

UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET
PODGORICA

Rade Čađenović

**„MJERENJE I ISPITIVANJE PARCIJALNIH PRAŽNJENJA U CILJU
DIJAGNOSTIKE STANJA IZOLACIJE MJERNIH
TRANSFORMATORA“**

MAGISTARSKI RAD

Podgorica, 2015.

UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET
PODGORICA

Rade Čađenović

**„MJERENJE I ISPITIVANJE PARCIJALNIH PRAŽNENJA U CILJU
DIJAGNOSTIKE STANJA IZOLACIJE MJERNIH
TRANSFORMATORA“**

MAGISTARSKI RAD

Podgorica, 2015.

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: Rade Čadenović

Datum rođenja: 22.11.1990. godine u Podgorici

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina: Energetika i automatika, 2012.

Naziv završenog specijalističkog studijskog programa i godina: Energetika i automatika, 2013.

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Naziv postdiplomskog studija : Elektroenergetski sistemi

Naslov rada:

**„MJERENJE I ISPITIVANJE PARCIJALNIH PRAŽNJEŃJA U CILJU
DIJAGNOSTIKE STANJA IZOLACIJE MJERNIH
TRANSFORMATORA“**

Fakultet na kojem je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada: 03.04.2015.

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 23.09.2015.

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda: prof. dr Sreten Škuletić, prof. dr Jaranka Radović, doc. dr Vladan Radulović

Mentor: prof. dr Sreten Škuletić

Komisija za ocjenu rada: prof. dr Sreten Škuletić, prof. dr Jaranka Radović, doc. dr Vladan Radulović

Komisija za odbranu rada : prof. dr Sreten Škuletić, prof. dr Jaranka Radović, doc. dr Vladan Radulović

Lektor

Datum odbrane: 09.11.2015.

Datum promocija

Predgovor

Parcijalna pražnjenja su veoma važna oblast u tehnici visokog napona. Kako se u posljednjem vremenu teži za sve snažnijim elektroenergetskim sistemima i sve višim naponima to je i testiranje visokonaponske opreme koja se koristi u njima dobilo na značaju. Štaviše ekonomska isplativost se ogleda u proizvodnji što efikasnijih uređaja za mjerenje intenziteta parcijalnih pražnjenja kako bi se korisnicima omogućilo dobijanje prave informacije o stanju izolacije visokonaponske opreme. Elektroenergetski sistemi se sastoje od velikog broja komponenti. Mjerni transformatori su jedni od važnih karika u njima.

Ispitivanje mjernih transformatora se pokazalo kao veoma korisno. Time se stvara slika o stanju mjernog transformatora i samim tim nude se rješenja za sprečavanje slučajnih ispada. Ovakav pristup provjeravanja mjernih transformatora je od velike važnosti, a prostora za napredovanje u razvijanju instrumenata i te kako ima. U skladu sa tim, rad se bavi ovom problematikom i predstavlja jedan novi pristup mjerenjima stanja mjernih transformatora u Crnoj Gori i njenom elektroprenosnom sistemu.

Pored namjene ovog istraživanja da da doprinos u okviru magistarskog rada na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici, isti može da posluži i inženjerima za buduće planiranje, istraživanje i evaluaciju mjerenja intenziteta parcijalnih pražnjenja.

Ovom prilikom autor želi da se zahvali mentoru prof. dr Sretenu Škuletiću na saradnji i uloženom vremenu i trudu, koji je učinio dragocjeni doprinos na finalizaciji ovog rada.

Veliku zahvalnost autor duguje sektoru za mjerenja Crnogorskog elektroprenosnog sistema na saradnji, koji su omogućili mjerenja u njihovim postrojenjima i korišćenje uređaja.

Autor se posebno zahvaljuje dipl. ing Goranu Martinoviću na izuzetno korisnim i nesebičnim savjetima tokom evaluacije, prikupljanja i analize podataka, odvojenom vremenu za konsultacije, kao i korisnim stručnim savjetima i edukaciji prilikom upravljanja mjernom opremom.

Izvod rada

Parcijalno pražnjenje je lokalno električno pražnjenje u dielektriku koje samo djelimično premošćava izolaciju među elektrodama. Parcijalna pražnjenja su posljedica lokalne koncentracije električnog naelektrisanja na površini izolacije ili u samoj izolaciji. Parcijalno pražnjenje predstavlja samo djelimičan proboj izolacije. To je ustvari iskrenje unutar defekta u izolaciji i unutar šupljina koje mogu biti ispunjene vazduhom ili gasovima. Parcijalna pražnjenja nastaju u početnoj fazi oštećenja visokonaponske izolacije i smatraju se najboljim početnim pokazateljom degradacije izolacije.

Rad se bavi problematikom mjerenja, ispitivanja i analize uticaja parcijalnih pražnjenja na izolaciju mjernih transformatora. Zbog kontinuiranog porasta kvarova i proboja izolacije u mjernim transformatorima javila se potreba za praćenjem i mjerenjem fenomena koji preliminarno ukazuju na moguće probleme u izolaciji mjernih transformatora, i tendencije ka trajnom proboju izolacije transformatora čime se onemogućava bezbjedan i kontinuiran rad transformatora. Pojava parcijalnih pražnjenja je najznačajniji indikator početka degradacije elemenata elektroizolacionog sistema. Zbog pojave različitih tipova parcijalnih pražnjenja koji se mogu javiti u normalnom režimu rada, analizirane su različite vrste parcijalnih pražnjenja kao i broj impulsa koji ukazuju na parcijalna pražnjenja. Energija koju oslobađaju parcijalna pražnjenja tokom svog pojavljivanja u mnogome zavisi od broja impulsa koji ukazuju na parcijalna pražnjenja.

Činjenica je da se aktivnosti parcijalnih pražnjenja mogu predstaviti kao uzrok i posljedica električnog proboja u izolaciji visokonaponske opreme. Zbog toga je cilj ovog rada da se što bolje objasne i shvate uslovi nastanka kao i uticaji parcijalnih pražnjenja na stanje i starenje izolacije, koji mogu biti prvi pokazatelj, a takođe i ukazati na opšte stanje izolacije opreme. Radi razumijevanja parcijalnih pražnjenja i u cilju promovisanja i predstavljanja fenomena parcijalnih pražnjenja u radu je data i objašnjena teorija nastanka i održavanja parcijalnih pražnjenja kao i njihov uticaj na izolaciju u kojoj se javljaju. Takođe su analizirani različiti načini detektovanja i korišćenja uređaja za mjerenje parcijalnih pražnjenja.

U radu su predstavljene različite metode koje se koriste u tehnici mjerenja parcijalnih pražnjenja, njihove prednosti i nedostaci. Metoda korišćena u radu je izabrana na osnovu uređaja za mjerenje parcijalnih pražnjenja, koji koristi tehniku mjerenja elektromagnetnog talasa. Kada se parcijalna pražnjenja dese unutar opreme, elektromagnetni talas se prostire unutar i van sistema radijacijom. Elektromagnetni senzor uređaja za mjerenje parcijalnih pražnjenja otkriva i snima promjene koje se dešavaju u izolaciji transformatora, a zatim se u softveru dobijeni podaci obrađuju i čiste od spoljašnjih šumova. Koristi se za mjerenje parcijalnih pražnjenja u izolaciji različitih vrsta transformatora na mrežama različitih naponskih nivoa u Crnogorskom elektroprenosnom sistemu (CGES). Mjerenja parcijalnih pražnjenja su vršena na mjernim transformatorima širom Crne Gore, pritom su u mjerenjima uključeni transformatori različitih proizvođača.

U radu je dat i detaljan opis korišćenja ovog uređaja. Izvršena je detaljna analiza dobijenih rezultata i upoređivanje ispitanih transformatora sa stanovišta stanja njihove izolacije. Stanje izolacije mjernih transformatora zavisi od dobijenih mjerenja, koja su se sprovela na velikom broju mjernih transformatora u sistemu. Interpretacija mjerenih podataka je data i tumačena paralelno sa sveobuhvatnim preventivnim akcijama koje se tiču analize parcijalnih pražnjenja. Na kraju rada je data sveobuhvatna slika o izolaciji mjernih transformatora i vezi između parcijalnih pražnjenja sa njihovim održavanjem i daljim ispitivanjima. Ovakvim analizama stvorila se slika o stanju izolacije, starosti, pouzdanosti i funkcije različitih vrsta transformatora u CGES.

Abstract

Partial discharge (PD) is localized electrical discharge which only partially bridges the insulation between conductors and which may or may not occur adjacent to a conductor. PD are consequence of local concentrations of electrical stress on surface of the insulation or in insulation itself. PD represents partial insulation breakthrough. As a matter of fact it is an arcing inside an insulation defect and cavities which can be filled with air or gasses. PD start in early phase of insulation defect and PD events are first indicators of insulation degradation.

In this paper is worked on measurement problem, scrutiny and analyses of PD influence on measurement transformers (MT) insulation. Increased insulation breakdowns in MT caused a need for tracking and measuring of these events. PD preliminary indicate on possible problems in transformers insulation and its tendency to further insulation degradation causing discontinuous and unsecure transformer operation. PD events are significant electrical elements degradation indicators. Because of different kinds of PD which can be detected in operation mode, types of PD and number of impulses are analyzed. Power released by PD as well as number of PD impulses are analyzed. Power of PD is related with number of impulses which point on PD.

It is a fact that PD events could cause and result electrical breakdown in high voltage (HV) equipment insulation. Therefore, one of goals of this paper is better understanding of condition under which this phenomena occur. Influence of PD on insulation ageing, which are the first indicator as well as determiner of equipment's insulation state are shown. In order to better understanding, promotion and introduction of PD phenomena, theory of occurrence and sustention of PD is given and its influence on insulation. Also, different ways of PD events detection and apparatus used are analyzed.

Paper gives description of different methods in PD measurement techniques, their advantages and shortcomings. Method used in this paper is based on equipment used for PD events detection, which uses electro-magnetic (EM) wave technique. When PD occurs inside an electrical apparatus, EM waves can propagate inside and outside the system through irradiation mechanisms. EM sensor captures and records these changes which occur in transformer's insulation. Afterwards, gathered data are processed and cleaned from exterior noises. This apparatus is used in measurements of PD events for different kinds of transformers in different HV levels in Montenegrin transmission system. Measurements of PD events are carried out within Montenegrin transmission system and different types of MT are included.

The paper represents manual description of apparatus. Comparison and profound analyses of obtained results is carried out and comparison from the point of insulation state of tested transformers is done. The obtained results about insulation state depends from measurements data, which are carried out in large number of MT in the system. Measured data point on different levels of PD severity. Interpretation of measurement data is overwied and interpreted, in parallel with comprehensive preventive actions which concern analyses of PD. At the end of this paper comprehensive picture of MT insulation and connection between PD and their sustaining and further PD events investigation are given. General picture about insulation state, ageing, reliability and function of different types of MT in Montenegrin power system is created.

Sadržaj

LISTA KORIŠĆENIH SKRAĆENICA	6
I UVOD	7
II PARCIJALNA PRAŽNENJA	10
II.1 Istorija parcijalnih pražnjenja	10
II.2 Uzroci nastanka i model procesa parcijalnih pražnjenja	11
II.2.1 Izolacioni model	12
II.2.2 Osnovno električno kolo procesa parcijalnih pražnjenja	13
II.2.3 Veličine za mjerenje parcijalnih pražnjenja	16
II.3 Klasifikacija	17
II.3.1 Spoljašnja parcijalna pražnjenja	17
II.3.2 Unutrašnja parcijalna pražnjenja	18
III METODE ZA MJERENJE I DETEKCIJU PARCIJALNIH PRAŽNENJA	20
III.1 Konvencionalne metode za mjerenje parcijalnih pražnjenja	21
III.2 Elektromagnetna tehnika detekcije parcijalnih pražnjenja	22
III.2.1 Teorija elektromagnetnog talasa	22
III.2.2 Ultra - visokofrekventna mjerenja parcijalnih pražnjenja	25
III.2.3 Visokofrekventna i veoma visokofrekventna mjerenja parcijalnih pražnjenja	26
III.3 Akustične tehnike mjerenja parcijalnih pražnjenja	27
III.4 Optička metoda mjerenja parcijalnih pražnjenja	28
III.5 Hemijska metoda za mjerenje parcijalnih pražnjenja	29
III.6 Mjerenje dielektričnih gubitaka i kapacitivnosti izolacije	29
III.7 Poređenje različitih metoda parcijalnih pražnjenja u zavisnosti od režima rada	31
III.8 Prednosti testiranja	32
IV MJERNI TRANSFORMATORI	33
IV.1 Zamjenska šema	33
IV.2 Strujni mjerni transformatori	36
IV.3 Naponski mjerni transformatori	37
V PROGRAM ZA OBRADU REZULTATA MJERENJA I MATEMATIČKI MODEL ZA ANALIZU DOBIJENIH PODATAKA	39
V.1 PDPRO - DUA softverski paket za analizu podataka	39
V.2 Smjernice za nivo ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja u PD-PAC uređaju	41
V.3 Matematički model za evaluaciju dobijenih podataka	42
V.4 Korektivne akcije na osnovu primjene matematičkog modela	45
VI MOBILNI UREĐAJ ZA SNIMANJE I ANALIZU PARCIJALNIH PRAŽNENJA	46
VI.1 Tehnika mjerenja elektromagnetnog talasa	48
VI.2 Elektromagnetni senzor	48

VI.3 Priprema opreme za mjerenje parcijalnih pražnjenja	49
VII REZULTATI MJERENJA PARCIJALNIH PRAŽNJENJA MOBILNOM KONZOLOM U KONKRETNIM USLOVIMA	52
VII.1 Smjernice za čitanje relevantnih podataka	53
VII.2 Mjerenja parcijalnih pražnjenja u mjernim transformatorima na naponskom nivou 400 kV	55
VII.2.1 Tehnička dokumentacija mjernih transformatora	55
VII.2.2 Rezultati mjerenja	56
VII.3 Mjerenja parcijalnih pražnjenja u mjernim transformatorima na naponskom nivou 220 kV	58
VII.3.1 Tehnička dokumentacija mjernih transformatora	58
VII.3.2 Rezultati mjerenja	59
VII.4 Mjerenja parcijalnih pražnjenja u mjernim transformatorima na naponskom nivou 110 kV	61
VII.4.1 Tehnička dokumentacija mjernih transformatora	61
VII.4.2 Rezultati mjerenja	62
VIII ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA I EVALUACIJA STANJA IZOLACIJE MJERNIH TRANSFORMATORA NA OSNOVU IZVRŠENIH MJERENJA	64
VIII.1 Analiza rezultata na 400 kV nivou	64
VIII.2 Analiza rezultata na 220 kV nivou	67
VIII.3 Analiza rezultata na 110 kV nivou	70
IX ZAKLJUČAK	73
POPIS OSNOVNE LITERATURE	75
PRILOZI	79
Grafici	79
Kod i algoritam programa	79
Podaci	79

LISTA KORIŠĆENIH SKRAĆENICA

CGES - crnogorski elektroprenosni sistem
CISPR - comité international spécial des perturbation radioélectrique
EM - elektromagnetni talas
IEC - international electrotechnical committee
JUS - jugoslovenski standard
MI - mjerni instrument
MT - mjerni transformator
NEMA - National Electrical Manufacturers Association
PDPAC - partial discharge portable analyzer console
PP - parcijalno pražnjenje
TS - trafostanica
UVF - ultra visokofrekventni
VN - visoki napon
VF - visokofrekventni
VVM - veoma visokofrekventni

I UVOD

Značajan trend u razvijanju visokonaponskih (VN) uređaja je povećanje snage, napona i gabarita proizvodnih jedinica. Ovo zahtijeva ozbiljnije povećanje pouzdanosti rada tih jedinica. Zbog toga, današnja visokonaponska tehnika izolacije zahtijeva moderne procedure testiranja aparata. Shodno tome pažnja se usmjerava ka razvijanju posebnih dijagnostičkih testova. Kako je jedna od tih tehnika i detektovanje parcijalnih pražnjenja, nema sumnje da su ona od velikog značaja za visokonaponska testiranja, jer parcijalna pražnjenja mogu biti posmatrana kao prethodnik uzroka starenja električne izolacije visokonaponskih aparata.

Stabilnost energetskog sistema je određena radom VN opreme ugrađenom u njega. Havarija ili ispadanje iz rada je uglavnom vezana za aktivnost fenomena kojim se rad bavi. Pojava i razvoj parcijalnih pražnjenja može dovesti do prekida, požara ili nepopravljive štete u sistemu. Kako su ovi događaji izuzetno važni za pouzdanost rada sistema potrebno je preventivno mjerenje aktivnosti koje mogu izazvati pad sistema. Sigurnost stanja izolacije VN opreme je potrebno osigurati kako ne bi došlo do nepotrebnih ispada i ugrožavanja sigurnosti osoblja. Dobro razumijevanje mehanizma parcijalnog pražnjenja, karakteristika, njegovog razvijanja i odstranjivanja je veoma bitno za dizajnere energetskih sistema i instalaciju istih, kao i za inženjere koji održavaju energetske sisteme.

Postoji rizik od nestabilnosti izolacionog dielektrika kada se parcijalna pražnjenja dese. Zbog toga je značaj parcijalnog pražnjenja odavno prepoznat, jer svako pražnjenje uzrokuje oštećenje i propadanje materijala zbog udara elektrona visoke energije ili ubrzanih jona, izazivajući hemijske i mehaničke transformacije različitih tipova. Broj parcijalnih pražnjenja tokom određenog vremenskog intervala u mnogome zavisi od primijenjenog napona i kvaliteta izolacije i najveći je za naizmjenične napone. Pored primijenjenog napona, na parcijalna pražnjenja veliki uticaj ima materijal koji se koristi u izolaciji. Izolacija može da se sastoji od čvrstih, tečnih, gasovitih ili bilo koje kombinacije ova tri materijala.

Oprema koja se koristi u visokonaponskoj industriji prije svega iziskuje velike količine novca i od ključnog je značaja za pravilno funkcionisanje elektroenergetskog sistema. Radi značajnih troškova nabavke stavlja se akcenat na održavanje i produžavanje vijeka ovoj opremi, zbog čega se i koristi metoda mjerenja parcijalnih pražnjenja. Ekonomske prednosti se mogu ogledati i kroz mogućnost korišćenja opreme za mjerenje parcijalnih pražnjenja za ispitivanje različitih tipova aparata koji imaju drugačije karakteristike.

Rad se bavi problematikom mjerenja, ispitivanja i analize uticaja parcijalnih pražnjenja na izolaciju mjernih transformatora. Zbog kontinuiranog porasta kvarova i proboja izolacije u mjernim transformatorima javila se potreba za praćenjem i mjerenjem fenomena koji preliminarno ukazuju na moguće probleme u izolaciji mjernih transformatora (MT), i tendencije ka trajnom proboju izolacije transformatora, čime se onemogućava bezbjedan i kontinuiran rad mjernih transformatora. Postoji sve veća zabrinutost zbog mogućih opasnosti koje proističu iz uticaja parcijalnih pražnjenja na proboj izolacije. Ozbilnost parcijalnih pražnjenja pored indikacije postojanja problema u izolaciji VN opreme, informiše i o stanju, pukotinama i šupljinama u izolaciji visokonaponske opreme. Uistinu, parcijalna pražnjenja se dešavaju zbog defektivnosti izolacije, ali, ukoliko su zanemarena mogu dovesti do dalje degradacije i propadanja, kao i do trajnog uništenja. Činjenica je da se aktivnosti parcijalnih pražnjenja mogu predstaviti kao uzrok i posljedica električnog proboja u izolaciji visokonaponske opreme. Zbog toga je cilj ovog rada da se što bolje objasne i shvate uslovi nastanka kao i uticaji parcijalnih pražnjenja na stanje i starenje izolacije, koji mogu biti prvi pokazatelj, a takođe i ukazati na stanje izolacije opreme. Ukoliko se na vrijeme ne otkrije i odstrani prisustvo parcijalnih pražnjenja, doći će do progresivne degradacije i proboja

izolacionog sistema, koji će prouzrokovati dalju havariju uređaja. Zbog toga je pravovremena detekcija i mjerenje intenziteta parcijalnih pražnjenja od velikog značaja.

Rad se sastoji iz devet poglavlja, uključujući zaključak, popis korišćene literature i priloga koji su dati na CD - u.

U prvom dijelu rada dat je kratak uvod u problematiku kojom će se rad baviti, kao i kratak opis strukture i sadržaja rada.

U drugom dijelu dat je osvrt na fenomen parcijalnih pražnjenja, uzroke nastanka i historija parcijalnih pražnjenja od njihovog definisanja do danas. Date su samo neke od prihvaćenih definicija parcijalnih pražnjenja i predstavljeni osnovni tipovi ovog fenomena. Objasnjeni su fizički procesi, odnosno razvoj, trajanje i gašenje parcijalnih pražnjenja, način modelovanja, ekvivalentna električna šema procesa i problemi vezani za detekciju i mjerenje. Pored fizičkog opisa parcijalnih pražnjenja data je klasifikacija ovog fenomena kako bi se na pravi način razumjeli tipovi i podjela parcijalnih pražnjenja. Predstavljen je standard IEC 60270, po kojem su izvedene veličine kojim se opisuje intenzitet parcijalnih pražnjenja. Iz osnovnih veličina (napona i struje) parcijalnih pražnjenja izvedene su i ostale veličine kojima se mjere parcijalna pražnjenja.

Treći dio u potpunosti je posvećen starijim, aktuelnim i novim tehnikama i metodama za mjerenje parcijalnih pražnjenja. Predstavljeni su principi detektovanja i mjerenja parcijalnih pražnjenja, veličine koje mogu biti mjerene i fizički procesi izazvani pojavom parcijalnih pražnjenja i čija se osnova koristi za izradu uređaja za mjerenje. Analizirani su različiti načini detektovanja i korišćenja uređaja za mjerenje parcijalnih pražnjenja. Dato je poređenje dvije metode (on-line i off-line) i predstavljene njihove prednosti i nedostaci u zavisnosti od potreba i situacija u kojima se koriste. Na kraju ovog poglavlja navedene su prednosti testiranja VN opreme na parcijalna pražnjenja i benefiti koji dolaze generalno iz same ideje o stanju izolacije i VN opreme.

U četvrtom poglavlju date su karakteristike mjernih transformatora i vrste koje se koriste u zavisnosti od interesnih veličina za mjerenje. Data je zamjenska šema i glavne osobine strujnih i naponskih mjernih transformatora.

U petom poglavlju je predstavljen softver PDPRO-DUA za obradu podataka koji se koristi za analizu izvršenih mjerenja dobijenih uređajem za mjerenje parcijalnih pražnjenja. Predstavljen je i objašnjen matematički model za interpretaciju dobijenih podataka u PDPRO-DUA programskom paketu.

U šestom poglavlju je dat detaljan opis korišćene metode, kako je izabrana metoda za mjerenje parcijalnih pražnjenja i koju tehniku detektovanja koristi. Opisan je elektromagnetni senzor za prijem signala parcijalnih pražnjenja, koji je ujedno u današnje vrijeme jedan od najbolje dizajniranih senzora u svojoj generaciji. Uređaj za analizu mjerenja parcijalnih pražnjenja "Partial Discharge Portable Analyzer Console" (PDPAC). Ovaj tip uređaja za mjerenje parcijalnih pražnjenja koristi sektor za mjerenja za potrebe Crnogorskog elektroprenosnog sistema (CGES).

Sedmo poglavlje se odnosi na rezultate mjerenja koja su izvršena u slučajevima parcijalnih pražnjenja u izolaciji različitih vrsta MT na mrežama različitih naponskih nivoa u CGES. Transformatori za potrebe mjerenja parcijalnih pražnjenja su birani na osnovu historije i starosti, stoga su i vrste MT i njihova godina proizvodnje istaknuti. Izvršena je sistematizacija, dat tabelarni pregled, primjeri i konačna obrada dobijenih podataka prema instrukcijama opisanim u četvrtom poglavlju.

U osmom poglavlju je izvršena detaljna analiza dobijenih rezultata i upoređivanje ispitanih transformatora sa stanovišta stanja njihove izolacije. Dati su prijedlozi korektivnih akcija u slučajevima otkrivanja značajnih aktivnosti parcijalnih pražnjenja, manjih aktivnosti parcijalnih pražnjenja i ukazano na sigurnost opreme kako to prikupljeni podaci ukazuju.

Pored sugestija koje se tiču direktnih akcija u pogledu servisiranja i tretmana MT na osnovu urađenih analiza dato je i generalno stanje MT na osnovu analiziranih podataka.

Posljednje, deveto poglavlje, je napisano sa ciljem da se da završna riječ o problemu uticaja parcijalnih pražnjenja na MT, kao i zaključci dobijeni iz sprovedenih mjerenja i analiza. Dat je i zaključak o akcijama i prijedlozima prevazilaženja problema pojave parcijalnih pražnjenja u konkretnim slučajevima kao i prijedlog daljih aktivnosti. Prijedložene su smjernice za dalje istraživanje u ovoj veoma važnoj, za normalan rad i održavanje visokonaponskih sistema i opreme veoma značajnoj oblasti.

Na kraju rada dat je popis osnovne literature koja je korišćena u izradi rada.

Zbog boljeg pregleda i njihove obimnosti šeme trafostanica, podaci korišćeni u radu i kod programa su dati u prilogu na CD - u.

II PARCIJALNA PRAŽNJENJA

Parcijalno pražnjenje je definisano Jugoslovenskim standardom JUS N.A5.530, kao poseban vid električnog pražnjenja koje djelimično premošćuje izolaciju dva provodnika, odnosno međuelektrodno rastojanje [2]. Parcijalno pražnjenje je lokalno električno pražnjenje u dielektriku koje samo djelimično premošćava izolaciju među elektrodama i može, a ne mora da se desi uz elektrodu. Parcijalna pražnjenja su posljedica lokalne koncentracije električnog naelektrisanja na površini izolacije ili u samoj izolaciji. Parcijalno pražnjenje predstavlja samo djelimičan proboj izolacije. To je ustvari iskrenje unutar defekta u izolaciji i unutar šupljina koje mogu biti ispunjene vazduhom ili gasovima. Parcijalna pražnjenja nastaju u početnoj fazi oštećenja visokonaponske izolacije i smatraju se najboljim početnim pokazateljom degradacije elektroizolacije.

Pojam 'parcijalna pražnjenja' se vezuje za široku grupu pojava električnih pražnjenja:

- (1) unutrašnja pražnjenja koja se dešavaju u šupljinama ili prazninama unutar tečnih i čvrstih dielektrika;
- (2) površinska pražnjenja koja se dešavaju na granicama različitih izolacija;
- (3) koronarna pražnjenja koja se dešavaju u gasovitim dielektricima u prisustvu nehomogenih polja;
- (4) uzastopni udari pražnjenja u čvrstim dielektricima koji formiraju provodne kanale i slično.

Ukoliko se na vrijeme ne otkrije i odstrani prisustvo parcijalnih pražnjenja, doći će do progresivne degradacije i proboja izolacionog sistema, koji će prouzrokovati havariju uređaja. Zbog toga je pravovremena detekcija i mjerenje intenziteta parcijalnih pražnjenja od velikog značaja. Prethodnoj konstataciji ide u prilog činjenica da je novim međunarodnim standardom, koji se odnosi na dielektrična ispitivanja izolacije energetskih transformatora IEC 60076-3 [3], predviđeno mjerenje nivoa parcijalnih pražnjenja na svim tipovima energetskih transformatora.

II.1 Istorija parcijalnih pražnjenja

Prvi standard za detektovanje parcijalnih pražnjenja u izolaciji VN opreme je izdat davne 1940. godine od strane Nacionalne asocijacije proizvođača električne opreme (National electrical manufacturers association - NEMA) [74 i 75] koja se tiče 'Metode mjerenja radijskog šuma'. Njihova edicija 107 pod nazivom 'Metode mjerenja uticaja napona visokonaponskih aparata', koja je objavljena 1964. godine, je bila produžetak prethodne publikacije. Prva praktična iskustva sa njihovom metodom su razotkrila da, osim korone, pražnjenja koja se pojavljuju u izolaciji VN aparata mogu pored onih u vazduhu da se dese i u unutrašnjosti čvrste i tečne izolacije. Zbog čega je slični metod takođe predstavljen u Evropi od strane Comité International Spécial des Perturbation Radioélectrique (CISPR) 1961. godine [43 i 44].

Sami počeci značaja prepoznavanja parcijalnih pražnjenja su krenuli od prepoznavanja površinskih pražnjenja davne 1777. godine primijećeni od strane G. Ch. Lichtenberga [23]. Međutim, prošao je skoro vijek od kada se moglo sa sigurnošću zaključiti da su to upravo površinska električna pražnjenja. Njegove tehnike se i dan danas koriste za istraživanje ovog fenomena.

Električna pražnjenja su oduvijek bila prepoznata kao negativna za izolaciju VN opreme i aparata. Kada je predstavljena VN oprema za prenos i proizvodnju električne energije 'koronarna pražnjenja' su bila termin korišćen za sva pražnjenja nasuprot današnjim 'parcijalnim pražnjenjima'. Kako je postojala potreba za razvojem VN opreme i

za razvojem izolacije koja je korišćena u toj opremi, prva oprema za prepoznavanje parcijalnih pražnjenja je predstavljena na početku prošlog vijeka. Koristeći takve instrumente, fundamentalne studije o parcijalnim pražnjenjima je bilo moguće izvoditi. Iskustva u prepoznavanju parcijalnih pražnjenja su rasla i prvi industrijski detektor parcijalnih pražnjenja je predstavljen polovinom prošlog vijeka. On je dao esencijalni doprinos daljem istraživanju parcijalnih pražnjenja i njihovom otkrivanju [23].

U 1970 - im godinama, kada su predstavljeni novi materijali za izolaciju energetskih kablova, mjerenja nivoa parcijalnih pražnjenja su zahtijevala nivo piko Kulona (pC), jer nivo od nekoliko pC može dovesti do destruktivnosti polimerske izolacije. Ovo je vodilo ka unaprijeđenim sistemima za mjerenje i detektovanje parcijalnih pražnjenja. Štaviše, testovi u skladu sa IEC 60270 [45] su bili primjenjivani za osiguranje kvaliteta izolacije energetskih transformatora. Pored metode odbijanja elektromagnetnih šumova i nekonvencionalne elektromagnetne (ultra visokofrekventne) i akustične metode su korišćene za ispitivanje parcijalnih pražnjenja, koje su predmet razmatranja standarda IEC 62478 [46].

Od početka 1970. godine konvencionalne analogne instrumente su polako počeli da zamjenjuju moćniji digitalni sistemi koji su pokušavali da izađu u susret sve češćim zahtjevima za povećanjem tačnosti i naučnim i tehničkim dostignućima. Sve to upućuje na stohastičnu prirodu parcijalnih pražnjenja. Prvobitno multi - kanalni analizator visine pulsa je primjenjivan. Nekoliko godina kasnije zamijenjen je kompjuterizovanim sistemom za mjerenje parcijalnih pražnjenja sposobnim za procesuiranjem, prikupljanjem i vizuelnim prikazom kompleksnih podataka o parcijalnim pražnjenjima. Današnji digitalni instrumenti za mjerenje parcijalnih pražnjenja su uobičajeni u laboratorijama visokog napona. Pored toga, analogne procedure za otklanjanje šuma su zamijenjene efektivnijim digitalnim alatima.

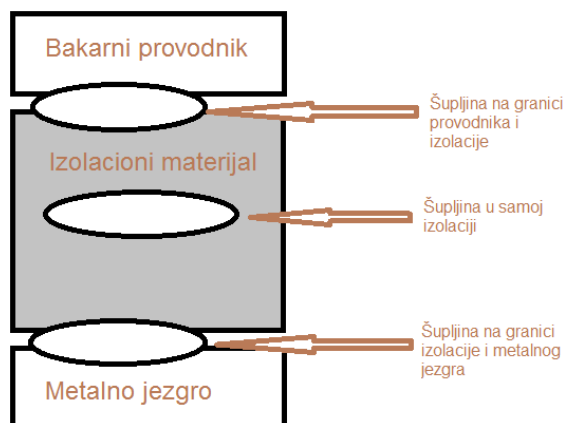
Pored testiranja u laboratorijama, današnji električni instrumenti koji se koriste za mjerenje parcijalnih pražnjenja su osposobljeni za tzv. 'on-site' (na licu mjesta) testiranje VN aparata, poput energetskih kablova, transformatora, električnih mašina i sl. Bazirano na takvim saznanjima korisna pravila su kreirana i objavljena 2003. godine od strane CIGRÉ Joint TF 15.11/33.03.02. [47].

II.2 Uzroci nastanka i model procesa parcijalnih pražnjenja

Savršenu električnu izolaciju, odnosno izolaciju koja ne posjeduje nehomogenosti ili deformacije je nemoguće napraviti. Nehomogenosti su najčešće normalna prirodna pojava u elektroizolacionom materijalu, a deformacije nastaju u toku tehnološkog procesa proizvodnje i korišćenja izolacije. Tačke nehomogenosti i deformacija su izolaciono oslabljena mjesta i postoji mogućnost da se u njima pojavi lokalno jačanje električnog polja (slika 2.1 [30]). Kada jačina električnog polja u izolaciono oslabljenoj tački prekorači kritičnu (probojnu) vrijednost, nastaje parcijalno pražnjenje. Postojanje nesavršenosti u električnoj izolaciji je preduslov za pojavu parcijalnih pražnjenja. Ova vrsta električnog pražnjenja je okarakterisana izrazito kratkim vremenom trajanja i relativno velikom vrijednošću oslobođene količine elektriciteta. Parcijalna pražnjenja oštećuju električnu izolaciju i zbog toga se svrstavaju u red negativnih pojava.

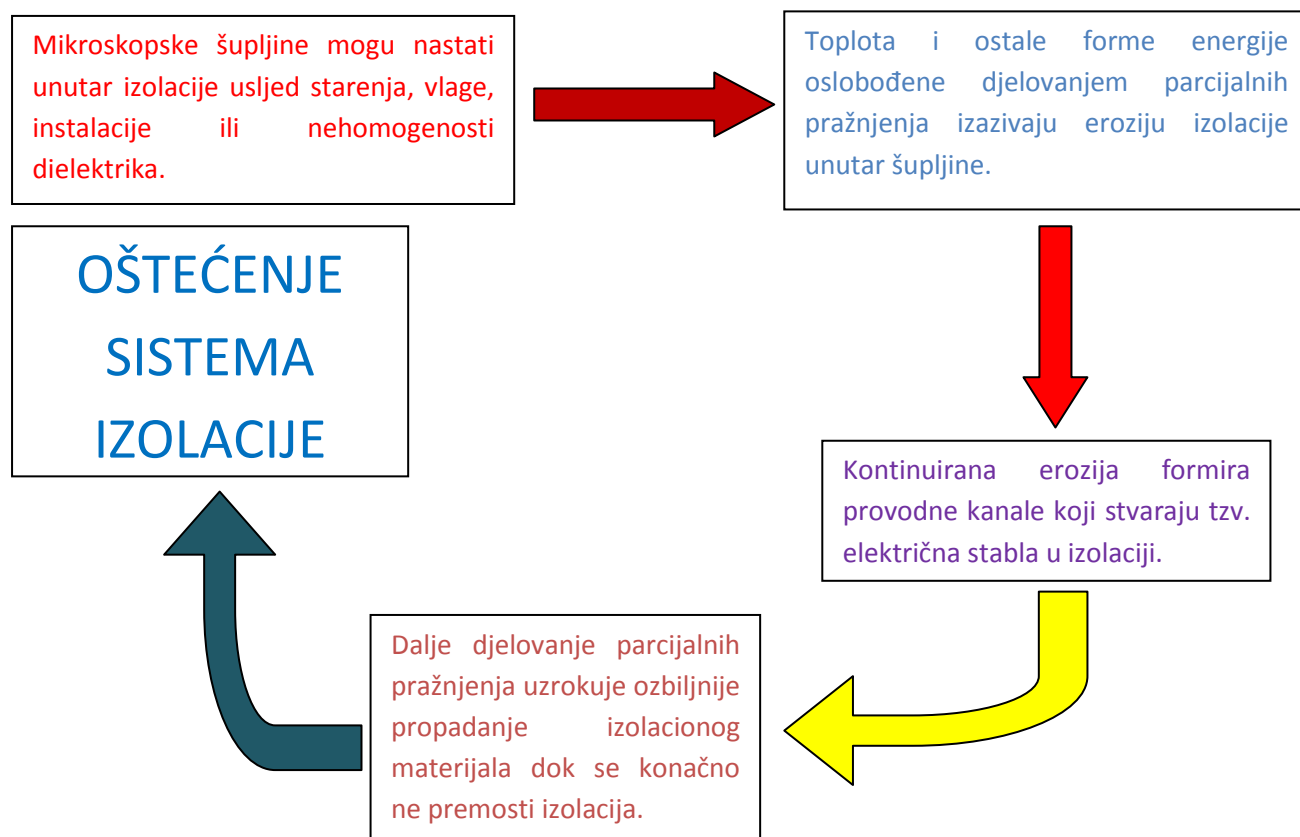
Najčešći tipovi parcijalnih pražnjenja su [1]:

- 1) korona,
- 2) površinska ili klizna pražnjenja,
- 3) pražnjenja u laminiranim materijalima,
- 4) pražnjenja u šupljinama ispunjenim gasom,
- 5) pražnjenja u čvrstim dielektricima i sl.



Slika 2.1. Tačke nehomogenosti izolacije

Generalno ovakva pražnjenja se javljaju kao impulsi čije je trajanje manje od $1\mu\text{s}$. Parcijalna pražnjenja su ograničena na prostor gdje su dielektrici i samo djelimično premošćavaju izolaciju među provodnicima. Korona, kao jedan od navedenih oblika parcijalnih pražnjenja, nema uticaj na starenje nadzemnih vodova, dok parcijalna pražnjenja u termoplastičnim dielektricima mogu da izazovu propadanje materijala i za nekoliko dana. Proces propadanja izolacije uzrokovanim parcijalnim pražnjenjima je prikazan na dijagramu 1 [28].

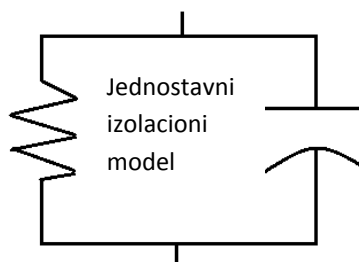


Dijagram 1. Proces propadanja izolacije uzrokovan parcijalnim pražnjenjima

II.2.1 Izolacioni model

Jednostavni model izolacionog sistema može biti predstavljen paralelnom vezom kapaciteta i otpora (slika 2.2) [30]. Ovaj koncept je istovjetan sistemu mjerenja faktora snage

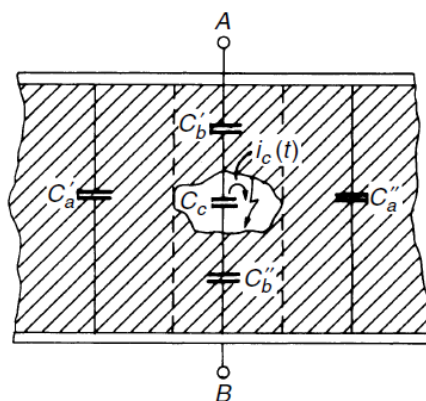
izolacionih sistema. Struja koja se javlja u izolaciji je razdvojena na aktivnu i kapacitivnu stranu. Faktor snage je kosinus ugla između modula struje i aktivne komponente struje .



Slika 2.2 Izolacioni model

Model na slici 2.2 se koristi u prigušnim kolima u elektronici. Signal prigušenja rezultira u smanjenju amplitude električnog signala. Ovo naglašava problem parcijalnih pražnjenja. Izolacioni medijum, koji je izložen parcijalnim pražnjenjima, prigušuje signal, zbog čega slabi signal koji pokušava da se otkrije pomoći senzora. Takođe, ovaj signal je uglavnom zamaskiran šumovima, koji dolaze iz različitih električnih izvora.

Fizički proces pojave parcijalnog pražnjenja je najlakše analizirati na jednostavnom modelu dielektrika sa šupljinom koji je prikazan na slici 2.3 [1].



Slika 2.3 Model dielektrika sa šupljinom

Model se sastoji od dvije pločaste elektrode ili terminala A i B i elektroizolacionog materijala između njih. Može se pretpostaviti da izolacioni materijal ima nehomogenost, deformaciju u obliku šupljine ispunjene vazduhom. Kapacitivnosti kondenzatora prikazanih na slici 2.3 su:

- C_c - kapacitivnost šupljine (deformacije),
- C_b'' i C_b' - kapacitivnosti između šupljine i elektroda,
- C_a'' i C_a' - kapacitivnosti dijela međuelektrodnog prostora, u kome šupljina ne deformiše linije električnog polja.

II.2.2 Osnovno električno kolo procesa parcijalnih pražnjenja

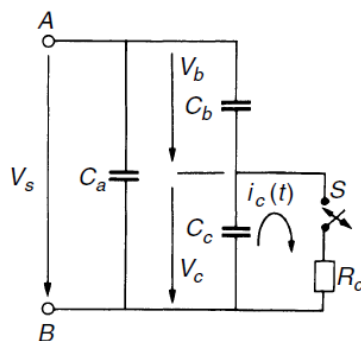
Na osnovu slike 2.3 se može konstruisati ekvivalentna električna šema procesa parcijalnih pražnjenja koja je prikazana na slici 2.4 [1]. Kapacitivnosti na šemi sa slike 2.4 su:

$$C_b = \frac{C_b' C_b''}{(C_b' + C_b'')} \quad (2.1)$$

$$C_a = C'_a + C''_a \quad (2.2)$$

S obzirom na realne geometrijske dimenzije izolacije i šupljine, kapacitivnosti istih se mogu posmatrati kao:

$$C_a \gg C_c \gg C_b \quad (2.3)$$



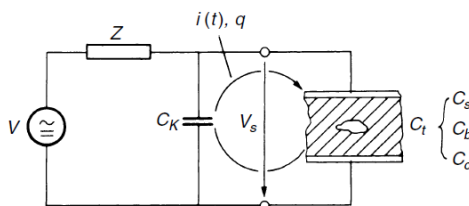
Slika 2.4 Električno kolo procesa parcijalnog pražnjenja

Početak parcijalnih pražnjenja u šupljini, odnosno na kondenzatoru kapacitivnosti C_c se simulira zatvaranjem prekidača S. Prekidač S se kontrolira naponom šupljine V_c . Otpornik R_c simulira period pražnjenja. Struja pražnjenja $i_c(t)$, koja ne može biti izmjerena, bi bila slična Dirakovoj funkciji, generalno ova struja je veoma kratka pulsacija trajanja nanosekundi.

Terminali A i B su priključeni na napon V_s , napunjeni do napona V_a , a zatim isključeni. Kondenzatori su napunjeni ukoliko je prekidač S zatvoren i C_c se kompletno isprazni, struja $i_c(t)$ oslobađa naelektrisanje $\Delta q_c = C_c \Delta V_c$ iz C_c , naelektrisanje koje protekne u cijelom sistemu kako je pretpostavljeno simulacijom. Upoređujući ovo naelektrisanje u sistemu prije i poslije pražnjenja, dobija se pad napona na terminalima ΔV_a kao:

$$\Delta V_a = \frac{C_b}{C_b + C_a} \Delta V_c \quad (2.4)$$

Ovaj pad napona ne sadrži informacije o količini naelektrisanja koja je protekla u sistemu Δq_c , ali sadrži komponentu $C_b \Delta V_c$ koja je vezana za naelektrisanje tako što C_b raste sa povećanjem šupljine. ΔV_a je veličina koja može biti mjerena, ali zbog nesigurnosti u vezi odnosa C_b/C_a po formuli 2.3, direktno mjerenje ovog napona bi bilo veoma teško. Zbog toga je kolo po kojem se mjeri direktna vrijednost parcijalnih pražnjenja bazirano na drugoj mjeri prikazanoj na slici 2.5. Test objektat je povezan na naponski izvor V , naizmjenični napon. Impedansa Z (sastoji se ili od prirodne impedanse ili filtra) može da odvoji sprežni kondanzator C_K i test objektat C_t sa naponskog izvora tokom kratkog trajanja parcijalnih pražnjenja. Tada sprežni C_K kondenzator služi kao baterija ili stabilni naponski izvor tokom kratkog perioda trajanja parcijalnih pražnjenja.



Slika 2.5 Test objektat sa šemom procesa parcijalnog pražnjenja

C_K oslobađa stvarnu struju parcijalnog pražnjenja $i(t)$ između C_K i C_t (kapacitivnost ispitivanog objekta) i smanjuje pad napona ΔV_a duž $C_t \approx (C_a + C_b)$. Ukoliko je $C_K \gg C_t$, ΔV_a je kompenzovano i protok naelektrisanja koje je nastalo proticanjem strujnog pulsa $i(t)$ je dat kao:

$$q = \int i(t)dt = (C_a + C_b)\Delta V_a \quad (2.5)$$

Kada se zamijeni jednačina 2.4 u 2.5 dobija se:

$$q = C_b \Delta V_c \quad (2.6)$$

naelektrisanje koje je označeno kao prividna količina elektriciteta.

U standardu JUS N.A5.530 [2] definisana je prividna količina elektriciteta ili prividni naboj kao količina elektriciteta koja bi naglo ubačena između priključaka ispitivanog objekta izazvala promjenu napona između njegovih priključaka ΔV_a u istom iznosu kao i parcijalno pražnjenje po formuli 2.6.

Uslov da $C_K \gg C_a$ ($\approx C_t$) nije primjenljiv u praksi, jer je C_t relativno veliko, ili potreban naizmjenični napon izvora postaje isuviše visok i troškovi tako velikog kondenzatora prevazilaze ekonomičnost, a mora biti napravljen da ne postoje nikakva parcijalna pražnjenja u njemu. Za konačnu vrijednost C_K naelektrisanje q ili struja $i(t)$ je smanjena, kako napon na kondenzatoru takođe pada tokom proticanja naelektrisanja. Označavajući ovaj pad napona kao ΔV^* , može se izračunati ova vrijednost pretpostavljajući da isto naelektrisanje protekne u kolima na slikama 2.4 i 2.5. Slijedi:

$$(C_a + C_b)\Delta V_a = (C_a + C_b + C_K)\Delta V^* \quad (2.7)$$

Kombinujući jednačine 2.4 i 2.6 sa 2.7, dobija se:

$$\Delta V^* = \frac{C_b}{C_b + C_a + C_K} \Delta V_c = \frac{C_b}{C_b + C_a + C_K} q \quad (2.8)$$

Takođe, vrijednost ΔV^* je teško mjeriti, međutim naelektrisanje koje je proteklo između C_K i C_t tokom proticanja smanjene struje $i(t)$ je jednako $C_K \Delta V^*$ i povezano je sa prividnim naelektrisanjem q [1]. Ukoliko se obilježi sa q_m dobija se:

$$q_m = C_K \Delta V^* = \frac{C_K}{C_b + C_a + C_K} q \quad (2.9)$$

$$\frac{q_m}{q} \approx \frac{C_K}{C_t + C_K} \quad (2.10)$$

Jednačina 2.10 daje sliku o poteškoćama detektovanja prividnog naelektrisanja, iako C_K i C_t mogu biti poznate. Mogućnosti za detektovanje malih vrijednosti q će biti smanjene kako instrumenti imaju donji limit za određivanje q_m , zbog čega jednačina 2.10 nameće limite u snimanju piko Kulona u velikim testnim objektima.

Prividno naelektrisanje nije jednako naelektrisanju koje protekne tokom nastanka parcijalnog pražnjenja u defektu izolacije, jer naelektrisanje koje protekne u tom vremenu i na tom mjestu nije moguće mjeriti.

Standardima je određeno da prividna količina elektriciteta q bude mjera parcijalnih pražnjenja jer je mjerenje promjene napona na krajevima ispitivanog objekta ΔU_a povezano sa nizom problema. Promjenu napona ΔV_a je teško utvrditi pošto je njena vrijednost mnogo niža od vrijednosti napona između krajeva ispitivanog objekta. Osim toga, u mjernoj šemi bi bilo neophodno ugraditi naponski mjerni transformator koji sam po sebi predstavlja izvor parcijalnih pražnjenja, u ovom slučaju smetnji [10].

Detekcija i mjerenja parcijalnih pražnjenja se svrstavaju u složena električna merenja. Problemi pri mjerenju parcijalnih pražnjenja se generalno mogu svrstati u dvije grupe:

- U prvu grupu spadaju problemi uzrokovani samom prirodom parcijalnih pražnjenja. Naime, pojava, trajanje i intenzitet impulsa struje parcijalnih pražnjenja ne slijede nikakvu zakonitost, što predstavlja teškoću pri izboru mjerne opreme;
- U drugu grupu problema spadaju smetnje nastale kao posledica uticaja smetnji i šumova, čiji su izvor električni uređaji u okolini.

U cilju smanjenja uticaja smetnji standardima je propisano da se mjerenja parcijalnih pražnjenja moraju obavljati u zaštićenim (ekranizovanim) laboratorijama [55]. Ovo predstavlja veliki problem jer zahtijeva izdvajanje ispitivanog objekta iz sistema, njegov transport do laboratorije i samim tim porast cijene eksploatacije, koji se prevazilazi on - line ispitivanjima.

II.2.3 Veličine za mjerenje parcijalnih pražnjenja

Naponski i strujni impuls su rezultat aktivnosti parcijalnih pražnjenja unutar objekta. Koristeći adekvatne senzore i detektore, ovaj puls je moguće mjeriti. Parcijalno pražnjenje koje se desi unutar testnog objekta proizvodi strujne impulse, međutim detektor pretvara te impulse u strujne ili naponske signale kao njegov izlaz proporcionalno ulazu strujnih impulsa [24].

Pored napona i struje postoje i izvedene veličine za mjerenje impulsa parcijalnih pražnjenja kao što su [24]:

1. Prividno naelektrisanje q parcijalnog pražnjenja je količina elektriciteta koja injektirana u kratkom vremenu između terminala testiranog objekta u specificiranim testnim kolima daje isto očitavanje strujnog impulsa kao i struje izazvane parcijalnim pražnjenjima i izražava se u piko Kulonima.
2. Odnos između broja pulseva parcijalnih pražnjenja u označenom vremenu i vremena trajanja tog intervala se naziva broj ponavljanja pulsacija i obilježava se sa n .
3. Frekvencija impulsa parcijalnog pražnjenja, N , je broj impulsa u sekundi u slučaju istih razmaka između impulsa.
4. Veza između faznog ugla φ_i i vremena t_i impulsa parcijalnog pražnjenja je data po formuli:

$$\varphi_i = 360 \frac{t_i}{T} \quad (2.11)$$

gdje je t_i vrijeme mjereno između prethodnog pozitivnog polariteta tranzijentnog napona kroz nulu i impulsa parcijalnog pražnjenja, a T je period testnog napona. Fazni ugao je izražen u stepenima.

5. Prosječni intenzitet struje pražnjenja, I , je izvedena veličina jednaka količniku sume individualnih apsolutnih vrijednosti količina prividnog naelektrisanja q_i tokom izabranog referentnog intervala T_{ref} i tog vremenskog intervala. Izražena je u Kulonima po sekundi.

$$I = \frac{1}{T_{\text{ref}}} [|q_1| + |q_2| + |q_3| + \dots + |q_i|] \quad (2.12)$$

6. Snaga pražnjenja 'P', je prosječna snaga impulsa devedena na krajevima terminala testnog objekta tokom ubrizgavanja prividnog naelektrisanja u toku nekog vremenskog intervala T_{ref} .

$$P = \frac{1}{T_{\text{ref}}} [u_1 q_1 + u_2 q_2 + u_3 q_3 + \dots + u_i q_i] \quad (2.13)$$

gdje su u_i trenutne vrijednosti testnog napona u trenucima uspostavljanja vrijednosti prividnog naelektrisanja q_i . Prilikom zapisivanja vrijednosti napona mora se voditi računa o znaku vrijednosti. Snaga pražnjenja je izražena u Vatima.

7. Kvadratni odnos, 'D', je izvedena veličina koja se dobija količnikom sume kvadrata individualnih magnituda prividnih naelektrisanja u izabranom vremenskom intervalu i tog vremenskog intervala T_{ref} .

$$D = \frac{1}{T_{\text{ref}}} [q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + \dots + q_i^2] \quad (2.14)$$

Kvadratni odnos je izražen u Kulonima na kvadrat po sekundi.

II.3 Klasifikacija

Generalno parcijalna pražnjenja se mogu pojaviti ukoliko je električno polje unutar defekta izolacije veće od električne čvrstoće samog gasa u defektu. U tehničkom smislu parcijalna pražnjenja u izolaciji su posljedica njene nehomogenosti i nesavršenosti.

Parcijalna pražnjenja su posljedica lokalne koncentracije električnog naelektrisanja na površini izolacije ili u samoj izolaciji. Generalno ovakva pražnjenja se javljaju kao impulsi čije je trajanje manje od $1\mu\text{s}$ [45].

Sa tehničkog aspekta mogu se razlikovati dvije veće grupe parcijalnih pražnjenja:

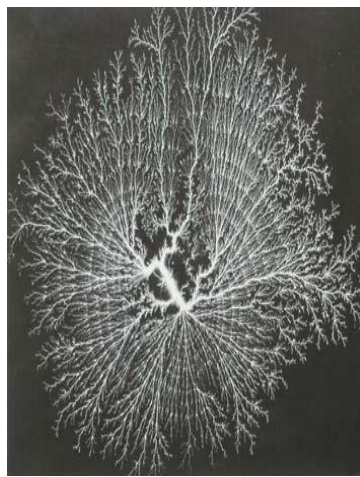
1. spoljašnja i
2. unutrašnja.

II.3.1 Spoljašnja parcijalna pražnjenja

Pražnjenja u vazduhu su klasifikovana kao 'eksterna pražnjenja' i često se poistovjećuju i nazivaju koronarna pražnjenja. Kada se napon poveća do vrijednosti proboja gasa prva iskra ili strimer može da se pojavi (Slika 2.6a). Lider se pojavljuje samo u slučajevima većih vazdušnih praznina koje prevazilaze metar dužine. U slučajevima pojave pražnjenja, hemijske reakcije se dešavaju u gasnim šupljinama, ali su proizvodi ovih reakcija ubrzo zamijenjeni cirkulišućim gasom zbog čega se procesi pražnjenja u vazdušnim sredinama smatraju kao reverzibilni i zbog toga bezazleni. Međutim u nekim slučajevima spoljašnja pražnjenja u vazduhu, koja se kreću duž čvrste izolacije tzv. puzajuća pražnjenja, mogu izazvati oštećenja čvrste izolacije.



Slika 2.6a Strimer u vazduhu



Slika 2.6b Električno pražnjenje u uljnoj izolaciji



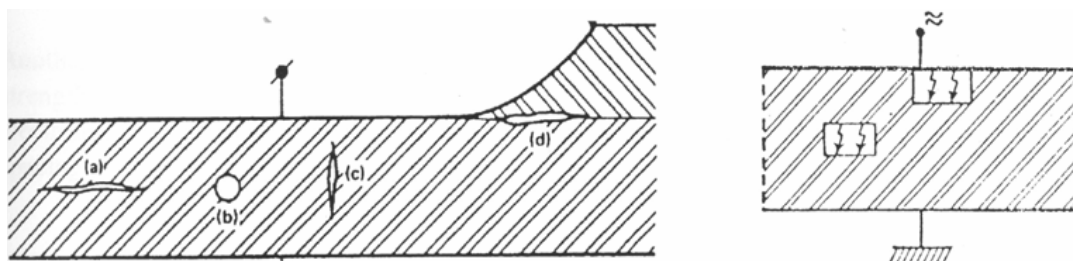
Slika 2.6c Električno pražnjenje u čvrstoj izolaciji - tzv. 'treeing'

Zbog normalne i tangencijalne komponente vektora električnog polja može biti izazvano i tzv. 'Toeplerovo pražnjenje' [23]. Takvo pražnjenje može da prespoji velike šupljine, iako je test napon povećan za samo nekoliko kV iznad napona stvaranja lidera. Posljedica toga je erozija i destrukcija čvrste izolacije zbog visoke temperature kanala lidera.

Razmatrajući izolacione sisteme spoljašnja pražnjenja u vazduhu mogu biti značajna za ocjenu stanja prstenova na izolatorima korišćenim u VN vodovima kao i provjeravanje elektroda korišćenim u VN testovima. Nepovratna Toeplerova pražnjenja mogu biti uspostavljena na izolatorima energetskih transformatora zbog lokalne neravnomjernosti jačine polja.

II.3.2 Unutrašnja parcijalna pražnjenja

Parcijalna pražnjenja nastala zbog nehomogenosti u tečnoj (slika 2.6b) i čvrstoj izolaciji (slika 2.6c), kao i u kompresovanom gasu su klasifikovana kao unutrašnja pražnjenja. Samo-održavajuće lavine elektrona su moguće samo u gasnim šupljinama. Zbog toga se pražnjenja u čvrstim izolacijama mogu pojaviti samo u gasnim pukotinama, kao što su šupljine, pukotine ili čak defekti u molekularnim strukturama. U tečnim izolacijama parcijalna pražnjenja se mogu pojaviti u gasnim balončićima nastalim usljed termalnih ili električnih fenomena i u vodenoj pari koja nastaje u sredinama visoke jačine električnog polja.



Slika 2.7 Tipične veličine gasnih šupljina u čvrstoj izolaciji

Napon pojave i prestanka parcijalnih pražnjenja, magnituda parcijalnih pražnjenja i šabloni za simulaciju parcijalnih pražnjenja su izvođeni ne samo na osnovu tipa defekta, pritiska već i dimenzija šupljine u izolaciji, kao što je ilustrovano na slici 2.7 [23]. Kako

unutrašnja parcijalna pražnjenja uzrokuju progresivno starenje izolacije, ona su označena kao nepovratna.

U izolaciji unutrašnja pražnjenja su značajna, na primjer, za energetske kablove i transformatore, kao i izolovane instrumente. Tzv. električno stablo koje se formira u unutrašnjosti izolacije može da napreduje veoma brzo ili ekstremno sporo zavisno od defekta. U zavisnosti od brzine napredovanja pražnjenja, preskok unutar izolacije može da se desi veoma brzo (reda nekoliko sekundi) ili da napreduje godinama dok ne dođe do potpunog uništavanja izolacije. Unutrašnja pražnjenja se takođe dešavaju na granici čvrstih i tečnih izolacija i mogu biti negativna ukoliko postoje klizna pražnjenja duž površine čvrste izolacije. U gasno izolovanim prekidačkim postrojenjima unutrašnja pražnjenja, koja su često izazvana česticama koje se nalaze unutar gasa, su označena kao veoma opasna zato što mogu da pretvore SF₆ gas u neželjene produkte. Ovo može da dovede do propadanja čvrste izolacije ili stvori otrovne supstance koje rezultiraju konačnim električnim preskokom u izolaciji izazvanim tranzijentnim prenaponima.

III METODE ZA MJERENJE I DETEKCIJU PARCIJALNIH PRAŽNENJA

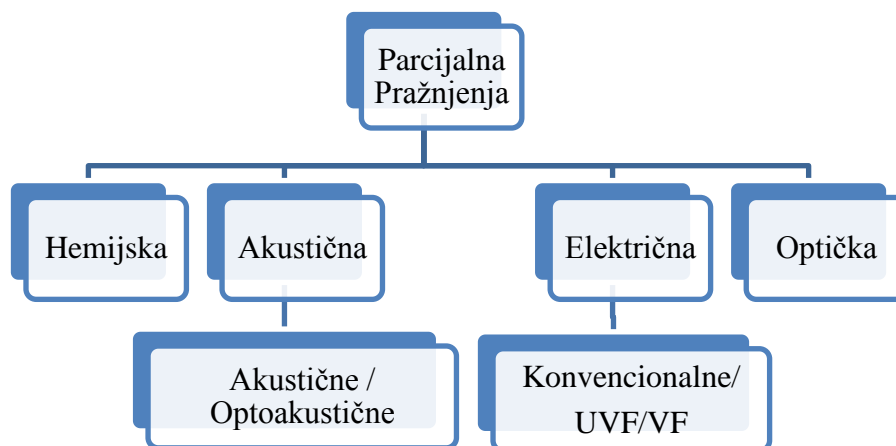
Ispitivanje aktivnosti i nivoa parcijalnih pražnjenja u mjernim transformatorima i VN opremi ima značajnu ulogu u dijagnostici stanja izolacionog sistema i prevenciji havarije. Principi detektovanja i mjerenja parcijalnih pražnjenja se baziraju na praćenju razmjene energije koja se dešava u trenutku parcijalnog pražnjenja. Ove razmjene se manifestuju kao [1]:

- 1) impuls električne struje,
- 2) dielektrični gubici,
- 3) radijacija (svjetlost),
- 4) zvuk (šum),
- 5) povećani pritisak gasa,
- 6) hemijske reakcije i slično.

Stoga, mjerenje parcijalnog pražnjenja se zasniva na posmatranju bilo kojeg od ovih fenomena. Najstariji, a ujedno i najprostiji metod se oslanja na osluškivanje šuma koji potiče od parcijalnog pražnjenja, tzv. hissing test [1]. Međutim osjetljivost ovog testa je uvijek uslovljena i otežana zvucima i šumovima koji potiču od spoljašnjih faktora. Poznato je da će energija oslobođena parcijalnim pražnjenjem povećati faktor disipacije, što mjerenjem tangens dielektričnih gubitaka ($\tan \delta$) u zavisnosti od primijenjenog napona prikazuje tzv. jonizaciono koljeno, koje remeti inače linearnu zavisnost. Međutim, najčešće ovo koljeno, i pored reprezentativnog parcijalnog pražnjenja nije moguće najtačnije odrediti. Mjerenje $\tan \delta$ uspješno se realizuje preko visokonaponskog Šeringovog mosta. Najuspješnije i najtačnije su električne metode koje imaju za cilj da razdvoje impulsne struje povezane sa parcijalnim pražnjenjima od bilo kojeg drugog fenomena. Zbog toga se koriste adekvatni detektori parcijalnih pražnjenja.

Parcijalna pražnjenja imaju mali uticaj na izolaciju opreme ukoliko su kratkotrajna, međutim dugotrajni uticaj parcijalnih pražnjenja se pokazao kao destruktivan po elektroizolaciju, što degradira električne karakteristike izolacionog sistema.

Postoje mnogobrojne metode za detektovanje i dobijanje podataka o parcijalnim pražnjenjima. Za mjerenje se koriste fizički efekti, kao što su optičke i akustične pojave. Takođe, različite metode u zavisnosti od opreme se koriste za analizu aktivnosti parcijalnih pražnjenja. Pregled fizičkih pojava koje emituju parcijalna pražnjenja i metode njihovog otkrivanja su date na slici 3.1.



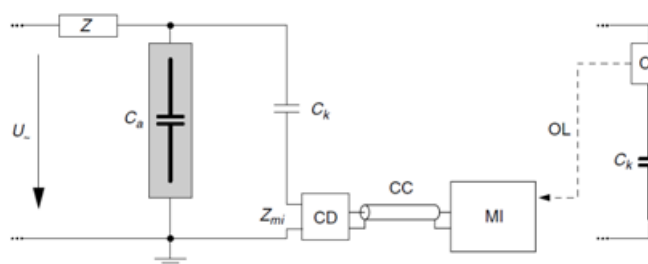
Slika 3.1 Fizičke pojave parcijalnih pražnjenja i metode otkrivanja istih

Kako sve starije metode iziskuju off - line testiranje, u ovom poglavlju će pored opisanih postojećih tehnika i metoda za detektovanje i mjerenje parcijalnih pražnjenja biti dato i poređenje off-line i on-line metoda, kao i njihovi nedostaci i prednosti.

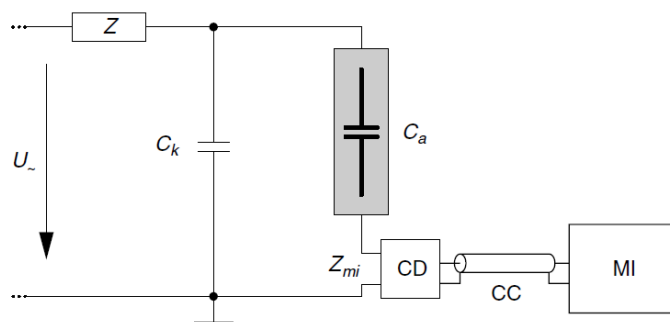
III.1 Konvencionalne metode za mjerenje parcijalnih pražnjenja

Konvencionalne metode za mjerenje parcijalnih pražnjenja i njihovo uputstvo za pravilno rukovanje je tema standarda IEC 60270 [24]. Test oprema treba da sadrži izvor visokog napona, sprežni kondenzator i mjerenu impedansu. Svako parcijalno pražnjenje u testu uzrokuje visoko frekventni strujni impuls kratkog trajanja u mjernom kolu.

Većina mjernih sistema prema standardu su realizovani prema slici 3.2 [1].



3.2a Sprežni uređaj u seriji sa sprežnim kondenzatorom



Slika 3.2b Sprežni uređaj u seriji sa testnim objektom

Oznake na slici 3.2 su:

$U \sim VN$ izvor, Z_{mi} - ulazna impedansa mjernog sistema, CC - sprežni kabl, OL - optički kabl, C_a - testni objekat, C_k - sprežni kondenzator, CD - sprežni uređaj, MI - mjerni instrument, Z - filter/impedansa za smanjenje šuma iz VN izvora.

Ovakva testna kola su označena kao direktni sistemi za detekciju parcijalnih pražnjenja. Sprežni uređaj 'CD' sa impedansom Z_{mi} formira ulazni kraj mjernog sistema. Kao što je predstavljeno na slici 3.2a ovaj uređaj se može postaviti na kraju VN izvora, ukoliko je jedan kraj testnog objekta uzemljen. U tom slučaju za povezivanje sprežnog uređaja sa instrumentom korišćeni su optički kablovi umjesto spojnog kabla 'CC'. Za realizaciju ovakvog testa moraju se ispoštovati određena pravila postavljena standardom.

- Kondenzator mora biti sa malom induktivnošću i dizajniran tako da pri određenim testovima pokazuje veoma male aktivnosti parcijalnih pražnjenja u sebi, osim ukoliko testni uređaj nije sposoban da razdvoji pražnjenja koja dolaze iz kondenzatora i testnog objekta.
- VN izvor mora imati dovoljno mali nivo šuma kako bi se dozvolilo mjerenje magnitude parcijalnih pražnjenja na određenom testnom naponu.
- Takođe, prethodno se odnosi na VN spojeve.

- Impedansa ili filter mogu biti primijenjeni kako bi se smanjio uticaj šuma koji potiče od VN izvora.

Glavna razlika između ova dva testna sistema je u mjestu postavljanja mjernog sistema. U slučaju na slici 3.2a, sprežni uređaj je na nultom potencijalu i u seriji sa sprežnim kondenzatorom C_k , kao što je uobičajeno u praksi. Na slici 3.2b, isti uređaj je u seriji sa testnim objektom C_a . U ovom slučaju lutajuće kapacitivnosti svih elemenata VN strane ka zemlji će porasti do vrijednosti C_k omogućavajući višu osjetljivost na osnovu jednačine 2.10. Nedostatak je mogućnost oštećenja mjernog sistema ukoliko testni objekat zakaže. Mjerni instrumenti koji se koriste za sprovođenje ove metode su širokopojasni, uskopojasni i limitirani širokopojasni instrumenti parcijalnih pražnjenja. Ova metoda se sprovodi u laboratorijskim uslovima i pripada grupi off-line metoda.

IEC 60270 [24] definiše i određuje karakteristike tih mjernih sistema.

III.2 Elektromagnetna tehnika detekcije parcijalnih pražnjenja

III.2.1 Teorija elektromagnetnog talasa

Elektromagnetni talas (EM) je fizička pojava koju čine električno i magnetno polje. Električno i magnetno polje su pod pravim uglom u odnosu jedno na drugo. Pri tome svaka promjena električnog polja generiše nastajanje magnetnog, i obrnuto. Ukoliko u bilo kojem dijelu prostora se pobudi promjenljivo električno/magnetno polje tada će se u tom dijelu prostora pobuditi magnetno/električno polje. Zbog čega je opravdano govoriti o EM polju.

EM talas se širi u okolni prostor konačnom brzinom koja je u vakuumu jednaka brzini svjetlosti. U tehnici primjenjuje se pojava širenja elektromagnetnih talasa u prostoru. Tako velika brzina rasprostiranja i druge karakteristike čine ih pogodnim za bežični prenos informacija. Dio spektralnog područja elektromagnetnih talasa koji služe za bežični prenos informacija zauzima frekvencijsko područje od oko 10 kHz do više od 60 GHz. Talasi iz tog područja, budući da služe za bežični prenos informacija (radio prenos), nazivaju se radio talasima.

EM polje je kontinualan fizički proces, tj. proces koji se odvija u svakom dijelu prostora. Za opis principa EM polja može se početi od Maksvelovih jednačina koje su prikazane u diferencijalnom obliku:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (3.1)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (3.2)$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (3.3)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (3.4)$$

Kako u ovim jednačinama ne figurišu karakteristike sredine, ove jednačine važe za ma kakvu sredinu. U slučaju različitih sredina dodaju se karakteristike sredine prema formulama:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \vec{J} = \sigma \vec{E}, \vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.5)$$

gdje su:

\vec{E} - vektor jačine električnog polja,

\vec{D} - vektor električnog pomjeraja,

\vec{J} - vektor gustine struje,

μ - magnetna permeabilnost supstance,

σ - specifična električna provodnost.

\vec{H} - vektor jačine magnetnog polja,

\vec{B} - vektor magnetne indukcije,

ρ - zampreminska gustina naelektrisanja,

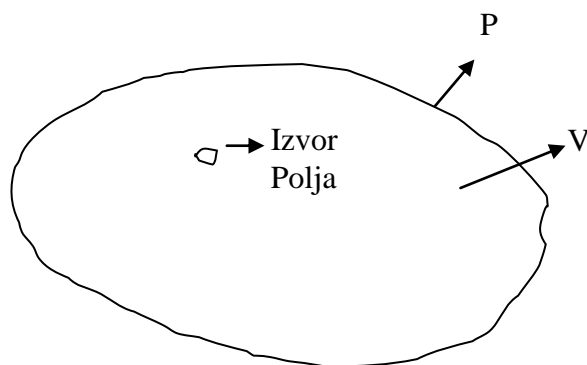
ϵ - dielektrična konstanta,

Iz jednačine 3.1 je moguće zaljučiti da u stvaranju magnetne komponente polja učestvuje kondukciona i struja pomjeraja. Takođe električna provodljivost se sastoji iz dva fenomena, prvi je vezan za provodnik, a drugi za izolacioni medijum koji postoji između dva provodnika.

Drugi fenomen, struja pomjeraja, je uglavnom vezana za brze promjene, što je vezano za visoke frekvencije i zajedno sa formulom 3.2 vodi do prostiranja EM talasa.

S obzirom da je EM polje realan fizički proces koji se odvija u supstanci rezumljivo je da za stvaranje EM talasa mora biti uložena energija. Kako se distribuira energija uložena u stvaranje EM polja je opisano u nastavku [65].

Posmatra se određeni domen V , kojeg ograničava površina S (slika 3.3).



Slika 3.3 Domen V sa izvorom EM polja

Parametri ove sredine su $\epsilon, \mu = \text{const}$. Ukoliko se jednačine 3.1 i 3.2 pomnože sa \vec{E} i \vec{H} respektivno, a zatim oduzme prva od druge dobija se:

$$\vec{H} \text{rot } \vec{E} - \vec{E} \text{rot } \vec{H} = -\vec{H} \frac{d\vec{B}}{dt} - \vec{E} \vec{J} - \vec{E} \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (3.6)$$

kako se unutar domena nalazi i izvor polja, primjenjuje se Omov zakon u najopštijem obliku:

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{E}_i) \quad (3.7)$$

gdje je \vec{E}_i - električno polje samog izvora.

Odakle je:

$$\vec{E} = \frac{\vec{J}}{\sigma} - \vec{E}_i \quad (3.8)$$

zamjenom u 3.6 i obzirom da važi:

$$\text{div}(\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{H} \text{rot } \vec{E} - \vec{E} \text{rot } \vec{H} \quad (3.9)$$

dobija se:

$$\operatorname{div}(\vec{E} \times \vec{H}) = -\vec{H} \frac{d\vec{B}}{dt} - \vec{E} \frac{d\vec{D}}{dt} - \frac{\vec{J}^2}{\sigma} + \vec{J} \vec{E}_i \quad (3.10)$$

integraljeći lijevu i desnu stranu po domenu V se dobija:

$$\int_V \operatorname{div}(\vec{E} \times \vec{H}) dV = - \int_V \vec{H} \frac{d\vec{B}}{dt} dV - \int_V \vec{E} \frac{d\vec{D}}{dt} dV - \int_V \frac{\vec{J}^2}{\sigma} dV + \int_V \vec{J} \vec{E}_i dV \quad (3.11)$$

mijenjajući raspored dobija se:

$$\int_V \vec{J} \vec{E}_i dV = \int_V \frac{\vec{J}^2}{\sigma} dV + \int_V \vec{E} \frac{d\vec{D}}{dt} dV + \int_V \vec{H} \frac{d\vec{B}}{dt} dV + \oint_{S_V} (\vec{E} \times \vec{H}) d\vec{S} \quad (3.12)$$

Svaki od sabiraka po svojoj prirodi predstavlja snagu. Član na lijevoj strani pokazuje snagu razvijenu u samom izvoru. Desna strana pokazuje na šta se ta snaga troši, odnosno kako se distribuira:

- Prvi član predstavlja snagu Džulovih gubitaka utrošenu u provodnim domenima V , što znači da taj dio nepovratno odlazi na toplotne gubitke;
- Drugi član predstavlja dio snage izvora utrošen za stvaranje električne komponentne EM polja;
- Treći član služi za stvaranje magnetne komponente EM polja;
- U četvrtom članu figuriše i magnetna i električna komponenta EM polja. Ovaj član odražava svojstvo promjenljivog EM polja i predstavlja fluks. S druge strane ovaj član predstavlja dio energije izvora koji kroz površinu domena V odlazi u okolni prostor. Što znači da dio svoje energije EM polje odašilje u okolni prostor. Što znači da nastajanjem EM polja ono postaje nezavisno od svog izvora i prostorno i vremenski.

Ovakvim saznanjem se energija može prenositi bežičnim putem sa jednog mjesta na drugo. Energija EM talasa je opisana Pointigovim vektorom ($\vec{\Gamma}$):

$$\vec{\Gamma} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (3.13)$$

Intenzitet Pointigovog vektora predstavlja onaj dio snage izvora utrošenog na stvaranje EM polja, samim tim, sadržane u tom polju koje se prostire od izvora ka beskonačnosti. Ovaj vektor po svojoj prirodi predstavlja površinsku gustinu snage razmjene.

$$\Gamma = E \cdot H = \frac{A \cdot V}{m \cdot m} = \frac{W}{m^2} \quad (3.14)$$

Prvi eksperimentalni dokaz prostiranja elektromagnetnih talasa dao je Herc (H. R. Hertz) 1888. godine. On je eksperimentom dokazao prostiranje elektromagnetnih talasa bez ikakvih provodnih kontura.

Prostiranje signala parcijalnih pražnjenja na niskim frekvencijama uglavnom se dešava od strane provodnih struja. U provodniku, okolno magnetno polje je zatvoreno. Električno polje ima svoje porijeklo na površini provodnika i širi se radialno. Ni H ni E

vektori polja nijesu u pravcu prostiranja. Ovo odgovara definiciji poprečnog prostiranja EM talasa koji se prostiru do visokih frekvencija.

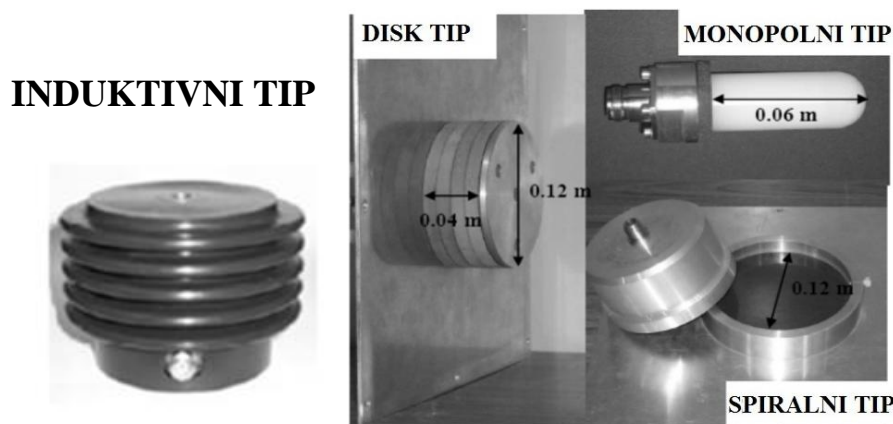
Za ultra visoke frekvencije, provodna struktura radi kao antena, čiji opseg frekvencije zavisi od dimenzija, posebno oko izvora parcijalnog pražnjenja. Struktura izvora parcijalnog pražnjenja utiče na signal parcijalnog pražnjenja.

III.2.2 Ultra - visokofrekventna mjerenja parcijalnih pražnjenja

Ultra - viskofrekventni (UVF) senzori su proizvedeni 1980ih godina za gasno izolovane trafostanice. Dizajnirani su da uhvate elektromagnetne talase u opsegu 300-3000 MHz koji su emitovani aktivnostima struja parcijalnih pražnjenja, danas se koriste za različite primjene koje će biti predstavljene u nastavku.

Impulsi parcijalnog pražnjenja veoma kratkog trajanja (reda nanosekundi), generišu elektromagnetne talase, čiji spektar dostiže i red GHz. U koaksijalnim strukturama ovi impulsi oslobađaju elektromagnetne talase. Iz ovog razloga kapacitivni senzori, poput antena, su razvijeni i imaju mogućnost detektovanja tranzijentnih talasa. Pored detektovanja, ovaj metod ima sposobnost i pronalaženja lokacije izvora parcijalnih pražnjenja. UVF metod ima prednost zbog oklopa transformatora, zbog čega je prigušenje signala veoma malo. Takođe UVF metod može da izbjegava šumove do 100 MHz opsega svog rada što je rezultat širokog opsega rada UVF uređaja koji se kreću između 300 MHz do 2GHz. Takođe, konekcija između UVF senzora i transformatora (za šta se najčešće koriste) je neelektrična i zbog toga pouzdanost i sigurnost osoblja je zagarantovana.

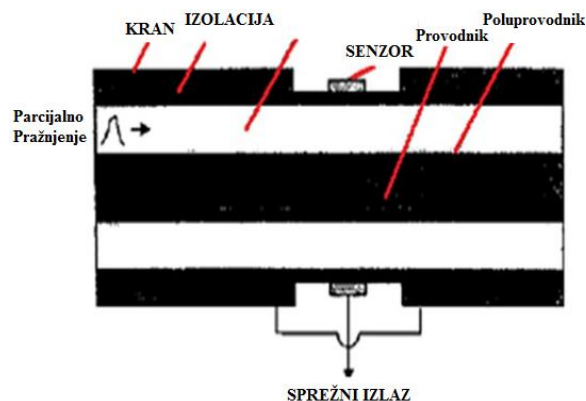
Senzori koji se koriste za UVF su se pokazali kao efikasni ne samo u laboratorijskim (off-line) već i u ispitivanjima u realnom vremenu (on-line). Postoje različite vrste ovog senzora poput spiralnog, monopolnog, disk, induktivnog tipa (slika 3.4) [34].



Slika 3.4 Tipovi UVF senzora

Spiralni, monopolni i disk tip se koriste za detekciju parcijalnih pražnjenja u gasno izolovanim trafostanicama i energetskim transformatorima. Pokazalo se da ovi senzori imaju visoku osjetljivost na radijacione signale. Induktivni tip je namijenjen detekciji parcijalnih pražnjenja u energetskim kablovima, tako što se postavlja na kraj kabla.

Pored ova četiri tipa senzora za detekciju parcijalnih pražnjenja u VN kablovima se koristi i kapacitivni senzor koji se spreže sa kablom i prikazan je na slici 3.5 [34].



Slika 3.5 Dijagram sprezanja kapacitivnog senzora

Za energetske transformatore velike snage koriste se uljni ventili. Mogu biti instalirani on-line, u unutrašnjosti energetskog transformatora, kroz uljni ventil na dnu transformatora. Njihova osjetljivost je najjača za parcijalna pražnjenja koja se dešavaju pri dnu, tj. u blizini uljnog ventila. Predstavljaju optimalno rješenje kada se kombinuju sa kapacitivnim čepovima koji se nalaze na gornjem dijelu metalnog kućišta (slika 3.6) [60].



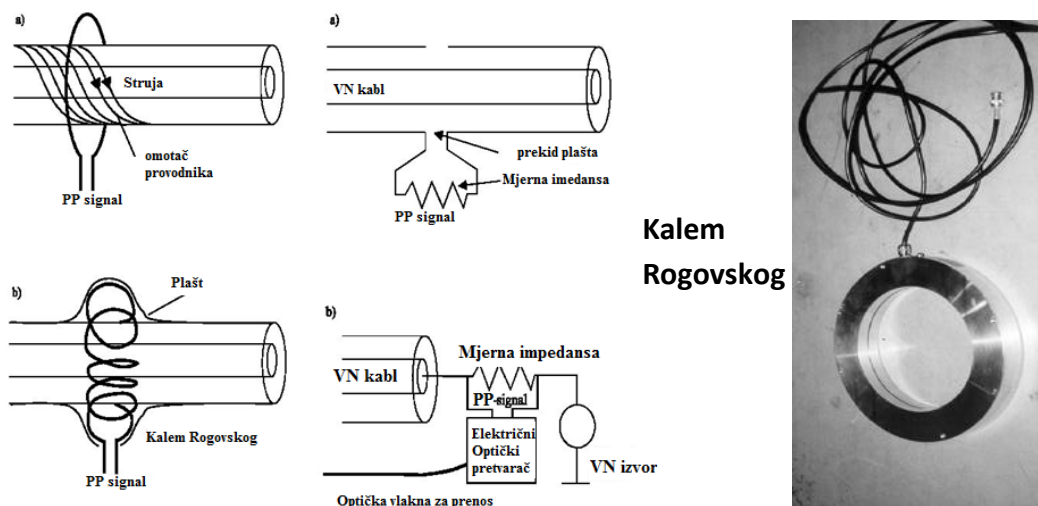
Slika 3.6 Unutrašnji UVF uljno - ventilni senzori

Dva različita tipa sistema se koriste, uskopojasni sistem sa frekventnim opsegom od nekoliko MHz i širokopojasni sistemi sa opsegom do 2GHz.

III.2.3 Visokofrekventna i veoma visokofrekventna mjerenja parcijalnih pražnjenja

Za potrebe mjerenja parcijalnih pražnjenja visokofrekventnom (VF) metodom se koriste senzori u opsegu 3-30 MHz, dok se veoma visokofrekventni (VVF) senzori proizvode za frekvencije u opsegu 30-300MHz. VF metoda mjerenja parcijalnih pražnjenja se može koristiti za mjerenje istih u generatorima i kablovima, dok VVF ima širu primjenu i može se koristiti za mjerenje u kablovima, generatorima, transformatorima i gasno izolovanim trafostanicama.

Za upotrebu VF i VVF metode koriste se induktivni i kapacitivni senzori, kao i specijalno dizajnirane sonde. VF i VVF senzori koji se koriste za mjerenje elektromagnetnih talasa za energetske kablove su metalne prevlake, aksialni senzori, kalem Rogovskog i direktno spregnuti senzori i prikazani su na slici 3.7 [60].



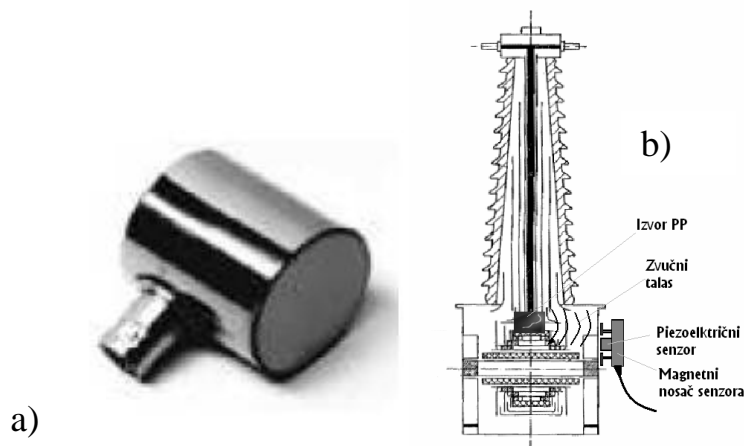
Slika 3.7 Vrste VF i VVF senzora za mjerenje EM talasa

III.3 Akustične tehnike mjerenja parcijalnih pražnjenja

Svaka aktivnost parcijalnog pražnjenja oslobađa energiju, jedan dio te energije se pretvara u mehanički talas, tj. zvučni talas određene frekvencije. Taj talas se detektuje pomoću akustičnih mjernih sistema za snimanje parcijalnih pražnjenja. Zvučni talas koji nailazi na sud MT detektuje se sa spoljašnje strane akustičnim sensorima.

Akustični senzori koji se najčešće koriste u detekciji parcijalnih pražnjenja u transformatorima hvataju zvučni signal emitovan od strane parcijalnih pražnjenja u opsegu frekvencije 10-300 kHz. Rezultirajući signal zavisi od tipa parcijalnih pražnjenja, distance između senzora i mjesta izvora. Snimanje signala akustičnom metodom može da se realizuje pomoću senzora postavljenih u unutrašnjost ili prislonjenih na metalno kućište transformatora. Prednost senzora postavljenog u unutrašnjosti transformatora je smanjenje šumova koji dolaze iz spoljašnjosti, jer transformator posjeduje kućište. Ukoliko je postavljen spolja, tj. na metalno kućište transformatora velika je vjerovatnoća da će šumovi iz spoljašnjosti uticati na tačnost akustičnih senzora, što dovodi svrhu ove tehnike u pitanje.

Akustični signali proizvedeni parcijalnim pražnjenjima izazivaju mehaničke vibracije i za detektovanje ovakvih signala se koriste piezoelektrični (pretvarači) senzori. Piezoelektrični senzori pretvaraju mehanički pritisak zvučnih talasa u električni signal koji je pogodan za dalju obradu i analizu. Pored njih koriste se optički akustični senzori, brzinometri, mikrofoni, slika 3.8 [17 i 40].



Slika 3.8 Akustični senzor a), Rasprostiranje zvučnog talasa i postavljanje piezoelektričnog senzora b)

Na akustični talas kojeg detektuje senzor utiče najviše geometrija testnog objekta, zbog čega dolazi do pojava kao što su odbijanje, prelamanje, prigušenje, apsorpcija i rasipanje talasa. Prednost korišćenja akustičnih senzora je lokalizacija defekta, odnosno izvora pražnjenja kroz vrijeme trajanja prostiranja akustičnog talasa. Mora se napomenuti da osjetljivost ovih senzora je veoma mala, stoga pražnjenja koja oni detektuju su velikih jačina u odnosu na druge tehnike mjerenja i detekcije.

Metodu akustičnog mjerenja zvučnih talasa nastalih parcijalnim pražnjenjima je moguće koristiti kako u on-line tako i u off-line režimu.

U gasnim i uljnim izolacijama, akustični talas se nalazi u opsegu soničnih i ultrasoničnih opsega. Ukoliko proizvedeni talas utiče na specijalna optička vlakna, njihova optička provodljivost se mijenja. Ova činjenica se koristi u optičko-akustičnim sensorima. Ukoliko intenzitet parcijalnog pražnjenja u okruženju raste, pritisak talasa deformiše optičko vlakno. Dolazi do mehaničkog pomjeranja i istežanja vlakana i zbog toga dolazi do uticaja polarizovane svjetlosti iskorišćene od strane vlakna. Zbog ovog fenomena dolazi do promjene optičke distance kao i uslova polarizacije.

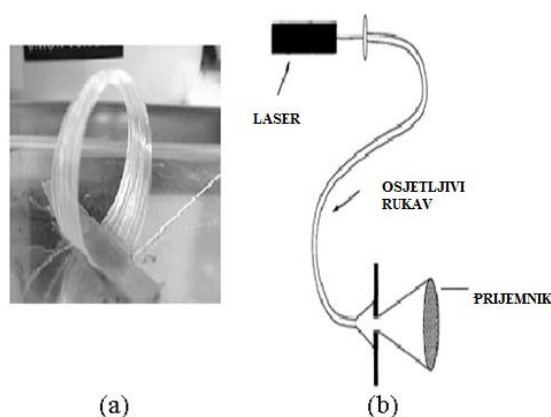
III.4 Optička metoda mjerenja parcijalnih pražnjenja

Optička detekcija parcijalnih pražnjenja je bazirana na snimanju svjetlosti koja se emituje tokom aktivnosti parcijalnih pražnjenja. Svjetlost je rezultat jonizacije, pobuđivanja i rekombinacionih procesa izazvanim parcijalnim pražnjenjima. Količina emitovane svjetlosti i njene talasne dužine zavise od ambijenta (temperature, pritiska) i od medijuma izolacije (gas, tečnost, čvrsta). Optički spektar boja se kreće od ultravioletne, preko vidljive do infracrvene. Koriste se dvije tehnike, jedna za detektovanje na površini VN opreme i druga za detektovanje optičkih signala unutar VN opreme. Zavisno od spektra ultravioletna optika, oprema za noćno nadgledanje, nisko svjetlosni pojačivači, fotodiode i fotopojačivač povezani na optička vlakna se koriste.

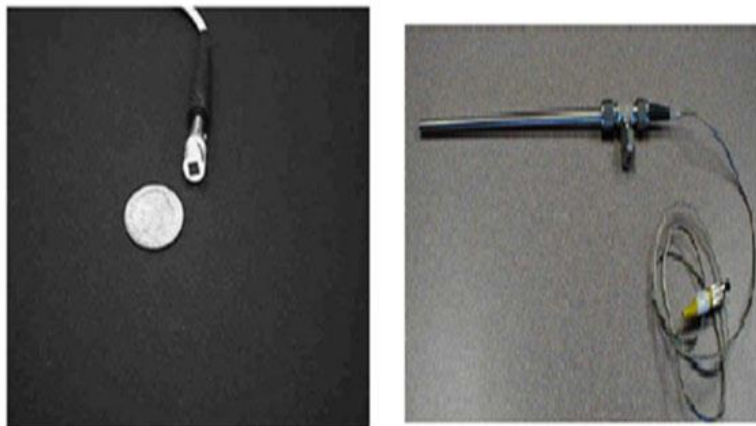
Prostiranje optičkog signala zavisi od opreme. Mnogi faktori koji utiču na optički signal, kao i fizički zakoni koji opisuju smetnje iz okoline moraju biti razmatrani.

Optički metod koristi optičke senzore koji su laki, visoko osjetljivi, malih gabarita i posjeduju visoko-frekventni izlaz i značajne je otpornosti na elektromagnetne smetnje. Može mjeriti visoki opseg hemijskih i optičkih parametara sa lakoćom.

Optički metod se najčešće koristi za detektovanje pražnjenja u gasno izolovanim trafostanicama i VN transformatorima. Unutrašnji senzor koji se sastoji od vlaknastog kalema je napravljen od namotavanja 8m vlakna formirajući kalem od 25mm u poluprečniku. Na slici 3.9 su prikazani tipovi senzora koji koriste optičku metodu [34].



Slika 3.9a Unutrašnji optički senzor baziran na Mach-Zehnderovom vlaknastom interferometru i unutrašnji višemodni optički senzor



Slika 3.9b Spoljašnji Fapri-Perotov optički i mikroelektromehanički senzor

Optički senzori su korišćeni dugo vremena zbog svojih prednosti, poput sigurnosti od električnih preskoka, otpornosti na koroziju, odziva u širokom spektru, sposobnosti da izdrže visoke temperature, malih gabarita, visoke osjetljivosti. Optička detekcija je bazirana na promjene optičkih parametara poput talasne dužine i intenziteta svjetlosti, polarizacije i faze, zbog čega je i moguće napraviti četiri vrste senzora za mjerenje ovih veličina.

III.5 Hemijska metoda za mjerenje parcijalnih pražnjenja

Hemijske metode djeluju kao procedura provjere sastojaka i dekompozicije produkata u izolacionom materijalu, izazvane parcijalnim pražnjenjima. U tečnim izolacionim materijalima uglavnom se stvaraju gasni balončići, koji mogu biti izolovani i određeni gasno - uljnom analizom. Ukoliko se pražnjenja dogode u vazduhu, hemijske reakcije između komponenata vazduha akumuliraju NO_x i ozon. Određivanjem koncentracije ozona se dolazi do zaključaka o aktivnostima parcijalnih pražnjenja. Međutim, nedostatak hemijske procedure je integrativni karakter, koji ne dozvoljava opis trenutnog stanja opreme. Nije moguće odrediti prividnu količinu elektriciteta pojedinačnih parcijalnih pražnjenja niti lociranje izvora pražnjenja.

Trenutne tehnike koje se koriste za transformatore su bazirane na otkrivanju parcijalnih pražnjenja na osnovu hemijske analize iz uljnih i gasnih uzoraka. Dvije hemijske tehnike su trenutno prisutne: analiza rastvorenog gasa i tečna hromatografija visokih performansi.

- Prva metoda analizira akumulativnu zapreminu gasa proizvedenu djelovanjima parcijalnih pražnjenja.
- Druga metoda izbacuje nus produkte (kao što su glukoza) koji su proizvedeni degradacijom izolacije.

Za hemijska mjerenja, dovoljna količina nus produkata ili gasa mora biti prikupljena prije nego što analiza počne. Zbog toga, postoji mali vremenski period između analize i prikupljanja.

Hemijski metod istraživanja i mjerenja parcijalnih pražnjenja nije pogodan za on-line nadzor. Poput električnih, ni hemijske metode nijesu u stanju da pronađu lokaciju izvora parcijalnog pražnjenja u izolaciji VN opreme.

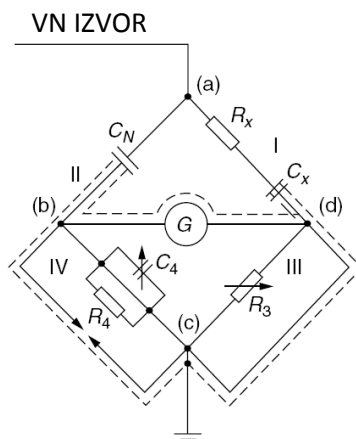
III.6 Mjerenje dielektričnih gubitaka i kapacitivnosti izolacije

Jedno od važnih svojstava svih dielektrika i izolacionih materijala je svojstvo polarizacije koje se opisuje kapacitetom i dielektričnim gubicima. Dielektrični gubici se kvantifikuju tangensom dielektričnih gubitaka. Dielektrični gubici i kapacitivnost dielektrika

su od velike važnosti za nove materijale zbog čega skoro sva visokonaponska oprema prije isporuke mora biti testirana. Razlozi za to su višestruki i obuhvataju kontrolu od prevelikih gubitaka tokom primjene testnih napona koji mogu da izazovu termalna oštećenja. Drugo, proizvođač opreme mora da zna vrijednosti koje obezbjeđuju informacije o kvalitetu iste.

Mjerenje kapacitivnosti i tangensa ugla gubitaka uspješno se realizuje preko visokonaponskog Šeringovog mosta. Prikaz Šeringovog mosta dat je na slici 3.10 [1].

Most mjeri kapacitivnost C_X i tangens ugla gubitaka kondenzatora ili bilo koje kapacitivnosti testnog objekta upoređujući kondenzator ispunjen gasom C_N koji ima zanemarujuće gubitke u širokom opsegu frekvencije i može biti izrađen za test napone do 1 MV.



Slika 3.10 Šeringov most

Grana 'X' se sastoji od testnog objekta, njegove otpornosti i kapacitivnosti koji se mjeri. Struja prednjači naponu za 90° u slučaju kada nema gubitaka, međutim zbog dielektričnih gubitaka struja će prednjačiti naponu za ugao $90^\circ - \delta$. Ova struja proizvodi pad napona na otporniku R_3 na niskonaponskoj strani mosta. Elementi R_4 i C_4 su tu radi balansiranja mosta.

Uslov balansa Šeringovog mosta podrazumijeva pokazivanje nulte vrijednosti struje kroz granu sa galvanometrom G :

$$R_3 C_X = R_4 C_N \quad (3.15)$$

$$R_X C_N = R_3 C_4 \quad (3.16)$$

Iz ovih jednačina moguće je odrediti :

$$C_X = C_N \frac{R_4}{R_3} \quad (3.17)$$

$$\text{tg} \delta = \omega C_4 R_4 \quad (3.18)$$

gdje je $\omega = 2\pi f$.

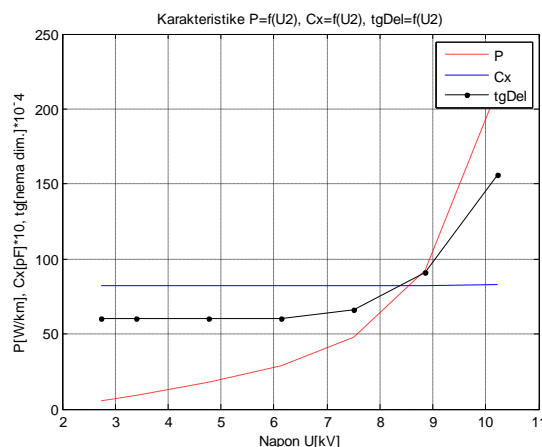
U praktičnoj primjeni R_3 je promjenljiva otpornost čija je vrijednost ograničena na 10 k Ω . R_4 je konstantno i iznosi $1000/\pi$, omogućavajući mjerenje $\tan \delta$, pod pretpostavkom da je frekvencija konstantna. C_4 je promjenljiva.

Balansni uslovi su dati smatrajući da je čista kapacitivnost C_X vezana serijski sa hipotetičkom otpornošću R_X , snaga koja se gubi u ovoj otpornosti simulira gubitak snage u stvarnom kondenzatoru. Gubitak snage u sistemu je moguće odrediti iz fazora napona i struje.

$$P = \omega \cdot C_x \cdot U^2 \cdot \text{tg}\delta \quad (3.19)$$

gdje je U - primijenjeni napon.

Testovi se rade u zavisnosti od testnog napona. Obje veličine, kapacitivnost i faktor dielektričnih gubitaka, moraju biti konstantne sa povećanjem napona, zbog svojstva izolacionih sistema koji su linearni i svaki nagli porast $\tan \delta$, predstavlja jonizaciono koljeno što je preliminarni pokazatelj parcijalnog pražnjenja. Na slici 3.11 dat je primjer grafika na osnovu mjerenja i određivanja početka parcijalnog pražnjenja na osnovu primijenjenog testnog napona [33].



Slika 3.11 Grafičko poređenje parametara koji ukazuju na pojavu parcijalnih pražnjenja

Ako se analizira karakteristika $\text{tg}\delta = f(U)$ vidi se da je tangens ugla gubitaka počeo naglo da raste u četvrtoj tački mjerenja, što znači da je vrijednost 6.1362 kV napon koji pokazuje da svako sljedeće podizanje napona izaziva parcijalno pražnjenje. Tačka u kojoj tangens ugla gubitaka počinje naglo da raste naziva se jonizaciono koljeno.

Karakteristika $P = f(U_2)$ jasno pokazuje da se gubici povećavaju sa podizanjem napona i pojavom parcijalnog pražnjenja.

Metoda se izvodi u laboratorijskim uslovima i pripada off-line metodama.

III.7 Poređenje različitih metoda parcijalnih pražnjenja u zavisnosti od režima rada

Ekonomska prednost on-line načina testiranja opreme na ozbiljnost parcijalnih pražnjenja naspram off-line je prepoznata na osnovu nepostojećih troškova transporta i isključenja opreme iz pogona. Štaviše, dijagnostički aparat on-line testiranja je uglavnom i jeftiniji kao i vremenski efikasniji od off-line dijagnostičkog aparata. Takođe, gabariti i snaga VN opreme teže da budu sve veći, zbog čega izgradnja laboratorija za VN off-line testiranja iziskuje ogromna sredstva. Glavni nedostatak on-line testiranja visokonaponske opreme je nemogućnost povećanja/smanjenja, tj. uopšteno mijenjanja testnog napona tokom dijagnostičkog testa. Promjena testnog napona tokom testiranja opreme na parcijalna pražnjenja jasno ukazuje pri kojem naponu je došlo do pojave parcijalnog pražnjenja i kada je došlo do prestanka parcijalnih pražnjenja.

U tranzicionom periodu prelaska sa off-line na on-line testiranje nije moguće uzeti neke originalne metodologije procjene parametara. Neki dijagnostički parametri gube smisao, i potrebno je razviti nove on-line dijagnostičke metode u zavisnosti od novih uslova testiranja. U off-line mjerenju parcijalnih pražnjenja metodologija evaluacije su bili prividna

količina elektriciteta, struja parcijalnog pražnjenja, frekvencija parcijalnog pražnjenja i sl. u zavisnosti od primijenjenog napona. U on-line mjerenju, vrijednost napona je konstantna i radi se pod radnim naponom. Međutim, nove zavisnosti se pojavljuju, tj. javljaju se promjene dijagnostičkih parametara tokom operacionog perioda. Upravo zbog ovih promjena je potrebno razviti nove metodologije vezane za promjenu tih parametara.

Ukoliko se pažnja obrati na evaluaciju dobijenih rezultata iz off-line i on-line testiranja, može se doći do zaključka da se još uvijek gleda sa skepticizmom na on-line testiranje, s obzirom da su softveri i alati za procjenu i analizu dobijenih rezultata u on-line testiranju izuzetno komplikovani, dok su rezultati dobijeni za vrijeme off-line testiranja pouzdani. Ovo je glavni razlog zbog kojeg on-line testiranje još uvijek treba da napreduje. Tokom on-line testiranja neophodno je smanjiti broj dijagnostičkih parametara na minimum, međutim ovaj nedostatak može biti prevaziđen činjenicom da je on-line testiranje dostupno tokom dužeg vremenskog perioda.

III.8 Prednosti testiranja

Testiranje parcijalnih pražnjenja će obezbijediti korisniku jedne ili više od sljedećih prednosti [19]:

- Izbjegavanje nepotrebnih premotavanja u starijim mašinama povećavajući operativne sate istih;
- Izbjegavanje neočekivanih ispada statorskog namotaja i povećavanje vremena između isključenja;
- Pronalaženje i prepoznavanje problema izolacije na starijim aparatima;
- Pronalaženje i prepoznavanje problema u izolaciji novih VN aparata i opreme koje mogu biti još uvijek pod garancijama;
- Pristupanje i prepoznavanje kvaliteta održavanja opreme prije i poslije testiranja;
- Upoređivanje rezultata sličnih mašina radi fokusiranja održavanja na one sa višim nivoom parcijalnih pražnjenja;
- Identifikovanje specifičnih ispada radi omogućavanja korektivnih akcija;
- Neke osiguravajuće kompanije prepoznaju značaj testiranja parcijalnih pražnjenja u VN opremi i sa tim u vezi daju popuste na istu;
- Poboljšanje cjelokupne pouzdanosti i sigurnosti VN opreme u postrojenjima;
- Postizanje svega navedenog dok je oprema još uvijek u pogonu (on-line testiranje) i sl.

Sve su češći slučajevi u kojima korisnici napuštaju off-line i prelaze na on-line testiranja parcijalnih pražnjenja. Razlog tome je i pretpostavka da mašina koja se nalazi u pogonu je u operativnom stanju i ne postoji opravdani razlog za njeno isključenje. Stoga se preporučuje da se uradi on-line testiranje i ukoliko se utvrdi opravdano postojanje problema kod aparata ili opreme da se sprovedu dodatna off-line testiranja kako bi se potvrdilo i dalo 'drugo mišljenje' u testiranju opreme.

Veoma je bitno za korisnike da znaju ili da steknu makar ideju o stanju opreme koja je u upotrebi i u pogonu, zbog čega je navedeno on-line testiranje opravdano. Takođe, veoma je bitno da korisnik zna da li postoje problemi ili ne u opremi. Neke mašine i oprema su poznate po veoma visokoj pouzdanosti zbog svog dizajna, proizvođača i sl., dok na drugoj strani postoje uređaji nižeg kvaliteta. Međutim, poslije izvjesnog rada sve mašine dostignu svoj vrhunac operativnih časova, zbog čega moraju biti kontrolisane i ne smije se čekati na njihov 'slučajni' ispad. Inženjeri koji koriste testiranja parcijalnih pražnjenja će biti u mogućnosti da pronađu probleme tokom operativnog rada mašine, kao i da prepoznaju opremu koja je u dobrom stanju što im omogućava da produže vrijeme između većih ispada. On-line testiranje je zapravo jedino testiranje koje omogućava sve navedeno.

IV MJERNI TRANSFORMATORI

Za mjerenje visokih napona i struja koriste se mjerni transformatori (MT). Osnovna podjela MT je na naponske i strujne MT. Naponski mjerni transformatori služe da visoki napon transformišu na napon na koji su dimenzionirani uređaji za mjerenje i zaštitu (100 V). Strujni mjerni transformatori transformišu struju velike jačine u male vrijednosti pogodne za mjerenje i zaštitu (1 ili 5 A). Logičnost upotrebe MT se ogleda u neekonomičnosti direktnih mjerenja i proizvodnje mjernih instrumenata koji bi se koristili u direktnim mjerenjima visokih napona i struja. Bilo strujni, ili naponski, MT se sastoje od primarnog i sekundarnog namotaja koji su međusobno izolovani i magnetnog jezgra. Prednosti korišćenja MT su višestruki i prepoznaju se po sljedećim benefitima [73]:

- Mjerni instrumenti i uređaji se pomoću MT izoluju od visokih napona u mjernom krugu, njihova konstrukcija se pojednostavljuje, gabariti se smanjuju, jer ih ne treba direktno sprežati sa naponom visoke mreže. Upotrebom MT obezbijedena je sigurnost osoblja koje rukuje mjernim instrumentima;
- Mjerene struje i naponi naznačenih nivoa se transformišu na uvijek iste, standardima utvrđene vrijednosti (na struje 1A i 5A, napone 100 V, 200 V, $100/\sqrt{3}$ V ili $200/\sqrt{3}$), što smanjuje broj potrebnih vrsta mjernih, zaštitnih i regulacionih instrumenata i aparata, što znači da je omogućena serijska proizvodnja, a samim tim i smanjeni troškovi iste;
- Mjerni instrumenti i aparati se štite od štetnih termičkih i dinamičkih uticaja dejstva struja kratkog spoja;
- Ako se udalje od mjernog kruga, na mjerne instrumente neće uticati snažna električna i magnetna polja i sl.

Naponski MT se spaja paralelno sa mrežom i ima veoma mali pad napona, što znači da kroz primarni namotaj teče jako mala struja. Strujni MT se vezuje redno sa mrežom, što znači da kroz njega teče puna struja potrošača, ali se takođe zahtijeva mali pad napona na njegovom primaru, što znači da otpornost strujnom MT mora biti jako mala. Takođe zahtijeva se da sekundarni napon naponskog MT bude u fazi sa primarnim, isto važi i za strujne MT. Ovi kriterijumi moraju biti ispunjeni zbog priključka drugih mjernih uređaja na MT (brojila, vatmetra, fazometra).

Veoma bitno za MT je da se uprkos transformaciji VN na niski napon zadrži tačnost kako bi se ta vrijednost mogla pouzdano transformisati i dalje koristiti. Strujni transformatori moraju prenositi na sekundar primarne veličine u samom trenutku kvara, u prelaznom periodu kratkog spoja ili drugog poremećaja da bi se adekvatno odgovorilo sa relejnom zaštitom. Greške zbog ovakvih stanja mogu uzrokovati havarije u postrojenjima i na VN opremi. Veza između korisnika koji određuje vrstu mjerenja ili zaštite i proizvođača postoji preko IEC standarda koji definišu karakteristike mjernih transformatora [67-71].

Nazivne vrijednosti MT su određene njihovom pozicijom u postrojenjima, naponskim nivoom, vrijednošću struja spojeva, prenosnim odnosom i namjenom (zaštita ili mjerenje).

IV.1 Zamjenska šema

Da bi se MT moglo mjeriti potrebno je da se na osnovu sekundarnog napona odredi koliki je primarni napon/struja, pri uslovu da je transformacija napona/struje u tačnom odnosu. Odnos primarnog i sekundarnog napona je konstantan:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4.1)$$

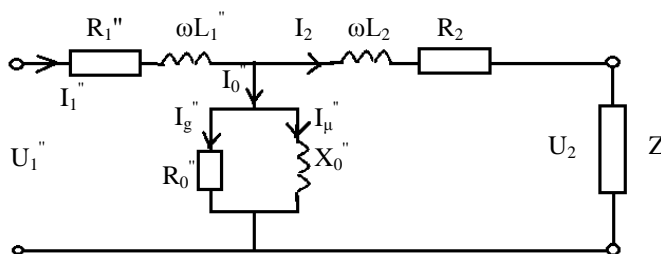
gdje su U_1 i U_2 naponi primara i sekundara MT, a N_1 i N_2 broj namotaja primara i sekundara respektivno. Dok je strujni odnos primarne i sekundarne struje dat formulom 3.2:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (4.2)$$

Shodno tome da ne postoji idealni transformator, postoje gubici i na primaru i na sekundaru:

- aktivni otpor primara R_1 ,
- aktivni otpor sekundara R_2 ,
- reaktivni gubici primara $X_1 = \omega L_1$,
- reaktivni gubici sekundara $X_2 = \omega L_2$,
- aktivna komponenta međusobne impedanse primara i sekundara R_0 ,
- reaktivna komponenta međusobne impedanse primara i sekundara X_0 .

Obzirom na gubitke u primaru i sekundaru dolazi se do zamjenske šeme transformatora (slika 4.1).



Slika 4.1 Zamjenska šema transformatora

Svi parametri zamjenske šeme su svedeni na sekundarnu stranu transformatora. Svođenje se vrši množenjem naponskim/strujnim odnosom u slučaju napona i struja, odnosno kvadratom odnosa napona/struja u slučaju impedansi.

Primarni napon i struja svedeni na sekundar su:

$$U_1'' = U_1 \frac{N_2}{N_1} \quad (4.3)$$

$$I_1'' = I_1 \frac{N_1}{N_2} \quad (4.4)$$

Fazor struje u međusobnoj impedansi, aktivna komponenta primara, međusobna aktivna komponenta, reaktivna komponenta primara i međusobna reaktivna komponenta svedene na sekundar su date sljedećim formulama:

$$I_0'' = I_0 \frac{N_1}{N_2} \quad (4.5)$$

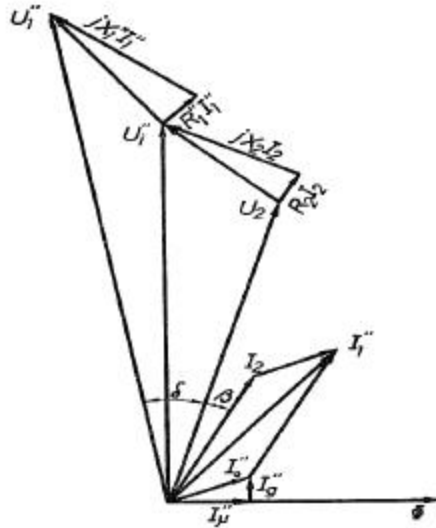
$$R_1'' = R_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (4.6)$$

$$R_0'' = R_0 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (4.7)$$

$$X_1'' = X_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (4.8)$$

$$X_0'' = X_0 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (4.9)$$

Na osnovu zamjenske šeme je dat vektorski dijagram transformatora na slici 4.2.



Slika 4.2 Vektorski dijagram transformatora

Na fazorskom dijagramu se jasno vidi indukovani napon na sekundaru tokom toka fluksa Φ , zajedničkim za primar i sekundar. Indukovani napon je dat po formuli:

$$u_i'' = \omega N_2 \Phi \cos \omega t \quad (4.10)$$

$$\Phi = S_{Fe} B \quad (4.11)$$

$$U_i'' = 4.44 f N_2 S_{Fe} B \quad (4.12)$$

gdje su: B - jačina magnetne indukcije, S_{Fe} površina poprečnog presjeka jezgra, f - frekvencija.

Za održavanje toka magnetnog fluksa potrebna je struja magnećenja I_0'' , koja se dijeli na aktivnu (I_g'') i reaktivnu komponentu I_μ'' :

$$I_g'' = \frac{U_i''}{R_0} \quad (4.13)$$

$$I_\mu'' = \frac{U_i''}{jX_0} \quad (4.14)$$

IV.2 Strujni mjerni transformatori

Tačnost strujnih transformatora za zaštitu definisana je [76]:

- nazivnom primarnom graničnom strujom tačnosti,
- nazivnom primarnom strujom,
- nazivnom sekundarnom strujom,
- klasom tačnosti,
- graničnim faktorom tačnosti.

Nazivnom primarnom i sekundarnom strujom definisan je i nazivni odnos transformacije (formula 4.15). Zadatak strujnog transformatora je transformisanje mjerene struje u stalnom odnosu i bez faznog pomjeraja na vrijednost prilagođenu mjernim instrumentima i uređajima zaštite.

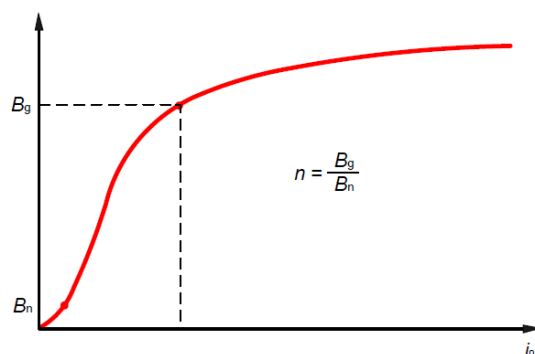
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = k_n \quad (4.15)$$

Strujna greška kod strujnih MT se računa po formuli:

$$p_i = \frac{k_n I_2 - I_1}{I_1} 100\% \quad (4.16)$$

dok je fazna greška definisana uglom između primarne i sekundarne struje.

Granični faktor tačnosti (ALF) je odnos nazivne primarne granične struje tačnosti i nazivne primarne struje. Ustaljena oznaka (starija literatura) za granični faktor tačnosti ili prekostrujni broj je 'n'. Standardne vrijednosti graničnog faktora tačnosti su 5, 10, 15, 20 i 30. Graničnim faktorom tačnosti približno je određena indukcija pri nazivnoj struji i opterećenju u odnosu na indukciju koljena na krivoj magnećenja magnetskog kruga (slika 4.3) [72].



Slika 4.3 Karakteristika magnetnog jezgra strujnog transformatora

B_n odgovara nazivnoj struji primara, B_g - indukcija koja odgovara nazivnoj primarnoj graničnoj struji transformatora.

Ponašanje strujnog MT za mjerenje u slučajevima struja većih od nazivne definisana je nazivna sigurnosna struja I_{1s} koja se definiše relacijom:

$$\frac{I_{2s}}{I_{2n}} \leq 0.9 \frac{I_{1s}}{I_{1n}} = 0.9 F_S \quad (4.17)$$

gdje je F_S sigurnosni faktor, za koga su karakteristične vrijednosti 5 i 10.

Prilikom tranzijentnih poremećaja MT je izložen strujama mnogo većim od nominalne, zbog čega moraju da izdrže termička i dinamička naprezanja. Da bi ostali neoštećeni za strujne MT su definisane:

- Nazivna termička struja kratkog spoja, I_{th} , je efektivna vrijednost primarne struje koju transformator izdrži tokom 1s, a da ne pretrpi značajnija oštećenja pri kratkospojenom sekundaru. Ukoliko kratak spoj traje duže, nova termička granica se određuje relacijom:

$$I'_{th} = \frac{I_{th}}{\sqrt{t}} \quad (4.18)$$

Standardne efektivne vrijednosti, izražene u kA su 6.3 - 8 - 10 - 12.5 - 16 - 20 - 25 - 31.5 - 40 - 50 - 63 - 80 - 100.

- Dinamička granična struja I_{din} je nazivna vrijednost struje koju strujni MT može izdržati pri kratkospojenom sekundaru, a da ga ne oštete sile koje ta struja uzrokuje.

Da bi strujni MT zadovoljavali klase tačnosti njihove greške moraju zadovoljavati vrijednosti iz tabele 1 [72].

Tabela 1. Dopuštene greške strujnih MT za mjerenje

strujna greška $\pm p_i$ %							fazna greška $\pm \delta_i$ [min]					
Klasa tačnosti	% nazivne struje											
	1	5	20	50	100	120	1	5	20	50	100	120
0,1	-	0,4	0,2	-	0,1	0,1	-	15	8	-	5	5
0,2	-	0,7	0,3	-	0,2	0,2	-	30	15	-	10	10
0,2s	0,7	0,3	0,2	-	0,2	0,2	30	15	10	-	10	10
0,5	-	1,5	0,7	-	0,5	0,5	-	90	45	-	30	30
0,5s	1,5	0,7	0,5	-	0,5	0,5	90	45	35	-	30	30
1	-	3	1,5	-	1	1	-	180	90	-	60	60
3	3					3	nijesu specificirane					
5	5					5	nijesu specificirane					

IV.3 Naponski mjerni transformatori

Visoki naponi su transformisani u napone pogodne za mjerenje i zaštitu upotrebom naponskih MT. Stoga, osnovna uloga naponskog MT je da primarne visoke napone transformiše u sekundarne niske napone usklađene sa naznačenim vrijednostima napona mjernih instrumenata, te da pouzdano odvoji te uređaje od VN mreže.

Primarni namotaj naponskog transformatora se priključuje paralelno sa mrežom na kojoj se mjeri napon. Pri tome struja kroz njegov primarni namotaj mora biti znatno manja od nazivne. Takođe, primarni namotaj se izoluje od sekundarnog.

Nazivni odnos transformacije je dat relacijom:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k_n \quad (4.19)$$

Idealni naponski transformator bi transformisao bez gubitaka, međutim to nije slučaj u praksi, pa je naponska greška:

$$p_u = \frac{k_n U_2 - U_1}{U_1} 100\% \quad (4.20)$$

Fazna greška δ_u je fazna razlika između vektora primarnog i sekundarnog napona. Ona je pozitivna ako je vektor sekundarnog napona vremenski ispred vektora primarnog napona.

Naponsku i faznu grešku naponskog transformatora uzrokuju primarna i sekundarna struja koje stvaraju padove napona na primarnom i sekundarnom aktivnom otporu R_1 i R_2 te reaktansama X_1 i X_2 .

Koristeći se vektorskim dijagramom naponskog transformatora na slici 4.2, te uz pretpostavku da je nazivni odnos transformacije jednak odnosu broja zavoja namotaja, pa se naponska greška može izraziti kao:

$$p_u = \frac{k_n U_2 - U_1}{U_1} 100\% = \frac{U_2 - U_1''}{U_1''} \quad (4.21)$$

Naponska greška je razlika daljina vektora U_2 i U_1'' , fazna greška ugao između njih. Naponska greška je pozitivna ako je amplituda vektora U_2 veća od amplitude vektora U_1'' .

Mjerna klasa tačnosti jednaka je dopuštenoj apsolutnoj naponskoj greški u procentima pri naponu koji je u granicama od $0,8 U_{n1}$ do $1,2 U_{n1}$ i za opterećenja od 25 do 100 % nominalnog uz induktivni faktor snage 0,8 (tabela 2) [73].

Tabela 2. klase tačnosti naponskih MT

Klasa tačnosti	Naponska greška [$\pm\%$]	Fazna greška [min]
0.1	0.1	5
0.2	0.2	10
0.5	0.5	20
1	1	40
3	3	nije definisano

V PROGRAM ZA OBRADU REZULTATA MJERENJA I MATEMATIČKI MODEL ZA ANALIZU DOBIJENIH PODATAKA

Analiza aktivnosti parcijalnih pražnjenja je nekompletna i neupotrebljiva bez obrade i sređivanja dobijenih mjerenja. S obzirom na činjenicu da se u ovom radu koriste EM senzori za detekciju EM talasa na veoma visokim frekvencijama logično je zaključiti da su takvi signali opterećeni šumovima. Tako dobijeni podaci nijesu podobni za evaluaciju podataka i sprovođenje mjera. Da bi podaci koje se mjere bili relevantni i upotrebljivi moraju se sprovesti akcije otklanjanja smetnji iz okoline zbog čega je razvijen program. Prvobitno, smetnje se iz okoline snimaju, a zatim se ti podaci u daljim obradama podataka koriste za čišćenje od smetnji. Programski paket koji se koristi u ovom radu za otklanjanje smetnji na izvršenim mjerenjima na MT u CGES-u je PDPRO DUA [19].

Nakon obrade i sređivanja izvršenih mjerenja dobijeni su konkretni podaci na osnovu kojih je moguće zaključiti i pravilnom analizom izvršiti konkretne preventivne i korektivne akcije. Na osnovu ovako dobijenih podataka napravljen je matematički model za potrebe i završnu analizu stanja izolacije MT. Matematički model je realizovan u grafičkom korisničkom interfejsu u matematičkom programu MATLAB. Za realizaciju ovog programa potreban je pravilan unos podataka u odgovarajuća polja. Programski paket za analizu stanja izolacije na osnovu dobijenih podataka je realizovan za potrebe ovog rada. Kod programa je dat u prilogu.

Predstavljanje i instrukcije za korišćenje programskog paketa za obradu izvršenih mjerenja PRPRO-DUA i matematičkog modela za evaluaciju i analizu tako dobijenih podataka biće dati u ovom poglavlju.

V.1 PDPRO - DUA softverski paket za analizu podataka

PDPRO - DUA je razvijeni softverski paket za analizu prikupljenih podataka dobijenih snimanjem parcijalnih pražnjenja. U softverskom paketu je ugrađena baza podataka koja pomaže u određivanju nivoa ozbiljnosti i drugačije tipove parcijalnih pražnjenja u prekidačkim uređajima, suvim i uljnim transformatorima. Karakteristike i osobine testiranja su ugrađene u softveru. Prikupljeni podaci se čiste od šumova veoma kompleksnim matematičkim aparatom koji je takođe ugrađen u programski paket i razvijen je od strane HOESTAR tehnologije za parcijalna pražnjenja. HOESTAR tehnologija je specijalizovana kompanija iz Singapura [19].

Program omogućava podešavanje uređaja za prikupljanje parcijalnih pražnjenja i određivanje broja mjerenja uključenih u analizu i otklanjanje šumova iz izvršenih mjerenja.

Princip rada programa je predmet ovog potpoglavlja.

Za pokretanje analize podataka prikupljenih mjerenjima potrebno je podesiti niz funkcija u zavisnosti od originalnog izgleda signala kao i unaprijed zadate instrukcije preporučene od strane kompanije koja je izradila softver.

Na početku se pokreće program sa kompjutera.

Kada je program pokrenut na ekranu se pojavljuje prozor za podešavanje dat na slici 5.1. Na istoj slici pod nazivom 'load data' se nalazi polje za podešavanje broja fajlova u kojima su smještena mjerenja prilikom prikupljanja istih (mjerenja koja su prikupljena su smještena u najviše 10 tekstualnih fajlova - '10 sets').

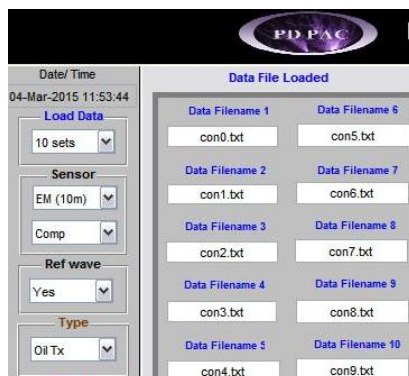
Zatim se bira tip elektromagnetnog senzora koji je korišćen na kanalu CH0 (kanal za snimanje parcijalnih pražnjenja). Podešava se dužina kabla elektromagnetnog senzora koji je korišćen za spajanje EM senzora sa opremom ('EM (10m)'). U CGES-u dostupne su različite dužine kabla za spajanje EM senzora sa opremom.

Pod poljem senzor, ukoliko na originalnoj karakteristici (original PD plot - slika (5.2)) jačina parcijalnih pražnjenja prelazi 0.5V senzor se podešava na 'comp', u suprotnom 'no comp'.

Pod nazivom 'Ref wave' daje se informacija o tome da li postoji, tj. da li se pojavila referentna karakteristika.

Pod nazivom 'Type' korisnik podešava tip opreme koja je testirana. U sklopu ove opcije dostupne su tri mogućnosti:

- suvi,
- uljni transformator ,
- prekidački uređaji.

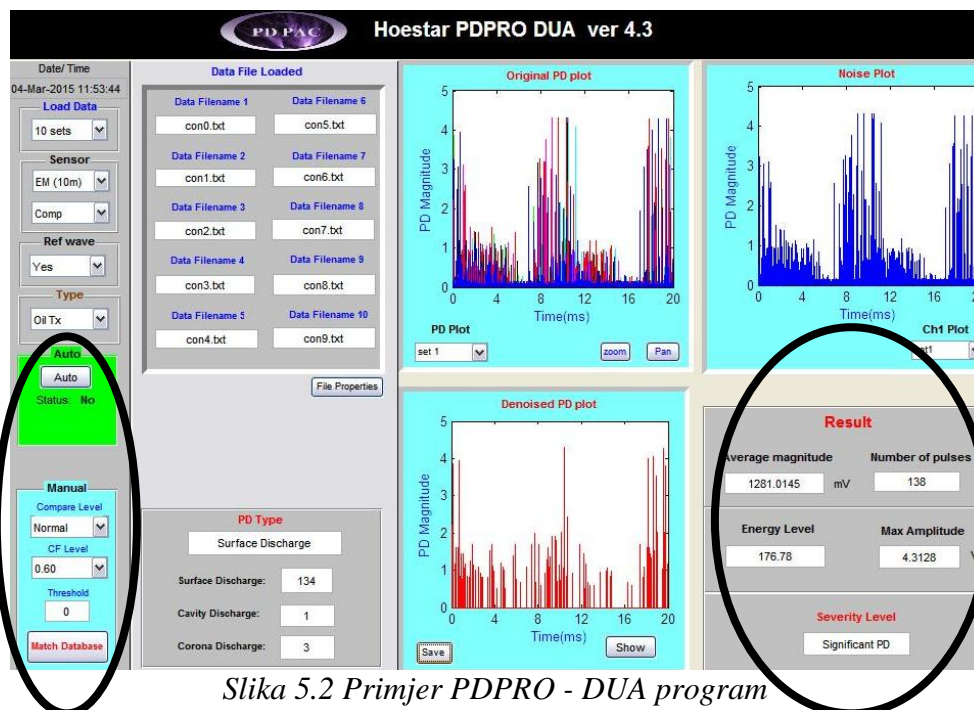


Slika 5.1 Podešavanje smjernica za upotrebu snimljenih podataka

Postoje dva tipa operacija (slika 5.2):

- automatski (auto) i
- ručni (manual) tip.

'Auto' tip se koristi ukoliko korisnik želi brzu analizu prikupljenih podataka. Podešavanja u ovom tipu obrade podataka su bazirana na predefinisanim softverskim parametrima. U 'manual' tipu obrade podataka postoji veća fleksibilnost tako što korisnik može da podešava različite nivoe agresivnosti u očitavanju parcijalnih pražnjenja.



Slika 5.2 Primjer PDPRO - DUA program

Ukoliko se koristi 'manual' tip, 'Compare level' se postavlja na 'Normal' ili na 'Agress' tip (ovakav tip se koristi ukoliko je visok nivo šuma).

'CF' level' predstavlja nivo striktnosti u obradi podataka, sa tim što ukoliko je viši nivo 'CF level' striktnost je veća.

'Treshold' se prema uputstvu podešava na '0'. Konačni rezultati su dati na slici 5.2 u donjem desnom uglu pod nazivom 'Result'. U slučaju da 'manual mode' pokaže broj pulsacija viši od 80, 'Compare level' se podešava na 'Agress' tip, zbog čega će rezultati prikazati manji broj pulsacija parcijalnih pražnjenja nakon pritiska na 'Match database'.

U označenom desnom dijelu pod naslovom 'Result' mogu se vidjeti sljedeći podaci:

- 'Average magnitude' - označava prosječnu jačinu parcijalnih pražnjenja.
- 'Number of impulses' - označava broj pulsacija parcijalnih pražnjenja.
- 'Max amplitude' - predstavlja maksimalnu vrijednost napona koju je proizvela jedna pulsacija parcijalnog pražnjenja.
- 'Energy level' - predstavlja nivo energije oslobođene u toku snimanja parcijalnih pražnjenja.
- 'Severity level' - predstavlja ozbiljnost parcijalnih pražnjenja na osnovu dobijenih rezultata.

Na karakteristikama koje su date na slici 5.2 su predstavljene originalna karakteristika (Original plot - kanal 1) snimljena EM senzorom i signal koji se koristi kao referentni (Noise plot - kanal 2) pomoću kojeg se otklanjaju šumovi dobijeni na originalnoj karakteristici.

Na slici 5.3 su prikazani tipovi parcijalnih pražnjenja i broj pulsacija pojedinačnih tipova pražnjenja koji su dobijeni obradom podataka softverom PDPRO - DUA. Tipovi parcijalnih pražnjenja dobijeni programom su podijeljeni na:

- površinska,
- kavitaciona pražnjenja i
- koronarna pražnjenja.



Slika 5.3 Tip parcijalnih pražnjenja

Ovako dobijeni podaci pogodni su za korišćenje, unošenje u matematički program i konačnu analizu. Za njih je urađena osnovna tablica za ozbiljnost parcijalnih pražnjenja u izolaciji ispitivane opreme, koja je ujedno i ugrađena u bazu podataka PDPRO-DUA programa.

V.2 Smjernice za nivo ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja u PD-PAC uređaju

Vrijednosti podataka dobijenih u PDPRO-DUA softveru se klasifikuju prema različitom nivou ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja. Nivo ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja se odnosi na stadijum, tj. period razvitka aktivnosti parcijalnih pražnjenja u izolaciji MT.

Neke od klasifikacija ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja su prikazane u tabeli 3 [19].

Tabela 3. Nivoi ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja

q (prosječna jačina, mV)	N (broj PD pulsacija)	Klasifikacija ozbiljnosti
$q \geq 2000$ mV	$N \geq 300$ pulsacija	Visoka
$1000\text{mV} \leq q < 2000$ mV	$100 \leq N < 300$ pulsacija	Značajna
$q \geq 500$ mV	$15 < N \leq 55$ pulsacija	Granica 1
$500\text{mV} \geq q$	$55 < N \leq 120$ pulsacija	Granica 2
$500\text{mV} \leq q < 1000$ mV	$45 \leq N < 120$ pulsacija	Mala
$q < 500$ mV	$N < 45$ pulsacija	Normalna
$q < 270$ mV	$N < 8$ pulsacija	Normalna

Prikazani nivoi ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja mogu biti uzete kao vodič. Preporuka je da korisnik ovog uređaja razvije sopstvenu tabelu za ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja vezanu za opremu koja se testira, ali nije obavezno s obzirom da vodič ozbiljnosti pražnjenja sugerira dovoljnu tačnost. Ozbiljnost parcijalnih pražnjenja vezana je za prosječnu jačinu i broj impulsa parcijalnih pražnjenja koja se dešavaju u VN opremi.

Nivo ozbiljnosti 'Normalna' upućuju na stabilno stanje VN opreme koja je testirana.

Nivo ozbiljnosti 'Mala' upućuje na minimalne aktivnosti parcijalnih pražnjenja u VN opremi i da zahtijeva servis.

Nivo ozbiljnosti 'Granica 1 i 2' zahtijeva nadziranje uslova rada opreme kao i same opreme narednih tri do šest mjeseci. Ponekad ovakva indikacija parcijalnih pražnjenja uzrokuje ozbiljnije promjene u izolaciji VN opreme poslije kratkog vremena.

Nivo ozbiljnosti 'Značajna' i 'Visoka' zahtijeva hitno isključenje opreme iz pogona radi laboratorijskih ispitivanja i servisa VN opreme.

V.3 Matematički model za evaluaciju dobijenih podataka

Posmatrajući tabelu koja je data kao vodič za ozbiljnost parcijalnih pražnjenja može se zaključiti da ne postoji tačna granica između različitih nivoa ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja. Može se reći da je ovo mana programa PDPRO-DUA.

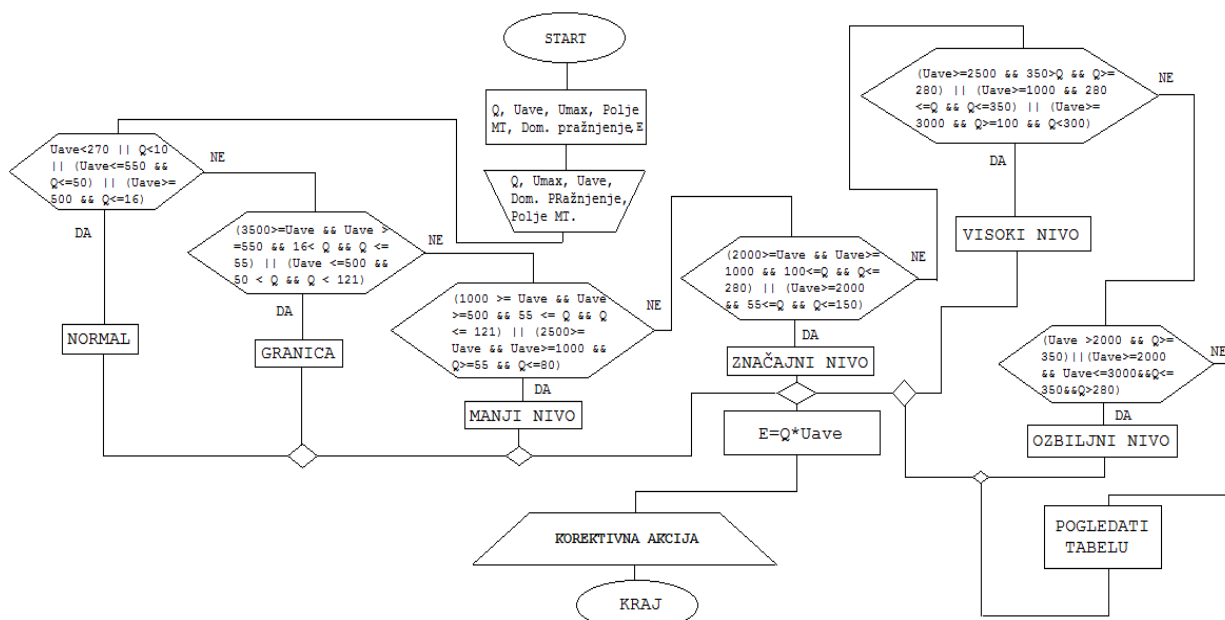
Iskustvom potkrijepljenim velikim brojem prikupljenih i obrađenih podataka je dokazano da u najvećem broju slučajeva nije moguće na osnovu tabele jasno odrediti nivo ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja. Samim tim takođe nije moguće preduzeti konkretne akcije sprečavanja daljih aktivnosti u cilju sprečavanja napredovanja istih. S obzirom da i proizvođač predlaže stvaranje sopstvenih smjernica za čitanje ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja na osnovu dobijenih podataka stvoren je matematički model koji se oslanja na tabelu 3. Matematički model je upotpunjen pokazao se kao dobra smjernica za dalju analizu. Za obrađene podatke model izbacuje konkretne akcije koje treba da budu preduzete u svim pojedinačnim slučajevima posmatranih MT.

Programom je obuhvaćeno određivanje ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja. Kao smjernica ovom programu korišćena je tabela 3 (potpoglavlje V.2). Međutim, kako i same smjernice nalažu, ova tabela se koristi kao inicijalna ideja o interpretaciji dobijenih podataka. Uzimajući u obzir tako postavljene stvari, stvorene su drugačije granice ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja. Pored ovog proračuna, data je mogućnost izračunavanja energetskog nivoa na osnovu čitanja broja pulsacija i srednje jačine napona parcijalnih pražnjenja.

Na slici 5.4 dat je algoritam za proračun ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja na osnovu unešenih podataka. Algoritam je, takođe zbog bolje preglednosti dat u prilogu na CD - u.

Korisnik definiše podatke algoritma. Podaci koji su potrebni za unošenje u algoritam se čitaju iz programa PDPRO-DUA. Očitani podaci iz PDPRO-DUA programa potrebni za realizaciju ovog matematičkog modela su:

- prosječna jačina parcijalnih pražnjenja izražena u mV,
- broj detektovanih pulsacija,
- maksimalna amplituda,
- tip dominantnog pražnjenja.

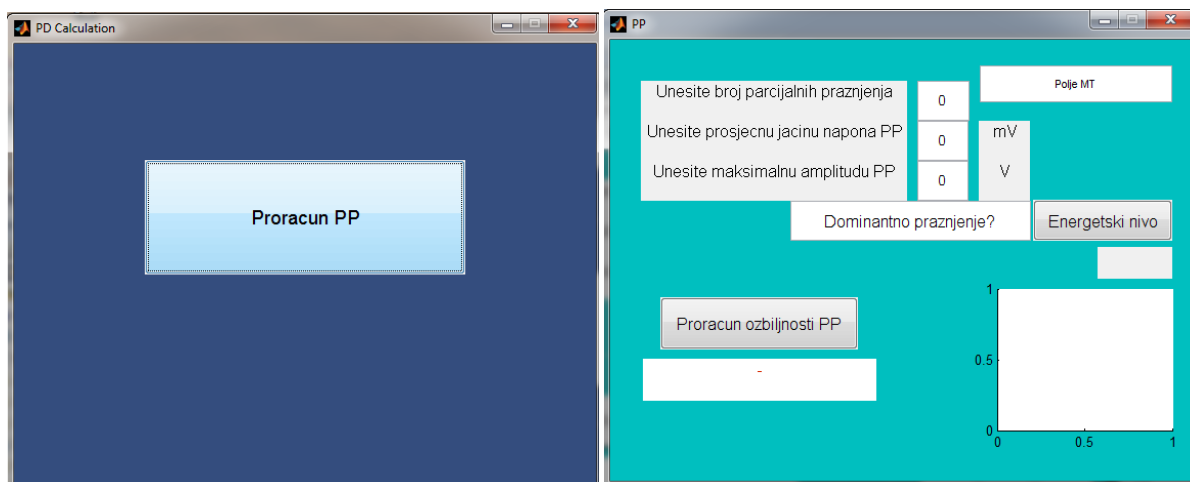


Slika 5.4 Algoritam za procjenu ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja u izolaciji MT

Nakon unosa podataka algoritam provjera uslove za različite nivoe ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja. Uslovi koji su upisani u algoritam daju interpretaciju dobijenih podataka. Samom upotrebom algoritma moguće je izvršiti konačnu analizu dobijenih podataka i na osnovu korektivne akcije omogućeno je reagovanje na terenu.

Na osnovu provjere uslova moguće je dobiti korektivne akcije.

Realizacija algoritma sa slike 5.4 je sprovedena u programskom paketu MATLAB, preko Graftic User Interface-a (GUI-a). Izgled prozora programa dat je na slici 5.5 (a i b).

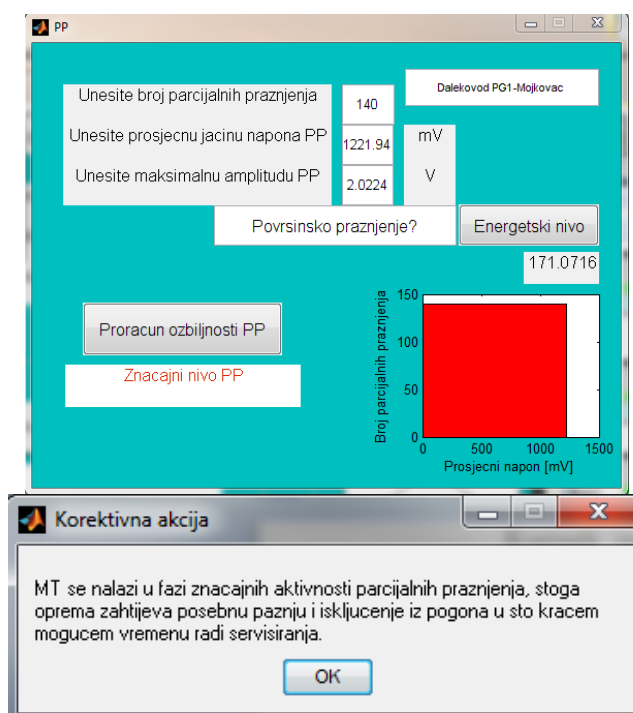


Slika 5.5 GUI a) Program za start programa, b) Prozor za unos podataka

Početak programa se daje pokretanjem programskog paketa MATLAB. Pritiskom na dugme 'Proracun PP' omogućeno je otvaranje prozora za unos već pomenutih podataka. Uslov tačnosti i realizacije programa je uslovljeno unošenjem logički tačnih i preciznih podataka.

Korisnik unosi podatke u označena polja, a pritiskom na dugmad programa isti se realizuje i izbacuje potrebne rezultate. Za određene usvojene podatke, korisnik pritiskom na odgovarajuće dugme dobija željene vrijednosti. Pritiskom na dugme 'Proracun ozbiljnosti PP' korisnik dobija nivo ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja. Istovremeno prozor sa predloženim korektivnim akcijama za MT se prikazuje (slika 5.6).

Programom je omogućeno i unošenje podataka o mjestu MT, tj. o poziciji MT u trafostanici.



Slika 5.6 Primjer realizacije programa pritiskom na dugme 'Proracun ozbiljnosti PP' i 'Energetski nivo'

Pritiskom na dugme 'Energetski nivo' se dobija procijenjeni energetski nivo parcijalnih pražnjenja na osnovu broja i prosječne jačine napona parcijalnih pražnjenja (slika 5.6). Crvenom bojom je prikazana površina koja označava nivo energije oslobođene tokom aktivnosti parcijalnih pražnjenja za unešene podatke.

Problem matematičkog modela je što i pored proširenih uslova ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja, postoji prostor za još striktnijim granicama između nivoa. Upravo zbog toga može se desiti da u konkretnim slučajevima nije moguće na osnovu istog odrediti korektivnu akciju i nivo ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja na osnovu unešenih podataka. Kako se može vidjeti sa algoritma (slika 5.4), korisnik se u slučaju nezadovoljavanja granica unutar algoritma vraća na početak, tj. na tabelu 3 i algoritam. Zbog toga se korisnik preko poruke u prozoru 'korektivna akcija' obavještava i upućuje na algoritam i tabelu. S obzirom da je program proširen zbog nemogućnosti korisnika da pomoću tabele utvrdi tačan nivo, upućivanje ka tabelu i algoritmu znači mogućnost za proširenje programa na osnovu novih granica. Tako da u slučajevima u kojima dođe do unosa podataka na osnovu kojih se ne može odrediti nivo ozbiljnosti, program vraća korisnika da shodno svom iskustvu, tabeli i algoritmu odluči kojem nivou ozbiljnosti pripadaju određeni podaci o parcijalnim pražnjenjima. Ujedno se

može dostaviti informacija o nemogućnosti programa da odredi korektivnu akciju, kako bi se proširila baza uslova ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja u samom programu.

V.4 Korektivne akcije na osnovu primjene matematičkog modela

Primjenom matematičkog modela za procjenu nivoa ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja na osnovu unešenih podataka moguće je sprovesti korektivne akcije. Akcije sprovedene u cilju poboljšanja performansi stanja MT su predložene na osnovu tipa parcijalnih pražnjenja i nivoa procijenjene ozbiljnosti. Pored toga, vođeno je računa o ekonomičnosti djelovanja u slučaju nivoa 'Granica' i 'Manji nivo' ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja, zbog čega su u prijedlogu akcija dati savjeti za monitoring opreme u zavisnosti od dominantnog tipa parcijalnih pražnjenja.

Primjenom ovog matematičkog modela i primijenjenog programa su dati prijedlozi akcija za sve MT uključene u ovo istraživanje kako bi se izvršila konačna analiza stanja izolacije MT.

Pored stanja izolacije obraćena je i pažnja na raspodjelu prosječne jačine parcijalnih pražnjenja u odnosu na maksimalnu jačinu pojedinačnog parcijalnog pražnjenja.

Ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja su klasifikovani u šest različitih nivoa prema dobijenim ulaznim podacima. Nivoi ozbiljnosti su usklađeni sa tabelom 3 [19]. Međutim korektivne akcije su modifikovane i usklađene sa zahtjevima CGES i inženjerima sa dugogodišnjim iskustvom u rukovanju ovom opremom.

U zavisnosti od nivoa ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja prijedložene su sljedeće korektivne akcije:

1. 'NORMALAN' - 'Oprema je u dobrom stanju i osigurana je sigurnost u pogledu operativnosti. Korisniku se savjetuje isključenje opreme jedino u slučaju planiranog godišnjeg remonta ili kalibracije.'
2. GRANICA - 'Oprema je u ranoj fazi početka aktivnosti parcijalnih pražnjenja i pokazuje nizak nivo parcijalnih pražnjenja. Ukoliko je dominantno površinsko/koronarno pražnjenje opremu nije potrebno isključiti, preporučuje se redovan godišnji servis sa posebnom pažnjom na pregled izvora pražnjenja. Ukoliko je kavitaciono pražnjenje dominantno, preporučuje se monitoring opreme u neredna 3 mjeseca i u slučaju povećanja aktivnosti parcijalnih pražnjenja isključenje opreme radi servisiranja.'
3. 'MANJI NIVO' - 'Oprema pokazuje određene forme defekta u izolaciji. Ukoliko je površinsko/koronarno pražnjenje dominantno korisniku se preporučuje monitoring u narednih tri do šest mjeseci. Ukoliko je kavitaciono pražnjenje dominantno, moguće je isključenje opreme radi servisiranja, ako ne iziskuje velike troškove neoperativnosti, u suprotnom monitoring u narednih 6 mjeseci je obavezan.'
4. 'ZNAČAJNI NIVO' - 'MT se nalazi u fazi značajnih aktivnosti parcijalnih pražnjenja, stoga oprema zahtijeva posebnu pažnju i isključenje iz pogona u što kraćem mogućem vremenu radi servisiranja.'
5. 'VISOKI NIVO' - 'MT pokazuje visok nivo aktivnosti parcijalnih pražnjenja, što ukazuje na ozbiljne defekte u izolaciji MT. Momentalno isključenje i remont je preporučen, kao i dalja ispitivanja radi utvrđivanja izvora pražnjenja i mogućnosti servisiranja.'
6. 'OZBILJAN NIVO' - 'Preporučuje se zamjena opreme i određivanje mogućnosti servisiranja ukoliko su površinska/koronarna pražnjenja dominantna. U slučaju kavitacionih pražnjenja kao dominantnih oprema se dodatno testira i ukoliko je to ekonomski isplativo servisira i remontuje.'

VI MOBILNI UREĐAJ ZA SNIMANJE I ANALIZU PARCIJALNIH PRAŽNJENJA

Proboj VN izolacije izaziva u najvećem broju slučajeva havariju na VN uređajima. Primjena testiranja parcijalnih pražnjenja radi dijagnostike stanja izolacije je u stalnom porastu. Uputstva za kontrolu stanja izolacije VN opreme se svode na preventivne akcije koje se mogu sprovesti, zbog čega se koriste uređaji za mjerenje aktivnosti parcijalnih pražnjenja. Kako su uslovi i aparati za testiranje od glavnog značaja mnogi korisnici se odlučuju na on-line mjerenje. Glavna prednost takvog mjerenja je mjerenje pod radnim naponom i bez prekidanja operativnosti opreme.

U proteklim godinama, sve je više razvijenih senzora i aparata za mjerenje. Danas, skoro sva oprema se oslanja na digitalnu tehnologiju koja omogućava korišćenje ultravisokofrekventnih i širokopoljnih senzora. U ovom poglavlju je predstavljen aparat za mjerenje parcijalnih pražnjenja kojeg koristi operator prenosnog sistema u Crnoj Gori. Upotrebljava se za potrebe sektora za mjerenje CGES-a i služi za brzu procjenu stanja velikog broja MT u kratkom vremenskom periodu. Ovaj uređaj je odabran upravo zbog osobina koje omogućavaju veoma brzo i efikasno mjerenje.

Mobilna konzola za snimanje (Partial Discharge Portable Analyzer Console - PD-PAC) je visoko specijalizovana oprema za snimanje parcijalnih pražnjenja u VN opremi. Paket uređaja sadrži moćan softver, specijalno dizajniran i proizveden od strane HOESTAR tehnologije za parcijalna pražnjenja (Singapur) za komercijalno tržište. PD-PAC se koristi za procjenu stanja MT u CGES u on-line režimu i sastoji se od sljedećih komponenti (slike 6.1 i 6.2) [19]:

1. lap top sa ugrađenim kolektorom podataka 'data acquisition card',
2. 'AC reference synchronous kit' - uređaj za snimanje oblika napona u odnosu na koji se mjere aktivnosti parcijalnih pražnjenja,
3. elektromagnetni senzor (EM senzor) za detektovanje aktivnosti parcijalnih pražnjenja,
4. antena senzor ili EMS senzor koji se koristi za simultano snimanje šumova iz okoline,
5. kablovi za spajanje komponentata uređaja sa lap topom, punjenje baterija i sl.



Slika 6.1. Mobilni uređaj PD-PAC



Slika 6.2. Glavne komponente PD-PAC uređaja: Antena senzor, EM senzor i AC reference synchronous Box respektivno

Mjerenja parcijalnih pražnjenja ovim uređajem su izvršena na MT širom Crne Gore, pritom su u mjerenjima uključeni transformatori različitih proizvođača. Pored različitih tipova i proizvođača, obuhvaćeni su i transformatori različitih naponskih nivoa.

PD-PAC je izrađen za upotrebu bez prekidanja pogona opreme koja se testira, čime se smanjuje trošak transporta opreme do laboratorije. On-line monitoring, odnosno mjerenje u relanom vremenu kod MT omogućava blagovremeno otkrivanje promjena na izolacionom (mehaničkom) električnom sistemu u ranoj fazi, čime se štiti transformator u radu, smanjuje mogućnost većih oštećenja, izbjegava neplanirano isključenje iz rada, povećava pouzdanost cijelog sistema i sl.

Benefiti on-line testiranja omogućavaju dijagnozu i analizu MT tokom njihove operativnosti. Korektivne akcije se planiraju i primjenjuju u cilju produžetka radnog vijeka opreme i sprečavanja neplaniranih ispada.

Mjerenje parcijalnih pražnjenja ovim uređajem se razlikuje od konvencionalnih mjerenja po upotrebi senzora koji ni na kakav način ne utiču na rad VN opreme i dobijene rezultate. Rezultati se kasnije analiziraju i procesuiraju u softveru (poglavlje V).

Posebnost ovakvog uređaja je prepoznata i na ovakav način se snima i analizira stanje opreme koje dalje dozvoljava planiranje pogona i održavanja opreme. Periodično testiranje omogućava poređenje stanja opreme iz prethodnog perioda sa dobijenim rezultatima i stvaranje analize trenda stanja izolacije visokonaponske opreme. Ovakve analize identifikuju problem i određuju vrijeme nastanka problema, kao i brzinu progressa parcijalnih pražnjenja. Takođe, analiza parcijalnog pražnjenja osigurava pouzdanost sistema. Ovakav metod evaluacije visokonaponske opreme dovodi do veće tačke produktivnosti sistema tako što štiti sistem od slučajnih i neplaniranih ispada iz pogona i prestanka napajanja.

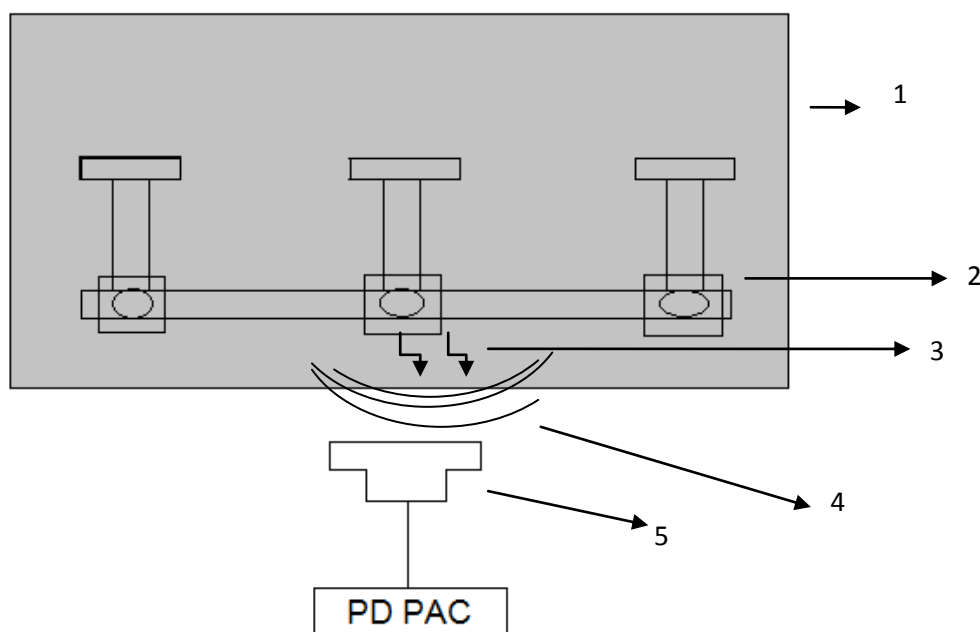
'PD-PAC' je dizajniran da radi samo na nultom potencijalu, što znači da ukoliko se testira bilo kakav energetski uređaj, njegov metalni oklop treba uzemljiti. Pored ovog preduslova, obavezno je mjerenje u odsustvu visoke vlažnosti, grmljavine i eksplozivnog okruženja radi sigurnosti osoblja i zaposlenih u postrojenju.

Način upotrebe i rukovanje mobilnom konzolom, kao i uputstvo za tumačenje podataka dobijenih u softveru su dati u ovom poglavlju.

VI.1 Tehnika mjerenja elektromagnetnog talasa

PD-PAC konzola koristi princip mjerenja elektromagnetnog talasa. Uređaj je napravljen za pregled VN opreme poput transformatora (mjernih i energetske), motora, kablova i slično.

Metoda je izabrana na osnovu tehnike koju koristi uređaj za mjerenje parcijalnih pražnjenja. Kada se parcijalna pražnjenja dese unutar opreme, struja parcijalnog pražnjenja će generisati elektromagnetni talas koji se prostire unutar i van sistema radijacijom. Elektromagnetni senzor uređaja za mjerenje parcijalnih pražnjenja otkriva i snima promjene koje se dešavaju u izolaciji transformatora, a zatim se u softveru dobijeni podaci obrađuju i čiste od spoljašnjih šumova. Na slici 6.3 je dat pojednostavljen profil koji prikazuje princip snimanja elektromagnetnog talasa elektromagnetnim senzorom, pokazujući samo jednu fazu sabirnice sa zaptivačem u centru [19].



Slika 6.3. Detekcija EM talasa generisanog od strane parcijalnog pražnjenja
 1) Metalno kućište, 2) VN sabirnica, 3) Parcijalno pražnjenje, 4) EM talas, 5) EM senzor

VI.2 Elektromagnetni senzor

Kada se parcijalno pražnjenje, veoma kratkog trajanja (reda nanosekundi), desi strujni impulsi proteknu duž metalnog kućišta ili po površini provodnika. Ova struja generiše električno i magnetno polje i emituje elektromagnetnu radijaciju poznatu kao elektromagnetni talas. Ovaj EM talas se prostire kroz otvor u metalnom kućištu. EM senzor, koji je visoko podešena osjetljiva antena, kupi sve generisane elektromagnetne talase.

U pogledu osjetljivosti parcijalnih pražnjenja, elektromagnetni senzor ovog uređaja je mnogo puta osjetljiviji od konvencionalnih rješenja što mu omogućava da detektuje i najslabije aktivnosti parcijalnih pražnjenja, koje je nemoguće otkriti slabijim sensorima. EM senzor je pored visoke osjetljivosti i senzor koji ne ometa rad VN opreme i ne zahtijeva isključenje opreme tokom izvođenja mjerenja. Takođe, ne postoji fizički i električni kontakt između senzora i VN opreme zbog čega je siguran po osoblje.

Od svih senzora sličnog tipa, EM senzor je najosjetljiviji sa tipičnim opsegom frekvencije od 100 kHz - 300 MHz. Njegova osjetljivost se ogleda u mogućnosti hvatanja

parcijalnih pražnjenja sa magnitudom napona na nivou od 100 μV . Sa visokim opsegom i osjetljivošću može da detektuje, osim spoljašnjih (površinska pražnjenja i korona), i kavitaciona (unutrašnja) pražnjenja. Ova osobina EM senzora prevazilazi konvencionalne senzore sa nižom osjetljivošću (1000 μV) koji u većini slučajeva ne uspijevaju da identifikuju i uhvate slaba unutrašnja pražnjenja.

Sa ovakvim karakteristikama EM senzor se može koristiti za detekciju parcijalnih pražnjenja u širokom spektru VN opreme [19]:

- Detektovanje parcijalnih pražnjenja tokom testova;
- Detektovanje parcijalnih pražnjenja u kablovima;
- Detektovanje parcijalnih pražnjenja u uljnim postrojenjima;
- Detektovanje parcijalnih pražnjenja u VN motorima, generatorima;
- Detektovanje parcijalnih pražnjenja u prekidačima;
- Detektovanje parcijalnih pražnjenja u transformatorima (suvim ili uljnim, mjernim ili energetske).

VI.3 Priprema opreme za mjerenje parcijalnih pražnjenja

PD - PAC može da radi u kontinualnom i fotografskom - 'snap shot' modu. 'Snap shot' mod se uglavnom koristi za inicijalno testiranje VN opreme za kratko vrijeme i veoma je povoljan za upoređivanje podataka dobijenih sa različitih mjesta i evaluaciju stanja opreme u kratkom periodu. Kontinualni mod je korišćen za nadgledanje opreme u dužim vremenskim intervalima kada su već snimljene sumnjive situacije u 'snap shot' modu.

U ovom radu je dat pregled podataka iz 'snap shot' moda i rukovanje opreme u istom modu, kako bi se omogućila šira slika o stanju izolacije MT u CGES-u u što većem broju.

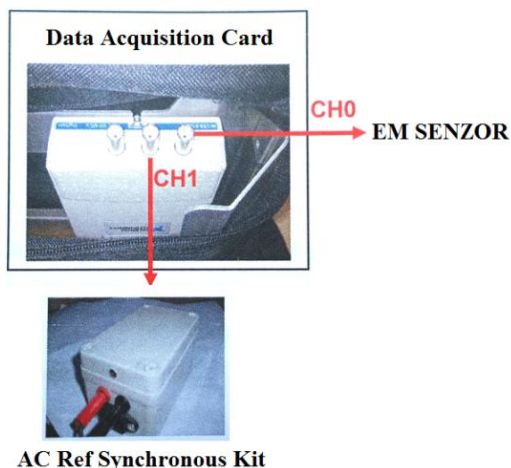
Generalni prikaz mobilne konzole upotrijebljene za mjerenje i testiranje opreme na parcijalna pražnjenja je dat na slici 6.4 [19].



Slika 6.4 PD-PAC uređaj

PD-PAC za snimanje parcijalnih pražnjenja koristi EM senzor i postavka opreme se realizuje u sljedećim koracima [19]:

- 1) na slici 6.5 je dat način priključenja elektromagnetnog senzora na 'data acquisition card' - kolektor podataka o parcijalnim pražnjenjima. EM senzor se koaksijalnim kablom poveže na kanal 0 kolektora (CH0 - PD Input). Zatim se na kanal 1 takođe koaksijalnim kablom povezuje AC 'Reference Synchronous Kit' (CH1- Ref Input).



Slika 6.5 Priklučenje AC reference box i EM senzora sa 'data acquisition card'

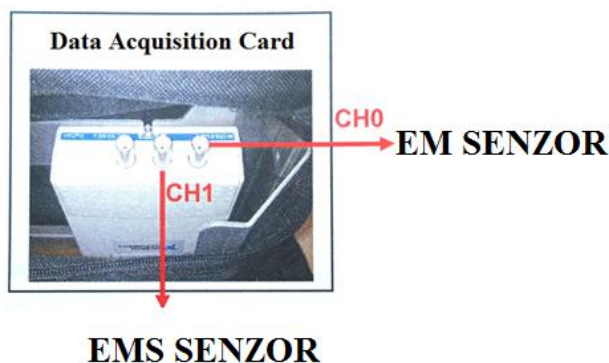
- 2) Lap top koji skuplja podatke i kutija za memorisanje podataka se startuju radi podizanja sistema.
- 3) EM senzor koji se koristi za detekciju parcijalnih pražnjenja posjeduje magnet. Sljedeće je pozicioniranje elektromagnetnog senzora (slika 6.6). EM senzor se postavlja na metalno kućište VN opreme. Prekidač EM senzora se postavlja na 'ON'.



Slika 6.6 Pozicioniranje EM senzora na metalno kućište mjernog transformatora - CGES

- 4) Po pokretanju lap topa sa softverom 'Acquisition software', za prikupljanje podataka potreban je dupli klik na 'Data Acquire'.
- 5) Poslije paljenja softvera za prikupljanje podataka podaci u realnom vremenu će biti prikazani. Mod 2 se podešava na 'Acquire'. Rezolucija na 'Low' - niska. Adresa fajlova u kojima se podaci čuvaju takođe mora biti određena. Najmanje 10 setova (mjerenja) podataka treba da bude prikupljeno. Ukoliko se pojavi da neki od imena fajlova već postoje, potrebno je promijeniti ime fajlovima. Softver za prikupljanje podataka prikazuje grafike snimanja aktivnosti parcijalnih pražnjenja u realnom vremenu, kao i grafik referentnog signala.
- 6) Za čuvanje podataka u memoriju računara je potrebno pritisnuti taster za čuvanje podataka. Svi podaci se čuvaju u različitim fajlovima koji su numerisani hronološkim redom od 0 do 9. Tokom prikupljanja podataka mora se obezbijediti da indikatori parcijalnih pražnjenja i referentnog signala budu zeleni.
- 7) Kada je prikupljanje podataka završeno ikonica za odobravanje će se pojaviti i korisnik treba da pritisne dugme 'OK'.
- 8) Za simultano otklanjanje šumova koristi se EMS senzor ili antena senzor. Ukoliko se pojavi prozor sa obavještenjem 'Data Acquisition is completed! Collect 2M points', koristi se EMS senzor, i prikupljanje podataka se vrši simultano sa EM i EMS senzorom prema

slici 6.7. Prikupljeni podaci će se obrađivati u PDPRO - DUA programskom softveru (poglavlje V).



Slika 6.7 Priključenje EMS senzora za simultano otklanjanje šuma

Za transformatore je potrebno postaviti EM senzor na opremu ili metalni dio transformatora, a EMS senzor na distanci od 9m od opreme koja se testira (transformatora). Razlog za postavljanje EMS senzora na određenu distancu od transformatora je potpuno smanjenje šansi za registrovanje parcijalnih pražnjenja u transformatoru. EMS senzor se koristi za prikupljanje signala šuma i ti podaci će se koristiti za analizu u softveru.

- 9) Za prikupljanje podataka u visokoj rezoluciji uređaj se podešava prema slici 6.5, pri čemu se 'Resolution mode' podešava na 'High' ili visoki.

Kada su koraci 1-9 ispoštovani, korisnik je spreman za analizu i obradu podataka u PDPRO - DUA softveru [19].

Moblina konzola za testiranje parcijalnih pražnjenja ima prednost zbog svoje jednostavne upotrebe i brzih mjerenja. Priključak opreme na ispitivani objekat se sprovodi bez problema i relativno brzo. Inženjeri u postrojenjima mogu upravljati mobilnom konzolom nakon kratkotrajne obuke. Znajući da električni kontakt sa ispitivanom opremom ne postoji, ovaj uređaj se smatra bezbjednim za rukovanje i upotrebu.

Podaci koji se dobijaju su jednostavni za analizu i čitanje. Pored toga što PD-PAC konzola obezbjeđuje sigurnost korisnika, ona predstavlja jednostavan i inteligentan alat za identifikaciju promjena aktivnosti parcijalnih pražnjenja. Zbog mogućnosti memorisanja velikog broja mjerenja u memoriju računara, dobijena mjerenja se mogu iskoristiti za analizu promjena stanja izolacije različitih tipova opreme u dugoročnom periodu.

Često, on-line testiranje zahtijeva komplikovane programe odstranjivanja smetnji iz dobijenih signala mjerenja, zbog čega rastu troškovi upotrebe ovog aparata. Tačnost programa za odstranjivanje električnih smetnji u mjerenjima se konstantno povećava i dopunjava. Upravo zato postoji prostor za unapređenje u ovom domenu. Međutim i pored svojih mana, uređaj predstavlja veliki korak naprijed u tehnologiji mjerenja i identifikacije tipa parcijalnih pražnjenja.

PD-PAC uređajem su izvršena mjerenja na 60 MT u CGES-u za potrebe ovog istraživanja. Obradeni podaci mjerenja su predmet narednog poglavlja.

Svi podaci dobijeni mjerenjima su dati u prilogu na CD-u.

VII REZULTATI MJERENJA PARCIJALNIH PRAŽNJEŃJA MOBILNOM KONZOLOM U KONKRETNIM USLOVIMA

Elektromagnetna mjerenja su izuzetno pogodna pri ispitivanju MT u postrojenju. Samo mjerenje je prilično brzo i efikasno i najbitnije, ne zahtijeva razvezivanje MT i isključenje dijela postrojenja. Naprotiv, metoda podrazumijeva da se mjerenja vrše u on-line režimu, pod naponom. Zbog svoje izuzetne efikasnosti i jednostavnosti, omogućava brz pregled svih MT u postrojenju, njihovo razvrstavanje po „težini“ kvara. Takođe, na ovaj način se detektuju trenutna parcijalna pražnjenja. Međutim, glavna mana ovom mjerenju je veliki intenzitet šuma u postrojenjima koji dolazi od VN opreme, zbog čega se koriste dva senzora, EM za snimanje parcijalnih pražnjenja i EMS (antena), senzor za uklanjanje šuma.

Postavljanje opreme i EM senzora se realizuje prema instrukcijama iz potpoglavlja VI.3. Otklanjanje šumova vrši se pomoću EMS senzora, simultanim mjerenjem (slika 6.7). Obrada podataka je izvršena u PDPRO-DUA softveru (poglavlje V).

U ovom poglavlju je dat dio mjerenja parcijalnih pražnjenja PD-PAC uređajem u CGES, kao i tehnička dokumentacija ispitivanih MT.

CGES je nacionalna kompanija za prenos električne energije i s obzirom da posjeduje nadzemne vodove na tri naponska nivoa. Zbog toga naponski nivoi obuhvaćeni mjerenjima su 400 kV, 220 kV i 110 kV. Izabrane trafostanice u kojima su vršena mjerenja se nalaze u Podgorici (PG1, PG2), Baru i Ribarevinama (Bijelo Polje) [61, 62, 63 i 64]. Kriterijumi odabira trafostanica su naponski nivo postrojenja trafostanica, uslovi i mogućnosti mjerenja u trafostanicama u toku istraživanja.

Mjerenja u svrhu istraživanja stanja VN opreme (MT) u CGES su izvođena tokom 2014. i 2015. godine. Izvršeno je ukupno 600 mjerenja, po 10 na ukupno 60 obuhvaćenih MT.

Tokom prve polovine septembra 2014. godine izvršeno je prikupljanje podataka na MT u trafostanici Podgorica 2, na kojoj je izvršeno 180 mjerenja na 18 transformatora.

U drugoj polovini septembra i početkom oktobra 2014. godine izvršeno je 60 mjerenja u 400 kV postrojenju trafostanice Ribarevine na 6 MT.

Do polovine septembra 2014. godine izvršena su mjerenja i na MT u 220 kV postrojenju u trafostanici Podgorica 1. Obavljeno je 180 mjerenja na 18 MT.

Zbog pogoršanja vremena mjerenja su stopirana do marta 2015. godine kada su izvršena mjerenja na MT u 110 kV postrojenju trafostanice u Baru. 180 mjerenja je izvršeno na 18 MT do kraja prve polovine marta.

S obzirom da je prema instrukcijama aparat dizajniran da radi na nultom potencijalu, sva mjerenja su odrađena sa prethodno ispunjenima uslovima za optimalan rad aparata [19]:

- uzemljenje metalnih površina sa kojima aparat dolazi u kontakt,
- provjera izolacije svih dijelova koji mogu doći u kontakt sa aparatom,
- obavezno nošenje opreme za mjerenje (gumene čizme, obuća),
- striktno pridržavanje lokalnih pravila postrojenja u kojem se vrši mjerenje,
- ne vršiti mjerenja u slučaju oblačnosti, kiše, prisustva zapaljivih materija, grmljavine i sl.,
- ukoliko je prisustvo ozona ili nenormalno visoka frekvencija šuma prisutna prije mjerenja odmah napustiti mjesto mjerenja i obavijestiti osoblje zaposleno u postrojenju,
- osoblje mora da nadzire opremu i da održava čist pristup VN opremi,

- u bilo kojem trenutku mjerenja osoblje ne smije da dotakne bilo koji metalni dio VN opreme koji bi mogao da dođe pod napon u slučaju kvara ili visoke aktivnosti parcijalnih pražnjenja i sl.

Zbog uslova iz uputstva za rad aparata da se oprema ne smije izlagati velikoj vlažnosti, sva mjerenja su rađena u suvom okruženju. Temperatura vazduha u ispitivanim slučajevima nije prelazila 30 stepeni, čime su se bili stekli uslovi za optimalan rad aparata [19].

Podaci su prikazani tabelarno i birani su na osnovu potrebe za uspješnom realizacijom matematičkog modela koji je opisan u poglavlju V. Za čitanje podataka su date smjernice.

Izolacija u slučaju svih ispitivanih MT je uljnopapirna.

Na slici 7.1 dat je prikaz opreme u CGES i prikaz postavljanja EM senzora na metalno kućište MT.



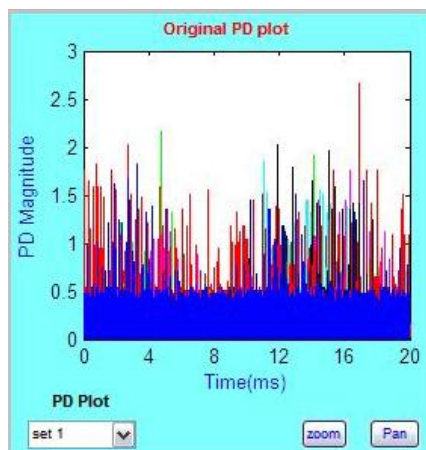
Slika 7.1 Postavka opreme i pozicioniranje EM senzora - CGES

VII.1 Smjernice za čitanje relevantnih podataka

Kako bi unos podataka iz programa za obradu podataka PDPRO-DUA bio omogućen i da bi podaci unešeni u tabelama mogli biti pravilno iskorišćeni potrebno je pravilno čitanje podataka i njihov upis u odgovarajuće kolone.

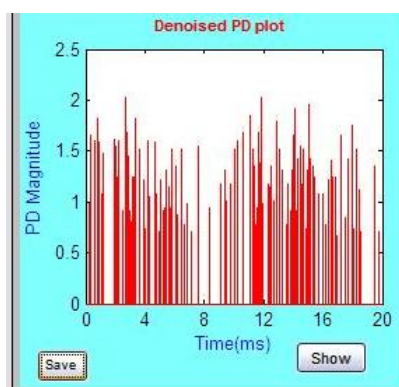
Tačan pregled podataka potrebnih za analizu i korišćenje matematičkog modela je dat prema instrukcijama navedenim u ovom potpoglavlju.

Na slici 7.2 prikazan je grafik snimljenih podataka. Sa slike se može vidjeti da su podaci teško pogođeni šumovima i praktično ‘zamaskirani’ istim. Može se zaključiti da bez procedure otklanjanja šuma i upotrebe EMS senzora ovako prikazani podaci nijesu pogodni za obradu, donošenje odluka i korektivnih akcija koje se sprovode u cilju dobijanja veće pouzdanosti i funkcionalnosti, kako MT tako i VN postrojenja u kojima su operativni.



Slika 7.2 PRIMJER: Grafik snimjenih parcijalnih pražnjenja prije otklanjanja šuma - CGES - Naponski MT na dalekovodu PGI - Mojkovac u fazi '4'

Na slici 7.3 prikazan je grafik poslije otklanjanja uticaja šumova prema instrukcijama iz potpoglavlja V.1. Ovako dobijena vizuelizacija podataka pokazuje da su podaci obrađeni i moguće ih je iskoristiti u svrhu donošenja odluka, kao što je i učinjeno u svim mjerenjima u konkretnim pojedinačnim slučajevima, kako u slučaju naponskih tako i u slučaju strujnih MT.



Slika 7.3 PRIMJER: Grafik parcijalnih pražnjenja nakon otklanjanja šuma CGES -Naponski MT na dalekovodu PGI - Mojkovac u fazi '4'

Nakon dobijanja grafika dobijaju se i konkretni podaci i vrijednosti (slika 7.4):

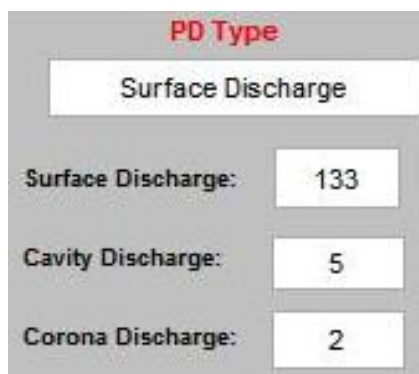
- prosječna jačina pražnjenja,
- maksimalna jačina pražnjenja,
- energetski nivo i
- broj pulsacija.

Result	
Average magnitude	Number of pulses
1221.94 mV	140
Energy Level	Max Amplitude
171.0716	2.0224 V

Slika 7.4 Prikaz konačnih rezultata aktivnosti parcijalnih pražnjenja dobijenih u PDPRO-DUA softveru, PRIMJER: CGES -Naponski MT na dalekovodu PGI - Mojkovac u fazi '4'

Analiza podataka omogućava čitanje vrsta parcijalnih pražnjenja (slika 7.5). U obradi podataka relevantna su parcijalna pražnjenja koja su dominantna, kako bi se u odnosu na njih stekla slika o eventualnim mjestima-izvorima parcijalnih pražnjenja sa najvećim energetske udjelom. Pored toga, na osnovu vrste parcijalnih pražnjenja se daju i korektivne akcije koje trebaju da budu primijenjene.

Znajući da su unutrašnja (kavitaciona) pražnjenja opasnija i da se smatraju nepovratnim, sa većom pažnjom se posmatraju i razmatraju od spoljašnjih (površinskih i koronarnih pražnjenja). Korektivne akcije u slučaju njihove dominantne pojave su striktnije i izvršavaju se bez mogućnosti odlaganja.



Slika 7.5 Prikaz vrsta parcijalnih pražnjenja dobijenih u PDPRO-DUA softveru, PRIMJER: CGES -Naponski MT na dalekovodu PG1 - Mojkovac u fazi '4'

Na osnovu instrukcija za čitanje obrađenih podataka u PDPRO-DUA softverskom paketu dobijeni su rezultati na 60 MT u 4 različite trafostanice. Mjerenja su izvršena radi određivanja stanja izolacije u postrojenjima trafostanica na 400 kV nivou (PG2 i Ribarevine), 220 kV nivou (PG1) i 110 kV nivou (Bar). Šeme trafostanica i podaci su zbog lakšeg pregleda i obimnosti dati u prilogu.

VII.2 Mjerenja parcijalnih pražnjenja u mjernim transformatorima na naponskom nivou 400 kV

Za mjerenje parcijalnih pražnjenja ispitivani su MT na 400 kV nivou u trafostanicama (TS) u Podgorici (TS PG2) i Bijelom Polju (TS Ribarevine). Mjerenja su sprovedena u odsustvu kiše, po suvom i optimalnom vremenu za korišćenje opreme.

VII.2.1 Tehnička dokumentacija mjernih transformatora

U tabelama 4 i 5 su date tehničke specifikacije o analiziranim MT u 400 kV postrojenju trafostanice PG2. Tabele daju prikaz proizvođača, tip, prenosni odnos, opterećenje MT i polje u kojem je instalisan MT.

Tabela 4. Strujni transformatori - PG2

Proizvođač	"ENERGOINVEST"
Tip	TPE - 16 H, 420 KV
Odnos	2x500/1 / 2x800/1 /1/1 A
Klasa	0,2 / 0,5 / 5 p 30 / 5p30
Opterećenje	15 VA / 30VA / 30VA / 30VA
Prekostrujni broj	Fs-10 / Fs-10 (za I i II jezgro)
U polju	1, 2, 8

Tabela 5. Naponski transformatori - PG2

Proizvođač	"ENERGOINVEST"
Tip	MBH - 420 kV
Odnos	400/V3 / 0,1/V3 / 0,1/V3
Klasa	0,2 / 1
Opterećenje	30 VA / 100 VA
U polju	1, 2, 8

Objašnjenje tabela 4 i 5, trafostanica PG2, postrojenje 400 kV [61]:

- Polje 1 - Polje trafoa 1;
- Polje 2 - Dalekovod 400 kV ka Ribarevinama;
- Polje 8 - Dalekovod 400 kV ka Trebinju.

U tabelama 6 i 7 su date tehničke specifikacije o analiziranim MT u 400 kV postrojenju trafostanice Ribarevine. Tabele daju prikaz proizvođača, tip, prenosni odnos, opterećenje MT i polje u kojem je instalisan MT.

Tabela 6. Strujni transformatori - Ribarevine

Proizvođač	"ENERGOINVEST"
Tip	TPE - 16 H, 420 KV
Odnos	2x500/ 1A, 2 x 800 /1 /1 / 1 A
Klasa	0,2, Fs = 10 / 0,5 Fs = 10 / 5p30 / 5p30
Opterećenje	15 / 30 / 30 / 30 VA
U polju	6 (br. 40054 (0),10262 (4) 11536 (8) 1981 i 1980.g.

Tabela 7. Naponski transformatori - Ribarevine

Proizvođač	"ENERGOINVEST"
Tip	MBH - 420 / 680 / 1550 kV
Odnos	400/V3 / 0,1/V3 / 0,1/V3 KV
Klasa	0,2 / 1
Opterećenje	30 / 100 VA
U polju	6 - Pljevlja (br.4173 (8),4166 (4),4163 (0) svi 1987.g.

Objašnjenje tabela 6 i 7, trafostanica Ribarevine, postrojenje 400 kV [62]:

- Polje 6 - Dalekovod 400 kV ka Pljevljima (trafostanica Pljevlja 2).

VII.2.2 Rezultati mjerenja

Praktični rezultati mjerenja i obrade podataka u softveru nakon primjene metode otklanjanja šumova dati su u tabeli 8. Tabela 8 prikazuje tip MT, polje u kojem je u pogonu, fazu, prosječnu i maksimalnu jačinu parcijalnih pražnjenja, broj pulsacija, prosječnu energiju i dominantni tip parcijalnih pražnjenja (PP) respektivno, koji su detektovani mobilnom konzolom.

Tabela 8. Praktični podaci dobijeni na 400 kV naponskom nivou za strujne i naponske MT

Tip MT N- Naponski, S-Strujni	Polje	Faza	Prosječna jačina PP [mV]	Maksimalna jačina PP [V]	Broj pulsacija	Prosječna energija	Dominantni tip PP
N	Dalekovod PG2- Ribarevine	0	3131.66	5.391	40	125.266	-
N	Dalekovod PG2- Ribarevine	4	2670.3	5.391	55	146.868	Površinsko pražnjenje
N	Dalekovod PG2- Ribarevine	8	2837.41	4.928	59	167.407	Površinsko pražnjenje
S	Dalekovod PG2- Ribarevine	0	2675.33	4.591	6	16.052	-
S	Dalekovod PG2- Ribarevine	4	2946.96	5.096	63	185.658	Površinsko pražnjenje
S	Dalekovod PG2- Ribarevine	8	2549.81	5.307	55	140.24	Površinsko pražnjenje
N	Trafo 1 PG2	0	2991.1	5.391	70	209.37	Površinsko pražnjenje
N	Trafo 1 PG2	4	3363.45	5.391	81	273.44	Površinsko pražnjenje
N	Trafo 1 PG2	8	2781.77	5.391	106	294.88	Površinsko pražnjenje
S	Trafo 1 PG2	0	2781.77	5.391	106	294.88	Površinsko pražnjenje
S	Trafo 1 PG2	4	2418.63	4.928	117	282.98	Površinsko pražnjenje
S	Trafo 1 PG2	8	2925.91	4.349	62	181.41	Površinsko pražnjenje
N	Dalekovod PG2- Trebinje	0	2225.05	5.391	84	186.9	Površinsko pražnjenje
N	Dalekovod PG2- Trebinje	4	2335.94	5.349	81	189.21	Površinsko pražnjenje
N	Dalekovod PG2- Trebinje	8	2582.34	5.391	96	247.9	Površinsko pražnjenje
S	Dalekovod PG2- Trebinje	0	1959.625	5.265	16	31.354	-
S	Dalekovod PG2- Trebinje	4	2726.44	5.263	25	68.161	-

S	Dalekovod PG2- Trebinje	8	2225.35	5.391	120	267.04	Površinsko pražnjenje
N	Ribarevine- Pljevlja2	0	2294.77	5.347	297	681.5474	Površinsko pražnjenje
N	Ribarevine- Pljevlja2	4	1683.14	5.349	159	267.62	Površinsko pražnjenje
N	Ribarevine- Pljevlja2	8	1392.36	3.7064	57	79.3648	Kavitaciono pražnjenje
S	Ribarevine- Pljevlja2	0	1458.81	4.126	59	86.07	Kavitaciono pražnjenje
S	Ribarevine- Pljevlja2	4	1345.877	3.7384	62	83.444	Kavitaciono pražnjenje
S	Ribarevine- Pljevlja2	8	1418.38	4.3128	143	202.8284	Površinsko pražnjenje

VII.3 Mjerenja parcijalnih pražnjenja u mjernim transformatorima na naponskom nivou 220 kV

Za mjerenje parcijalnih pražnjenja ispitivani su MT na 220 kV nivou u trafostanici u Podgorici (TS PG1). Mjerenja su sprovedena u odsustvu kiše, po suvom i optimalnom vremenu za korišćenje opreme.

VII.3.1 Tehnička dokumentacija mjernih transformatora

U tabelama 9 i 10 su date tehničke specifikacije o analiziranim MT u 220 kV postrojenjima trafostanica PG1. Tabele daju prikaz proizvođača, tip, prenosni odnos, opterećenje MT i polje u kojem je instalisan MT.

Tabela 9. Strujni transformatori - PG1

Proizvođač	"R. K"
Tip	4 APU - 245
Odnos	2 x 300 / 1 / 1 / 1 A
Klasa	0,2 Fs10 / 0,5 Fs10 / 10p20
Prekostrujni broj	15 / 30 / 30 VA
U polju	2 (br.770984 / 1981.770746 / 77 i 770745 / 77), 4 (u fazi"4" 770748 / 77).
Proizvođač	"R. K"
Tip	APU - 245
Odnos	2 x 300 / 1 / 1 A
Klasa	0,5 / 1
Opterećenje	n < 10, n > 10
Prekostrujni broj	60 / 90 VA
U polju	4 (br.770334, remontovan u " Elektroputere", 770237 / 1977.g
Proizvođač	"R. K".
Tip	APU - 245
Odnos	2 x 200 / 1 / 1 A
Klasa	0,5 / 1

Prekostrujni broj	$n < 10, n > 10$
Opterećenje	60 / 90 VA
U polju	3 (T2) (br. 770254, 770255 ,770256)
Proizvođač	"GALILEO",remontovan u "Elektroputere" Rumunija
Tip	TAE - 220
Odnos	2 x 200 / 1 / 1 A
Klasa	0,5 / 1
Prekostrujni broj	$n < 10, n > 10$
Opterećenje	75 / 75 VA
U polju	1 (T1) (br. 059145, 059142, 059143)

Tabela 10. Naponski transformatori - PG1

Proizvođač	"R. K"
Tip	3 VCU - 245
Odnos	220/V3 / 0,1/V3 / 0,1/V3 KV
Klasa	0,5 / 3p
Opterećenje	100 / 100 VA
U polju	2 ("4" 773792/80).
Proizvođač	"R. K".
Tip	VCU - 245
Odnos	220/V3 / 0,1/V3 / 0,1/3 KV
Klasa	0,5
Opterećenje	200 VA
U polju	2 ("0", br.773197 i "8" 773868 / 86 4 ("0" 773464).
Proizvođač	"GALILEO"
Tip	TC 220
Odnos	220 / V3 / 0,1 / V3 - 0,1 / V3
Opterećenje	130 / P
U polju	4 (br. "4" 060058 / 62)
Proizvođač	"Energoinvest"
Tip	KNT 245
Odnos	220 / V3 / 0,1 / V3 - 0,1 / V3
Klasa	0,2 / 1
Opterećenje	30 / 100 VA
U polju	4 (br."8" 72693)

Objašnjenje tabela 9 i 10, trafostanice PG1, postrojenje 220 kV [64]:

- Polje 1 - Polje trafoa 1;
- Polje 2 - Dalekovod 220 kV ka Perućici;
- Polje 3 - Polje trafoa 2;
- Polje 4 - Dalekovod 220 kV ka Pljevljima (preko Mojkovca).

VII.3.2 Rezultati mjerenja

Praktični rezultati mjerenja i obrade podataka u softveru nakon primjene metode otklanjanja šumova dati su u tabeli 11. Tabela 11 prikazuje tip MT, polje u kojem je u

pogonu, fazu, prosječnu i maksimalnu jačinu parcijalnih pražnjenja, broj pulsacija, prosječnu energiju i dominantni tip parcijalnih pražnjenja, koji su detektovani mobilnom konzolom.

Tabela 11. Praktični podaci dobijeni na 220 kV naponskom nivou za strujne i naponske MT

Tip MT N- Naponski, S-Strujni	Polje	Faza	Prosječna jačina PP [mV]	Maksimalna jačina PP [V]	Broj pulsacija	Prosječna energija	Dominantni tip PP
N	Dalekovod PG1- Perućica	0	1175.36	1.58	14	16.455	-
N	Dalekovod PG1- Perućica	4	1138.15	1.6825	20	22.763	-
N	Dalekovod PG1- Perućica	8	992.6	1.43	10	9.926	-
S	Dalekovod PG1- Perućica	0	1174.06	1.434	7	8.22	-
S	Dalekovod PG1- Perućica	4	1196.49	1.602	41	49.056	-
S	Dalekovod PG1- Perućica	8	958.58	1.686	9	8.6273	-
N	Dalekovod PG1- Mojkovac	0	1153.35	1.686	67	77.2648	Površinska pražnjenja
N	Dalekovod PG1- Mojkovac	4	1221.94	2.0224	140	171.07	Površinska pražnjenja
N	Dalekovod PG1- Mojkovac	8	990.99	1.686	17	16.8468	-
S	Dalekovod PG1- Mojkovac	0	1052.4	1.686	70	73.668	Površinska pražnjenja
S	Dalekovod PG1- Mojkovac	4	1204.59	1.7848	177	213.21	Površinska pražnjenja
S	Dalekovod PG1- Mojkovac	8	1035.4	1.3128	4	4.1416	-
S	Trafo 1 PG1	0	1497.5	1.686	12	17.97	-
S	Trafo 1 PG1	4	1231.82	1.82	9	11.08	-
S	Trafo 1 PG1	8	1162.97	1.518	7	8.14	-

S	Trafo 2 PG1	0	960.61	1.346	13	12.488	-
S	Trafo 2 PG1	4	786.5	1.182	12	9.438	-
S	Trafo 2 PG1	8	1473.66	1.686	6	8.842	-

VII.4 Mjerenja parcijalnih pražnjenja u mjernim transformatorima na naponskom nivou 110 kV

Za mjerenje parcijalnih pražnjenja ispitivani su MT na 110 kV nivou u trafostanici u Baru. Mjerenja su sprovedena u odsustvu kiše, po suvom i optimalnom vremenu za korišćenje opreme.

VII.4.1 Tehnička dokumentacija mjernih transformatora

U tabelama 12 i 13 su date tehničke specifikacije o analiziranim MT u 110 kV postrojenju trafostanice u Baru. Tabele daju prikaz proizvođača, tip, prenosni odnos, opterećenje MT i polje u kojem je instalisan MT.

Tabela 12. Strujni transformatori - Bar

Proizvođač	"R. K."
Tip	APU - 123
Odnos	2 x 400 / 1 / 1 A
Klasa	0,5 / 1
Prekostrujni broj	$n > 10$; $n < 10$
Opterećenje	60 / 60 VA
U polju	2 (083949,983980,983498) i 3
Proizvođač	"ENERGOINVEST"
Tip	TPE - 11c
Oodnos	2 x 150 / 1 / 1A
Klasa	0,5 / 5p10
Opterećenje	60 / 60 VA
Prekostrujni broj	$F_s = 10$
U polju	1 (br. 15004, 15006, 15005) 1984.

Tabela 13. Naponski transformatori - Bar

Proizvođač	"R. K."
Tip	2 VPU - 123
Odnos	110/V3 / 0,1/V3 / 0,1/3 KV
Klasa	0,5
Opterećenje	200 VA
U polju	3 (781192,781897,781865)
Proizvođač	"R. K."
Tip	VPU - 123
Odnos	110/V3 / 0,1/V3 / 0,1/3 KV
Klasa	0,5
Opterećenje	200 VA
U polju	2 (780443,780398,780431) u fazi "4"i"0",

	nema oznake a razlikuje se od faze "8"
proizvođač	"ENERGOINVEST"
tip	UH 11 - 15 - 123
odnos	110/V3 / 0,1/V3 / 0,1/V3 KV
klasa	0,5
opterećenje	200 VA
u polju	1 (br. 51178, 51176, 51177 / 1984.)

Objašnjenje tabela 12 i 13, trafostanice PG1, postrojenje 110 kV [64]:

- Polje 1 - Dalekovod 110 kV ka Ulcinju;
- Polje 2 - Dalekovod 110 kV ka Podgorici (preko Virpazara);
- Polje 3 - Dalekovod 110 kV ka Budvi.

VII.4.2 Rezultati mjerenja

Praktični rezultati mjerenja i obrade podataka u softveru nakon primjene metode otklanjanja šumova dati su u tabeli 14. Tabela 14 prikazuje tip MT, polje u kojem je u pogonu, fazu, prosječnu i maksimalnu jačinu parcijalnih pražnjenja, broj pulsacija, prosječnu energiju i dominantni tip parcijalnih pražnjenja, koji su detektovani mobilnom konzolom.

Tabela 14. Praktični podaci dobijeni na 110 kV naponskom nivou za strujne i naponske MT

Tip MT N- Naponski, S-Strujni	Polje	Faza	Prosječna jačina PP [mV]	Maksimalna jačina PP [V]	Broj pulsacija	Prosječna energija	Dominantni tip PP
N	Dalekovod Bar - Budva	0	1303.95	4.168	132	172.12	Površinsko pražnjenje
N	Dalekovod Bar - Budva	4	1162.07	2.399	106	123.18	Površinsko pražnjenje
N	Dalekovod Bar - Budva	8	1401.27	4.673	105	151.3375	Površinsko pražnjenje
S	Dalekovod Bar - Budva	0	1238.75	3.286	161	214.09	Površinsko pražnjenje
S	Dalekovod Bar - Budva	4	1062.57	3.328	80	86.605	Površinsko pražnjenje
S	Dalekovod Bar - Budva	8	1038.52	1.6825	26	27.002	-
N	Dalekovod Bar - Ulcinj	0	1399.11	2.778	65	90.942	Površinsko pražnjenje
N	Dalekovod Bar - Ulcinj	4	1358.24	5.391	219	303.37	Površinsko pražnjenje
N	Dalekovod Bar - Ulcinj	8	1269.54	3.747	144	182.81	Površinsko pražnjenje
S	Dalekovod Bar - Ulcinj	0	1510.83	3.833	213	321.81	Površinsko pražnjenje
S	Dalekovod Bar - Ulcinj	4	1578.26	4.886	138	217.8	Površinsko pražnjenje
S	Dalekovod Bar - Ulcinj	8	1425.02	4.759	114	162.45	Površinsko pražnjenje

N	Dalekovod Bar - Virpazar	0	1792.88	4.549	237	424.91	Površinsko pražnjenje
N	Dalekovod Bar - Virpazar	4	1769.02	4.168	141	249.432	Površinsko pražnjenje
N	Dalekovod Bar - Virpazar	8	2396.19	5.391	377	903.363	Površinsko pražnjenje
S	Dalekovod Bar - Virpazar	0	1770.51	4.38	250	442.63	Površinsko pražnjenje
S	Dalekovod Bar - Virpazar	4	1751.93	4.042	303	530.83	Površinsko pražnjenje
S	Dalekovod Bar - Virpazar	8	2474.85	5.349	371	918.17	Površinsko pražnjenje

Tokom istraživanja, mjerenja su izvršena na velikom broju MT u crnogorskom elektroprenosnom sistemu. Zahvaljujući sektoru za mjerenja CGES-a, osim podataka dobijenih mjerenjima vezanim za istraživanje, dostupni su bili i podaci njihovih mjerenja iz 2013., 2014. i 2015. godine, kako bi se stekao uvid u rad sa aparatom i softverom od početka upotrebe aparata.

Zbog nemogućnosti obrade ogromnog broja mjerenja, tokom istraživanja su izabrani karakteristični slučajevi koji obuhvataju tri različita naponska nivoa. Podaci o vrijednostima karakterističnih veličina (broj pulsacija, tip parcijalnog pražnjenja, srednja jačina naponskog impulsa, maksimalna jačina naponskog impulsa i energetski nivo) su raspoređeni u tabelama 8, 11 i 14. Pored njih u istim tabelama je prikazan tip MT, dalekovod i faza u kojem su postavljeni. Takođe, tabelarno je i prikazana tehnička dokumentacija o tipovima naponskih i strujnih MT, njihovim proizvođačima, starosti i naponskom nivou na kojem se priključeni. Podaci sortirani u tabelama olakšavaju njihovu primjenu i upotrebu za finalnu analizu i donošenje odluka.

Iz tabela će u sljedećem poglavlju biti upotrijebljeni podaci za analizu i određivanje korektivnih akcija koje se preporučuju korisniku za svaki pojedinačni slučaj.

VIII ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA I EVALUACIJA STANJA IZOLACIJE MJERNIH TRANSFORMATORA NA OSNOVU IZVRŠENIH MJERENJA

Mjerenje aktivnosti parcijalnih pražnjenja, a zatim i obrada dobijenih mjerenja su izvođena na MT za Crnogorski elektroprenosni sistem. Obradeni podaci su iskorišćeni za analizu stanja izolacije MT radi otklanjanja sumnji o stanju njihove operativnosti, s obzirom da je većina obuhvaćenih transformatora već duže vrijeme operativna.

VN oprema se nalazi u trafostanicama, tj u okruženju gdje su smetnje iz okoline na visokom nivou i proizvode se šumovi na frekvencijama koje EM senzor detektuje. Zbog toga svi uzeti podaci su obradeni u softverskom paketu PDPRO-DUA. Na osnovu dobijenih rezultata sprovedena su istraživanja i predložene korektivne akcije.

Za analizu dobijenih podataka korišćen je matematički model i na osnovu procijenjene ozbiljnosti je dat paket preventivnih akcija. U zavisnosti od obradenih podataka analizirane su ozbiljnosti i dominantne vrste parcijalnih pražnjenja su date. Korektivne akcije za MT u mnogome zavise od intenziteta aktivnosti parcijalnih pražnjenja kao i vrste parcijalnih pražnjenja.

S obzirom da je jedan od ciljeva istraživanja bio prikaz stanja MT na sva tri naponska nivoa u CGES-u, analiza podataka je obuhvatila podatke o MT na 400 kV, 220 kV i 110 kV naponskom nivou u četiri trafostanice u CGES-u. Stoga su samo karakteristični MT analizirani i komentarisani. U ovom poglavlju je detaljno dat pregled predloženih korektivnih akcija za svih 60 MT podijeljenih na tri različita naponska nivoa. Na osnovu ovako analiziranih podataka stekla se slika o stanju izolacije MT u četiri trafostanice u CGES-u.

Kao što je pomenuto u prethodnom poglavlju, broj MT uzetih za obradu je 60 i na njima je izvršeno po 10 mjerenja. Svi podaci obuhvaćeni mjerenjima su dati u prilogu na CD-u, uz šeme i kod programa za analizu krajnjih podataka i određivanje korektivnih akcija.

Mogućnosti i performanse uređaja omogućuju veliki broj mjerenja za veoma kratko vrijeme, što je dovelo do prikupljanja velikog broja podataka.

VIII.1 Analiza rezultata na 400 kV nivou

Mjerenja su rađena u toku septembra i početkom oktobra 2014. godine. Zbog dostupnosti i redovnog pregleda opreme u trafostanicama izvršeno je 180 mjerenja na 18 MT u trafostanici PG2 (400 kV) i 60 mjerenja na 6 MT u 400 kV postrojenju trafostanice Ribarevine u Bijelom Polju. MT uzeti u obzir detaljno su analizirani i obradeni. Za MT analizirane u ovom potpoglavlju su predložene korektivne akcije u zavisnosti od ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja. Zbog velikog broja izvršenih mjerenja i prikupljenih podataka uzet je uzorak od 24 MT. Što znači da je uzeto u obzir 10 mjerenja za svaki pojedinačni transformator. Međutim, vodilo se računa da primjeri MT obuhvataju sve moguće slučajeve obuhvaćene matematičkim modelom. Zbog preglednosti podataka i korektivnih akcija, dominantna pražnjenja i nivo ozbiljnosti pražnjenja su dati tabelarno, a zatim predložene korektivne akcije u konkretnim slučajevima.

Primjenom uređaja za snimanje parcijalnih pražnjenja PD-PAC, softverskog paketa PDPRO - DUA i primjenom programa za ozbiljnost GUI - MATLAB detaljno je obraden 24 MT na 400 kV nivou i to 18 u trafostanici PG2 i 6 u trafostanici Ribarevine (Bijelo Polje).

U tabeli 15 pored tipa MT, faze i dominantnog tipa pražnjenja dat je pregled nivoa pražnjenja procijenjenih primjenom matematičkog modela iz potpoglavlja V.3. Čitanjem prijedloga korektivnih akcija iz potpoglavlja V.4 mogu se utvrditi na osnovu nivoa pražnjenja

i sljedeći koraci koji moraju biti preduzeti u cilju poboljšanja rada MT i povećanja pouzdanosti VN postrojenja.

Tabela 15. Nivo ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja MT na 400 kV nivou

Broj MT	Tip MT N- Naponski, S-Strujni	Polje	Faza	Dominantni tip PP	Nivo ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja
1	N	Dalekovod PG2- Ribarevine	0	-	GRANICA
2	N	Dalekovod PG2- Ribarevine	4	Površinsko pražnjenje	GRANICA
3	N	Dalekovod PG2- Ribarevine	8	Površinsko pražnjenje	GRANICA
4	S	Dalekovod PG2- Ribarevine	0	-	NORMALAN
5	S	Dalekovod PG2- Ribarevine	4	Površinsko pražnjenje	MANJI NIVO
6	S	Dalekovod PG2- Ribarevine	8	Površinsko pražnjenje	MANJI NIVO
7	N	Trafo 1 PG2	0	Površinsko pražnjenje	MANJI NIVO
8	N	Trafo 1 PG2	4	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
9	N	Trafo 1 PG2	8	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
10	S	Trafo 1 PG2	0	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
11	S	Trafo 1 PG2	4	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
12	S	Trafo 1 PG2	8	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
13	N	Dalekovod PG2- Trebinje	0	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
14	N	Dalekovod PG2- Trebinje	4	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
15	N	Dalekovod PG2- Trebinje	8	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
16	S	Dalekovod PG2- Trebinje	0	-	NORMALAN

17	S	Dalekovod PG2- Trebinje	4	-	GRANICA
18	S	Dalekovod PG2- Trebinje	8	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
19	N	Ribarevine- Pljevlja2	0	Površinsko pražnjenje	VISOKI NIVO
20	N	Ribarevine- Pljevlja2	4	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
21	N	Ribarevine- Pljevlja2	8	Kavitaciono pražnjenje	MANJI NIVO
22	S	Ribarevine- Pljevlja2	0	Kavitaciono pražnjenje	MANJI NIVO
23	S	Ribarevine- Pljevlja2	4	Kavitaciono pražnjenje	MANJI NIVO
24	S	Ribarevine- Pljevlja2	8	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO

Iz procjene stanja MT u postrojenju 400 kV nivou trafostanice PG2 i čitajući tabelu 15, može se zaključiti:

- 2 mjerenja (4 i 16) na MT pokazuju dobro stanje opreme i ne zahtijevaju pažnju, drugim riječima stanje izolacije MT je ocijenjeno kao dobro i MT može bez bojazni od proboja da nastavi operativnost.
- 4 mjerenja na MT (1, 2, 3 i 17) ukazuju na početne aktivnosti parcijalnih pražnjenja. S obzirom da je u pitanju početna faza aktivnosti parcijalnih pražnjenja sa kombinacijom površinskih pražnjenja kao dominantnog tipa, korisniku se nalaže monitoring opreme u periodu od 3 - 6 mjeseci. Jedino u slučaju naglog povećanja aktivnosti pražnjenja, mogu se razmotriti druge opcije.
- 3 mjerenja (5, 6 i 7) na MT ukazuju na manje defekte u izolaciji MT. S obzirom da dominiraju površinska pražnjenja, korisniku se nalaže monitoring i u slučaju povećanja aktivnosti isključenje iz operativnosti radi servisa, u suprotnom predlaže se redovan servis sa akcentom na identifikaciju izvora površinskih pražnjenja.
- 9 mjerenja (8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 i 18) na MT pokazuju značajan nivo aktivnosti parcijalnih pražnjenja. Površinska pražnjenja su se pokazala kao dominantan tip. U slučajevima poput ovih predložene su akcije isključenja MT sa mreže u što kraćem periodu, kako bi se poboljšale performanse izolacije MT i smanjio rizik od daljeg napredovanja parcijalnih pražnjenja i proboja u slučaju povećanja. Nakon servisiranja nalaže se novo mjerenje radi otklanjanja svih sumnji od daljih aktivnosti pražnjenja.

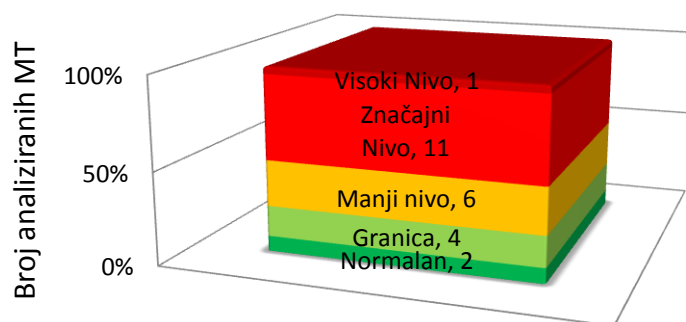
Iz procjene stanja MT u postrojenju 400 kV nivou trafostanice Ribarevine (Bijelo Polje), može se zaključiti:

- 3 mjerenja (21, 22 i 23) na MT ukazuju na manje defekte u izolaciji MT. S obzirom da dominiraju kavitaciona (unutrašnja) pražnjenja, korisniku se nalaže isključenje opreme sa mreže radi servisiranja ukoliko ne iziskuje velike ekonomske gubitke zbog neoperativnosti, u suprotnom monitoring u narednih 6 mjeseci i u slučaju povećanja aktivnosti isključenje iz operativnosti radi servisa.
- 2 mjerenja (20 i 24) na MT pokazuju značajan nivo aktivnosti parcijalnih pražnjenja. Površinska pražnjenja su se pokazala kao dominantan tip. U slučajevima poput ovih

predložene su akcije isključenja MT sa mreže i servisiranje MT kako bi se poboljšale performanse izolacije MT i smanjio rizik od daljeg napredovanja parcijalnih pražnjenja i proboja u slučaju povećanja. Nakon servisiranja nalaže se novo mjerenje radi otklanjanja svih sumnji od daljih aktivnosti pražnjenja.

- jedno mjerenje (19) je pokazalo visok nivo parcijalnih pražnjenja. Površinska pražnjenja su se pokazala kao dominantna. Ozbiljne aktivnosti parcijalnih pražnjenja su nastupile i pokazuje se ozbiljan defekt u izolaciji MT. U slučaju dalje operativnosti rizikuje se preskok u MT, zbog čega je predloženo isključenje sa mreže radi servisa ili remonta. Utvrđivanje izvora pražnjenja je obavezno.

Na slici 8.1 dat je grafički prikaz statistike stanja analiziranih MT u zavisnosti od ozbiljnosti aktivnosti parcijalnih pražnjenja u njihovoj izolaciji. Na osnovu grafika sa slike jasno se može vidjeti da je analiza stanja izolacije MT na 400 kV nivou u preko 70% slučajeva dala rezultate koji upućuju na visoke aktivnosti parcijalnih pražnjenja. Iz svega navedenog zaključuje se da se posebna pažnja mora obratiti u toku remonta opreme. Pronalaženje, kao i eliminisanje mjesta i uzroka pražnjenja su važne karike kako bi se povećala pouzdanost 400 kV postrojenja trafostanica Ribarevine i PG2.



Slika 8.1: Grafik statistike stanja izolacije analiziranih MT na 400 kV naponskom nivou

Analizirani podaci mjerenja u izolaciji MT, u postrojenjima TS PG2 i Ribarevine na 400 kV nivou su pokazali značajnije prisustvo parcijalnih pražnjenja, pri čemu se operativnost opreme može dovesti u pitanje, a samim tim i pouzdanost rada postrojenja u kojima je oprema instalirana. U više od polovine slučajeva ispitivanih MT je potrebno da se intervenišu prijevremenim isključenjem sa mreže.

VIII.2 Analiza rezultata na 220 kV nivou

Mjerenja su rađena u toku septembra 2014. godine. Zbog dostupnosti i redovnog pregleda opreme u trafostanici izvršeno je 180 mjerenja na 18 MT u trafostanici PG1 u 220 kV postrojenju. MT uzeti u obzir detaljno su analizirani i obrađeni. Za MT analizirane u ovom potpoglavlju su predložene korektivne akcije u zavisnosti od ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja. Uzeto je u obzir 10 mjerenja za svaki pojedinačni transformator. Zbog preglednosti podataka i korektivnih akcija, dominantna pražnjenja i nivo ozbiljnosti pražnjenja su dati tabelarno, a zatim predložene korektivne akcije u konkretnim slučajevima.

Primjenom uređaja za snimanje parcijalnih pražnjenja PD-PAC, softverskog paketa PDPRO - DUA i primjenom programa za ozbiljnost GUI - MATLAB obrađeno je 18 MT na 220 kV nivou u trafostanici PG1.

U tabeli 16 pored tipa MT, faze i dominantnog tipa pražnjenja dat je pregled nivoa pražnjenja procijenjenih primjenom matematičkog modela iz potpoglavlja V.3. Čitanjem prijedloga korektivnih akcija iz potpoglavlja V.4 mogu se utvrditi na osnovu nivoa pražnjenja i sljedeći koraci koji moraju biti preduzeti u cilju poboljšanja rada MT i povećanja pouzdanosti VN postrojenja.

Tabela 16. Nivo ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja MT na 220 kV nivou

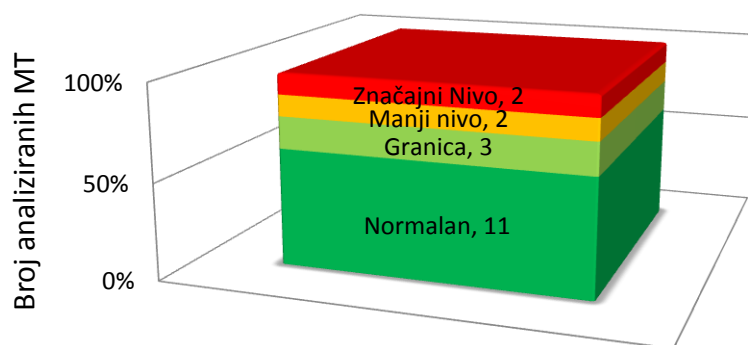
Broj MT	Tip MT	Polje	Faza	Dominantni tip PP	Nivo ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja
1	N	Dalekovod PG1-Perućica	0	-	NORMALAN
2	N	Dalekovod PG1-Perućica	4	-	GRANICA
3	N	Dalekovod PG1-Perućica	8	-	NORMALAN
4	S	Dalekovod PG1-Perućica	0	-	NORMALAN
5	S	Dalekovod PG1-Perućica	4	-	GRANICA
6	S	Dalekovod PG1-Perućica	8	-	NORMALAN
7	N	Dalekovod PG1-Mojkovac	0	Površinska pražnjenja	MANJI NIVO
8	N	Dalekovod PG1-Mojkovac	4	Površinska pražnjenja	ZNAČAJNI NIVO
9	N	Dalekovod PG1-Mojkovac	8	-	GRANICA
10	S	Dalekovod PG1-Mojkovac	0	Površinska pražnjenja	MANJI NIVO
11	S	Dalekovod PG1-Mojkovac	4	Površinska pražnjenja	ZNAČAJNI NIVO
12	S	Dalekovod PG1-Mojkovac	8	-	NORMALAN
13	S	Trafo 1 PG1	0	-	NORMALAN
14	S	Trafo 1	4	-	NORMALAN

		PG1			
15	S	Trafo 1 PG1	8	-	NORMALAN
16	S	Trafo 2 PG1	0	-	NORMALAN
17	S	Trafo 2 PG1	4	-	NORMALAN
18	S	Trafo 2 PG1	8	-	NORMALAN

Iz procjene stanja MT u postrojenju 220 kV nivou trafostanice PG1, može se zaključiti:

- 11 (1, 3, 4, 6, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18) mjerenja na MT pokazuju dobro stanje opreme i ne zahtijevaju pažnju, drugim riječima stanje izolacije MT je ocijenjeno kao dobro i MT može bez bojazni od proboja da nastavi operativnost.
- 3 (2, 5 i 9) mjerenja na MT ukazuju na početne aktivnosti parcijalnih pražnjenja, sa tim da se ne može utvrditi tačno dominantan tip pražnjenja. U ovakvim situacijama korisniku se nalaže monitoring opreme u daljem periodu (najduže 6 mjeseci).
- 2 mjerenja (7 i 10) na MT ukazuju na manje defekte u izolaciji MT. S obzirom da dominiraju površinska pražnjenja, korisniku se nalaže monitoring i u slučaju povećanja aktivnosti isključenje iz operativnosti radi servisa, u suprotnom predlaže se redovan servis sa akcentom na identifikaciju izvora površinskih pražnjenja.
- 2 (8 i 11) mjerenja na MT pokazuju značajan nivo aktivnosti parcijalnih pražnjenja. Površinska pražnjenja su se pokazala kao dominantan tip. U slučajevima poput ovih predložene su akcije isključenja MT sa mreže i servisiranje MT kako bi se poboljšale performanse izolacije MT i smanjio rizik od daljeg napredovanja parcijalnih pražnjenja i proboja u slučaju povećanja. Nakon servisiranja nalaže se novo mjerenje radi otklanjanja svih sumnji od daljih aktivnosti pražnjenja.

Na slici 8.2 dat je grafički prikaz statistike stanja analiziranih MT u zavisnosti od ozbiljnosti aktivnosti parcijalnih pražnjenja u njihovoj izolaciji. Na osnovu grafika sa slike jasno se može vidjeti da je analiza stanja izolacije MT na 220 kV nivou u preko 70% slučajeva dala rezultate koji upućuju na normalno stanje izolacije. Iz svega navedenog zaključuje se da je oprema u dobrom stanju i da pouzdanost postrojenja se može dodatno poboljšati intervencijom u toku remonta i mijenjanjem kritičnih transformatora.



Slika 8.2 Grafik statistike stanja izolacije analiziranih MT na 220 kV naponskom nivou

Analizirani podaci mjerenja u izolaciji MT, u postrojenjima TS PG1 na 220 kV nivou su pokazali niske aktivnosti parcijalnih pražnjenja, pri čemu se operativnost opreme ne dovodi u pitanje, a samim tim i pouzdanost rada postrojenja u kojima je oprema instalisana. Samo u 2 od 18 posmatranih slučajeva je potrebno da se interveniše.

VIII.3 Analiza rezultata na 110 kV nivou

Mjerenja su rađena u toku marta 2015. godine. Zbog dostupnosti i redovnog pregleda opreme u trafostanici izvršeno je 180 mjerenja na 18 MT u trafostanici Bar u 110 kV postrojenju. MT uzeti u obzir detaljno su analizirani i obrađeni. Za MT analizirane u ovom potpoglavlju su predložene korektivne akcije u zavisnosti od ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja. Uzeto je u obzir 10 mjerenja za svaki pojedinačni transformator. Zbog preglednosti podataka i korektivnih akcija, dominantna pražnjenja i nivo ozbiljnosti pražnjenja su dati tabelarno, a zatim predložene korektivne akcije u konkretnim slučajevima.

Primjenom uređaja za snimanje parcijalnih pražnjenja PD-PAC, softverskog paketa PDPRO - DUA i primjenom programa za ozbiljnost GUI - MATLAB obrađeno je 18 MT na 110 kV nivou u trafostanici u Baru.

U tabeli 17 pored tipa MT, faze i dominantnog tipa pražnjenja dat je pregled nivoa pražnjenja procijenjenih primjenom matematičkog modela iz potpoglavlja V.3. Čitanjem prijedloga korektivnih akcija za različite nivoe pražnjenja (potpoglavlje V.4) mogu se utvrditi sljedeći koraci koji moraju biti preduzeti u cilju poboljšanja rada MT i povećanja pouzdanosti VN postrojenja.

Tabela 17. Nivo ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja MT na 110 kV nivou

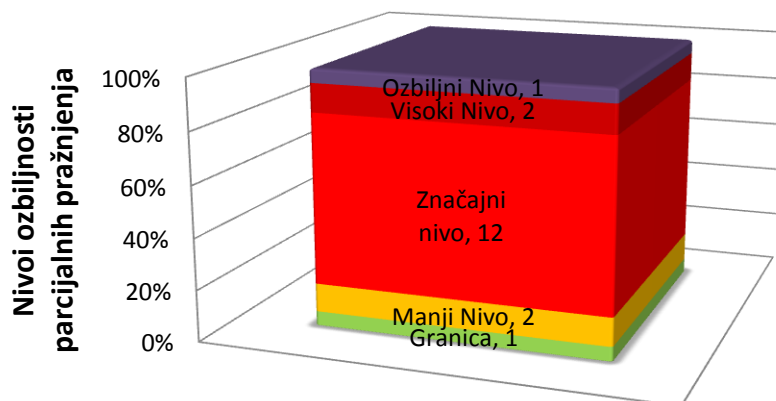
Broj MT	Tip MT N- Naponski, S-Strujni	Polje	Faza	Dominantni tip PP	Nivo ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja
1	N	Dalekovod Bar - Budva	0	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
2	N	Dalekovod Bar - Budva	4	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
3	N	Dalekovod Bar - Budva	8	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
4	S	Dalekovod Bar - Budva	0	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
5	S	Dalekovod Bar - Budva	4	Površinsko pražnjenje	MANJI NIVO
6	S	Dalekovod Bar - Budva	8	-	GRANICA
7	N	Dalekovod Bar - Ulcinj	0	Površinsko pražnjenje	MANJI NIVO
8	N	Dalekovod Bar - Ulcinj	4	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
9	N	Dalekovod Bar - Ulcinj	8	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
10	S	Dalekovod Bar - Ulcinj	0	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
11	S	Dalekovod Bar - Ulcinj	4	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO

12	S	Dalekovod Bar - Ulcinj	8	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
13	N	Dalekovod Bar - Virpazar	0	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
14	N	Dalekovod Bar - Virpazar	4	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
15	N	Dalekovod Bar - Virpazar	8	Površinsko pražnjenje	VISOKI NIVO
16	S	Dalekovod Bar - Virpazar	0	Površinsko pražnjenje	ZNAČAJNI NIVO
17	S	Dalekovod Bar - Virpazar	4	Površinsko pražnjenje	VISOKI NIVO
18	S	Dalekovod Bar - Virpazar	8	Površinsko pražnjenje	OZBILJAN NIVO

Iz procjene stanja MT u postrojenju 110 kV nivou trafostanice u Baru, može se zaključiti:

- jedno mjerenje (6) na MT ukazuje na početne aktivnosti parcijalnih pražnjenja, sa tim da se ne može utvrditi tačno dominantan tip pražnjenja. U ovakvim situacijama korisniku se nalaže ponovno mjerenje i u slučaju nemogućnosti određivanja dominantnog tipa monitoring MT u daljem periodu (3 mjeseca).
- 2 mjerenja (5 i 7) na MT ukazuju na manje defekte u izolaciji MT. S obzirom da dominiraju površinska pražnjenja, korisniku se nalaže monitoring i u slučaju povećanja aktivnosti isključenje iz operativnosti radi servisa, u suprotnom predlaže se redovan servis sa akcentom na identifikaciju izvora površinskih pražnjenja.
- 12 mjerenja (1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 i 16) na MT pokazuju značajan nivo aktivnosti parcijalnih pražnjenja. Površinska pražnjenja su se pokazala kao dominantan tip. U slučajevima poput ovih predložene su akcije isključenja MT sa mreže u što kraćem mogućem periodu i servisiranje MT kako bi se poboljšale performanse izolacije MT i smanjio rizik od daljeg napredovanja parcijalnih pražnjenja i proboja u slučaju povećanja. Nakon servisiranja nalaže se novo mjerenje radi otklanjanja svih sumnji od daljih aktivnosti pražnjenja.
- 2 mjerenja (15 i 17) su pokazala visok nivo parcijalnih pražnjenja. Površinska pražnjenja su se pokazala kao dominantna. Visoke aktivnosti parcijalnih pražnjenja su nastupile i pokazuje se ozbiljan defekt u izolaciji MT. U slučaju dalje operativnosti rizikuje se preskok u izolaciji MT, zbog čega je predloženo isključenje sa mreže radi servisa ili remonta. Utvrđivanje izvora pražnjenja je obavezno.
- jedno mjerenje (18) je pokazalo ozbiljan nivo pražnjenja. U slučaju poput ovog korisniku se nalaže zamjena opreme. Dominantna su površinska pražnjenja. U rijetkim slučajevima je ekonomski isplativ remont, dalja električna mjerenja i utvrđivanje mogućnosti rada MT.

Na slici 8.3 dat je grafički prikaz statistike stanja analiziranih MT u zavisnosti od ozbiljnosti aktivnosti parcijalnih pražnjenja u njihovoj izolaciji. Na osnovu grafika sa slike jasno se može vidjeti da je analiza stanja izolacije MT na 110 kV nivou u 100% slučajeva dala rezultate koji upućuju na početna ili ozbiljne aktivnosti parcijalnih pražnjenja koje mogu ugroziti izolaciju MT. Samim tim postoji opasnost od havarije na MT, a obavezno je isključenje 3 MT iz pogona u sto kraćem vremenskom periodu. Pouzdanost trafostanice je ugrožena ukoliko MT nastave operativnost. Iz svega navedenog zaključuje se da je oprema nepouzdana i da iziskuje ozbiljne intervencije radi sprečavanja zatajenja izolacije MT.



Slika 8.3 Grafik statistike stanja izolacije analiziranih MT na 110 kV naponskom nivou

Analizirani podaci mjerenja u izolaciji MT, u postrojenju TS Bar na 110 kV nivou su pokazali veoma visoke aktivnosti parcijalnih pražnjenja, pri čemu se operativnost opreme dovela u pitanje i neophodno je što ranije isključenje sa mreže, kako se ne bi rizikovala havarija i ugrozila pouzdanost rada postrojenja u kojima je oprema instalisana.

Kada se sagleda analiza podataka dobijenih za sva tri naponska nivoa u CGES-u može se zaključiti sljedeće:

- na osnovu prikazane analize podataka rezultati su pokazali da je stanje izolacije MT na 220 kV nivou u postrojenju TS PG1 na visokom nivou i da su aktivnosti parcijalnih pražnjenja daleko niže od 400 kV i 110 kV nivoa,
- analiza pokazuje da je stanje MT u TS Bar na 110 kV nivou loše sa stanovišta aktivnosti parcijalnih pražnjenja, što zahtijeva što hitniju zamjenu skoro svih MT sa mreže,
- rezultati u TS PG2 i Ribarevine na 400 kV nivou su pokazali da treba obratiti pažnju i intervenisati na polovini ispitanih MT.

IX ZAKLJUČAK

Parcijalno pražnjenje predstavlja djelimičan proboj izolacije. To je ustvari iskričavo pražnjenje unutar defekta u izolaciji i unutar šupljina koje mogu biti ispunjene vazduhom ili gasovima. Testiranjem izolacije na postojanja parcijalnih pražnjenja identifikuju se upravo ti defekti u izolaciji, na osnovu čega se može suditi o stanju izolacije.

Ispitivanje aktivnosti i nivoa parcijalnih pražnjenja u MT ima značajnu ulogu u dijagnostici stanja izolacionog sistema i prevenciji havarije. Principi detektovanja i mjerenja parcijalnih pražnjenja se baziraju na praćenju razmjene energije koja se dešava u trenutku parcijalnog pražnjenja. Tokom istorije konvencionalne analogne instrumente su zamijenili moćniji digitalni sistemi koji su pokušavali da izađu u susret sve češćim zahtjevima za povećanjem tačnosti i naučnim i tehničkim dostignućima.

U slučaju velikih struja i visokih napona za mjerenje električnih veličina (struje i napona) primjenjuju se MT, zbog čega su MT sastavni dijelovi i bitna karika u VN postrojenjima. MT se dijele na naponske i strujne. Naponski MT se spajaju paralelno sa mrežom i njihova prisutnost ne smije da remeti tok struje (ne smije da izaziva značajne gubitke), što znači da kroz primarni namotaj teče jako mala struja. Strujni MT se vezuje redno sa mrežom, što znači da kroz njega teče puna struja potrošača.

U dosadašnjim istraživanjima mjerenje parcijalnih pražnjenja se obavljalo uglavnom u laboratorijskim uslovima. Istraživanja su se vršila u off-line režimu. Problemi ovakvih istraživanja su se ogledali u povećanju troškova, nepotrebnim isključenjima opreme, kao i dužem vremenu potrebnom za analizu stanja opreme.

U radu je pokazano kako je moguće koristiti novu metodu za mjerenje i istraživanje parcijalnih pražnjenja. Ispitivanjima ovom metodom omogućeno je smanjenje troškova istraživanja, izbjegnuto nepotrebno isključenje MT i omogućeno izbjegavanje troškova prevoza. Metoda je omogućila mjerenje parcijalnih pražnjenja na licu mjesta, a kasnijom obradom istih i dobijanje podataka na osnovu kojih se može doći do zaključka o stanju izolacije VN opreme, u ovom slučaju MT.

Rad opisuje uticaj intenziteta parcijalnog pražnjenja na stanje izolacije MT sa uljnopapirnom izolacijom. Mjerenje intenziteta pražnjenja realizovano je pomoću PD-PAC konzole primjenjujuću tehniku detektovanja elektromagnetnih talasa koji potiču od struja parcijalnog pražnjenja. EM senzor uređaja za mjerenje parcijalnih pražnjenja otkriva i snima promjene koje se dešavaju u izolaciji MT, a zatim su u softveru dobijeni podaci profiltrirani od spoljašnjih šumova i obrađeni.

U cilju ilustracije mogućnosti primjene EM metode za detekciju parcijalnih pražnjenja izvršena su istraživanja na MT u CGES-u na 400 kV, 220 kV i 110 kV naponskim nivoima. Trafostanice se nalaze u Podgorici, Bijelom Polju i Baru i odabrane su na osnovu naponskog nivoa, uslova i mogućnosti mjerenja dostupnih tokom istraživanja. Obrađeno je ukupno 60 MT. Na svim MT urađeno je po 10 mjerenja, što znači da je izvršeno ukupno 600 mjerenja koja su iskorišćena za analizu i dobijanje korisnih podataka. Iz razmatranih rezultata kao karakteristični izdvojeni su za detaljniju analizu samo nekoliko tipičnih koji ukazuju na ozbiljnost parcijalnih pražnjenja. Zbog toga, izdvojeni su broj pulsacija, prosječna i maksimalna jačina parcijalnih pražnjenja, kao i tip dominantnog pražnjenja.

Analizirani rezultati ukazuju na stanje izolacije MT u odabranim trafostanicama (TS PG1, TS PG2, TS Ribarevine i TS Bar). Kao što je već rečeno TS PG1, TS PG2, TS Ribarevine i TS Bar su izabrane na osnovu naponskog nivoa, uslova i dostupnosti mjerenja u toku istraživanja. Kako je mjerenje parcijalnih pražnjenja izloženo velikima smetnjama iz okoline, što je karakteristično za VN postrojenja, konačni rezultati i korektivne akcije vezane za MT su bazirani i na iskustvu dobijenom iz većeg broja mjerenja.

Za detaljnije analize urađen je matematički model koji najbolje odgovara razmatranim slučajevima. Urađen je na osnovu tablice ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja. Primjenom matematičkog modela za dobijanje nivoa ozbiljnosti parcijalnih pražnjenja dobijeni su konkretni rezultati koje je moguće povezati sa korektivnim akcijama predloženim za dobijeni nivo ozbiljnosti. Program je urađen u programskom paketu MATLAB, koristeći GUI.

Program je urađen za potrebe ovog istraživanja i omogućuje unos prethodno pomenutih karakterističnih podataka dobijenih mjerenjem i obradom u PDPRO-DUA softveru. Takođe, omogućeno je i izračunavanje energetskog nivoa parcijalnog pražnjenja na osnovu broja detektovanih pulsacija i prosječne jačine napona parcijalnih pražnjenja.

Dobijeni rezultati su pokazali da VN oprema (MT) u CGES zahtijevaju u većini slučajeva veću pažnju od strane korisnika kako bi se poboljšale performanse izolacije MT i pouzdanost rada prenosnog sistema i postrojenja u kojima se nalaze. Logičnost dobijenih rezultata se ogleda u relativno staroj opremi koja se još uvijek koristi u postrojenjima CGES-a, što ukazuje na nedovoljno pouzdan rad tih postrojenja. Najbolji način za otklanjanje sumnji je upravo mjerenje parcijalnih pražnjenja na čemu rad dodatno dobija na značaju.

U konkretnim slučajevima rezultati su dali prisustvo visokih aktivnosti parcijalnih pražnjenja u 70% ispitanih MT na 400 kV nivou. Zaključuje se da posebna pažnja se mora obratiti u toku remonta opreme. Pronalaženje, kao i eliminisanje mjesta i uzroka pražnjenja su važne karike kako bi se povećala pouzdanost 400 kV postrojenja TS Ribarevine i TS PG2.

U preko 70% ispitanih MT na 220 kV nivou ustanovljeno je dobro stanje opreme. Iz navedenog se zaključuje da je oprema u dobrom stanju. Pouzdanost postrojenja se može dodatno poboljšati intervencijom u toku remonta i mijenjanjem kritičnih MT.

Na 110 kV nivou, na 100% ispitanih MT je dokazano prisustvo aktivnosti parcijalnih pražnjenja. Analizirani podaci u postrojenju TS Bar su pokazali veoma visoke aktivnosti parcijalnih pražnjenja, pri čemu se operativnost opreme dovela u pitanje i neophodno je što ranije isključenje sa mreže.

Kada se sagleda analiza podataka dobijenih za sva tri naponska nivoa u CGES-u može se zaključiti sljedeće:

- na osnovu prikazane analize podataka rezultati su pokazali da je stanje izolacije MT na 220 kV nivou u postrojenju TS PG1 na visokom nivou i da su aktivnosti parcijalnih pražnjenja daleko niže od 400 kV i 110 kV nivoa,
- analiza pokazuje da je stanje MT u TS Bar na 110 kV nivou loše sa stanovišta aktivnosti parcijalnih pražnjenja, što zahtijeva što hitniju zamjenu ili remont na skoro svim MT,
- rezultati u TS PG2 i TS Ribarevine na 400 kV nivou su pokazali da treba obratiti pažnju i intervenisati na polovini ispitanih MT.

Kako je moguće izvoditi veliki broj mjerenja i dobijanje validnih podataka o stanju izolacije MT u razumnom vremenskom periodu, opravdanost ove metode za mjerenje parcijalnih pražnjenja je očigledna i sa ekonomskog aspekta. Iz tog razloga u radu je istaknut značaj analiziranja ovom tehnologijom mjerenja parcijalnih pražnjenja, kao validnom za evaluaciju stanja izolacije MT. Poseban akcenat je stavljen na unapređenje senzora za detekciju parcijalnih pražnjenja u različitim frekventnim opsezima, sa dodatnom mogućnošću otklanjanja šuma koji remeti tačnost dobijenih mjerenja. Izuzetna složenost softvera za obradu i otklanjanje šumova iz mjerenja, dobijenih EMS senzorom ukazuje na mogućnost daljih istraživanja i unapređivanja mjernih tehnologija i u oblasti obrade podataka.

Dosadašnja istraživanja su pokazala da je dosta teško obezbijediti dobru povezanost ovog fenomena i starenja izolacije u visokonaponskoj opremi. Zbog toga su neophodna dalja istraživanja na temu parcijalnih pražnjenja.

Stohastička priroda parcijalnih pražnjenja i fluidnost ove oblasti ukazuju na mogućnost za daljim istraživanjima i napretku u ovoj važnoj oblasti tehnike visokog napona.

POPIS OSNOVNE LITERATURE

- [1] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, 'High Voltage engineering - fundamentals, second edition', Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.
- [2] Jugoslovenski standard JUS N.A5.530 Visokonaponska ispitivanja, Mjerenje parcijalnih pražnjenja (1990).
- [3] CEI 60076-3 Transformateurs de puissance, Niveaux d'isolement essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air, Commission Électrotechnique Internationale (2000).
- [4] Krystian Leonard Chrzan, 'High Voltage Laboratory training', Wroclaw University of Technology, Wroclaw, Poland, 2011.
- [5] BICC cables, 'Electric cables handbook', third edition, Wiley-Blackwell 1997, dostupan u Knovel bazi podataka.
- [6] Naidu M.S., Kamaraju V., 'High Voltage Engineering, second Ed.', McGraw-Hill, 1996, Chapter 9.
- [7] J.P. Holtzhausen, W.L. Vosloo, 'High Voltage Engineering', Practice and Theory, Stellenbosch University, 2008, Chapter 4.
- [8] Z.T. Yao, T.K. Saha, 'Separation of ageing and moisture impacts on transformer insulation degradation by polarization phenomena', CIGRE, Paris, 2002.
- [9] M. Simović, J. Mikulović, 'The simulation of partial discharges', Infoteh, Jahorina, 2003.
- [10] Jugoslovenski standard JUS N.H9. 100 Mjerni transformatori, Mjerenje parcijalnih pražnjenja, 1984.
- [11] B. Oyegoke, P. Hyvönen, M. Aro, 'Partial discharge measurement as diagnostic tool for power cable system', Helsinki University of Technology, 2001.
- [12] N. Kartalović, 'Stohastičnost impulsnog odziva gasne izolacije', Beograd, 2000.
- [13] E. Gulski, P. Cicecki, R. Jongen, 'Aspects of PD interpretation in HV power cables', Delft University of Technology.
- [14] M. Krüger, A. Kraetge, M. Koch, K. Rethmeier, M. Pütter, L. Hulka, N. Koch, M. Muhr, C. Summereder, OMICRON Energy, Klaus, Austria 2MICAFIL, Zürich, Switzerland, 3TU Graz, Austria, 'New diagnostic tools for high voltage bushings', Johannesburg, 2009.
- [15] Robert Schwarz, Michael Muhr, 'Measurement Techniques for Transformer Diagnostic', Graz University of technology.
- [16] M. Hans Michael, S. Robert, 'Partial discharge impulse characteristics of different detection systems', Graz University of technology.
- [17] M. Tozzi, 'Partial discharges in power distribution electrical systems pulse propagation models and detection optimization', University of Bologna, 2010.
- [18] D. King, K. Feser, "High Voltage Test Techniques", Newnes, 2nd edition, 2001.
- [19] Hoestar PD Technology, Partial Discharge Analyzer Console, PD Pac, Operator's Manual, Singapore, 2006.
- [20] L. Beranová, K. Záliš, 'Partial discharge measurement in operation problems with disturbances and their removing', Czech Technical University in Prague.
- [21] E. Gulski, D. Allan, 'Knowledge rules for partial discharge diagnosis in service', Technical Brochure, No. 207, 2003.
- [22] E. Gulski, H.P. Burger, 'PD data base for power transformers and reactors', Delft University of Technology, Quebec, 1997.
- [23] Eberhard Lemke, 'Guide for partial discharge measurements in compliance to IEC 60270', CIGRE, 2008.

- [24] IEC Standard 60270, Partila Discharge Measurements, International Electro technical Commission, Geneva, Switzerland, Third edition, 2000.
- [25] G. Paoletti, A. Golubev, 'PD practice and theory'.
- [26] ABB, 'Testing of Power Transformers', 1st edition, Zurich, 2003.
- [27] Bolliger, E. Lemke, 'PD Diagnostic - its history and future', Virginia, 2001.
- [28] S. Hicks, 'On- line PD testing', Emerson, electro test inc.
- [29] P. Agoris, S. Meijer, E. Gulski, J. Smit, L.M. Kanters, 'On-line partial discharge detection on transformers', Delft University of Technology, CIRED, Turin, 2005.
- [30] G. Paoletti, A. Golubev, 'Partial Discharge Theory and Applications to Electrical Systems', Presented at the 1999, IEEE.
- [31] S. M. Hoek, M. Koch, M. Heindl, 'Emission and Propagation Mechanisms of PD Pulses for UHF and Traditional Electrical Measurements', Vol. 4, 2012.
- [32] Ruay - Nan Wu, Yu - Hsun Lin, 'Estimating the aging trend of dry-type current transformer', Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 27, No. 1, pp. 69-77 (2004).
- [33] R. Čađenović, S. Škuletić, V. Radulović, 'Mjerenje parcijalnog pražnjenja i njihov uticaj na starenje izolacije', IV savjetovanje Crnogorskog komiteta za velike električne mreže, CG KO CIGRE, STK A3, R A3-, Herceg Novi, Igalo, 11.-14. maj, 2015 pp. 10.
- [34] M. Yaacob, M. Alsaedi, Jr. Rashed, Am. Dakhi, Sf. Atyah, 'Review on Partial Discharge Detection Techniques Related to High Voltage Power Equipment Using Different Sensors', PHOTONIC SENSORS / Vol. 4, No. 4, 2014: 325-337.
- [35] C. Suwanasri, T. Suwanasri, P. Fuangpian, 'Investigation on Partial Discharge of Power Cable Termination Defects using High Frequency Current Transformer', ECTI transactions on electrical eng., electronics, and communications vol.12, no.1 February 2014.
- [36] V. Polužanski, U. Kovačević, N. Miladinović, A. Milošević, J. Lazić, 'Baza podataka za dijagnostiku stanja generatora u okviru dijagnostičkog centra', INFOTEH-JAHORINA Vol. 13, mart 2014.
- [37] N. Kartalović, N. Ilić, A. Milošević, D. Teslić, N. Cakić, S. Milosavljević, 'Metoda za ultrazvučno ispitivanje parcijalnih pražnjenja kod mernih transformatora', Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija, (2012), 22.p.223-234.
- [38] S. Marinković, D. Teslić, Đ. Jovanović, N. Kartalović, M. Sušić, '„Ultrazvučno ispitivanje parcijalnih pražnjenja kod mernih transformatora“, Zbornik radova za međunarodnu konferencija CG KO CIGRE, Budva, 12-16. oktobar 2009. godine.
- [39] D. Teslić, A. Bojković, S. Marinković, M. Belčević, S. Đurović, S. Milosavljević, S. Teslić, '„Strategija preventivne kontrole mernih transformatora: on-line akustična metoda merenja parcijalnih pražnjenja uz podršku gasnohromatografske analize ulja“, STK 3 R3.2, JUKO CIRED, V.Banja, 30.09 – 03.10.2008.
- [40] Denis Ilić, Ilija Klasnić, Jelena Ponoćko, Draganja Mihajlović, Ljubiša Nikolić, Srdjan Milosavljević, Dušan Arnautović, 'Ispitivanje stanja izolacionog sistema mernih transformatora (110 kV i više) ultrazvučnom metodom', Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija.
- [41] Lj. Milanković, Tehnika visokog napona, ETF, Beograd, 1981.
- [42] S. Škuletić, Tehnika visokog napona, UCG UR, Titograd, 1989.
- [43] IEC-Publication 1: Specification for CISPR radio interference measuring apparatus for the frequency range 0.15 Mc/s to 30 Mc/s (1961.)
- [44] CISPR 16-1: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus (1993.)

- [45] IEC 60270: High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, third edition (2000)
- [46] IEC 62478: High-voltage test techniques – Measurement of partial discharge by electromagnetic and acoustic methods (first edition, 200-xx)
- [47] Knowledge Rules for Partial Discharge Diagnosis in Service. CIGRE JWG-TF 15.11/33.03.02, Technical Brochure 226 (2003).
- [48] S. Kornhuber, S. Markalous, M. Muhr, T. Strehl, C. Sumereder, ‘Comparison of methods for the dissipation factor measurement at practical examples’, Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering, SAIEE, Innes House, Johannesburg, 2009.
- [49] G. Hoogenraad, J. Beyer, ‘Digital HVDC Partial Discharge Testing’, ISEI, 2000.
- [50] G. C. Montanari, ‘Insulation Diagnosis of High Voltage Apparatus by Partial Discharge Investigation’, IEEE, 2006.
- [51] E. Lemke P. Schmiegel, ‘INTRODUCTION TO FUNDAMENTALS OF PD DIAGNOSTICS’, LEMKE DIAGNOSTICS GmbH, Germany
- [52] User’s manual, PARTIAL DISCHARGE MEASURING SYSTEM LDS6, Version: 01-99 (January 1999.)
- [53] N. Kartalović, A. Milošević, S. Milosavljević, MODEL PARCIJALNIH PRAŽNENJA KOD VELIKIH OBJEKATA, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd, Koste Glavinića 8A
- [54] A. Bolliger, E. Lemke, PD Diagnostics - Its History and Future, workshop, Virginia, December 3th and 4th 2001.
- [55] Jugoslovenski standard JUS N.C0.042 Ispitivanje energetske kablova, Mjerenje parcijalnih pražnjenja (1990).
- [56] K. Zalis, L. Beranova, L. Prskavec and R. Teminova, Some Problems with Partial Discharge Measurement in On-line Mode, Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, Department of Electroenergetics, 2002.
- [57] M. Muhr, R. Schwarz, S. Jauffer, Electrical Measurements as Diagnostic Tool for HV-Insulations, Portoroz, 8th Höfler’s Day 2005
- [58] Partial Discharge Measurements. IEC Standard 270, 1981.
- [59] Koh Yong Kwee James, Leong Weng Hoe, Latest Development in Partial Discharge Testing, Hoestar Group, March 2010.
- [60] M. Muhr, T. Strehl, E. Gulski, Sensors and sensing used for non-conventional PD detection, CIGRÉ, D1-102, 2006.
- [61] OSNOVNA TEHNIČKA DOKUMENTACIJA 3101/1 400/110 KV PODGORICA 2, "Elektroprenos", Podgorica, novembar 2003.
- [62] OSNOVNA TEHNIČKA DOKUMENTACIJA 3102/ 3 RP 400 KV, TS 110 / 35 KV RIBAREVINE, "Elektroprenos", Podgorica, jun 2004.
- [63] OSNOVNA TEHNIČKA DOKUMENTACIJA 3102 / 9 TS 110 / 35 KV BAR, "Elektroprenos", Podgorica, april 2004.
- [64] OSNOVNA TEHNIČKA DOKUMENTACIJA 3102 / 4 TS 220 / 110 / 35KV PODGORICA 1, "Elektroprenos", Podgorica, jun 2004.
- [65] S. Jovičević, Teorijska Elektromagnetika, Klub Studenata Elektrotehnike, 1995.
- [66] Wei-Chih Wang, Electromagnetic Wave Theory, Department of Mechanical Engineering, University of Washington, ME 557.
- [67] International standard IEC 60044-1, Instrument transformers - Part1:Current transformers, 2003-02
- [68] International standard IEC 60044-2, Instrument transformers - Part 2: Inductive voltage transformers, 2003-02.

- [69]International standard IEC 60044-6, Instrument transformers - Part 3: Combined transformers 2002-12
- [70]International standard IEC 60044-5, Instrument transformers - Part 5: Capacitor voltage transformers 2002-07
- [71]International standard IEC 60044-6, Instrument transformers - Part 6: Requirements for protective current transformers for transient Performance 1992-03
- [72]Osnovne definicije za izbor strujnih MT, FER, Univerzitet u Zagrebu, poglavlje 2, 2011.
- [73]Naponski Mjerni Transformatori, FER, Univerzitet u Zagrebu, poglavlje 1, strana 1-17, 2011.
- [74]NEMA 107: Methods of Measuring Radio Noise, first edition (1940) ,
- [75]NEMA 107 (R 1971): Methods of Measurement for Radio Influence Voltage (RIV) of High-Voltage Apparatus, second edition (1964).
- [76]Ljubičić, V., Ravlić, V.: Izbor strujnih mjernih transformatora i udešenje relejne zaštite u TS 110/10(20) kV DOBRI, Zagreb 2002.

PRILOZI

Grafici

Kod i algoritam programa

Podaci