i 3 primjećuje se daljnje sniženje amplituda struja i manje izraženo zasićenje zbog još većeg iznosa otpora na mjestu kvara.

Injektiranje signala 1 Hz, 100 V

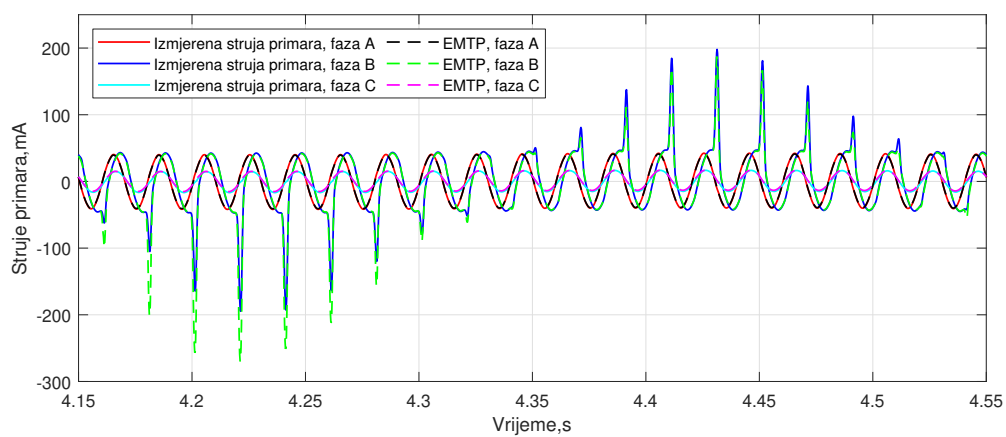


Slika 6.54: Usporedba struja primara pri injektiranju signala 100 V, 1 Hz

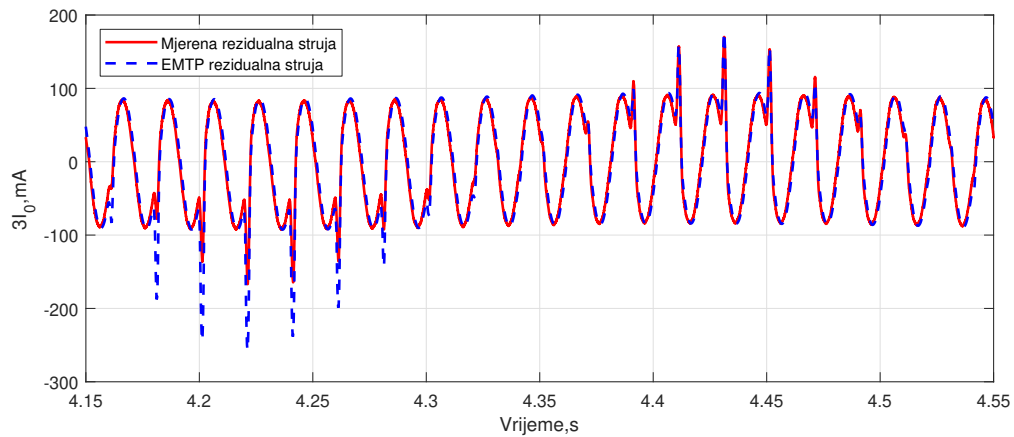


Slika 6.55: Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 100 V, 1 Hz

Injektiranje signala 2,5 Hz, 100 V

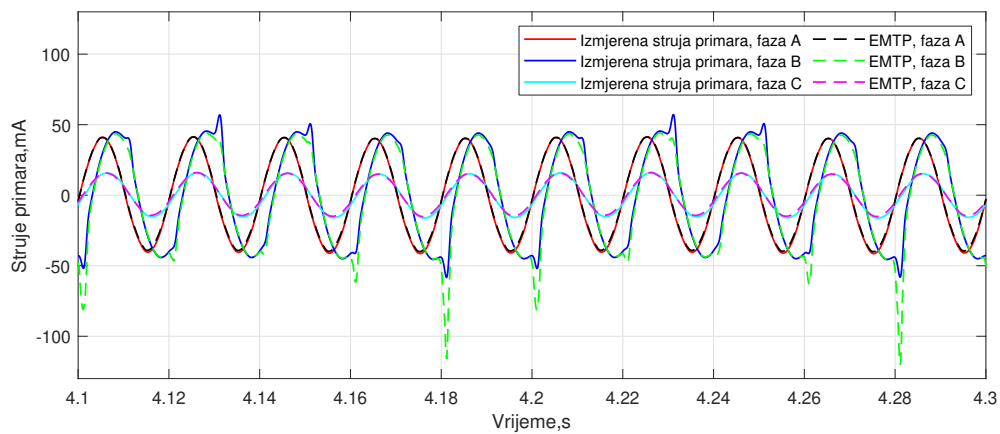


Slika 6.56: Usporedba struja primara pri injektiranju signala 100 V, 2,5 Hz

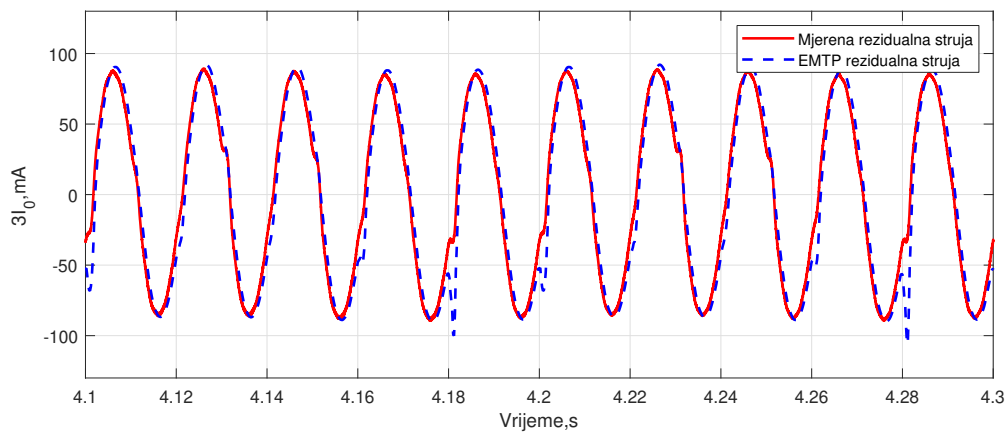


Slika 6.57: Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 100 V, 2,5 Hz

Injektiranje signala 10 Hz, 100 V



Slika 6.58: Usporedba struja primara pri injektiranju signala 100 V, 10 Hz

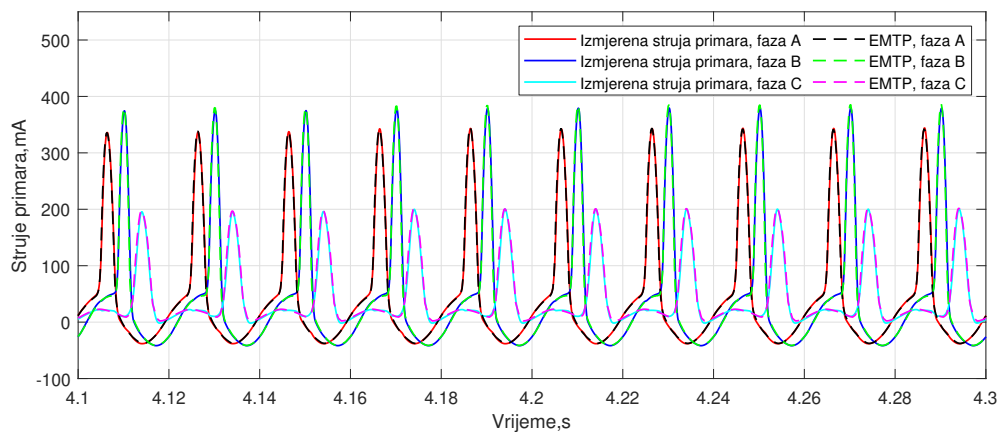


Slika 6.59: Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 100 V, 10 Hz

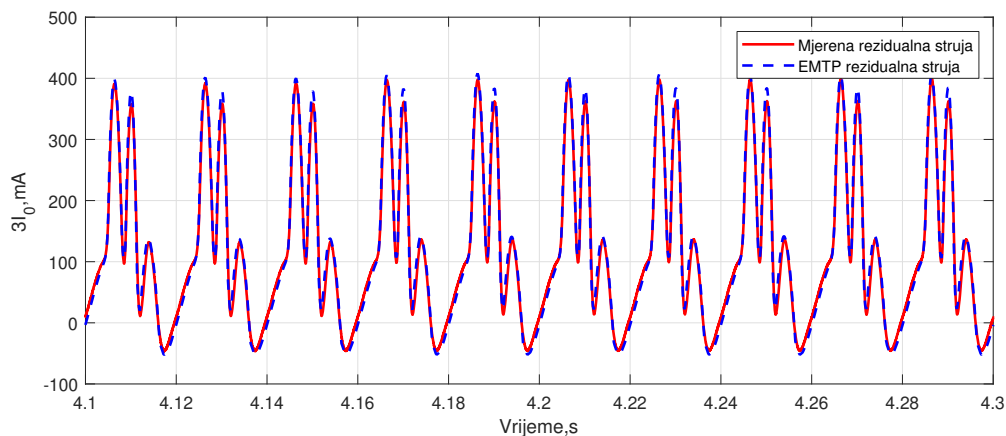
6.4.8 Zemljospoj s otporom 2150Ω na mjestu kvara i injektiranje istosmjernog signala

Slike 6.60 - 6.61 prikazuju valne oblike struja primara i rezidualne struje u slučaju injektiranja istosmjernog signala. Kontrolirajući efektivne vrijednosti struja primara, amplituda injektiranog signala povišena je do 390 V. Usporedba rezultata mjerenja i simulacije pokazuje vrlo dobro preklapanje.

Injektiranje signala 390 V DC



Slika 6.60: Usporedba struja primara pri injektiranju signala 390 V DC



Slika 6.61: Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 390 V DC

6.4.9 Diskusija o usporedbi mjerenja i simulacija

U svim usporedbama vidljivo je vrlo dobro preklapanje valnih oblika izmjerenih i simuliranih struja. Odstupanje koje se može primijetiti događa se u zasićenju naponskog transformatora, kada su struje primara vrlo izobličene. Navedena odstupanja se događaju u fazi B. Na mjestima odstupanja, iznosi struja su viši u rezultatima simulacija, a odstupanja su veća u jednoj poluperiodi. Činjenica da je odstupanje veće u jednoj poluperiodi znači da struja ima nesimetrične poluvalove. Uzrok ovakvoj nesimetriji mogu biti parni harmonici koji su bili prisutni u naponu za vrijeme mjerenja. Parni harmonici se u valnom obliku napona očituju kao nejednake površine poluperioda pri čemu vršne vrijednosti pozitivnog i negativnog poluvala mogu biti naizgled jednake, ali poluperiode nisu simetrične. Ako je pozitivna poluperioda napona različita od negativne poluperiode napona, a poznato je da je magnetski tok integral napona, onda će valni oblik magnetskog toka imati nejednake pozitivne i negativne vršne vrijednosti. Kad se takav valni oblik magnetskog toka preslika preko ϕ - i krivulje nelinearnog induktiviteta, dobije se struja koja ima nesimetrične vršne vrijednosti, odnosno nejednake pozitivne i negativne vršne vrijednosti. Dodatan utjecaj na ova odstupanja imaju činjenice:

- u području zasićenja vrlo mala promjena napona može značiti značajnu promjenu struje,
- EMTP softver računa ϕ - i krivulju za frekvenciju 50 Hz, a pri mjerenju krivulje magnetiziranja bili u prisutni viši harmonici,
- krivulja magnetiziranja naponskog transformatora u fazi B razlikuje se od krivulja preostalih dvaju mjernih transformatora.

Konstrukcijom naponskog transformatora prilagođenog za više iznose amplituda injektiranog signala (izmjena krivulje magnetiziranja prema poglavlju 4.6.4) se ionako očekuje izbjegavanje zasićenja, a time bi nestala i navedena odstupanja. Prikazana odstupanja pri usporedbi s mjerenjem u ovom istraživanju ne utječu na mogućnost provedbe metode injektiranja. Može se zaključiti da se valni oblici vrlo dobro preklapaju te da je metoda injektiranja signala preko primarnih namota induktivnih naponskih transformatora moguća jer odstupanja ne utječu na verifikaciju same metode injektiranja. Provedena eksperimentalna verifikacija potvrđuje točnost provedenih simulacija u četvrtom i petom poglavlju.

Poglavlje 7

Zaključak i buduće istraživanje

U ovom istraživanju je analizirana mogućnost primjene metode injektiranja signala u svrhu pronalaska zemljospoja u neuzemljenoj srednjenaponskoj mreži. Budući da je u takvoj mreži zvjezdište transformatora nedostupno za injektiranje signala, predloženo je injektiranje preko grupe od tri jednopolno izolirana induktivna naponska mjerna transformatora, koji se uobičajeno u praksi postavljaju u izolirane mreže. Za injektirani signal je odabrana niska frekvencija koja umanjuje utjecaj kapacitivnih reaktancija tzv. zdravih odcjepa i pospješuje zatvaranje signala kroz mjesto kvara. Poželjna je što viša amplituda injektiranog signala za olakšavanje detekcije injektiranog signala u mreži. Karakteristike injektiranog signala direktno utječu na naponske mjerne transformatore. Uz pretpostavku da su osjetljivi strujni senzori za mjerenje istosmjerne i izmjenične struje dostupni, naponski mjerni transformator je kritična komponenta za primjenu metode.

U četvrtom poglavlju je mogućnost injektiranja provjerena simulacijama na modelu radialne kableske industrijske mreže. Injektiranje je obavljeno preko postojećih naponskih mjernih transformatora u mreži, čiji su podatci bili dostupni od proizvođača. Rezultati simulacija pokazali su da je moguće pratiti injektirani signal u mreži prema frekvencijskom spektru rezidualnih struja po odcjepima. Frekvencija injektiranog signala najviša je u spektru rezidualne struje odcjepa na kojem je nastao zemljospoj. Rezultati simulacija su također pokazali da je moguće koristiti postojeće naponske transformatore, a da se ne preoptereće u smislu nedozvoljenog pregrijavanja namota. Pri metalnom zemljospoju, iznos injektirane struje ograničen je u najvećoj mjeri otporom primarnih namota i uzdužnim impedancijama, ovisi o amplitudi napona signalnog generatora, a frekvencijska komponenta u rezidualnoj struji koja odgovara frekvenciji injektirane struje je u tom slučaju najveća. Pri podizanju otpora na mjestu kvara, frekvencijska komponenta u rezidualnoj struji koja odgovara frekvenciji injektirane struje se smanjuje. Zbog povećanog otpora na mjestu kvara, injektirana struja se drugačije grana. Kada otpor na mjestu kvara postane sumjerljiv s kapacitivnom reaktancijom nekog drugog odcjepa, samo na temelju sadržaja rezidualne struje postaje nemoguće zaključiti na kojem odcjepu je nastao zemljospoj.

U ovom slučaju, dodatna provjera može biti usporedba frekvencijskog sadržaja rezidualne struje pojedinih vodova za vrijeme zemljospoja s referentnim stanjem, odnosno sa frekvencijskim sadržajem rezidualnih struja pri injektiranju signala u normalnom pogonu. Frekvencijska komponenta u rezidualnoj struji koja odgovara frekvenciji injektirane struje na odcjepu na kojem je nastao kvar bilježi porast u odnosu na iznos u normalnom pogonu.

Na istom modelu industrijske mreže, analizirani su utjecaj odabira frekvencije i amplitude injektiranog signala na zasićenje jezgre naponskog mjernog transformatora. Pokazano je kako povišenje amplitude generatora signala povisuje udio frekvencijske komponente injektiranog signala u frekvencijskom spektru rezidualne struje na kvarnom odcjepu što olakšava detekciju strujnim sensorima. Primjerice, za injektiranje signala frekvencije 2,5 Hz, amplituda 100 V, 300 V odnosno 500 V, 2,5 Hz-komponenta u rezidualnoj struji na odcjepu s kvarom iznosi redom 19 mA, 280 mA odnosno 596 mA. Navedeni iznosi struje se mogu izmjeriti strujnim sensorima. Značajnije zasićenje transformatora se primjećuje pri injektiranju 500 V. Pri povišenju otpora na mjestu kvara, pronalazak odcjepa na kojem je kvar prvenstveno ovisi o frekvenciji injektiranog signala i topologiji mreže (raspodijeli dozemnih kapaciteta) koja uvjetuje grananje injektiranog signala. Za usporedbu je pokazan limit detekcije u industrijskoj mreži pri punoj topologiji (3,66 km kableske mreže) i pri reduciranoj topologiji iste mreže (1,48 km kableske mreže). Pri punoj topologiji, za zemljospoj na najkraćem kabelu, limit detekcije pri injektiranju signala frekvencije 2,5 Hz iznosi 20 k Ω , a pri reduciranoj topologiji 55 k Ω . Pri povišenju frekvencije injektiranja signala, limit detekcije se smanjuje zbog nepovoljnijeg utjecaja kapacitivnih reaktancija ostalih odcjepa. Primjerice, za navedenu mrežu u punoj topologiji, limit detekcije s 55 k Ω pri injektiranju 2,5 Hz pada na 15 k Ω pri injektiranju 10 Hz. S druge strane, kvarove s još višim otporima na mjestu kvara moguće je detektirati koristeći još nižu frekvenciju (primjerice 1 Hz ili istosmjerni signal). Za usporedbu, primjenom usmjerene nadstrujne zemljospojne zaštite na reduciranoj topologiji iste mreže, za najgori slučaj kvara na odcjepu s najvećim dozemnim kapacitetom, moguće je detektirati kvar do 860 Ω , odnosno 35 k Ω uz korištenje osjetljivih ulaza releja. Usmjeren nadstrujna zemljospojna zaštita je komercijalno dostupno rješenje koje se koristi u praksi. Prihvatljivo ju je predvidjeti kao rješenje za nove industrijske pogone i elektrane ili pri revitalizaciji starijih postrojenja. Mreže u takvim postrojenjima nisu velike i pa je kapacitivna struja mreže relativno mala, što može dovesti do neosjetljivosti takve zaštite, a investicija u takvu zaštitu može biti ekonomski neopravdana. Predložena metoda zato može imati prednost prvenstveno u manjim mrežama i u starijim postrojenjima u kojima bi se mogli koristiti postojeći naponski mjerni transformatori.

Kako bi se tijekom injektiranja signala u potpunosti izbjegao ulazak naponskih mjernih transformatora u zasićenje, moguće je utjecati na njihov dizajn. Izmjenom karakteristika jezgre utječe se na krivulju magnetiziranja, tako da transformatori budu prikladniji za injektiranje signala, istovremeno ne ugrožavajući njihovu primarnu funkciju. Daljnje povišenje amplitude

injektiranog signala je tada omogućeno bez opasnosti od zasićenja naponskih transformatora, ali pri podizanju amplitude treba paziti na dozvoljeni napon u niskonaponskom krugu za injektiranje. U istraživanju je pokazano kako se malim povećanjem presjeka jezgre i dodavanje malog zračnog raspora u jezgru ostvaruje sprječavanje zasićenje jezgre tijekom injektiranja. Koristeći izmijenjene karakteristike naponskih transformatora, metoda injektiranja je u petom poglavlju analizirana na primjeru veće, mješovite distribucijske mreže. U usporedbi s manjom industrijskom mrežom, limit detekcije visokoomskih kvarova je niži. Primjerice, za kvar na odcjepu s najmanjim dozemnim kapacitetom, metoda je primjenjiva do otprilike 10 k Ω , a za kvar na odcjepu s najvećim dozemnim kapacitetom do otprilike 4 k Ω . Na modelu distribucijske mreže kao posebni slučajevi su analizirani zemljospoj na prstenastom dijelu mreže i intermitirajući kvar koji nastaje na nadzemnom vodu. Analizom stanja pri intermitirajućem kvaru na nadzemnom vodu, pokazano je kako se intermitirajući kvarovi također mogu otkriti primjenom metode injektiranja, naročito kada postoji efekt porasta struje kvara s vremenom. Pri zemljospoju na prstenastom dijelu, u svakom slučaju se može zaključiti da je kvar nastao na prstenastom dijelu, a ne negdje u ostatku radijalne mreže. Pri točnijem određivanju kraka prstena na kojem je nastao kvar, strateški postavljeni strujni senzori bi doprinijeli u odlučivanju. Ako postoji samo informacija o rezidualnoj struji na počecima prstena, u slučaju kada kvar nastane bliže bilo kojem od krajeva prstena, može se zaključiti na kojem od krakova je nastao kvar. U slučaju kada kvar nastane na mjestu gdje dvije moguće putanje injektiranog signala imaju približno jednake dozemne kapacitete, ne može se zaključiti na kojem dijelu prstena je kvar.

Na kraju istraživanja, provedena je eksperimentalna provjera metode u laboratorijskim uvjetima. U eksperimentu su korištena tri standardna induktivna naponska mjerna transformatora, bez izmijenjenog dizajna. Eksperiment je potvrdio da je preko primarnih namota naponskih mjernih transformatora moguće injektirati niskofrekvencijski i istosmjerni signal i da je injektirani signal sadržan i mjerljiv u frekvencijskom spektru rezidualne struje. Utjecaj promjene frekvencije injektiranog signala i povišenja otpora na mjestu kvara također su potvrđeni eksperimentom. Eksperimentalni krug je također modeliran, a sve izmjerene veličine uspoređene su s rezultatima simulacija. Ustanovljena su vrlo dobra preklapanja valnih oblika, što potvrđuje ispravnost modela i rezultata simulacija koje su provedene u četvrtom i petom poglavlju na primjerima industrijske i distribucijske mreže.

Opisani zaključci provedenog istraživanja mogu se sažeti u sljedećih devet točaka:

1. Induktivni naponski mjerni transformatori se mogu koristiti za injektiranje signala u neuzemljene srednjenaponske mreže.
2. Prema frekvencijskoj komponenti u rezidualnim strujama odcjepa koja odgovara frekvenciji injektiranog signala se može zaključiti na kojem odcjepu je nastao zemljospoj.
3. Granica detekcije visokoomskih kvarova ovisi o raspodjeli dozemnih kapaciteta u mreži, odnosno o topologiji. Različita je za svaku mrežu i ovisi o odcjepu na kojem nastane

zemljospoj.

4. Veća učinkovitost pri pronalasku visokoomskih kvarova primjenom metode injektiranja se očekuje u manjim mrežama.
5. Usporedba frekvencijske komponente u rezidualnim strujama odcjepa koja odgovara frekvenciji injektiranog signala u normalnom pogonu i za vrijeme zemljospoja može olakšati određivanje odcjepa u kvaru.
6. Moguće je utjecati na dizajn induktivnih naponskih mjernih transformatora kako bi se postigle veće amplitude injektiranog signala i izbjeglo zasićenje.
7. Promjene u dizajnu jezgre koje su provedene pri istraživanju ne bi utjecale na njegovu osnovnu funkciju i vanjske dimenzije, a predložene promjene jezgre smatraju se realnima za izgradnju i primjenu.
8. Najviši iznosi efektivnih vrijednosti struja primara izračunati prilikom analiza su viši od trajno dozvoljene struje primara. Injektiranje se ne vrši kontinuirano, već kratkotrajno (trajanje barem jedne periode injektiranog signala zbog izračuna frekvencijskog spektra). Iako kratkotrajna povišenja struja primara nisu opasna za transformatore, problem zagrijavanja se može riješiti promjenom presjeka vodiča primarnog namota.
9. Učinkovitost metode i potrebe za redizajniranim naponskim transformatorima mogu se provjeriti simulacijama za bilo koju mrežu.

U nastavku istraživanja i razvoja metode moguće se usmjeriti na projektiranje novog mjernog transformatora uvažavajući predložene izmjene u dizajnu jezgre te analizu funkcionalnosti primjenom metode konačnih elemenata. Ako se mogućnost bezopasnog injektiranja potvrdi, moguća je proizvodnja novih induktivnih naponskih mjernih transformatora s novim karakteristikama jezgre. Nadalje, potrebno je detaljnije istraživanje mogućnosti primjene strujnih senzora za detekciju injektiranog signala u sredjenaponskim mrežama (postojeća rješenja ili razvoj specijaliziranih). Na kraju, istraživanje bi bilo zaokruženo mjerenjem i analizom pri konačnom pokušaju primjene u stvarnoj trofaznoj neuzemljenoj mreži.

Literatura

- [1]IEEE Std 142-2007 (Revision of IEEE Std 142-1991), “IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems”, IEEE, norma, 2007.
- [2]HRN EN 50522:2010, “Uzemljenje elektri čnih postrojenja nazivnih izmjeničnih napona iznad 1 kV”, HRN, norma, 2010.
- [3] Čučić, R., Komen, V., Živić Đurović, M., “Koncept uzemljenja zvjezdišta razdjelnih mreža”, in *Energija*, Vol. 28-2, 2008, str. 77-89.
- [4]Ravli ć, S., “Prepoznavanje visokoomskih kvarova u mrežama srednjeg napona uzemljenima preko transformatora za uzemljenje zvjezdišta”, Doktorski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2016.
- [5]Roberts, J., Altuve, H., Hou, D., “Review of ground fault protection methods for grounded, ungrounded and compensated distribution systems”, 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century.
- [6]Prevé, C., *Protection of Electrical Networks*. ISTE, 2006.
- [7]Olszowiec, P., *Insulation Measurement and Supervision in Live AC and DC Unearthed Systems*. Springer, 2012.
- [8]Zhu, W., Wu, Z., “Comparison and research on insulation monitoring methods for marine power system”, in *Proceedings of the 2015 4th National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering*. Atlantis Press, 2015/12, str. 761-766, dostupno na: doi.org/10.2991/nceece-15.2016.141
- [9]Lee, K.-M., Park, C.-W., “Ground Fault Detection Using Hybrid Method in IT System LVDC Microgrid”, *Energies*, Vol. 13, No. 10, 2020.
- [10]Insulation Monitoring for Ungrounded Networks, Schneider Electric, 2019.

- [11]Hänninen, S., “Single phase earth faults in high impedance grounded networks- characteristics, indication and location”, Doktorski rad, Helsinki University of Technology, 2001.
- [12]Ravli ć, S., Marusic, A., “Simulation models for various neutral earthing methods in medium voltage systems”, *Procedia Engineering*, Vol. 100, 12 2015.
- [13]Jozsa, L., Fekete, K., Glavaš, H., *Kratki spojevi u elektroenergetskim mrežama*. GRAPHIS d.o.o., 2022.
- [14]Das, J. C., *Power System Analysis*. CRC Press, 2012.
- [15]Farughian, A., Kumpulainen, L., Kauhaniemi, K., “Review of methodologies for earth fault indication and location in compensated and unearthed MV distribution networks”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 154, 2018, str. 373-380.
- [16]Stefanidou-Voziki, P., Sapountzoglou, N., Raison, B., Dominguez-Garcia, J., “A review of fault location and classification methods in distribution grids”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 209, 2022, str. 108031.
- [17]Loos, M., “Single Phase to Ground Fault Detection and Location in Compensated Network”, Doktorski rad, Brussels School of Engineering, 2014.
- [18]Šeila Gruhonji ć Ferhatbegović, *Određivanje mjesta kvara a prijenosnim i distributivnim elektroenergetskim mrežama*. Udžbenici Sveučilišta u Sarajevu, 2018.
- [19]Noh, J., Chae, W., Kim, W., Choi, S., “A Study on Meshed Distribution System and Protection Coordination Using HILS System”, in *2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence*, 2022, str. 344-346.
- [20]Chu, C.-M., Yuri, Y.-S., Kwon, S.-C., Song, I.-K., “A protection coordination estimation of distribution network for smart distribution management system”, in *CIREN 2012 Workshop: Integration of Renewables into the Distribution Grid*, 2012, str. 1-4.
- [21]Lu, H., Biyawerwala, H., Thakrawala, H., “Polarized Distribution Protection Coordination Strategy Under the Impact from Various Distributed Energy Resources (DER) Generation Points”, in *2022 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2022, str. 1-5.
- [22]Kim, W.-H., Kim, J.-Y., Chae, W.-K., Kim, G., Lee, C.-K., “LSTM-Based Fault Direction Estimation and Protection Coordination for Networked Distribution System”, *IEEE Access*, Vol. 10, 2022, str. 40 348-40 357.

- [23]Saleh, K. A., Mehrizi-Sani, A., “Multi-Stage Protection Coordination Optimization for Distribution Systems with Topology Changes”, in 2020 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2020, str. 1-5.
- [24]Habib, Z., “Fault location in resonant earthed medium voltage distribution systems”, Doktorski rad, KTH Royal institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2022.
- [25]Zerihun, T. A., Treider, T., Taxt, H., Nordevall, L. B., Haugan, T. S., “Two novel current-based methods for locating earth faults in unearthed ring operating MV networks”, Electric Power Systems Research, Vol. 213, 2022, str. 108774.
- [26]Farughian, A., Kumpulainen, L., Kauhaniemi, K., “Earth Fault Location Using Negative Sequence Currents”, Energies, Vol. 12, No. 19, 2019.
- [27]Altonen, J., Wahlroos, A., “Advancements in fundamental frequency impedance based earth-fault location in unearthed distribution networks”, in 19th International Conference on Electricity Distribution, 2007.
- [28]Adzman, M. R., “Earth fault distance computation methods based on transients in power distribution systems”, Doktorski rad, Aalto University, Espo, Finland, 2014.
- [29]Druml, G., Achleitner, G., Leitner, W., Fickert, L., “New single-ended earthfault distance estimation for the 110-kV- and 20-kV-compensated network”, Elektrotechnik und Informationstechnik, Vol. 135, 2018, str. 567-575.
- [30]Wang, Z., Qi, Y., “Study and Realizing of Method of AC Locating Fault in Distribution System”, in 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2010, str. 1-5.
- [31]Sheta, A. N., Abdulsalam, G. M., Eladl, A. A., “Online tracking of fault location in distribution systems based on PMUs data and iterative support detection”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 128, 2021, str. 106793.
- [32]Farughian, A., Kumpulainen, L., Kauhaniemi, K., “Non-directional earth fault passage indication in isolated neutral distribution networks”, Energies, Vol. 13, No. 18, 2020.
- [33]Dashti, R., Salehizadeh, S. M., Shaker, H. R., Tahavori, M., “Fault location in double circuit medium power distribution networks using an impedance-based method”, Applied Sciences, Vol. 8, No. 7, 2018.
- [34]Lowczowski, K., Lorenc, J., Andruszkiewicz, J., Nadolny, Z., Zawodniak, J., “Novel earth fault protection algorithm based on mv cable screen zero sequence current filter”, Energies, Vol. 12, No. 16, 2019.

- [35]Elkalashy, N. I., Sabiha, N. A., Lehtonen, M., “Earth Fault Distance Estimation Using Active Traveling Waves in Energized-Compensated MV Networks”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 30, No. 2, 2015, str. 836-843.
- [36]Šeila Gruhonji ć Ferhatbegović, “Određivanje mjesta jednofaznog kvara u distribucijskim mrežama zasnovano na putnim valovima”, *Doktorski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva*, 2012.
- [37]Alamuti, M. M., Nouri, H., Ciric, R. M., Terzija, V., “Intermittent Fault Location in Distribution Feeders”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, No. 1, 2012, str. 96-103.
- [38]Xyngi, I., Popov, M., “Transient directional busbar protection scheme for distribution networks”, in *10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010)*, 2010, str. 1-4.
- [39]Mirshekali, H., Dashti, R., Keshavarz, A., Shaker, H. R., “Machine Learning-Based Fault Location for Smart Distribution Networks Equipped with Micro-PMU”, *Sensors*, Vol. 22, No. 3, 2022.
- [40]Darab, C., Tarnovan, R., Turcu, A., Martineac, C., “Artificial Intelligence Techniques for Fault Location and Detection in Distributed Generation Power Systems”, in *8th International Conference on Modern Power Systems*, 2019, str. 1-4.
- [41]Li, Y., Zhang, Y., Liu, W., Chen, Z., Li, Y., Yang, J., “A Fault Pattern and Convolutional Neural Network Based Single-phase Earth Fault Identification Method for Distribution Network”, in *IEEE Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Asia)*, 2019, str. 838-843.
- [42]Rafinia, A., Moshtagh, J., “A new approach to fault location in three-phase underground distribution system using combination of wavelet analysis with ANN and FLS”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 55, 2014, str. 261-274.
- [43]Tong, Z., Xianhong, L., Haibin, Y., Jianchang, L., Peng, Z., Lanxiang, S., “A Fault Location Method for Active Distribution Network with Renewable Sources Based on BP Neural Network”, in *7th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, Vol. 1, 2015, str. 357-361.
- [44]Olejniak, B., “Adaptive Zero-Sequence Overcurrent Criterion for Earth Fault Detection for Fault Current Passage Indicators in Resistor Grounded Medium Voltage Networks”, *IEEE Access*, Vol. 9, 2021, str. 63 952-63 965.
- [45]Lorenc, J., Andruszkiewicz, J., Staszak, B., Olejniak, B., Balcerek, P., “Support the work of Earth fault passage indicator in MV grid”, in *2016 Electric Power Networks*, 2016, str. 1-5.

- [46]Zeljko, C., Mrcic, P., Lekic, D., Erceg, B., Matic, P., Zubic, S., Balcerek, P., “Performance Assessment of Fault Locators and Fault Passage Indicators in Distribution Networks by the Non-Sequential Monte Carlo Simulation”, in International Symposium on Industrial Electronics, 2018, str. 1-7.
- [47]Farughian, A., Kumpulainen, L., Kauhaniemi, K., Pettissalo, S., Sallinen, V., “Technical requirements for practical implementation of fault passage indication”, in IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, 2021, str. 1-6.
- [48]Farughian, A., Kumpulainen, L., Kauhaniemi, K., Hovila, P., “Intermittent Earth Fault Passage Indication in Compensated Distribution Networks”, IEEE Access, Vol. 9, 2021, str. 45 356-45 366.
- [49]Nassif, A., Gill, R., Loo, C., Ge, E. P., “A negative-sequence based method for fault passage identification”, in IEEE Electrical Power and Energy Conference, 2016, str. 1-6.
- [50]de Miguel, C. G., De Rybel, T., Driesen, J., “Implementation of a digital directional Fault Passage Indicator”, in 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013, str. 2075-2080.
- [51]Horak, J., Babic, W., “Directional Overcurrent Relaying (67) Concepts”, in IEEE Rural Electric Power Conference, 2006, str. 1-8.
- [52]Technical Data, SIPROTEC 5, Overcurrent Protection, 7SJ82/7SJ85, Manual c53000-G5040-C017-8, Edition 11, SIEMENS, 2017.
- [53]Saraj čev, P., Kosor, R., Zaštita u elektroenergetskom sustavu. Predavanja, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni studijski centar za stručne studije, 2018.
- [54]Buigues, G., Valverde, V., Zamora, I., Mazón, J., Torres, E., “Signal injection techniques for fault location in distribution networks”, Renewable Energy and Power Quality, 2012, str. 412-417.
- [55]Raunig, C., Fickert, L., Obkircher, C., Achleitner, G., “Mobile earth fault localization by tracing current injection”, in Electric Power Quality and Supply Reliability, 2010., str. 243–246.
- [56]Druml, G., Raunig, C., Schegner, P., Fickert, L., “Fast selective earth fault localization using the new fast pulse detection method”, in International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2013, str. 1-5.

- [57]Druml, G., Raunig, C., Schegner, P., Fickert, L., “Earth fault localization with the help of the fast-pulse-detection-method using the new high-power-current-injection (HPCI)”, in *Electric Power Quality and Supply Reliability*, 2012, str. 1-5.
- [58]Yong, B., Wei, C., Jiansheng, L., Lei, D., Qingdong, L., Ning, Y., “Single phase to earth fault location method in distribution network based on signal injection principle”, in *4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, 2011, str. 204-208.
- [59]Chen, B., Yu, N., Chen, B., Tian, C., Chen, Y., Chen, G., “Fault Location for Underground Cables in Ungrounded MV Distribution Networks Based on ZSC Signal Injection”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 36, No. 5, 2021, str. 2965-2977.
- [60]Rahayu Widodo, M. B., Soeprijanto, A., Penangsang, O., “Analysis of Fault Location on Distribution System Using Impulse Injection learned by ANFIS”, in *2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications*, 2020, str. 38-43.
- [61]Kruger, S., de Kock, J., “Ferroresonance: A Review of the Phenomenon and Its Effects”, in *Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa*, 2021, str. 1-6.
- [62]Aref, S., Anaraki, A. S., Zarchi, D. A., “Probability Evaluation of Occurrence of Ferroresonance in Montazer Qaem 63kV Substation”, in *14th International Conference on Protection and Automation of Power Systems*, 2019, str. 7-13.
- [63]Heidary, A., Rouzbehi, K., Radmanesh, H., Pou, J., “Voltage Transformer Ferroresonance: An Inhibitor Device”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 35, No. 6, 2020, str. 2731-2733.
- [64]Solak, K., Rebiant, W., “Modeling of Ferroresonance Phenomena in MV Networks”, in *2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference*, 2018, str. 1-6.
- [65]Tianlong, Z., Shijin, T., Xuezhong, L., Hongwen, L., Ruigui, L., “Numerical and experimental simulation researches on effectiveness of anti-ferroresonance measures in distribution power grid”, in *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2016, str. 2584-2587.
- [66]Poornima, S., Sathyanandan, L., Sugumaran, C. P., “Ferroresonance Mitigation in an Inductive Voltage Transformer Using Memristor Emulator”, in *International Conference on High Voltage Engineering and Technology*, 2019, str. 1-6.
- [67]Kraszewski, W., Syrek, P., Mitoraj, M., “Methods of Ferroresonance Mitigation in Voltage Transformers in a 30 kV Power Supply Network”, *Energies*, Vol. 15, No. 24, 2022.

- [68] Moore, F., Haddad, A., Griffiths, H., Osborne, M., “Influence of inductive voltage transformers on the measurement of switching transients”, in 47th International Universities Power Engineering Conference, 2012, str. 1-5.
- [69] Bego, V., Mjerni transformatori. Školska knjiga, 1997.
- [70] Dommel, H., Electromagnetic Transients Program Reference Manual: (EMTP) Theory Book. Bonneville Power Administration, 1986.
- [71] Kelemen, T., “Ferorezonancija u trofaznoj mreži s izoliranom nultočkom”, in Hrvatski komitet Međunarodne konferencije za velike električne sustave. Četvrto savjetovanje. Grupa 12 - Transformatori, 1999.
- [72] Uglešić, I., Filipović-Grčić, B., Stipetić, N., “Study of the use of homopolar directional protections in the context of an industrial plant”, a research study for EDF R&D, 2019.
- [73] Stipetić, N., Filipović-Grčić, B., Uglešić, I., Xémard, A., Andres, N., “Earth-fault detection and localization in isolated industrial MV network – comparison of directional overcurrent protection and signal injection method”, Electric Power Systems Research, Vol. 197, 2021, str. 107313.
- [74] IEC 61869-2, “Instrument transformers – Part 2: Additional requirements for current transformers”, IEC, norma, 2012.
- [75] Stipetić, N., Filipović-Grčić, B., Žiger, I., “LF signal injection for earth-fault localization in unearthed distribution network”, Electric Power Systems Research, Vol. 220, 2023, str. 109249.
- [76] Syed, W. A., Khan, S., Phillips, P., Perinpanayagam, S., “Intermittent Fault Finding Strategies”, Procedia CIRP, Vol. 11, 2013, str. 74-79, 2nd International Through-life Engineering Services Conference.
- [77] Nikolaidis, V., Patsidis, A. D., Tsimtsios, A., “High Impedance Fault Modelling and Application of Detection Techniques with EMTP-RV”, The Journal of Engineering, Vol. 2018, 2018.
- [78] Stipetić, N., Filipović-Grčić, B., Žiger, I., Jančin, S., Novko, I., Brezak, D., Xémard, A., “Experimental verification of low-frequency signal injection through inductive voltage transformers for earth-fault detection”, in Cigre SC A2 & 6th International Colloquium "Transformer Research and Asset Management", 2023, str. 1-9.

- [79] Helbling, H., Benabou, A., Van Gorp, A., Tounzi, A., El Youssef, M., Boughanmi, W., Lallo, D., “Effect of industrial impregnation process on the magnetic properties of electrical steels”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 531, 2021, str. 167942.
- [80] F. Predl, M. A., M. Freiburg, “Diagnostic Measurements on Instrument Transformers – Part I”, *Transformers Magazine*, Vol. 3, 2021, str. 167942.
- [81] Tiismus, H., Kallaste, A., Belahcen, A., Rassolkin, A., Vaimann, T., Shams Ghahfarokhi, P., “Additive Manufacturing and Performance of E-Type Transformer Core”, *Energies*, Vol. 14, No. 11, 2021.

Popis slika

| | |
|--|----|
| 2.1. Prilike u izoliranoj mreži u normalnom pogonu | 7 |
| 2.2. Fazorski dijagram napona u normalnom pogonu | 8 |
| 2.3. Prilike u izoliranoj mreži pri zemljospoju | 8 |
| 2.4. Fazorski dijagram napona pri metalnom zemljospoju | 9 |
| 2.5. Utjecaj otpora na mjestu kvara na fazorski dijagram napona | 10 |
| 2.6. Primjer zemljospoja u mreži s tri odcjepa | 11 |
| 2.7. Pripadajući fazorski dijagram napona i struja za primjer mreže s tri odcjepa . . | 12 |
| 2.8. Nadomjesna shema mreže s tri odcjepa i izoliranim zvjezdištem | 13 |
| 2.9. Pojednostavljena nadomjesna shema mreže s izoliranim zvjezdištem | 13 |
| 2.10. Metode pronalaska kvara | 15 |
| 2.11. Trofazna shema spoja zemljospojne zaštite na otvoreni trokut sekundarnih namota naponskih transformatora [53] | 16 |
| 2.12. Direktno mjerenje rezidualne struje: obuhvatnim mjernim transformatorom (lijevo) i grupom od tri strujna transformatora (desno) [53] | 17 |
| 2.13. Princip injektiranja i praćenja signala u mreži [6] | 19 |
| 2.14. Shema spoja uređaja za nadzor izolacije u uzemljenim (lijevo) i neuzemljenim (desno) mrežama [6] | 21 |
| 3.1. Shema kruga za injektiranje signala preko grupe od tri naponska transformatora | 23 |
| 3.2. Jednopolna nadomjesna shema induktivnog naponskog transformatora | 24 |
| 3.3. Nadomjesna shema grupe od tri jednopolno izolirana naponska transformatora s otpornikom spojenim u otvoreni trokut pomoćnih namota | 25 |
| 3.4. Rekurzivni postupak pretvorbe $U_{rms} - I_{rms}$ krivulje u $\phi - i$ krivulju | 27 |
| 3.5. Krivulja magnetiziranja za naponski mjerni transformator 4VPA1-12 | 29 |
| 3.6. Model grupe od tri jednopolno izolirana naponska transformatora u EMTP-u . . | 30 |
| 4.1. Modelirana radijalna 10,5 kV kabela mreža unutar elektrane | 32 |
| 4.2. Valni oblik struje zemljospoja, $I_m = 30,12$ A, $I_{rms} = 21,30$ A | 34 |
| 4.3. Naponi po fazama. Prije zemljospoja $U_m = 8,35$ kV. Nakon zemljospoja napon u fazi A je nula, a u fazama B i C iznosi 14,47 kV. | 35 |

| | |
|--|-----|
| 4.4. Trostruki nulti napon na otporniku u spoju pomoćnih namota naponskih mjernih transformatora u trokut. Prije zemljospoja pri simetričnom pogonu nulti napon je nula, a nakon zemljospoja napon iznosi $98,6 V_{rms}$. | .35 |
| 4.5. Tokovi u jezgrama naponskih transformatora. Vršna vrijednost toka u jezgrama naponskih transformatora priključenih u faze u kojima nije nastupio kvar iznosi 46 Wb. | .36 |
| 4.6. Struje primarnih namota naponskih transformatora | .36 |
| 4.7. Struje sekundarnih namota naponskih transformatora. Nakon zemljospoja vršna vrijednost ne prelazi 2 A. | .37 |
| 4.8. Struja u spoju trokut pomoćnih namota. Vršna vrijednost ne prelazi 4,5 A. | .37 |
| 4.9. Ukupni otpor izolacije izračunat na temelju injektiranog istosmjernog signala preko primarnih namota naponskih transformatora za različite otpore na mjestu kvara | .38 |
| 4.10. Magnetski tok u jezgrama naponskih transformatora pri injektiranju DC struje, za otpor na mjestu kvara $R = 0 \Omega$ | .38 |
| 4.11. Struje primara naponskih transformatora pri injektiranju DC struje, za otpor na mjestu kvara $R = 0 \Omega$ | .39 |
| 4.12. Tok u jezgrama naponskih transformatora pri injektiranju DC struje, za otpor na mjestu kvara $R = 1000 \Omega$ | .39 |
| 4.13. Struje primara naponskih transformatora pri injektiranju DC struje, za otpor na mjestu kvara $R = 1000 \Omega$ | .39 |
| 4.14. Tri karakteristična mjesta kvara u mreži - kvar 1 na najkraćem kabelu, kvar 2 na povezujućem kabelu i kvar 3 na krajnjem odcjepu | .40 |
| 4.15. Valnik oblik rezidualne struje na odcjepu B_BA. Osim dominantne 50 Hz komponente rezidualna struja sadrži i 2,5 Hz komponentu zbog injektiranog signala | .41 |
| 4.16. 2,5 Hz komponente rezidualnih struja po odcjepima pri injektiranju signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz, za kvar 1 - zemljospoj na odcjepu B_BA | .41 |
| 4.17. 2,5 Hz komponente rezidualnih struja po odcjepima pri injektiranju signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz, za kvar 2 - zemljospoj na odcjepu A_E | .41 |
| 4.18. 2,5 Hz komponente rezidualnih struja po odcjepima pri injektiranju signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz, za kvar 3 - zemljospoj na odcjepu E_EA | .42 |
| 4.19. Tok u jezgrama naponskih transformatora pri istovremenom zemljospoju i injektiranju izmjeničnog signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz. Maksimalan iznos toka doseže 55 Wb | .42 |
| 4.20. Struje primara naponskih transformatora pri istovremenom zemljospoju i injektiranju izmjeničnog signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz | .43 |

| | |
|--|-----|
| 4.21. Struje sekundara naponskih transformatora pri istovremenom zemljospoju i injektiranju izmjeničnog signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz | .43 |
| 4.22. Struja u spoju trokut pomoćnih namota naponskih transformatora pri istovremenom zemljospoju i injektiranju izmjeničnog signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz | .43 |
| 4.23. Reducirana topologija razmatrane industrijske mreže | .44 |
| 4.24. Utjecaj otpora na mjestu kvara na rezidualnu struju kvarnog kabela za slučaj kvara na kabele A_E (slika lijevo - otpori do 1 k Ω , slika desno - otpori od 1 k Ω do 40 k Ω) | .46 |
| 4.25. Reducirana topologija razmatrane industrijske mreže, kvar 1 na kabele B_BA . | .47 |
| 4.26. Rezidualne struje po odcjepima u slučaju metalnog zemljospoja na kabele B_BA | .47 |
| 4.27. Reducirana topologija razmatrane industrijske mreže, kvar 2 na kabele A_E . | .47 |
| 4.28. Rezidualne struje po odcjepima u slučaju metalnog zemljospoja na kabele A_E | .48 |
| 4.29. Reducirana topologija razmatrane industrijske mreže, kvar 3 na kabele E_EB . | .48 |
| 4.30. Rezidualne struje po odcjepima u slučaju metalnog zemljospoja na kabele E_EB | .48 |
| 4.31. Magnetski tok u jezgrama naponskih transformatora pri istovremenom zemljospoju i injektiranju izmjeničnog signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz. Maksimalan iznos magnetskog toka u stacionarnom stanju doseže 55 Wb. | .49 |
| 4.32. Struje primara naponskih transformatora pri istovremenom zemljospoju i injektiranju izmjeničnog signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz. U stacionarnom stanju nema značajnih izobličenja | .49 |
| 4.33. Struje sekundara naponskih transformatora pri istovremenom zemljospoju i injektiranju izmjeničnog signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz. Vršna vrijednost struja sekundara je 2 A. | .50 |
| 4.34. Struja u spoju pomoćnih namota naponskih transformatora u trokut pri istovremenom zemljospoju i injektiranju izmjeničnog signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz. Vršna vrijednost struje tercijara je 4,5 A. | .50 |
| 4.35. Struje primara u fazi B pri injektiranju signala 2,5 Hz različitih amplituda | .51 |
| 4.36. Struje primara u fazi B pri injektiranju signala 10 Hz različitih amplituda | .51 |
| 4.37. Rezidualna struja na kabele u kvaru pri metalnom zemljospoju i istovremenom injektiranju signala različitih frekvencija, amplitude 300 V | .52 |
| 4.38. Struje primara pri injektiranju istosmjernog signala amplitude 300 V | .52 |
| 4.39. Magnetski tok po fazama pri zemljospoju i injektiranju istosmjernog signala amplitude 300 V | .53 |
| 4.40. Struje primara u fazi B pri injektiranju signala amplitude 300 V, različitih frekvencija | .53 |

| | |
|---|-----|
| 4.41. Struje primara u fazi B pri injektiranju signala 2,5 Hz, 500 V i pri različitim otporima na mjestu kvara | .55 |
| 4.42. Struje primara u fazi B pri injektiranju signala 10 Hz, 500 V i pri različitim otporima na mjestu kvara | .55 |
| 4.43. Rezidualna struja na kabelu u kvaru pri istovremenom zemljospoju s otporom na mjestu kvara od 20 k Ω i injektiranju izmjeničnog signala amplitude 100 V i frekvencije 2,5 Hz | .55 |
| 4.44. Rezidualna struja na kabelu u kvaru pri zemljospoju uz otpor na mjestu kvara od 20 k Ω uz istovremeno injektiranje signala 300 V, 2,5 Hz. Injektiranje traje od početka simulacije, a zemljospoj nastupa u 0,5 s. | .56 |
| 4.45. Rezidualna struja na kabelu u kvaru u slučaju zemljospoja s otporom na mjestu kvara od 55 k Ω , za injektiranje 300 V, 2,5 Hz. U proračunu injektiranje traje od početka simulacije, a zemljospoj nastupa u 0,5 s. | .57 |
| 4.46. Rezidualna struja na kabelu u kvaru u slučaju zemljospoja s otporom na mjestu kvara od 60 k Ω , za injektiranje 300 V, 2,5 Hz. U proračunu injektiranje traje od početka simulacije, a zemljospoj nastupa u 0,5 s. | .57 |
| 4.47. Rezidualna struja na kabelu u kvaru za različite otpore na mjestu kvara, za injektiranje 100 V i 300 V, 2,5 Hz | .57 |
| 4.48. Rezidualna struja na kabelu u kvaru pri zemljospoju uz otpor na mjestu kvara od 20 k Ω uz istovremeno injektiranje signala 300 V, 10 Hz | .58 |
| 4.49. Rezidualna struja na kabelu u kvaru za različite otpore na mjestu kvara, za injektiranje 300 V i 500 V, 10 Hz | .58 |
| 4.50. Usporedba limita detekcije pri punom i reduciranom uklopnom stanju industrijske mreže | .59 |
| 4.51. Varijante krivulje magnetiziranja ($U - I$) | .60 |
| 4.52. Varijante krivulje magnetiziranja ($\phi - I$) | .60 |
| 4.53. Struje primara u fazi B pri istovremenom metalnom zemljospoju i injektiranju 2,5 Hz, 300 V signala u industrijskoj mreži u slučaju pune topologije, za različite varijante krivulje magnetiziranja naponskih transformatora | .62 |
| 5.1. Iznosi otpora na mjestu kvara zabilježeni tijekom dvije godine u izoliranoj distribucijskoj mreži u Finskoj [11] | .63 |
| 5.2. Shema modelirane izolirane distribucijske mreže iz [25] za testiranje metode injektiranja signala | .64 |
| 5.3. Struje primara za vrijeme injektiranja niskofrekvencijskog (2,5 Hz) signala i metalnog zemljospoja koji nastupa u 4. sekundi, za model standardnih naponskih mjernih transformatora | .66 |

| | | |
|-------|--|-------------|
| 5.4. | Struje primara u fazi B za vrijeme injektiranja niskofrekvencijskog (2,5 Hz) signala amplitude 500 V i metalnog zemljospoja koji nastupa u 4. sekundi, za modele naponskih mjernih transformatora s različitim krivuljama magnetiziranja | 66 |
| 5.5. | Struje primara za vrijeme injektiranja niskofrekvencijskog (2,5 Hz) signala amplitude 500 V i metalnog zemljospoja koji nastupa u 2. sekundi, za model naponskog mjernog transformatora s varijantom 3 krivulje magnetiziranja |67 |
| 5.6. | Struje sekundara za vrijeme injektiranja niskofrekvencijskog (2,5 Hz) signala amplitude 500 V i metalnog zemljospoja koji nastupa u 2. sekundi, za model naponskog mjernog transformatora s varijantom 3 krivulje magnetiziranja | . . .67 |
| 5.7. | Struja tercijara za vrijeme injektiranja niskofrekvencijskog (2,5 Hz) signala amplitude 500 V i metalnog zemljospoja koji nastupa u 2. sekundi, za model naponskog mjernog transformatora s varijantom 3 krivulje magnetiziranja |68 |
| 5.8. | Tokovi u jezgrama naponskih mjernih transformatora za vrijeme injektiranja niskofrekvencijskog (2,5 Hz) signala amplitude 500 V i metalnog zemljospoja koji nastupa u 2. sekundi, za model naponskog mjernog transformatora s varijantom 3 krivulje magnetiziranja |68 |
| 5.9. | Iznosi 2,5 Hz komponente u rezidualnim strujama po odcjepima u slučaju kvara 1, pri injektiranju 2,5 Hz, 500 V signala |69 |
| 5.10. | 2,5 Hz komponenta u rezidualnim strujama po odcjepima ovisno o otporu na mjestu kvara, za slučaj kvara 1 (kraju odcjepa 1) |70 |
| 5.11. | 2,5 Hz komponenta u rezidualnim strujama po odcjepima ovisno o otporu na mjestu kvara, za slučaj kvara 2 (kraj odcjepa 4) |70 |
| 5.12. | Model intermitirajućeg kvara prema [77] |72 |
| 5.13. | Struja kvara pri injektiranju i intermitirajućem zemljospoju |72 |
| 5.14. | Uvećani dio struje kvara za vrijeme injektiranja signala i intermitirajućeg zemljospoja |72 |
| 5.15. | 2,5 Hz komponenta u rezidualnim strujama svih odcjepa za vrijeme injektiranja signala i intermitirajućeg kvara |73 |
| 5.16. | Distribucija 2,5 Hz komponente u rezidualnim strujama u slučaju kvara 1 - na kraju odcjepa 1 |73 |
| 5.17. | Distribucija 2,5 Hz komponente u rezidualnim strujama u slučaju kvara 2 - na kraju odcjepa 4 |74 |
| 5.18. | Distribucija 2,5 Hz komponente u rezidualnim strujama u slučaju kvara 4 - na početku odcjepa B na upetljanom dijelu mreže |74 |
| 5.19. | Distribucija 2,5 Hz komponente u rezidualnim strujama u slučaju kvara 5 - na kraju odcjepa B na upetljanom dijelu mreže |74 |
| 6.1. | Podatci s natpisne pločice mjernog transformatora tipa 4VPA1-12 |77 |

| | |
|---|-----|
| 6.2. Tri induktivna naponska transformatora korištena za eksperimentalnu provjeru principa rada metode injektiranja signala | .78 |
| 6.3. Izmjerene krivulje magnetiziranja triju naponskih mjernih transformatora korištenih u eksperimentu | .78 |
| 6.4. Shema mjernog kruga | .80 |
| 6.5. Fotografije mjernog postava | .81 |
| 6.6. Fotografija mjernog postava s označenom opremom. 1 - trofazni regulacijski transformator, 2 - trofazni ispitni transformator, 3 - naponski mjerni transformatori, 4 - nazivni tereti na sekundarima mjernih transformatora, 5 - SN kondenzatori, 6 - mjesto zemljospoja na koje se spajaju različiti otpori na mjestu kvara, 7 - otpornik za sprječavanje ferorezonancije u krugu tercijara, 8 - strujni senzori za mjerenje struje kroz SN kondenzatore, 9 - zvijezda spoj primarnih namota mjernih transformatora i NN kondenzator, 10 - kapacitivna djelila za mjerenje faznih napona | .81 |
| 6.7. Generator niskofrekvencijskog signala i pojačalo (lijevo) i akvizicijski sustav Dewesoft (desno) | .82 |
| 6.8. Fotografije otpornika korištenih pri mjerenju | .82 |
| 6.9. Termografska snimka otpornika za vrijeme mjerenja | .83 |
| 6.11. Izmjerene struje primarnih namota naponskih mjernih transformatora pri istovremenom zemljospoju i injektiranju signala frekvencije 2,5 Hz i amplitude 100 V | 84 |
| 6.12. Izmjerena rezidualna struja odvoda pri istovremenom zemljospoju i injektiranju signala frekvencije 2,5 Hz i amplitude 100 V | .84 |
| 6.13. Izmjerene struje primarnih namota naponskih mjernih transformatora pri istovremenom zemljospoju i injektiranju signala frekvencije 0,5 Hz i amplitude 100 V | 85 |
| 6.14. Izmjerena rezidualna struja odvoda pri istovremenom zemljospoju i injektiranju signala frekvencije 0,5 Hz i amplitude 100 V | .85 |
| 6.15. Dio snimljenog injektiranog signala amplitude 100 V kojem se frekvencija povećava od 0,5 Hz do 3 Hz | .85 |
| 6.16. Izmjerena rezidualna struja za vrijeme injektiranja signala kojem se povećava frekvencija prikazanog na slici 6.15 | .86 |
| 6.18. Dio snimljenog istosmjernog injektiranog signala amplitude od 100 V do 225 V | 87 |
| 6.19. Izmjerena rezidualna struja za vrijeme injektiranja istosmjernog signala prikazanog na slici 6.18 | .87 |
| 6.20. Izmjereni fazni naponi tijekom zemljospoja s otporom na mjestu kvara u iznosu od 690 Ω i istovremenom injektiranju izmjeničnog signala frekvencije 2,5 Hz i amplitude 100 V | .88 |

| | |
|---|------|
| 6.21. Izmjerene struje primara tijekom zemljospoja s otporom na mjestu kvara 690 Ω i istovremenog injektiranja signala 2,5 Hz, 100 V | .89 |
| 6.22. Izmjerena rezidualna struja tijekom zemljospoja s otporom na mjestu kvara 690 Ω i istovremenog injektiranja signala 2,5 Hz, 100 V | .89 |
| 6.23. Model eksperimentalnog mjernog kruga u EMTP-u | .90 |
| 6.26. Iznos efektivne vrijednosti rezidualne struje (puna linija) i niskofrekvencijske komponente rezidualne struje (isprekidana linija) pri različitim frekvencijama injektiranog signala, za različite otpore na mjestu kvara | .92 |
| 6.27. Iznos efektivne vrijednosti rezidualne struje (puna linija) i niskofrekvencijske komponente rezidualne struje (isprekidana linija) pri različitim frekvencijama injektiranog signala, za različite otpore na mjestu kvara | .92 |
| 6.28. Iznos efektivne vrijednosti rezidualne struje (puna linija) i istosmjerne komponente rezidualne struje (isprekidana linija) za različite otpore na mjestu kvara . | .92 |
| 6.30. Usporedba struja primara pri injektiranju 100 V, 1 Hz | .94 |
| 6.31. Usporedba rezidualne struje pri injektiranju 100 V, 1 Hz | .94 |
| 6.32. Usporedba struja primara pri injektiranju 100 V, 2,5 Hz | .94 |
| 6.33. Usporedba rezidualne struje pri injektiranju 100 V, 2,5 Hz | .95 |
| 6.34. Usporedba struja primara pri injektiranju 100 V, 10 Hz | .95 |
| 6.35. Usporedba rezidualne struje pri injektiranju 100 V, 10 Hz | .95 |
| 6.36. Usporedba struja primara pri injektiranju signala 224 V DC | .96 |
| 6.37. Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 224 V DC | .96 |
| 6.38. Usporedba struja primara pri injektiranju signala 100 V, 1 Hz | .97 |
| 6.39. Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 100 V, 1 Hz | .97 |
| 6.40. Usporedba struja primara pri injektiranju signala 100 V, 2,5 Hz | .98 |
| 6.41. Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 100 V, 2,5 Hz | .98 |
| 6.42. Usporedba struja primara pri injektiranju signala 100 V, 10 Hz | .98 |
| 6.43. Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 100 V, 10 Hz | .99 |
| 6.44. Usporedba struja primara pri injektiranju signala 300 V DC | .99 |
| 6.45. Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 300 V DC | .100 |
| 6.46. Usporedba struja primara pri injektiranju signala 100 V, 1 Hz | .100 |
| 6.47. Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 100 V, 1 Hz | .101 |
| 6.48. Usporedba struja primara pri injektiranju signala 100 V, 2,5 Hz | .101 |
| 6.49. Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 100 V, 2,5 Hz | .101 |
| 6.50. Usporedba struja primara pri injektiranju signala 100 V, 10 Hz | .102 |
| 6.51. Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 100 V, 10 Hz | .102 |
| 6.52. Usporedba struja primara pri injektiranju signala 370 V DC | .103 |
| 6.53. Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 370 V DC | .103 |

| | |
|--|------|
| 6.54. Usporedba struja primara pri injektiranju signala 100 V, 1 Hz | .104 |
| 6.55. Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 100 V, 1 Hz | .104 |
| 6.56. Usporedba struja primara pri injektiranju signala 100 V, 2,5 Hz | .104 |
| 6.57. Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 100 V, 2,5 Hz | .105 |
| 6.58. Usporedba struja primara pri injektiranju signala 100 V, 10 Hz | .105 |
| 6.59. Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 100 V, 10 Hz | .105 |
| 6.60. Usporedba struja primara pri injektiranju signala 390 V DC | .106 |
| 6.61. Usporedba rezidualne struje pri injektiranju signala 390 V DC | .106 |

Popis tablica

| | |
|---|----|
| 2.1. Načini uzemljenja zvjezdišta | 6 |
| 3.1. Podaci o induktivnom naponskom transformatoru | 26 |
| 3.2. $U_{rms} - I_{rms}$ i $\phi - i$ karakteristika induktivnog naponskog transformatora izračunate za primarnu stranu | 28 |
| 4.1. Podaci o energetskom transformatoru | 32 |
| 4.2. Podaci o asinkronim motorima | 32 |
| 4.3. Podaci o kabelima | 33 |
| 4.4. Podaci o rezidualnim strujama po odcjepima | 34 |
| 4.5. Rezidualne struje po odcjepima bez kvara i u slučaju kvara | 45 |
| 4.6. Rezidualne struje po odcjepima bez kvara i u slučaju kvara | 46 |
| 4.7. Usporedba parametara naponskih transformatora pri injektiranju 2,5 Hz amplituda 100, V, 300 V i 500 V | 51 |
| 4.8. Usporedba 2,5 Hz i 50 Hz komponente rezidualne struje na kabelu u kvaru | 56 |
| 4.9. $U-I$ krivulje za različite varijante krivulje magnetiziranja | 61 |
| 5.1. Podaci korišteni za modeliranje 10 kV distribucijske mreže | 65 |
| 5.2. Doprinosne kapacitivne struje odcjepa radijalnog dijela mreže | 69 |
| 6.1. Izmjerene $U-I$ karakteristike triju naponskih mjernih transformatora | 79 |
| 6.2. Oprema korištena za mjerenje | 80 |

Životopis

Nina Stipetić rođena je 1990. godine u Splitu. Matematičku gimnaziju završila je u Zagrebu 2009. godine. Diplomirala je 2014. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. Tijekom studija, provela je jedan semestar diplomskog studija u okviru Erasmus programa na Sveučilištu Mälardalen (Švedska). Zaposlila se 2017. kao istraživač na Zavodu za visoki napon i energetiku Fakulteta elektrotehnike i računarstva. Od 2018. je članica akreditiranog Laboratorija visokog napona, a sudjeluje u svim segmentima rada laboratorija te provođenju upravljanja kvalitetom prema normi HRN EN ISO/IEC 17025:2017. Izvodi laboratorijske i auditorne vježbe na kolegijima diplomskog studija: Tehnika visokog napona i elektromagnetska kompatibilnost, Prenaponska zaštita, Elektromagnetske prijelazne pojave u elektroenergetskom sustavu, Napajanje električne vuče i Elektroenergetski sustavi 1.

Glavna područja znanstveno-istraživačkog i stručnog rada su tehnika visokog napona, prijelazne pojave u elektroenergetskom sustavu, prenaponska zaštita, koordinacija izolacije i zaštita elektroenergetskog sustava. Tijekom znanstveno-istraživačkog rada na fakultetu, sudjelovala je na znanstvenom projektu Hrvatske zaklade za znanost „Razvoj naprednih visokonaponskih sustava primjenom novih informacijskih i komunikacijskih tehnologija“, a trenutno je zaposlena na projektu „Razvoj ekspertnog sustava mjerenja parametara udara munja i zaštita lopatica vjetroagregata radi smanjenja kvarova i zastoja“ te na istraživačkim projektima u suradnji s Électricité de France (EDF), HŽ Infrastruktura i Hrvatskim operatorom prijenosnog sustava.

Aktivna je članica IEEE, HRO CIGRÉ i međunarodne CIGRÉ, u okviru studijskog komiteta A3 - Oprema za prijenos i distribuciju te ogranaka S6 - Mreže nove generacije (NGN) i S1 - Žene u energetici (WiE).

Popis objavljenih djela

Radovi u časopisima

1. Stipetić, N., Filipović-Grčić, B., Žiger, I., “LF signal injection for earth-fault localization in unearthed distribution network”, in Special Issue on Papers from the 15th International Conference on Power Systems Transients (IPST 2023), Electric Power System Research, Vol. 220, 2023, 109249, July 2023.

Available at: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2023.109249>

2. Filipović-Grčić, B., Stipetić, N., Vuković, F., Jerković, A., Šanić, M., Musulin, K., “Transient recovery voltage investigation on HV circuit breaker in hydro power plant”, in Special Issue on Papers from the 15th International Conference on Power Systems Transients (IPST 2023), Electric Power System Research, Vol. 220, 2023, 109306, July 2023.

Available at: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2023.109306>

3. Stipetić, N., Filipović-Grčić, B., Perković, M., “Impact of autotransformer inrush currents on differential protection operation”, in Special Issue on Papers from the 15th International Conference on Power Systems Transients (IPST 2023), Electric Power System Research, Vol. 220, 2023, 109309, July 2023.

Available at: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2023.109309>

4. Xémard, A., Deneuve, B., Girard, P., Uglešić, I., Filipović-Grčić, B., Milardić, V., Stipetić, N., “Risk of voltage escalation due to a single-phase fault on the ungrounded MV network of an industrial plant”, in Special Issue on Papers from the 15th International Conference on Power Systems Transients (IPST 2023), Electric Power System Research, Vol. 220, 2023, 109298, July 2023.

Available at: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2023.109298>

5. Vuković, F., Milardić, V., Miloš, D., Filipović-Grčić, B., Stipetić, N., Franc, B., “Development and laboratory testing of a lightning current measurement system for wind turbines”, in Special Issue on Papers from the 15th International Conference on Power Systems Transients (IPST 2023), Electric Power System Research, Vol. 223, 2023, 109527, October 2023.

Available at: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2023.109572>

6. Stipetić, N., Filipović-Grčić, B., Uglešić, I., Xémard, A., Andres, N., “Earth-fault detection and localization in isolated industrial MV network – comparison of directional overcurrent protection and signal injection method”, in Special Issue on Papers from the 14th International Conference on Power Systems Transients (IPST 2021), Electric Power System Research, Vol. 197, 2021, 107313, August 2021.

Available at: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2021.107313>

Radovi na konferencijama

1. Stipetić, N., Filipović-Grčić, B., Žiger, I., Jančin, S., Novko, I., Brezak, D., Xémard, A., “Experimental verification of low-frequency signal injection through inductive voltage transformers for earth-fault detection”, in International Colloquium "Transformer Research and Asset Management", Split, 2023.
2. Stipetić, N., Filipović-Grčić, B., Žiger, I., “Pronalazak mjesta zemljospoja injektiranjem niskofrekvencijskog signala u neuzemljenoj distribucijskoj mreži”, 16. Savjetovanje

HRO CIGRE, Šibenik 2023.

3. Filipović-Grčić, B., Stipetić, N., Vuković, F., Jerković, A., Šanić, M., Musulin, K., “Izbor visokonaponskog prekidača u hidroelektrani s obzirom na naponska naprezanja”, 16. Savjetovanje HRO CIGRE, Šibenik 2023.
4. Vuković, F., Milardić, V., Filipović-Grčić, B., Stipetić, N., Franc, B., Miloš, D., “Incorporating a high-speed camera in the lightning current measurement system for wind turbines”, in 4th International Conference on Smart Grid Metrology, Cavtat, 2023.
5. Stipetić, N., Filipović-Grčić, B., Žiger, I., “LF signal injection for earth-fault localization in unearthed distribution network”, in International conference on Power System Transients, Thessaloniki, Greece, 2023.
6. Stipetić, N., Filipović-Grčić, B., Krajtner, D., Filipović-Grčić, D., “Lociranje zemljospoja u izoliranoj mreži injektiranjem signala kroz naponske transformatore”, 15. savjetovanje HRO CIGRE, Šibenik, 2021.
7. Stipetić, N., Filipović-Grčić, B., Uglešić, I., Xémard, A., N. Andres, “Earth-fault detection and localization in isolated industrial MV network – comparison of directional overcurrent protection and signal injection method”, in International conference on Power System Transients, Belo Horizonte, Brazil, 2021.
8. Stipetić, N., Filipović-Grčić, B., Uglešić, I., Tokić, A., “Investigation of lightning strikes to wind turbine blades”, in International Conference on Power Systems Transients, Perpignan, Francuska, 2019.
9. Stipetić, N., Uglešić, I., Milardić, V., Filipović-Grčić, B., Ivković, B., Pletikosa, N., “Analiza atmosferskih pražnjenja na lokacijama vjetroelektrana i prenapona uzrokovanih direktnim udarima munje u lopaticu vjetroagregata”, 14. savjetovanje HRO CIGRE, Šibenik, 2018.
10. Uglešić, I., Franc, B., Stipetić, N., “Lightning stroke measurements, data verification and application in power systems”, in 6th Russian conference on lightning protection, Saint Petersburg, 2018.
11. Stipetić, N., Franc, B., Uglešić, I., Mesić, M., Ivanković, I., “Improving Lightning Location System and Advance Control, Maintenance and Planning of Transmission Power System using Lightning Location System Data”, International Colloquium on Lightning and Power Systems, Ljubljana 2017.
12. Franc, B., Stipetić, N., Uglešić, I., Mesić, K., Ivanković, I., “Unaprjeđenje korelatora sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja”, 13. Savjetovanje HRO CIGRE, Šibenik 2017.

Biography

Nina Stipetić was born in Split in 1990. She graduated from a mathematical high school in Zagreb in 2009. In 2014, she received her Master of Engineering degree from the Faculty of Electrical Engineering and Computing at the University of Zagreb. She spent one semester of her Master's studies at Mälardalen University (Sweden) as part of the Erasmus exchange program. Since 2017, she has been working as a research associate at the Department of Energy and Power Systems (Faculty of Electrical Engineering and Computing). Since 2018 she is a member of the High Voltage Laboratory and participates in all aspects of the laboratory's work and quality management according to the standard HRN EN ISO /IEC 17025:2017. She is conducting lectures and laboratory exercises in the Master's courses High Voltage Technology and EMC, Overvoltage Protection, Electrical Transients in Power Systems, Electric Traction Power Supply, and Electric Power Systems 1.

Her main areas of scientific research and professional activities include transient phenomena and transient simulations in power system, overvoltage protection, insulation coordination and power system protection. During her scientific work at the Faculty, she participated in a scientific project funded by the Croatian Science Foundation "Development of Advanced High Voltage Systems Using New Information and Communication Technologies" and a scientific project "Development of an Expert System for Measuring Lightning Strike Parameters and Wind Turbine Blade Protection to Reduce Failures and Downtimes" funded by the European Union. She participated in several research projects in collaboration with Électricité de France (EDF), HŽ Infrastructure, and the Croatian Transmission System Operator.

She is an active member of IEEE, HRO CIGRÉ and the international CIGRÉ, in the study committees A3 - Transmission and Distribution Equipment, Next Generation Network (NGN), and Women in Energy (WiE).