

Univerzitet Crne Gore
Elektrotehnički fakultet



ZORAN MIJAJLOVIĆ

**ANALIZA POGONSKE RASPOLOŽIVOSTI ODVODNIKA
PRENAPONA U MREŽAMA VISOKOG NAPONA
PRIMJENOM RAZLIČITIH DIJAGNOSTIČKIH METODA**

-MASTER RAD-

Podgorica, jun 2023. godine

PODACI I INFORMACIJE O KANDIDATU

Ime i prezime: Zoran Mijajlović

Datum i mjesto rođenja: 16.03.1998. godine, Podgorica, Crna Gora

Naziv završenog studijskog programa i godina diplomiranja: Energetika i automatika, 2020. godine

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv osnovnih studija: Energetika i automatika, smjer Elektroenergetski sistemi

Naslov master rad: Analiza pogonske raspoloživosti odvodnika prenapona u mrežama visokog napona primjenom različitih dijagnostičkih metoda

Fakultet/Akademija na kojem je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet, Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 16.05.2022.

Datum sjednice Vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema:
22.02.2023.

Mentor: Prof. dr Vladan Radulović

Komisija za ocjenu rada:

Prof. dr Zoran Miljanić

Prof. dr Vladan Radulović

Prof. dr Saša Mujović

Komisija za odbranu rada:

1. Prof. dr Zoran Miljanić

2. Prof. dr Vladan Radulović

3. Doc. dr Snežana Vujošević

Datum odbrane: 27.12.2023.

Datum promocije: _____

Ime i prezime autora: Zoran Mijajlović, BSc

ETIČKA IZJAVA

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 20 Pravila studiranja na master studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je master rad pod naslovom

"Analiza pogonske raspoloživosti odvonika prenapona u mrežama visokog napona primjenom različitih dijagnostičkih metoda "

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,

Zoran Mijajlović, BSc

U Podgorici, dana 09.06.2023. godine

SADRŽAJ

U V O D	5
1. OSNOVNI POJMOVI I DEFINICIJE	9
1.1. Lista korišćenih skraćenica i oznaka	9
1.2. Osnovni pojmovi i definicije	10
2. POUDANOST RADA IZOLACIJE OBJEKATA VISOKOG NAPONA	12
2.1. Starenje električne opreme	13
2.2. Karakteristične funkcije i pokazatelji sistema	14
2.3. Izbor vrijednosti parametara pouzdanosti	15
2.4. Proračun parametara pouzdanosti	16
3. PRENAPONI U ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU	19
3.1. Opšte karakteristike prenapona	19
3.2. Atmosferski prenaponi	20
3.3. Sklopni prenaponi	21
3.4. Standardni podnosivi naponi izolacionih konstrukcija i zaštita od prenapona.....	22
4. ODVODNIK PRENAPONA	24
4.1. Istorijat razvoja konstrukcije odvodnika prenapona	24
4.2. Konstruktivne karakteristike odvodnika prenapona.....	25
4.3. Modeli i ekvivalentne šeme odvodnika prenapona	30
4.4. Energetsko opterećenje odvodnika prenapona	32
4.5. Primjena odvodnika prenapona u prenosnim mrežama.....	36
4.6. Izbor odvodnika prenapona	40
5. MONITORING I DIJAGNOSTIKA ODVODNIKA PRENAPONA	42
5.1. Metode za monitoring odvodnika prenapona bazirane na analizi struje odvođenja.....	43
5.2. Termovizijska kontrola	47
5.3. Mjerenje povratnog napona - RVM	49
5.4. Parcijalna pražnjenja	51
5.5. Detekcija atmosferskog pražnjenja	55
6. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA	57
6.1. Uporedne analize kombinovanih metoda	57
6.2. Metodologija kvantitativne procjene stanja odvodnika prenapona	63
7. ZAKLJUČCI	69
LITERATURA	71

ANALIZA POGONSKE RASPOLOŽIVOSTI ODVODNIKA PRENAPONA U MREŽAMA VISOKOG NAPONA PRIMJENOM RAZLIČITIH DIJAGNOSTIČKIH METODA

IZVOD RADA

Pouzdanost rada prenosne mreže sve je više na skali prioriteta operatora prenosnih sistema. Prenaponske pojave zauzimaju značajno mjesto kao ograničavajući faktor pouzdanosti rada mreže i predstavljaju problem kojem se sve ozbiljnije pristupa. Od svih uređaja koji štite opremu od prenapona odvodnik prenapona je najpouzdanija zaštita elektroenergetskih postrojenja. Zato je poznavanje njegove pogonske raspoloživosti jedan od osnovnih podataka kod planiranja održavanja visokonaponskih razvodnih postrojenja i jedan od najvažnijih kod analize stanja rada cjelokupnog elektroenergetskog sistema. Na temeljima dugogodišnjih ispitivanja utvrđena su tačno određena pravila prema kojima se određuje ponašanje odvodnika prenapona u raznim stanjima postrojenja. Postojeća praksa prepoznaje veći broj dijagnostičkih metoda kojima se utvrđuje stanje pogonske raspoloživosti odvodnika prenapona. Ipak, svaka od njih ima određeni limitirani opseg primjene i parametre stanja.

Iz tih razloga je u radu analizirana mogućnost određivanja pogonske raspoloživosti odvodnika prenapona u mrežama visokog napona, na presjeku rezultata više ovih primjenjivih dijagnostičkih metoda. S tim u vezi, sprovedena su višemjesečna ispitivanja odvodnika prenapona u realnom pogonu prenosne mreže Crne Gore. Kako su savremene metode monitoringa odvodnika prenapona dominantno bazirane na dekompoziciji ukupne struje odvođenja, to se za osnov istraživanja pošlo od analize rezultata izmjerenih struja odvođenja, praćenih brojem i intezitetom prorada odvodnika prenapona. Istovremeno su vršene i termovizijske kontrole, mjerenja parcijalnih pražnjenja i mjerenja povratnog napona ispitivanih odvodnika prenapona. Urađena je i statistička obrada sakupljenih podataka i rezultata mjerenja i ispitivanja. Podaci kontrole radnih režima odvodnika prenapona s pojavom atmosferskih pražnjenja su paralelno, poređenjem sa pregledom broja ispada usljed grmljavinskih procesa primjenom sofisticiranog sistema za lociranje atmosferskih prenapona, bili osnova poređenja broja ispada i kvarova u mreži registrovanih mikroprocesorskim zaštitnim uređajima. Korelacija rezultata ispitivanja izvršena je za sve primijenjene metode. Zbog obimnosti, prikazani su samo rezultati koji jasno oslikavaju pretpostavljena očekivanja i prikazani su u izvornim formama grafika i histograma primijenjenih softvera.

Analiza pogonske raspoloživosti odvodnika prenapona u mrežama visokog napona primjenom različitih dijagnostičkih metoda zaokružena je u radu primjenom originalno predložene metodologije za procjenu stanja. Zaključak o tome koliki je preostali životni vijek odvodnika prenapona donosi se na osnovu nezavisno osmišljenih i predloženih korekcionih faktora. Oni omogućavaju utvrđivanje jasnih granica do koje mjere se dati odvodnik prenapona može bezbjedno i pouzdano koristiti u pogonu, odnosno kolika je njegova pogonska raspoloživost.

Rezultati mjerenja dobijeni u okviru ovog rada su primjenjivi u privredi, u procesu procjene stanja odvodnika prenapona u pogonu. Završni korak u verifikaciji zaključaka omogućila bi periodična merenja na odvodnicima prenapona u pogonu što bi, uz usvajanje i implementaciju algoritamskog „indeksa stanja“, omogućilo efikasan postupak monitoringa i dijagnostike stanja odvodnika prenapona tokom eksploatacije. Konačno, osim što neposredno daje doprinos široj oblasti istraživanja predmetne problematike, ovaj rad nudi veliki broj otvorenih pitanja i tema koje pružaju osnov za nastavak istraživanja.

Ključne riječi: pogonska raspoloživost, odvodnik prenapona, monitoring, životni vijek
Naučna oblast: Tehničke nauke – Elektrotehnika

Uža naučna oblast: Elektroenergetski sistemi

ANALYSIS OF ASSETS AVAILABILITY OF SURGE ARRESTERS IN HIGH VOLTAGE NETWORKS USING DIFFERENT DIAGNOSTIC METHODS

ABSTRACT

The reliability of transmission network operation is increasingly on the priority scale of transmission system operators. Overvoltage phenomena occupy a significant place as a limiting factor of network operation reliability and represent a problem that is being approached more and more seriously. Of all the devices that protect equipment from overvoltage, the surge arrester is the most reliable electric power plant protection. That is why knowing its assets availability is one of the basic data when planning the maintenance of high-voltage switchgear and one of the most important when analyzing the state of operation of the entire power system. On the basis of long-term tests, precisely defined rules have been established according to which the behavior of the surge arrester is determined in various conditions of the plant. Existing practice recognizes a large number of diagnostic methods used to determine the operating condition and availability of surge arresters. However, each of them has a certain limited range of application and condition parameters.

For these reasons, the paper analyzed the possibility of determining the assets availability of surge arresters in high-voltage networks, based on the cross-section of the results of several of these applicable diagnostic methods. In this regard, multi-month tests of surge arresters were conducted in servis of the transmission network of Montenegro. As modern methods of monitoring surge arresters are dominantly based on the decomposition of the total leakage current, the basis of the research was the analysis of the results of the measured leakage currents, followed by the number and intensity of operation of the surge arrester. At the same time, thermal imaging controls, measurements of partial discharges and measurements of the return voltage of the tested surge arresters were performed. Statistical processing of the collected data and the results of measurements and tests was also done. The control data of surge arrester operating modes with the occurrence of lightning strikes were, in parallel, compared with the review of the number of outages due to lightning processes using a sophisticated system for locating lightning overvoltages, the basis of a comparison of the number of outages and failures in the network registered by microprocessor protection devices. Correlation of test results was performed for all applied methods. Due to the volume, only the results that clearly reflect the assumed expectations are shown and are presented in the native forms of graphics and histograms of the applied software.

The analysis of the assets availability of surge arresters in high-voltage networks using different diagnostic methods is rounded off in the paper by applying the originally proposed methodology for condition assessment. The conclusion about the remaining lifetime of the surge arrester is made on the basis of independently designed and proposed correction factors. They enable the determination of clear limits to which extent a given surge arrester can be safely and reliably used in operation, i.e. what is its asset availability.

The measurement results obtained in this work are applicable in the sector of economy, in the process of assessing the condition of surge arresters in operation. The final step in verifying the conclusions would be periodic measurements on the arresters in operation, which, along with the adoption and implementation of the algorithmic "health index" would enable an effective procedure for monitoring and diagnosing the condition of the surge arrester during operation. Finally, in addition to directly contributing to the broader field of research on the issue in question, this paper offers a large number of open questions and topics that provide a basis for continued research.

Keywords: assets availability, surge arrester, monitoring, lifetime

Scientific field: Technical science – Electrical engineering

Specific scientific field: Power systems

U V O D

Pouzdanost rada prenosne mreže sve više je na ljestvici prioriteta operatora prenosnih sistema. Planiranjem razvoja prenosnog sistema sagledava se neophodan razvoj i određeni uslovi u kojima će se rad ovog sistema odvijati u nastupajućem periodu, kako bi se odredile mjere za obezbjeđivanje normalnog funkcionisanja elektroenergetskog sistema.

Od prvih dana eksploatacije elektroenergetskih sistema (EES), jedan od osnovnih problema u njihovom radu jeste zaštita od neizbježnih atmosferskih prenapona, koji se najčešće događaju na prenosnim vodovima. Prenaponi izazvani ovim pražnjenjima se prenose dalekovodima (DV) do elektroenergetskih objekata i izazivaju oštećenja skupocjene opreme i prekide u napajanju konzumnih područja, što u krajnjem uzrokuje visoke novčane gubitke kod isporuke električne energije i prilične operativne probleme prenosnim kompanijama.

Razvojem energetske sistema razvijali su se i različiti sistemi zaštita od prenapona. Jedan od uređaja koji se tokom duge eksploatacije pokazao kao najefikasniji u zaštiti od prenapona jeste odvodnik prenapona (OP). Odvodnik je uređaj koji efikasno ograničava prenapone ispod nivoa podnosivog napona visokonaponske opreme, a da se pri tome energetski ne preoptereće. Spajaju se paralelno sa opremom koju štite, kako bi preusmjerili struju koja se javlja prilikom prenapona. Ugrađuju se u svim postrojenjima u blizini energetske transformatora, u dalekovodnim poljima ili na samim dalekovodima.

Izuzetno zahtjevna kontrola kvaliteta te brojna ispitivanja koja se provode u svim fazama proizvodnje, od ispitivanja sirovina pa do gotovog proizvoda, garancija su kvalitetne primjene OP-a u svim uslovima pojave prenapona. Različite dimenzije omogućavaju širok izbor standardnih odvodnika jednako kao i različite zahtjeve kupaca za nestandardnim zaštitnim nivoima i energijama odvođenja.

Na osnovama dugogodišnjih ispitivanja utvrđena su tačno određena pravila prema kojima se određuje ponašanje OP-a u raznim stanjima postrojenja. Zato je poznavanje njegove pogonske raspoloživosti jedan od osnovnih podataka kod planiranja održavanja visokonaponskih razvodnih postrojenja (VNRP) i jedan od najvažnijih kod analize stanja rada cjelokupnog elektroenergetskog sistema (EES).

Odvodnici prenapona koji su pod stalnim pogonskim naponom, izloženi su kombinovanom naprezanju od strane mreže i od samog postrojenja. Stalna izloženost naprezanju uzrokuje starenje i moguće oštećenje odvodnika. To se odnosi na moguće oštećenje izolacije i narušavanje zaštitnih karakteristika odvodnika. Najveći „neprijatelji“ odvodnika prenapona su prodor vode (vlaga), površinsko zagađenje i absorbovana toplota.

Jedini uređaji za kontinualno praćenje rada OP-a, koji su do sada korišćeni u praksi jesu kontrolna iskrišta, brojači pražnjenja i jednostavni miliampermetri, koji se ne svrstavaju u uređaje za monitoring i dijagnostiku, nego u uređaje za praćenje rada OP-a. Međutim, kako je u ovom trenutku veliki broj OP-a u pogonu blizu kraja svog očekivanog životnog vijeka, monitoring i dijagnostika OP-a je prilično aktuelna tema.

U toku eksploatacije odvodnika javlja se potreba za preventivnim ispitivanjem kako bi se otkrile eventualne nepravilnosti u radu i preduprijedile moguće posljedice kao što je eksplozija odvodnika. U postojećoj praksi postoji veći broj dijagnostičkih metoda kojima se utvrđuje stanje pogonske raspoloživosti odvodnika prenapona. Ipak, svaka od njih ima određeni limitirani opseg primjene i parametre stanja, pa je neophodno analizirati mogućnost određivanja pogonske raspoloživosti odvodnika prenapona u mrežama visokog napona na presjeku rezultata više ovih primjenjivih dijagnostičkih metoda.

Rad razmatra praktičnu mogućnost objedinjavanja više ispitnih metoda, polazeći od motiva da se uporednom komparativnom analizom dobijenih rezultata mjerenja i ispitivanja opravda i njihova primjena.

Ne treba naglašavati da su ispitivanja visokonaponske opreme u postrojenju - što zbog rada sa visokim naponom i rada na visini, što zbog rada u blizini visokog napona - prilično zatjevna i dovoljno opasna. Zato je jedan dio ispitivanja sproveden u laboratorijskim uslovima, kako bi se mogli donijeti zaključci o uslovima i kriterijumima ispitivanja u realnom pogonu. Glavna istraživanja su izvedena na OP-a instaliranim u VNRP EES-a Crne Gore.

Obimna i aktuelna materija sa aspekta tematike sistema zaštite od prenapona teorijski je izložena u obliku najpodesnijem za praktičnu primjenu. Ukazano je na postojeće stanje i rješenja, na aktuelne probleme, mogućnosti njihovog prevazilaženja i tendencije u razvoju ovih sistema.

Problematika analize pogonske raspoloživosti OP-a u mrežama visokog napona je obrađena kroz sedam poglavlja.

Najčešće korišćene skraćenice i oznake sa osnovnim pojmovima i definicijama, a u svrhu lakšeg praćenja izložene materije, navedene su u prvom poglavlju.

Šta znači starenje opreme, koje su to karakteristične funkcije i pokazatelji sistema i kako se proračunavaju parametri pouzdanosti rada izolacije objekta visokog napona, ukratko je objašnjeno u drugom poglavlju.

Pojava prenapona u mrežama visokih napona obrađena je u trećem poglavlju.

Odvodnik prenapona kao element VNRP razmatra se u četvrtom poglavlju. Akcenat je stavljen na konstruktivne karakteristike OP, da bi se kroz fizičke procese koje se dešavaju u specifičnim korišćenim materijalima proizvodnje OP, lakše razumjele primjene određenih modela kod ispitivanja OP.

Procena stanja OP-a generalno se može izvršiti na osnovu metoda koje zahtijevaju prekid pogona (*off-line* metode) i metoda koje ne zahtijevaju prekid pogona (*on-line* metode). Metode za monitoring odvodnika prenapona bazirane na analizi struje odvođenja, termovizijska kontrola, mjerenje povratnog napona i mjerenje parcijalnih pražnjenja ukratko su objašnjene u petom poglavlju rada.

U šestom poglavlju rada je izložena uporedna analiza rezultata ispitivanja kombinovanjem navedenih metoda, statističkom obradom podataka i korelacijom.

Na kraju su dati i zaključci sa preporukama za nastavkom ispitivanja. Isto tako, predloženo je donošenje jedinstvene metodologije ispitivanja OP-a u realnom pogonu sa primjenom kod preventivnog održavanja VNRP. U skladu s navedenim, u zaključcima je razmotrena i mogućnost uvođenja tzv. „indeksa procjene stanja“ (*eng. health index*) odvodnika prenapona na osnovu dostupnih sistema i programskih alata.

Dio obimne literature korišćene kod same izrade rada predstavljen je na kraju rada. Bibliografski naslovi su navedeni prema redosljedu pojavljivanja u odnosnim poglavljima teksta.

1. OSNOVNI POJMOVI I DEFINICIJE

U ovom poglavlju je, radi lakšeg praćenja teksta rada, jednostavnosti i kompaktnosti zapisa, data lista skraćenica i oznaka koje se najčešće koriste u tekstu, kao i definicije osnovnih pojmova iz rada.

1.1. Lista korišćenih skraćenica i oznaka

Skraćenica	Značenje
APU	Automatsko ponovno uključenje
CIGRE	Međunarodno vijeće za velike električne mreže (<i>fra. Conseil International des Grands Reseaux Electriques</i>)
CGES	Crnogorski elektroprenosni sistem A.D. Podgorica
DV	Dalekovod
EES	Elektroenergetski sistem
GIS	Gasom izolovano postrojenje (<i>eng. Gas-Insulated Substation</i>)
GPS	Globalni pozicioni sistem (<i>eng. Global Positioning System</i>)
IEC	Standardi Međunarodne Elektrotehničke Komisije (<i>eng. International Electrotechnical Commission</i>)
IEEE	Institut inženjera energetike i elektronike (<i>eng. The Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>)
MOV	Metal-oksidni varijabilni otpornik (<i>eng. Metal Oxid Varistor</i>)
MOP	Metal-oksidni odvodnik prenapona
OP	Odvodnik prenapona (<i>eng. surge arresters</i>)
PD	Parcijalna pražnjenja (<i>eng. Partial Discharge</i>)
p.u.	per unit
RVM	Mjerenje povratnog napona (<i>eng. Recovered Voltage Meter</i>)
SCADA	Sistem za nadzor i upravljanje elektroenergetskim sistemom u realnom vremenu (<i>eng. Supervisory control and data acquisition</i>)
SiC	Silicijum karbid
TS	Trafostanica
VN	Visokonaponski
VNO	Visokonaponska oprema
VNRP	Visokonaponsko razvodno postrojenje
VOP	Ventilni odvodnik prenapona
ZnO	Cink-oksid

Oznaka	Značenje
i_c	kapacitivna struja odvođenja odvodnika prenapona
I_n	nazivna struja odvođenja odvodnika prenapona
I_r	referentna struja odvodnika prenapona
i_r	rezistitivna komponenta struje odvođenja odvodnika prenapona
i_t	ukupna struja odvođenja odvodnika prenapona
k_z	koeficijent zemljospoja

$R(t)$	<i>pouzdanost sistema</i>
T	<i>vrijeme širenja putujućeg talasa</i>
T_{ot}	<i>vrijeme do pojave otkaza</i>
U_c	<i>trajni radni napon odvodnika</i>
U_m	<i>najviši napon opreme</i>
U_{max}	<i>amplituda prenapona</i>
U_n	<i>nazivni napon mreže</i>
U_{pl}	<i>amplituda preostalog napona</i>
U_r	<i>nazivni napon odvodnika</i>
U_{ref}	<i>referentni napon odvodnika</i>
U_{res}	<i>zaostali napon</i>
U_{TOV}	<i>amplituda privremenog prenapona</i>
V	<i>brzina širenja putujućeg talasa</i>
Z_v	<i>talasna impedansa dalekovoda</i>
$\lambda(t)$	<i>intezitet otkaza</i>
$Q(t)$	<i>nepouzdanost sistema</i>
w_r	<i>specifično energetske opterećenje odvodnika</i>

1.2. Osnovni pojmovi i definicije

Dalekovod - nadzemni elektroenergetski vod (DV) – Dio EES koji nadzemnim putem prenosi električnu energiju između dva udaljena objekta istog naponskog nivoa. Obuhvata prostor između priključnih stezaljki kojima se provodnici dalekovoda i zaštitnog užeta priključuju na izlazne portale u TS/RP. Sastoji se od: provodnika, zaštitnih užadi, zemljovoda, uzemljivača, izolatora, nosača, konzola, stubova i temelja [1].

Elektroenergetski sistem (EES) – skup svih međusobno povezanih elektroenergetskih objekata koji sačinjavaju jedinstveni tehničko-tehnološki sistem.

Elektroenergetski objekat (EE objekat) – građevinsko-elektromontažna cjelina koja služi za proizvodnju, prenos, distribuciju ili potrošnju električne energije.

Element - dalekovod, dalekovodno polje, transformator, transformatorsko polje, sistem sabirnica, spojno polje, mjerno polje, rastavljač, sopstvena potrošnja, multipleksna oprema...

Elektroenergetsko postrojenje – transformatorska stanica, odnosno razvodno postrojenje je objekat namijenjen za transformaciju, odnosno razvođenje električne energije.

Greška – nesavršenost stanja elementa (ili skrivena mana) koja može prouzrokovati jedan, ili više otkaza.

Kvar – slučajni događaj unutrašnjeg ili spoljašnjeg porijekla koji nastaje na opremi i dovodi do prestanka izvršavanja funkcije opreme i ispada te opreme iz pogona, kao i pridružene opreme.

Naponski nivo - Nazivni napon kojim se mreža označava i naziva.

Nazivni napon trofazne elektroenergetske mreže predstavlja međufaznu efektivnu vrijednost napona.

Najviši napon mreže - je najviša dozvoljena vrijednost radnog napona koja smije da se pojavi u normalnom pogonu u mreži.

Najviši napon opreme – je efektivna vrijednost međufaznog napona za koji je oprema konstruisana i pri kome ona može normalno da funkcioniše.

Održavanje – je sveukupni rad koji ima za svrhu očuvanje stalne tehničke ispravnosti elektroenergetskih objekata. U održavanje spadaju: Pregledi, Provjere, Revizije i Remonti.

Operator prenosnog sistema je energetske subjekat koji obavlja djelatnost prenosa električne energije ili gasa i odgovoran je za rad, održavanje i razvoj prenosnog sistema na određenom

području i njegovo povezivanje s drugim sistemima, kao i za obezbjeđenje dugoročne sposobnosti sistema da zadovolji zahtjeve za prenosom električne energije ili gasa na ekonomski opravdan način [2].

Oprema – su pojedinačni uređaji, instalacije i drugi proizvodi od kojih se sastoji element ili su samostalno ugrađeni u elektroenergetski objekat prenosne mreže.

Otkaz – prestanak sposobnosti elementa da obavlja zahtijevanu funkciju.

Pogon – je stanje objekta koje omogućava da se preko objekta prenosi električna energija.

Procjena stanja – Predstavlja dio izvještaja o obavljenom pregledu, provjeri/reviziji i remontu. Procjena treba da odgovori da li je predmet pregleda, provjere/revizije i remonta u dobrom ili lošem stanju i da li treba skratiti i u kojoj mjeri neki od rokova koji su postavljeni Pravilnikom [2].

Prenapon – je svako povećanje napona iznad najvišeg napona opreme.

Prenos električne energije je prenošenje električne energije interkonektovanim sistemom visokog i vrlo visokog napona sa ciljem isporuke krajnjim kupcima ili distributeru, koje ne obuhvata snabdijevanje.

Prenosni sistem - postrojenja 110 kV, transformatori 110/x kV i vodovi 110 kV, kao i postrojenja, transformatori i vodovi višeg naponskog nivoa, do mjesta priključka korisnika sistema na prenosni sistem i objekti, telekomunikaciona i informaciona oprema i druga infrastruktura neophodna za njegovo funkcionisanje.

Razvodno postrojenje (RP, VNRP) – je elektroenergetski objekat samo jednog naponskog nivoa (naponski nivo 400 kV, 220 kV ili 110 kV).

Sigurnost snabdijevanja je sposobnost sistema električne energije ili sistema gasa da kontinuirano snabdijeva krajnje kupce električnom energijom ili gasom, odnosno sposobnost prenosnih i distributivnih sistema da omoguće isporuku krajnjim kupcima [3].

Transformatorska stanica (TS) – elektroenergetski objekat koji sadrži transformatore i omogućava povezivanje više mreža različitih naponskih nivoa.

Visoki napon - Nominalni napon veći od 1 kV.

E - energetska sposobnost odvodnika je maksimalna energija koju odvodnik može apsorbovati pri jednom impulsu a da pri tome ostane termički stabilan kod definisanog privremenog prenapona i trajnog radnog napona [3,4]. Trajanje impulsa je najčešće 4 ms ili duže,

I_n - nazivna struja odvođenja (pražnjenja) odvodnika prenapona je vršna vrijednost impulsne (udarne) struje oblika 8/20 μ s.

I_{ref} - referentna struja, je vršna vrijednost radne komponente struje u radnoj tački koja se nalazi iznad koljena $U-I$ karakteristike. U ovoj tački je radna komponenta struje veća od kapacitivne.

U_c - trajni radni napon, je maksimalno dozvoljena efektivna vrijednost napona nazivne frekvencije koji može biti trajno doveden između priključaka odvodnika.

U_{ps} – maksimalno dozvoljena vršna vrijednost napona na krajevima odvodnika pri provođenju sklopnih udarnih struja (zaštitni nivo pri sklopnim prenaponima) [4,5].

U_r - nazivni napon predstavlja maksimalno dozvoljenu efektivnu vrijednost napona, nazivne frekvencije. Nakon što odvodnik apsorbuje dozvoljeni (nazivni) iznos energije, U_r je napon ograničenog trajanja (10 s), koji se može dovesti između priključaka odvodnika prenapona.

U_{pl} - amplituda preostalog napona pri nazivnoj odvodnoj struji (zaštitni nivo pri atmosferskim prenaponima).

U_{ref} - referentni napon je vršna vrijednost napona pogonske frekvencije kod kojeg kroz odvodnik teče referentna struja.

U_{res} – zaostali napon je vršna vrijednost napona na krajevima odvodnika pri provođenju udarne struje.

2. POUZDANOST RADA IZOLACIJE OBJEKATA VISOKOG NAPONA

Sposobnost elektroenergetskog sistema ili prenosne mreže kao dijela tog sistema, da omogući potpuno i stalno snabdijevanje potrošača električnom energijom definiše se kao pouzdanost EES-a. Bez obzira na obim proizvodnje i opterećenje u svakom trenutku i bilo da su potrošači direktno priključeni na prenosnu ili distributivnu mrežu, potpuno pouzdanom prenosnom mrežom smatraće se ona mreža koja je sposobna prenijeti električnu energiju proizvedenu u elektranama ili isporučenu iz susjednih sistema do svih potrošača. Kako je pojava kvarova u mrežama neminovnost, prenosna mreža će biti više ili manje pouzdana, zavisno od sposobnosti mreže da prenese svu energiju koja u nju uđe u toku posmatranog vremenskog perioda.

Najčešće korišćeni pokazatelj pouzdanosti prenosne mreže je njena raspoloživost, odnosno neraspoloživost. Vremenski period unutar promatranog vremenskog razdoblja (najčešće godina dana) unutar kojega mreža, odnosno neka njena jedinica, nije u funkciji predstavlja neraspoloživost. Neraspoloživost daje sliku kvaliteta izgrađenosti i održavanja mreže s jedne strane, odnosno organizacije, obučenosti i profesionalnosti osoblja koje upravlja i održava mrežu. Naravno, neraspoloživost će biti manja ukoliko je mreža kvalitetnija i ukoliko se njenom održavanju posvećuje posebna pažnja.

Na izolacije objekata visokog napona tokom rada djeluju radni napon trajno, i povremeno mnoštvo prenapona uglavnom kratkotrajno, stvarajući na njima naponska naprezanja koja mogu izazvati razorna pražnjenja. Njih generišu uzročni događaji (komutacije rasklopnih aparata, udari groma u pojedine tačke objekta i sl.). Svakom uzročnom događaju odgovara jedan ili više skupova prenapona.

S obzirom na naprezanja uslovljena naponima i prenaponima koji se javljaju na izolacijama tokom eksploatacije, izborom dielektričnih čvrstoća svih izolacija objekata mreže bavi se koordinacija izolacije. To je oblast tehnike visokih napona koja istražuje probleme funkcije vjerovatnoće razornog pražnjenja izolacije i njihovih međusobnih odnosa, vodeći računa o efektima okruženja objekta, postojećih i primijenjenih zaštitnih mjera i sredstava kao i efektima gromobranske zaštite, a u skladu sa zahtijevanom pouzdanošću rada. Istraživanjima i proračunima u oblasti koordinacije izolacija objekta se utvrđuju potrebna koordinaciona rješenja, naime, potrebne funkcije vjerovatnoće razornog pražnjenja svih izolacija, potrebne zaštitne mjere i sredstva za koje se vjerovatnoće razornog pražnjenja i oštećenja izolacija kao i vjerovatnoće prekida kontinuiteta rada, nalaze u prihvatljivim granicama [6].

Prolazni kvarovi na samoobnovljivoj izolaciji se u određenom broju mogu tolerisati, jer oni ujedno predstavljaju zaštitu neobnovljive izolacije od trajnih kvarova, pošto na mjestu preskoka značajno smanjuju prenapone. Međutim, broj prolaznih kvarova se mora takođe ograničiti na tehnički prihvatljivu mjeru, što sve zajedno čini složeni postupak usaglašavanja izolacionih nivoa različite opreme u procesu koordinacije izolacije. Srednji broj godina bez kvara izolacije MTBF (eng. *Mean Time Between Failures*) se upoređuje sa tehnički dozvoljenim brojem godina bez kvara, što je osnova statističkog postupka koordinacije izolacije koji je danas u upotrebi.

Sposobnost izolacije da podnosi naponska naprezanja izražava se podnosivim naponima ili sveobuhvatno funkcijama vjerovatnoće razornog pražnjenja. U daljem razmatranju će biti predstavljen osnovni matematički aparat - karakteristične funkcije vjerovatnoće, koje opisuju posmatrano stanje jednog sistema i njegovu pouzdanost.

2.1. Starenje električne opreme

Polazeći od tehno-ekonomske analize, nijedan tehnološki proces proizvodnje električne opreme nije savršen, pa samim tim svaki dio proizvedene opreme ili ona u cjelini ima određeno sopstveno vrijeme trajanja ili životni vijek unutar kojega se očekuje da će raditi u skladu s deklariranim karakteristikama bez većeg broja zastoja i kvarova. Do otkaza uvijek dolazi kada oprema počne da gubi deklarirane karakteristike i svojstva. Ipak, uz pravovremeno i korektno redovno održavanje električna oprema može raditi prilično pouzdano.

Posljedica zahtjeva za stalnim povećanjem opterećenja je modernizacija EES-a. Ako takvih zahtjeva nema, oprema će kvantitativno i kvalitativno spunjavati svoju ulogu u prenosu električne energije sve do kraja svog životnog vijeka, pa će vrlo velika količina opreme, koja je ugrađena u periodu velikog porasta potrošnje, najvjerovatnije dostići kraj svog životnog vijeka u isto vrijeme.

Kvarovi električne opreme prema uzroku nastanka mogu biti:

- slučajni kvarovi – koji najčešće nastaju zbog spoljašnjih uzroka i
- kvarovi zbog starosti – čiji je uzrok promjena karakteristika opreme tokom njenog dugotrajnog korišćenja.

Kvarovi uzrokovani greškama u početnoj fazi proizvodnje opreme po pravilu se ispoljavaju u početnoj fazi korišćenja opreme. Isto tako, na osnovu mjesta nastanka uzroka kvara, kvarovi se mogu podijeliti i na spoljašnje i unutrašnje kvarove, ili na osnovu mogućnosti saniranja kvara na popravljive i nepopravljive kvarove [7,8].

Kvarovi uzrokovani starošću nastaju unutar same opreme bez jedinstvenog spoljašnjeg razloga. Mogu se popravljati ili su nepopravljivi, pri čemu finansijska sredstva potrebna za popravak značajno rastu zavisno od starosti posmatrane opreme ili jedinice mreže.

Neraspoloživost ili intenziteta kvarova za električnu opremu imapoznati oblik kade [7]. Funkciju broja kvarova nije moguće matematički formulisati za svaki pojedinačni slučaj, jer, primjera radi, nakon puštanja u pogon opreme dolazi do nastanka određenog broja kvarova uglavnom uzrokovanih konstrukcijskim i dizajnerskim greškama pri projektovanju opreme. Tako da vrijeme prelaska iz razdoblja normalnog korišćenja u razdoblje dotrajalosti opreme zavisi od više faktora kao što su:

- pogonski uslovi (naponi, kratki spojevi, broj sklopnih operacija, opterećenje, i dr.),
- spoljašnji uticaji (klima, okolina, izloženost atmosferskom zagađenju i dr.),
- mehanički stresovi,
- termički stresovi.

O tome da li se posmatrana oprema nalazi na kraju razdoblja normalnog korišćenja, odnosno očekivanog životnog vijeka, govore indikatori, kao što su:

- povećani broj kvarova uz povećanu neraspoloživost,
- rast troškova održavanja,
- period upotrebe slične opreme u mreži.

Očekivani životni vijek pojedine opreme u mreži, odnosno jedinica mreže, nije moguće unaprijed odrediti pa se zato pribjegava poređenju sa što većim brojem uzoraka slične opreme. određuju se očekivane veličine. Na osnovu pogonskih podataka i različitih terenskih i laboratorijskih ispitivanja opreme, uglavnom se prate grupe sličnih jedinica mreže, pa se približavanje životnom vijeku može relativno sigurno predvidjeti. Potom se iskustveno definišu

približne veličine očekivanog životnog vijeka dalekovoda (električni i građevinski djelovi), kablova, transformatora, polja, ostale opreme u transformatorskim stanicama, sistema zaštite, telekomunikacija i sistema daljinskog upravljanja i ostalog.

Ako parametri posmatrane opreme više ne zadovoljavaju pogonske uslove, i/ili u slučajevima promjene strategije rada EES-a uslovljene prelaskom rada na viši naponski nivo, zahtjeva od strane regulatora, zahtjeva zaštite okoline sa obaveznom primjenom novih tehnologija, izostanka podrške matične fabrike proizvođača opreme kroz održavanje i isporuku rezervnih djelova, rekonstrukcije i kapitalnih remonta postrojenja, dugotrajno se, kroz kapitalne investicije planira i zamjena opreme. Smanjenje gubitaka u sistemu, nedostatak rezervnih djelova i nabavka znatno skuplje alternative, povećanje troškova korektivnog održavanja su klasični primjeri ekonomskih zahtjeva za proglašenjem kraja životnog vijeka, za razliku od tehničkog kraja, koji se konstatuje kada je oprema trajno havarisana, opravka je ekonomski neisplativa ili je istu nemoguće popraviti.

2.2. Karakteristične funkcije i pokazatelji sistema

Stanje jednog sistema definišu rad i obnavljanje. Sistem je u stanju obnavljanja ako se na njemu vrši opravka ili zamjena djelova u kvaru nakon kojih se sistem dovodi u stanje kao da je nov. Vrijeme trajanja obnavljanja sistema je slučajna veličina sa poznatom funkcijom raspodjele vjerovatnoća [6].

Sistemi koji se ne obnavljaju poslije kvara su neobnovljivi sistemi. Životni vijek neobnovljivih sistema traje onoliko dugo koliko protekne vremena do kvara, pa se za ovakve sisteme direktno može izračunati pouzdanost prema osnovnoj definiciji ovog pojma:

$$R(t) \equiv P \{T > t\} \quad (1)$$

gdje:

T označava vrijeme trajanja ispravnog rada sistema, a

t je vrijeme koje je do trenutka posmatranja proteklo od početka rada sistema.

Prema tome, pouzdanost $R(t)$ je vjerovatnoća da će sistem u trenutku posmatranja biti ispravan.

Nepouzdanost sistema je vjerovatnoća da će sistem u trenutku posmatranja biti u kvaru:

$$Q(t) \equiv P \{T \leq t\} \quad (2)$$

Tako da je:

$$R(t) + Q(t) = 1 \quad (3)$$

Po definiciji, gustina raspodjele vjerovatnoća slučajne promjenjive T jednaka je,:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (4)$$

Diferenciranjem (4) po vremenu, a na osnovu (3), dobija se:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(x)dx = \int_t^\infty f(x)dx \quad (5)$$

Intezitet otkaza se definiše kao:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (6)$$

Matematičko očekivanje vremena trajanja ispravnog rada definiše se kao:

$$m \equiv E(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{N(0)} \sum_{i=1}^{N(0)} T_i \quad (7)$$

gdje je:

T_i - vrijeme trajanja ispravnog rada elementa i ,

$N(t)$ - je broj sistema koji su radili ispravno do trenutka t .

Srednje vrijeme trajanja ispravnog rada sistema daje jasne predstave o pouzdanosti.

Kod obnovljivih sistema, tj. sistema koji se po nastanku otkaza obnavljaju zamjenom neispravnih djelova ili opravkom, gore razmatrani parametri se uvode da bi se ocijenila pouzdanost sistema od trenutka puštanja u rad do prvog otkaza. I ne samo do prvog otkaza, već je kod obnovljivih sistema riječ i o svakom drugom puštanju poslije obnavljanja, pri čemu se pretpostavlja da se sistem dovodi u isto stanje kao kada je bio nov. Ovdje je otkaz, u stvari, svaki prvi otkaz koji će uslijediti nakon puštanja u rad [6,7].

2.3. Izbor vrijednosti parametara pouzdanosti

Na izbor dozvoljenih vrijednosti parametara pouzdanosti utiče niz faktora, jer od pouzdanosti direktno zavisi plan rekonstrukcije dotrajalih postrojenja i svakako idejni projekat novih. Osim naponskog nivoa objekta i predviđenog vijeka trajanja, ti faktori su i cijena objekta i njegovih ključnih elemenata, značaj i veličina konzuma koji će biti napajan podsredstvom posmatranog objekta, višestranost napajanja konzuma i sama specifičnost konzuma – da li je riječ o petrohemijskoj, naftnoj industriji, elektrolizi, tekstilnoj industriji, bolnice, vojni objekti, luke i dr. U analizama se uvijek razmatraju i slučajevi ispada odnosnog objekta sa primjenom alternativnih napajanja iz drugih objekata.

Koristeći pozitivnu inženjersku praksu, u proračunima se koriste one vrijednosti parametara pouzdanosti koje su na strani sigurnosti. Naravno, uz teho-ekonomsku analizu i saglasnost investitora i projektanta.

Primjera radi, tokom pet godina rada uslijed sklopnih prenapona (za napone ≥ 300 kV) za spoljašnju izolaciju nadzemnih vodova dozvoljava se jedan preskok. Slično, za spoljašnju izolaciju postrojenja visokih napona dozvoljava se jedan preskok uslijed prenapona tokom deset godina. Tokom 600 godina, uslijed atmosferskih i sklopnih prenapona, dozvoljava se jedno oštećenje unutrašnje izolacije transformatora visokih napona [6,7].

Zavisno od vremena i cijene otklanjanja kvarova, prihvatljiv godišnji broj kvarova uslijed prenapona je za opremu od 0,001 do 0,004 [9, 28/115/FDIS iz 1996. godine], dok je za nadzemne vodove prihvatljiv godišnji broj kvarova uslijed atmosferskih prenapona na 100 km voda od 0,1 do 20 (veće vrijednosti se odnose na distributivne vodove). Prihvatljiv broj kvarova za sklopne prenapone po jednoj operaciji je od 0,001 do 0,01 [7].

Veoma značajna veličina koja definiše neprekidan rad i pouzdanost rada objekta visokog napona je i vrijeme do otkaza ili preskoka na izolacijama objekta, uslovljenih prenaponima na njegovim izolacionim konstrukcijama. Ispada objekta može biti sa ili bez kvara.

Vrijeme trajanja do otkaza je slučajna veličina, tako da za posmatrani element ili grupu elemenata slijedi eksponencijalnu raspodjelu gustine [6], datu kao:

$$p(t) = \frac{1}{T} e^{-\frac{t}{T}} \quad (8)$$

gdje je:

t - vrijeme trajanja do otkaza u godinama,

T - srednja vrijednost vremena do otkaza.

Rizik otkaza je integralna funkcija ove raspodjele. Ona određuje kumulativnu vjerovatnoću nastajanja vremena do otkaza, odnosno:

$$R(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \quad (9)$$

Vjerovatnoću rada bez otkaza, određuje pouzdanost rada $Q(t)$, data kao:

$$Q(t) = 1 - R(t) = e^{-\frac{t}{T}} \quad (10)$$

Srednja vrijednost vremena do otkaza (T_{ot}) i godišnji broj otkaza (N_{ot}) elemenata ili grupe elemenata, tokom posmatranog perioda t_v , dobijaju se iz izraza (8) kao:

$$T_{ot} = -\frac{t_v}{\ln Q(t_v)} \quad (11)$$

$$N_{ot} = -\frac{\ln Q(t)}{t_v} \quad (12)$$

Za razmatranje izbora parametara pouzdanosti objekata, izolacione konstrukcije razvrstavaju u određene grupe [6], kao što su: energetski transformator (jedan od najznačajnijih, najskupljih i najsloženijih konstrukcija sa unutrašnjom izolacijom), mjerni transformatori, prekidači, kondenzatori i sl. (jednostavniji, lako zamjenjivi i jeftiniji), izolatorski lanci, provodni i potporni izolatori (izolacione konstrukcije sa spoljašnjom, obično samoobnovljivom izolacijom).

Pri razmatranju pouzdanosti rada energetskih transformatora, polazi se od vrlo visoke pouzdanosti, normalno ne veće pouzdanosti od 95% [7]. Sa ovom vjerovatnoćom se očekuje da tokom određenog perioda, obično tokom cijelog vijeka jednog transformatora t_v , neće doći do otkaza, odnosno, kvara transformatora. Srednja vrijednost vremena do otkaza i godišnji broj otkaza za pretpostavljeni životni vijek transformatora od 30 godina i uz vjerovatnoću rada bez otkaza od 95%, ona iznose: $T_{ot} = 584.9 \text{ god}$ i $N_{ot} = 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ otkaza/god}$.

Parametri pouzdanosti za sve izolacione konstrukcije nadzemnih vodova dužine 100 km i vijek 30 god. uz pouzdanost 40%, iznose: $T_{ot} = 32.7 \text{ god}$. i $N_{ot} = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ otkaza/god}$.. Kada je riječ o visokonaponskom razvodnom postrojenju, odnosno njegovom cjelokupnom sistemu izolacionih konstrukcija, prosječno vrijeme i godišnji broj otkaza tokom vijeka od 30 god. i uz pouzdanost od 75% parametri pouzdanosti iznose: $T_{ot} = 104.3 \text{ god}$. i $N_{ot} = 9,6 \cdot 10^{-3} \text{ otkaza/god}$.

Imajući u vidu pouzdanost rada elemenata sistema usljed djelovanja atmosferskih i sklopnih prenapona, na osnovu naprijed navedenog, moguće je izvršiti proračun parametara pouzdanosti, za spoljašnju i unutrašnju izolaciju bilo kog konkretnog EES-a.

2.4. Proračun parametara pouzdanosti

U realnom pogonu, intezitet otkaza nije konstantna veličina. On zavisi od vremena. Istrošenost elementa i njegov otkat zavise od vremena, i značajno rastu sa povećanjem životnog vijeka. Ovo se ne uzima u obzir prilikom primjene eksponencijalne raspodjele, koja je najčešće

u primjeni prilikom proračuna pouzdanosti električnih komponenti, pa i aparata elektroenergetskih postrojenja [8].

Tako se za primjenu eksponencijalne raspodjele vremena rada do otkaza u praksi preporučuje korišćenje Weibull-ove raspodjele vremena rada do otkaza, koja omogućava razmatranje ovakvih oblika otkaza.

U slučaju tro-parametarske Weibull-ove raspodele vremena rada do otkaza, pouzdanost se računa po obrascu:

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\lambda}\right)^k} \quad (13)$$

gdje je:

t - posmatrani vremenski interval,

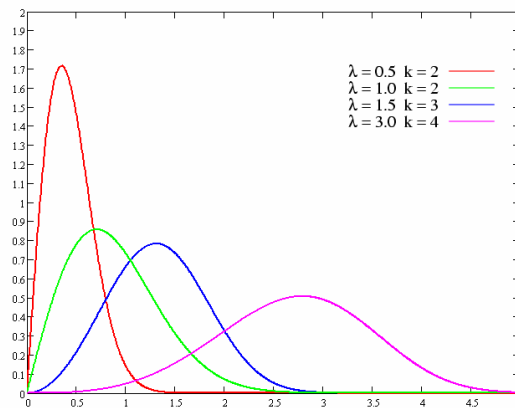
γ - parametar položaja,

k - parametar oblika,

λ - parametar razmjere,

$F(t)$ - funkcija raspodjele otkaza.

Na slici 1. je prikazana funkcija gustine vjerovatnoće Weibull-ove raspodjele.



Slika 1. Funkcija gustine vjerovatnoće Weibull-ove raspodjele

Dvo-parametarska Weibull-ova raspodjela, kada je parametar položaja $\gamma = 0$, je specijalan slučaj tro-parametarske Weibull-ove raspodjele. To je slučaj kada postoji mogućnost otkaza odmah od početka posmatranog vremenskog intervala t . Pouzdanost za dvo-parametarsku Weibull-ovu raspodelu je data kao [8]:

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^k} \quad (14)$$

Parametri k i λ predstavljaju parametre funkcije raspodjele, gdje je k je parametar oblika, a λ parametar razmjere. Ove parametre funkcije je moguće izračunati na osnovu aritmetičke sredine i standardne devijacije uzorka [6,8]. Treba naglasiti da za parametar oblika se uzima $k < 1$ ukoliko se broj zastoja (kvarova) smanjuje tokom vremena, a ukoliko je taj broj konstantan tada je $k = 1$. Ukoliko broj zastoja raste u vremenu tada je $k > 1$, čime se pokazuje zastarijevanje komponenata odnosno jedinica mreže.

Vrijeme do pojave otkaza (eng. *TBF – Time Between Failure*) je:

$$T_{ot} = \lambda \cdot \ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (15)$$

Srednje vrijeme između otkaza (eng. *MTBF* – *Mean Time Between Failure*) daje orijentacionu vrijednost vremena rada aparata u kojem vjerovatno neće doći do pojave otkaza. Produženjem srednjeg vremena između otkaza raste i nivo pouzdanosti aparata. Ovo vrijeme u slučaju dvo-parametarske Weibull-ove raspodele dato je kao:

$$T_{srot} = - \int_0^{\infty} t \cdot R(t) = \lambda \cdot \Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right) \quad (16)$$

gdje je:

Γ – gama funkcija od $\left(\frac{1}{k} + 1\right)$.

Za posmatrani vremenski interval t , intezitet otkaza u se računa po obrascu:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{N \cdot t} \quad (17)$$

gde je:

$\Delta n(t)$ - broj aparata koji su otkazali u posmatranom vremenskom intervalu t

N - broj posmatranih aparata koji su radili ispravno na početku posmatranog vremenskog intervala t .

Primjera radi, u Tabeli 1. predstavljeni su rezultati proračuna pokazatelja pouzdanosti za odvodnike prenapona u visokonaponskoj mreži EES-a Crne Gore.

Tabela 1. Rezultati proračuna pokazatelja pouzdanosti odvodnika prenapona

Broj posmatranih OP	Broj otkaza u periodu od 1 godine $\Delta n(t)$	Intezitet otkaza $\lambda(t)10^{-6}$ (h)	Srednje vrijeme između otkaza T_{ot} (h)	Pouzdanost aparata u periodu od 1 godine $R(t)$
720	3	47.56	217175	0.985221

Primjer proračuna pokazatelja pouzdanosti odvodnika prenapona dat je u Tabeli 2, gdje je srednje vrijeme između otkaza izračunato primjenom Excel-ove funkcije „*gammaln*“ koja vraća prirodni logaritam od funkcije $T_{ot}(h) = C6 * EXP(GAMMALN(1+1/C5))$. Funkcija „*weibull*“ data kao $R(t) = 1 - WEIBULL(C9, C5, C6, 1)$, služi za računanje vjerovatnoće da će aparat otkazati u posmatranom vremenskom intervalu t . Prilikom proračuna je neophodno unijeti vrijednost „*1-weibull*“, jer je to funkcija raspodjele otkaza $F(t)$ - vjerovatnoća bezotkaznog rada u posmatranom vremenskom intervalu t (pouzdanost).

Tabela 2. Primjer proračuna pokazatelja pouzdanosti odvodnika prenapona

A	B	C	D	E	F	G	H
3		Raspodjela otkaza		Raspodjela popravki	Raspodjela popravki		
4	g	0	μ	3	21.01		
5	k	1.28	σ	0.3	6.44		
6	λ	234394	MTTR	21.01			
7	MTBF	217175.6					
8						R(t)	0.985221
9	t	8760					
10	$\Delta n(t)$	3				λ	4.756E-07
11	$N_{(t1)}$	720				T_{ot} (h)	217176
12	Δt_{12}	8760					

3. PRENAPONI U ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU

Na izolacije objekata visokog napona tokom rada djeluju radni napon trajno, i povremeno mnoštvo prenapona uglavnom kratkotrajno, stvarajući na njima naponska naprezanja koja mogu izazvati razorna pražnjenja.

U visokonaponskim razvodnim postrojenjima egzistira veliki broj skupova prenapona koji djeluju na njegove izolacije. Prenaponi, kao povišenja napona u mrežama iznad maksimalnih pogonskih napona, su normalna pojava koja, generalno gledano, prati sve strukturne promjene mreže pod naponom. Prenaponi su stohastičke veličine u svim svojim elementima (amplituda, trajanje čela i začelja, oblik). Izolacije različito podnose napone i prenapone različitog oblika i trajanja, pa je od interesa da se ovi, polazeći od bliskosti oblika, trajanja i efekata koji proizvode na izolacijama, opišu i podijele na istim principima.

U ovom poglavlju su osim opštih karakteristika prenapona sa terminologijom i podjelom, ukratko navedeni problemi u radu elektroenergetskog sistema usljed pojave prenapona, kao i postupci i metodi za njihovo ograničenje.

3.1. Opšte karakteristike prenapona

Elektroenergetske mreže naizmjeničnog napona koje se koriste za prenos i distribuciju električne energije označavaju se prema naponskom nivou oznakom koja se zove nazivni napon mreže.

Kako u realnom pogonu u mreži, pogonski uslovi diktiraju naponske prilike, radni napon u nekoj tački varira u odnosu na nazivni. Zato se najviša dozvoljena vrijednost radnog napona koja se smije pojaviti u normalnom pogonu definiše kao najviši napon mreže [9]. Isto tako, oprema je konstruisana da normalno funkcioniše pri određenom naponu. Ta efektivna vrijednost međufaznog napona predstavlja i najviši napon opreme. Ukoliko se pređu granice najvišeg napona opreme tada nije više riječ o u normalnom pogonu. Svako povećanje napona iznad najvišeg napona opreme smatra se prenaponom.

Kada tjemena vrijednost pogonskog napona između faznog provodnika i zemlje ili između faza pređe odgovarajuću tjemenu vrijednost najvišeg napona opreme, govori se o prenaponu. Uzroci nastanka prenapona mogu biti spoljašnji i unutrašnji.

Atmosfersko pražnjenje sa udarom groma u elemente elektroenergetskih objekata smatra se spoljašnjim ili atmosferskim prenaponom. Ova pojava je praćena pojavom vrlo velikih struja, koje opet, izazivaju pojavu visokih napona, tako da je neophodno zaštititi opremu u postrojenjima. I atmosfersko pražnjenje u blizini elektroenergetskog objekta izaziva prenaponske pojave, što predstavlja dodatni problem, posebno kada su u pitanju mreže srednjih i niskih napona. Energija atmosferskog pražnjenja određuje visinu atmosferskih prenapona.

Pri svom prostiranju atmosferski prenaponi izazivaju oscilacije na djelovima mreže, sa aperiodičnim oblikom na mjestu nastanka. Naponski talas na svom čelu, nastao atmosferskim pražnjenjem, u frekvencijskom spektru najčešće je učestanosti od 1 MHz do 5 MHz.

Naponski poremećaji u samom sistemu karakterišu se unutrašnjim prenaponima, koji mogu nastati pri sklopnim operacijama rasklopne opreme, pa se i nazivaju sklopni ili komutacioni prenaponi. Za razliku od njih, prenaponi industrijske učestanosti, kao i učestanosti koja je viša ili niža od industrijske i koji imaju duže trajanje (od nekoliko perioda napona industrijske učestanosti do nekoliko sati) nazivaju se privremeni prenaponi. Oni rijetko ugrožavaju izolaciju opreme. Najčešće izazivaju probleme u radu pojedinih aparata kao što su odvodnici prenapona ili naponski mjerni transformatori.

Prenaponi se razvrstavaju i prema obliku i trajanju [10] na:

- Trajne napone industrijske učestanosti (stalna efektivna vrijednost napona, trajno primijenjeni napon na izolacijama);
- Privremene prenapone industrijske učestanosti (relativno dugo trajanje neprigušenog ili slabo prigušenog prenapona, čija učestanost u nekim slučajevima može biti nekoliko puta veća ili manja od industrijske);
- Tranzijentne prenapone (prenaponi kratkog trajanja, aperiodični ili oscilatorni jako prigušeni).

Tranzijentni prenaponi podrazumijevaju:

- spore prenapone (vrijeme do tjemena $20 \mu\text{s}$ do $5000 \mu\text{s}$, vrijeme začelja do 20ms);
- brze prenapone (vrijeme do tjemena od $0.1 \mu\text{s}$ do $20 \mu\text{s}$, vrijeme začelja do $300 \mu\text{s}$);
- vrlo brze prenapone (vrijeme do tjemena do $0.1 \mu\text{s}$, ukupno vrijeme trajanja do 3ms);
- kombinovane prenapone (kombinacija navedenih napona i prenapona).

Izolaciju je neophodno dimenzionisati tako da izdrži dielektrična naprezanja kojima može biti podvrgnuta kako za vrijeme dielektričkih ispitivanja tako i u pogonu. Norme za VN opremu definišu stepen izolacije (SI) koji je određen podnosivim naponom industrijske frekvencije, podnosivim atmosferskim i sklopnim udarnim naponom. U Tabli 3. su prikazane vrste prenapona i njihovi talasni oblici prema [9].

Tabela 3. Vrste i talasni oblici prenapona

Vrsta napona	Niska frekvencija		Prelazni – Tranzijentni		
	Trajni	Privremeni	Spori	Brzi	Vrlo brzi
Talasni oblik napona					
Karakteristike talasnih oblika napona	$f=50 \text{ Hz}$ ili 60 Hz $T \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0.03 \leq T_t \leq 3600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ms}$	$0.1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \text{ms}$	$3 \text{ ns} < T_1 \leq 100 \text{ ns}$ $0.3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Standardni oblici napona					*
Karakteristike talasnih oblika napona	$f=50 \text{ Hz}$ ili 60 Hz T^*	$48 \text{ Hz} < f < 62 \text{ Hz}$ $T_t=60 \text{ s}$	$T_p=250 \mu\text{s}$ $T_2=2500 \mu\text{s}$	$T_1=1.2 \mu\text{s}$ $T_2=50 \mu\text{s}$	*
Standardno ispitivanje podnosivosti	*	Ispitivanje kratkotrajnim naponom industrijske frekvencije	Ispitivanje sklopnim udarnim naponom	Ispitivanje atmosferskim udarnim naponom	*

*Neophodno je definisati u okviru radnih grupa za VN opremu

3.2. Atmosferski prenaponi

Gotovo na svim dalekovodima, glavni uzrok prekida u napajanju jeste pojava atmosferskih prenapona koji se javljaju pri udaru groma u nadzemne vodove. Nakon preskoka na izolatorskom lancu dolazi do prostiranja prenaponskog talasa vrlo strmog čela. Posljedično, propagacija atmosferskih prenapona dovodi i do oštećenja visokonaponske opreme u postrojenjima, a štete izazvane na ovaj način su havarijskog karaktera sa značajnim iznosima. Mjesto udara može biti različito i na raznim rastojanjima što je opet stohastičke prirode.

U odnosu na samo postrojenje, razlikuju se tri osnovna slučaja udara groma:

a) Udar groma u zaštitno uže ili u stub dalekovoda uz preskok na fazni provodnik je slučaj bliskog udara. Ovaj slučaj se odnosi i na udar groma u fazni provodnik uz preskok na stub dalekovoda. Na visinu prenapona veliki uticaj ima otpor uzemljenja dalekovoda.

b) Najkritičniji slučaj je bliski udara u fazni provodnik bez preskoka i modeluje se strujnim izvorom. Kod ovog slučaja, talasi se šire na obje strane od mjesta udara, a imendansa talasnog otpor groma je značajno veća od talasnog otpora voda. Proizvod dijela struje groma i talasnog otpora voda daje napon talasa.

c) Ako se atmosferski prenapon modeluje naponskim putujućim talasom koji se prostire nadzemnim vodom (i kablom) prije ulaska u postrojenje, tada se govori o slučaju udaljenog mjesta kvara.

Izolacioni nivo nadzemnog voda određuje tjemenu vrijednost talasa, a čelo talasa se produžuje prilikom prolaska talasa duž nadzemnog voda. Na svaki km dužine voda ovo produženje približno iznosi 1 μ s. Izobličenje i prigušenje upadnog talasa naročito je izraženo u električnom kablom. Ekstremni slučaj, iako rijetko nastupa, je bliski udar sa prilično većim zahtjevima kod proračuna vezanim za pogonsku opremu nego npr. udaljeni udar [10].

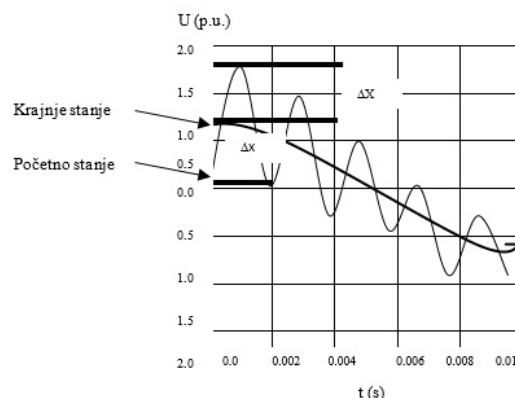
3.3. Sklopni prenaponi

Sklopni prenaponi spadaju u unutrašnje prenapone čiji je uzrok nagla promjena režima u kolu zbog sklopnih operacija. Za razliku od atmosferskih prenapona, amplituda sklopnih prenapona vezana je za unutrašnju energiju sadržanu u kolu i zbog toga je ograničena. Iako u pojedinim slučajevima sklopni prenaponi mogu da postignu značajnu amplitudu, ipak je ta amplituda vezana za radni napon mreže.

Učestanost sklopnih prenapona varira od nekoliko stotina Hz do nekoliko desetina kHz, a njihovo trajanje je od djelova periode industrijske učestanosti do nekoliko perioda industrijske učestanosti. Pri operacijama rastavljačima, kada dolazi do višestrukih paljenja i gašenja električnog luka, nastaje poseban tip ultrabrzih sklopnih prenapona [11].

Glavni razlog nastanka sklopnih prenapona je težnja da se iz jednog režima naglo (trenutno) pređe u drugi režim i pored postojanja inercionalnih elemenata kao što su kondenzatori i induktivni kalemovi. Kao posljedica naglih režima se javlja oscilatoran prigušen prelazni režim, pošto se elektroenergetske mreže mogu smatrati sistemima sa malim prigušenjem prelaznog režima.

Na slici 2. može se vidjeti da je prije uključjenja, do trenutka $t=0$ napon bio jednak nuli.



Slika 2. Procjena visine prenapona na bazi režima koji prethodi komutaciji i režima poslije komutacije

U trenutku uključanja bi napon trebalo da postigne vrijednost 1. Znači, početno naponsko stanje u kome se nalazio neki element u trenutku $t=0$ je $U=0$, a krajnje stanje ka kome režim teži u istom trenutku $t=0$ je $U=1$. Razlika ova dva stanja je ΔX . Približno ista tolika razlika se pojavljuje između ustaljenog stanja ka kome režim teži i maksimalne vrijednosti u oscilaciji prelaznog režima oko ustaljenog stanja.

Ukupna razlika između ustaljenog stanja i maksimalne vrijednosti u prelaznom režimu je približno $2\Delta X$. Ovo je gruba aproksimativna metoda za procjenu sklopnih prenapona na bazi poznavanja ustaljenog režima neposredno prije i poslije sklopne operacije, uz zanemareno prigušenje [10,11].

Sklopni prenaponi se mogu podijeliti na sljedeće tipove, prema operacijama koje ih prouzrokuju:

- Uključenje voda u praznom hodu;
- Isključenje kapacitivnih struja;
- Isključenje neopterećenog nadzemnog voda;
- Isključivanje kratkih spojeva;
- Isključivanje malih induktivnih struja.

3.4. Standardni podnosivi naponi izolacionih konstrukcija i zaštita od prenapona

Ekonomičan i pouzdan pogon EES-a zahtjeva kvalitetnu zaštitu od prenapona, koja će odgovoriti svim zahtjevima. Nakon pojave prenapona važno je da oprema i dalje normalno funkcioniše. Iz ekonomskog razloga, nije moguće izolovati opremu tako da izdrži sve prenapone, posebno atmosferske i sklopne. Stoga postoji realna opasnost od nastanka kvara električne opreme.

Izolacija električne opreme u pogonu može biti podvrgnuta dejstvu atmosferskih, sklopnih ili prenapona industrijske frekvencije. Da bi se utvrdilo da li će izolacija podnijeti naprezanja, na proizvedenoj opremi se izvode ispitivanja izolacije standardnim talasima. Step en izolacije nekog uređaja definisan je vrijednostima podnosivih napona.

Za verifikaciju sposobnosti podnošenja napona izolacionih konstrukcija, standardima za određene vrste napona propisani su standardni podnosivi naponi. Vrijednosti ovih podnosivih napona date su u Tabeli 4 [9]. Tabela se odnosi na sve izolacije: fazna, međufazna i podužna, sa prikazom naponskih nivoa koji su u upotrebi u Crnoj Gori.

Dakle, pri projektovanju objekata visokih napona, prvo se usvoje izolacioni nivoi prema Tabeli 4, a na osnovu pojave mogućih prenapona i na osnovu iskustva, izolacioni naponi opreme, rastojanja između faza i između faze i zemlje. To omogućava nabavku opreme sa izolacijom koja je ispitana takvim naponima. Izolacija mora da bude takva da pouzdanost bude izuzetno visoka, tj. da se kvarovi dešavaju izuzetno rijetko, sa unaprijed očekivanom vjerovatnoćom pojave.

Fazna izolacija je izolacija prema zemlji, međufazna se definiše između samih faza, a podužna kao izolacija između kontakata rasklopnih aparata u jednoj fazi.

Zaštitne naprave i zaštita elektroenergetskih postrojenja od prenapona moraju ispunjavati opšte uslove koji su predviđeni određenim standardima i propisima. Zaštitne naprave su uređaji čijim se funkcionisanjem ostvaruje ograničenje prenapona u mrežama visokih napona uzrokovanih promjenama njene strukture, udarima groma i sl. [10, 12, 13]. Mjere tj. sredstva za ograničavanje prenapona se suštinski često svode na kratkotrajnu ili trajnu racionalnu promjenu strukture posmatrane konfiguracije, na unaprijed programirane komutacije i sl. Da li će se primjenjivati sredstva za ograničavanje prenapona pri prelaznim režimima ili neće zavisi

od mnogih tehno-ekonomskih faktora, ali je najvažniji od svih faktora pouzdanost rada elektroenergetskog sistema.

Tabela 4. Standardni stepeni izolacije – izolacioni nivoi sa primjenom u Crnoj Gori

Najviši napon opreme U_m (kV_{eff})	Standardni podnosivi napon industrijske frekvencije (kV_{eff})			Standardni podnosivi atmosferski udarni napon (kV tjemena vrijednost)
7.2	20			40 60
12	28			60 75 95
24	50			95 125 145
36	70			145 170
123	185 230			450 550
245	275 325 360 395 460			650 750 850 950 1050
420	Standardni podnosivi sklopni udarni napon			Standardni podnosivi atmosferski udarni napon (kV_{tv})
	Izolacija			
	Podužna (kV_{tv})	Fazna (kV_{tv})	Međufazna (odnos prema faznoj izolaciji)	
	850	850	1.60	
	950	950	1.50	
	950	1050	1.50	1050 1175 1175 1300 1425

4. ODVODNICI PRENAPONA

Nezamenljivi uređaji u električnim mrežama za koordinaciju nivoa izolacije i zaštite transformatora, elemenata postrojenja, nadzemnih vodova i kablova od atmosferskih prenapona su odvodnici prenapona (*engl. surge arresters*) [14, 15]. U protekle dvije decenije došlo je do značajnih unapređenja tehničke konstrukcije i današnji odvodnici imaju malo zajedničkog sa odvodnicima u istoj primjeni u prošlom vijeku. Moderni metal-oksidni odvodnici prenapona (MOP) pružaju izvanrednu prenaponsku zaštitu elemenata prenosne mreže. Tehnička i komercijalna prednost korišćenja odvodnika je dokazana i njen značaj se povećava iz godine u godinu. Ne postoje generalne indikacije značajnije degradacije materijala metal-oksidnih odvodnika čak i nakon više od 20 godina upotrebe. Nivo kvarova MOP u prenosnim mrežama je ispod 0.1% i praktično se može izjednačiti sa nulom [12]. Ovako visoka pouzdanost omogućava sve širu i napredniju primenu odvodnika u zaštiti elektroenergetskih sistema.

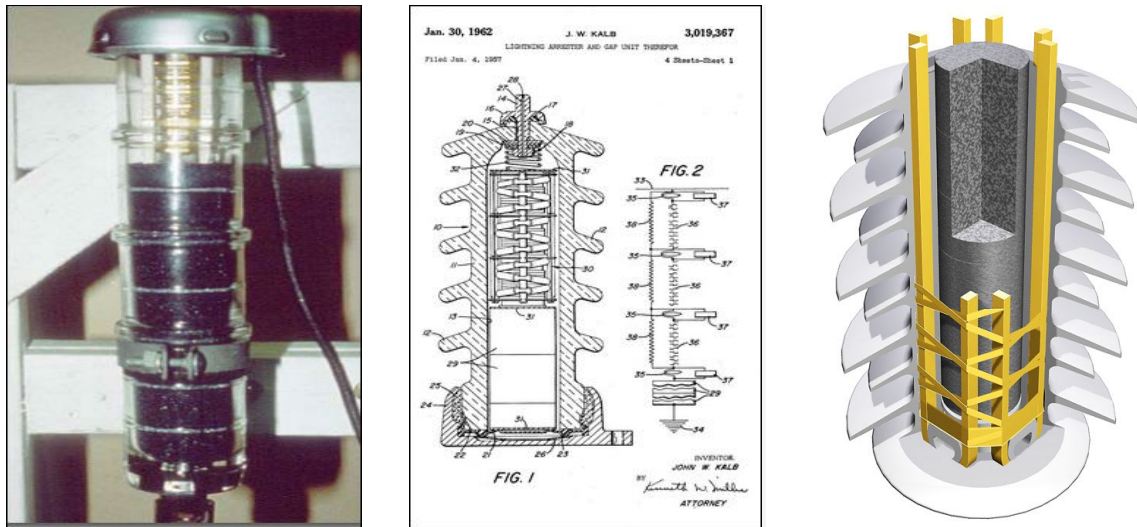
4.1. Istorijat razvoja konstrukcije odvodnika prenapona

Prvi uređaji sa otpornicima brzogrejnog tijela za stvaranje zagrijanog vazduha koji je oduvavao luk, proizvedeni su još 1918. godine [17]. Inženjer za inovacije u Vestinhaus-u Valter G. Roman uvodi potpuno nov koncept zaštite od prenapona. Naime, on je otkrio i razvio materijal koji je proizvodio velike količine dejonizovane vodene pare, koja je pravilnim kanalisanjem gasila električni luk pri prolasku napona kroz nulu. Patent je prijavio tek 1932. Iako se OP ovog tipa ne proizvode decenijama, popularno nazvani „Poluvjekovni stražari“, još uvijek se mogu vidjeti u zabačenim krajevima (slika 3.).



Slika 3. Odvodnici prenapona iz 1940. proizvodnje „*Joslyn Supply Co.*“ (lijevo), i 1950. proizvodnje „*GE Still*“ (u centru) još uvijek u pogonu. Odvodnik prenapona sa ventilom za ispuštanje gasova – „oduvnim kućištem“, rješenje „*General Electric*“-a iz 1922., proizveden 1945. i bio u upotrebi do 2011. (oštećeno desno kućište – prikaz desno)

Patent za „indikator prekida“ u maju 1922. je podnio inženjer Vestinghaus-a Lorens Rajs Goladej. Nemogućnost da se vizuelno utvrdi da li je odvodnik u funkciji ili je oštećen bio je osnovni problem toga vremena. Koncept savremenih odvodnika otpočeo je 1939., kada je Ralf H. Irl inženjer za osigurače, prijavio patent „eksplozivnog punjenja“ za uzemljavanje i odvajanje OP sa mreže. Početkom 1950-ih godina prošlog vijeka, napon prenosnih sistema se bliži 500 kV, a zahtjevi za izolacionim konstrukcijama se pooštavaju, tako da su konstrukcije odvodnika za najviše napone predstavljale ozbiljan mehanički izazov, jer su isti postajali značajno gabaritniji. Problem iznova rješavaju inženjeri konstruktori. Bivši inženjer GE Džek Kalb, obučavan u ASE-a, radeći u kompaniji Ohajo Bras, prijavljuje nov patent 1957., koji je odobren tek 1962. godine, smanjujući efektivnu dužinu OP za 25% (slika 4.).



Slika 4. Silicijum-karbidni odvodnik prenapona, proizvodnje sa staklenim kućištem koji je bio u eksploataciji od 1934. do 1957. (lijevo). Patent savremenog odvodnika prenapona iz 1957. godine (centar). Presjek konstrukcije savremenog odvodnika prenapona (desno)

Tehnologija silicijum-karbidnih (SiC) OP tih godina značajno dominira u primjeni. Sa različitim varijacijama, gotovo sva rješenja su zasnovana na patentiranom još od 1926. Iako je poslednji patent SiC OP predat još 1967. godine, tokom 1970-tih godina prošlog vijeka dizajn je značajno promijenjen i usavršen, tako da iako se sa njihovom proizvodnjom prestalo počev od 1998. godine, još uvijek se mogu vidjeti u značajnom broju u pogonu, posebno kada je riječ o distributivnoj mreži.

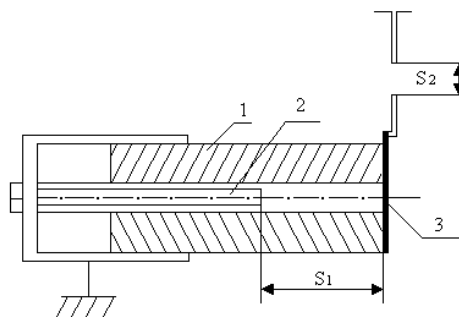
Prvi OP za gasom izolovana postrojenja (GIS) su proizvedeni 1971., a sa proizvodnjom MOP-a sa polimernim kućištem otpočelo se 1975. sa primjenom u distributivnoj mreži, odnosno 1982. za GIS postrojenja. Proizvodnja MOP sa polimernim kućištem za 145 kV visokonaponsku mrežu otpočela je 1987. godine, da bi za potrebe kompanije *Power Grid Corporation* u Indiji, 2010. bili proizvedeni tehnologijom „šupljeg jezgra“ kompozitnog polimera - prvi odvodnici naponskog nivoa 1200 kV [18].

4.2. Konstruktivne karakteristike odvodnika prenapona

Kako je i prethodno rečeno, koncept odvodnika prenapona kakav je danas poznat, nastaje 30-tih godina prošlog vijeka otkrićem nelinearnih karakteristika silicijum karbida (SiC) i konstrukcijom ventilnih odvodnika prenapona (VOP). U odomaćenoj praksi žargonski su nazivani „klasični“, „katodni“, „karbidni“ [14, 15].

Osnovna karakteristika OP jeste nelinearna volt-ameperska (U-I) karakteristika, koja omogućava da se OP u normalnom radu na trajnom radnom naponu mreže ponaša kao izolator, dok u slučaju pojave prenapona određene amplitude i strmine talasa odvodnik postaje niskoomski otpornik i odvodi dio energije u zemlju. Razlika između klasičnih VOP-a i MOP-a je upravo u stepenu nelinearnosti U-I karakteristike.

Elektrode najčešće u obliku rogova postavljene na određenom međusobnom rastojanju u specijalnu cijev jesu cijevni odvodnici. Cijevni odvodnici su u stvari iskrišta kod kojih je omogućeno gašenje luka. Cijev (zato su i nazvani cijevni) je napravljena od specijalnog materijala (tvrda guma, vodeno staklo). Svojim toplotnim dejstvom razara električni luk stvarajući gasove [14]. Kroz naročito predviđene otvore, gasovi koji su se stvorili u cijevi, izlaze napolje pod velikim pritiskom, struje i na taj način oduvavaju luk i gase ga. Od istog materijala kao i cijev, između elektroda se stavlja komadići izolacionog materijala. Na taj način se povećava razvijanje gasova da bi se intenzivnije gasio luk. Slika 5 prikazuje primjer cijevnog odvodnika prenapona, sa iskrištem S_1 na kome se stvara luk koji razara cijev, dok u trenutku reagovanja, iskrište S_2 služi da odvoji odvodnik prenapona od mreže.



Slika 5. Cijevni odvodnik prenapona

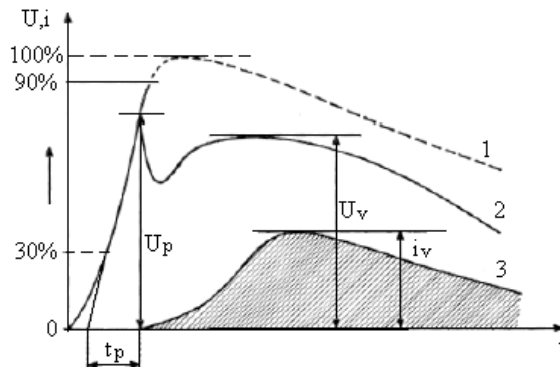
1-cijev odvodnika, 2-uzemljena elektroda, 3-elektroda pod naponom, S1, S2-iskrišta

Osim nazivnog napona i nazivne frekvencije, karakteristična veličina cijevnog odvodnika je i njegova klasa koja definiše granične propusne struje uz naizmjenični napon reagovanja. Kod cijevnog odvodnika prenapona udarni napon reagovanja je 100% napon reagovanja za talas oblika $1,2/50 \mu s/\mu s$. U mreži čije je zvjezdište izolovano, reagovanje cijevnog odvodnika predstavlja zemljospoj.

Osnovna konstrukcija ventilnih odvodnika prenapona - **VOP** sastoji se od pločastih procjepa razmaknutih izolacionim prstenovima sa serijskim nelinearnim **SiC** otpornicima. Funkciju prekidanja strujnog luka obavljaju procjepi, tkz. iskrišta, dok nelinearni otpornici ograničavaju struju odvođenja. Nakon reagovanja odvodnik prenapona ograničava prenapon. Sve dok postoji prenapon kroz odvodnik protiče struja odvođenja. Nelinearnim otpornicima se ograničava propratna struja (koja teče i nakon nestanka prenapona, kao posljedica radnog napona). Kao i prije reagovanja, kada se luk na iskrištima ugasi (trenutak kada propratna struja prolazi kroz nulu), odvodnik ponovo ima beskonačno veliku otpornost. Odvodnik prenapona. Strmina talasa koji nailazi na odvodnik određuje napon reagovanja iskrišta, tako da OP najčešće reaguje na $4U$ (p.u.). Kako bi volt-sekundna karakteristika iskrišta bila što manje zavisna od strmine talasa koji nailazi na odvodnik, iskrište se oblikuje upravo po tome.

Osnova OP je izolacioni materijal sa česticama silicijum karbida unutar njega. Zbog jakog električnog polja, prostor između SiC čestica se jonizuje i postaje provodan. Stvaranje provodnih kanala uslovljeno je većim naponom, jače je i polje, kao i jonizacija, tako da vrijednost otpora pada. Pri smanjenom naponu, otpor odvodnika raste kako električno polje slabi, a time i jonizacija oko SiC čestica, pa se smanjuju i provodni kanali [18, 19].

Napon pri kojem prorađuju iskrišta OP naziva se prorađni napon (slika 6.).



Slika 6. Proradni i preostali napon VOP

1-naponski talas bez VOP, 2-udarni talas na VOP, 3-strujni talas kroz VOP, t_p -proradno vrijeme, U_p -proradni napon VOP, U_v -preostali napon.

Značajno unapređenje predstavlja uvođenje aktivnih iskrišta sa kalemima koji proizvode jako magnetno polje tokom provođenja struje kroz odvodnik, tkz. odvodnici sa magnetnim oduvavanjem luka (slika 7.).



Slika 7. Klasični 110 kV odvodnici prenapona (lijevo) i odvodnici prenapona sa magnetnim oduvavanjem luka (desno)

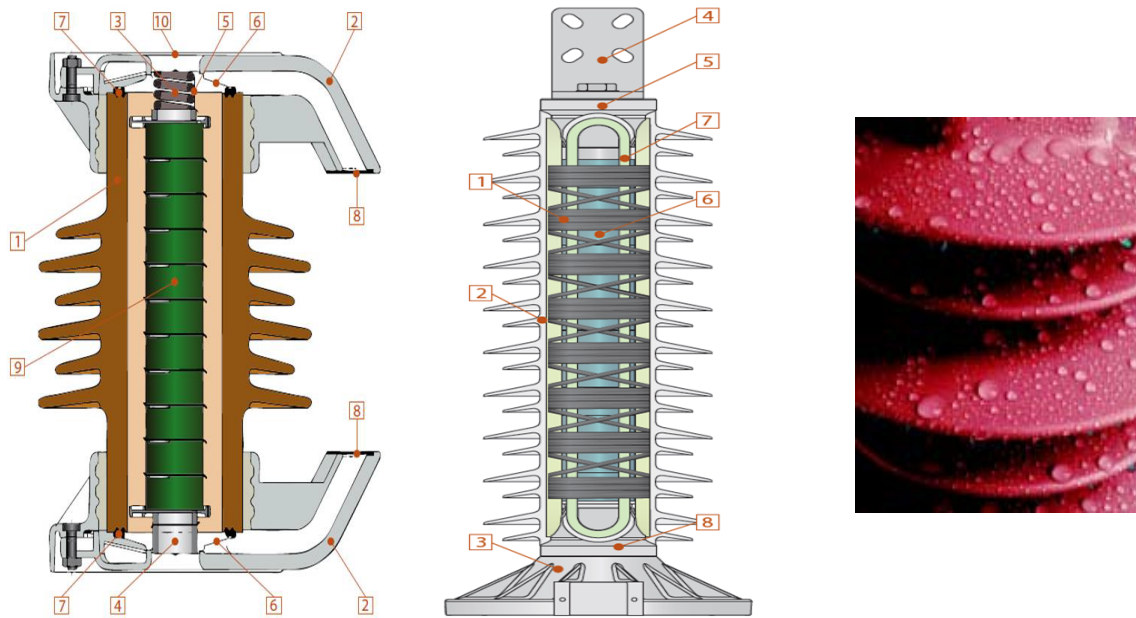
Strujni luk u procjepima se potiskuje i izdužuje ka ivicama komore uzrokujući veći pad napona duž odvodnika. Napon duž odvodnika je smanjen uz smanjenje struje odvođenja. Napon strujnog luka stvara veći otpor i omogućava prekidanje strujnog luka prije nego što radni napon padne na nulu [18, 19].

Zbog veoma izražene U-I karakteristike, **metal-oksidni odvodnici prenapona** se prave samo od redne veze nelinearnih otpornika dominantno od cink oksida (ZnO). Kako nemaju iskrište (slika 8.), to kroz MOP protiče mala struja odvođenja koja je posljedica trajnog priključenja odvodnika na radni napon mreže.

MOP se sastoje iz dva dijela: izolacionog kućišta čija je uloga da obezbijedi električnu izolaciju aktivnog dijela i mehaničku čvrstoću odvodnika. U zavisnosti od materijala od kojih su proizvedeni postoje porcelanska i silikonska kućišta. Porculanska kućišta su se koristila kod klasičnih OP-a, međutim i MOP-a su se u početku proizvodili isključivo u porculanskim kućištima. Ovakva kućišta su pokazala veći broj negativnih osobina: težina, prodor vlage unutar kućišta, zaprljanje i formiranje puzajućih struja po površini kućišta, opasnost kod eksplozija pojavom nadpritiska u kućištu i dr.

Nove generacije MOP-a do 1990. su se proizvodili u polimernim kućištima od etilen-vinil acetata, kopolimera. To je bila EPDM (eng. *Ethylene Propylene Diene Monomer*) guma,

sintetički elastomer [20, 21]. Pored visoke elastičnosti i otpornosti pucanju, visoke temperaturne stabilnosti, male vjerovatnoće paljenja i velike dielektrične čvrstoće, osnovna prednost silikona jeste izvrsna hidrofobnost (slika 8.). Naime, voda ostaje na površini silikonskog izolatora u obliku kapljica i sa njega otpada, tako da ne postoji mogućnost formiranja strujnih puteva po površini izolatora, uzrokovanih vlagom.



Slika 8. Presjek konstrukcije klasične izvedbe metal-oksidnog odvodnika prenapona (lijevo)

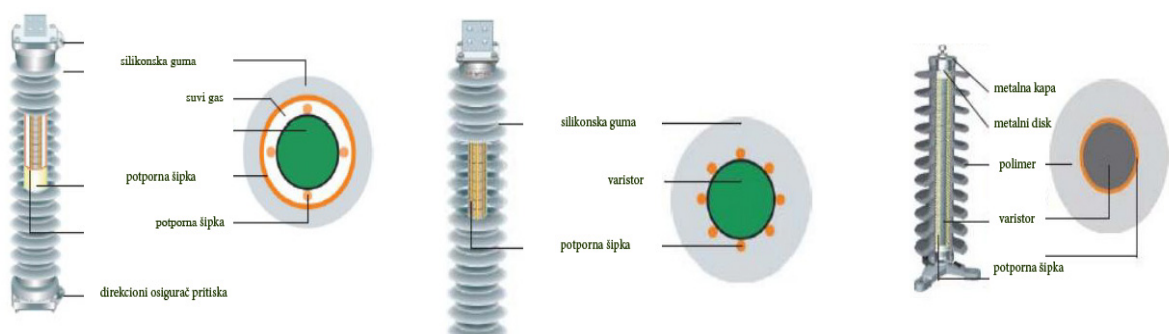
1-porculansko kućište, 2-izduvni otvor za nadpritisak, 3-kontaktna opruga, 4-komora za uklanjanje vlage, 5-bakarna veza, 6-elastična membrana, 7-zaptivni prsten, 8-indikacione ploče, 9- ZnO varistor, 10-metalna kapa

Presjek konstrukcije odvodnika prenapona sa silikonskim kućištem (desno)

1-zaštitni izolacioni namotaj, 2-silikonsko kućište, 3-osnova, 4-fazni priključak, 5-gornji provodni poklopac, 6-ZnO varistori, 7-ram od fibreglasa, 8-donji provodni poklopac

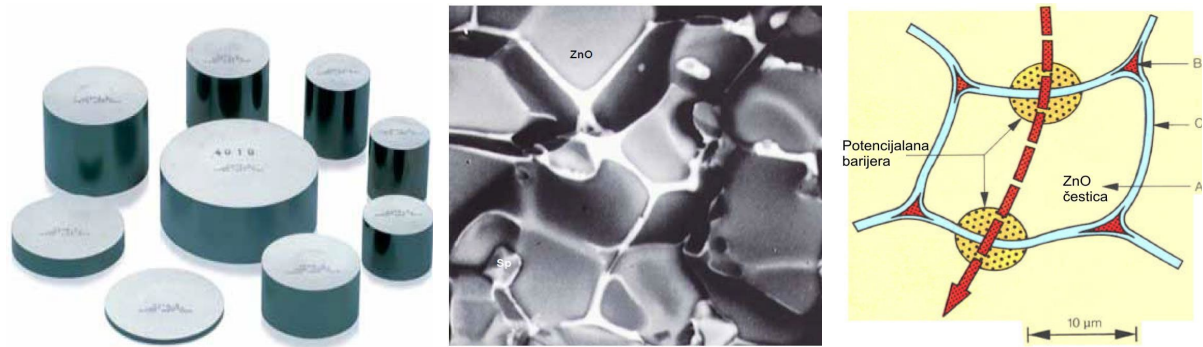
U praksi (slika 9.) se primjenjuju tri osnovna koncepta proizvodnje odvodnika:

- „Cijevni“ - aktivni dio se stavlja u cijev od fibreglasa koja se zatim presvlači izolacionim materijalom.
- „Kavezni“ - aktivni dio se učvršćuje ramom od fibreglasa, a zatim se polimerno kućište direktno izliva na sam aktivni dio.
- „Uvijeni“ - aktivni dio se umotava u materijal od fibreglasa i zatim se zajedno utapaju u smolu koja im daje čvrstoću, pa se ubacuju u unaprijed pripremljeno kućište od polimera.



Slika 9. Konstruktivne izvedbe odvodnika prenapona
„Cijevna izvedba“ (lijevo), „Kavezna izvedba“ (centar), „Uvijena izvedba“ (desno)

Aktivni dio odvodnika se pravi od varistora (slika 10.), koji se slažu jedan na drugi. Postupkom sinterovanja na visokim temperaturama do 1200°C , varistori se istiskuju u valjkaste blokove. U zavisnosti od njihove namjene i karakteristika samog materijala, dimenzije blokova se kreću od 3-10 cm, a visine u opsegu 2-5 cm [21]. Površina poprečnog presjeka varistora definiše njegovu apsorpcionu moć, tako da je diktirana klasa odvodnika definisana dimenzijama primijenjenog varistora. Isto tako, podnosivi napon varistora je uslovljen veličinom zrna ZnO, tako da se kreće u granicama 200-400 V/mm.



Slika 10. Metal-oksidni varistor i njegova mikroskopska struktura

Kao aditivi međugranularnog prostora se najčeće koriste oksidi bizmuta, mangana, hroma, antimona i kobalta (Bi_2O_3 , MnO , Cr_2O_3 , Sb_2O_3 , CoO). Sadržaj ovih aditiva, uobičajeno do 10%, direktno definiše nelinearnu U-I karakteristiku varistora i predstavlja tehnološko rješenje matične fabrike. Od naponskog nivoa OP zavisi koliki je broj varistora vezano na red, tako da više ovako vezanih jedinica čini OP za najviše naponske nivoe.

Visokonaponski OP-a su opremljeni i „prstenom za oblikovanje polja“ ili „kapacitivnim prstenom“ (slika 11.).



Slika 11. Prsten za oblikovanje polja i naponsko naprezanje kućišta odvodnika

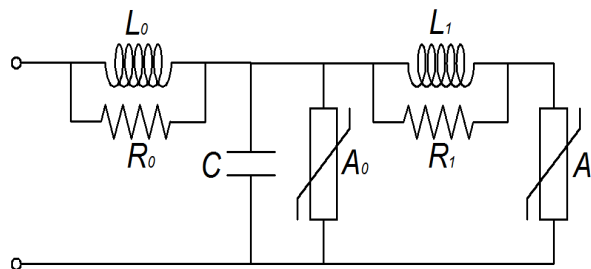
Elektroda u obliku prstena je apsolutno neophodna kada visina odvodnika prenapona prelazi jedan metar i kada je odvodnik konstruisan iz nekoliko jedinica. Uloga prstena je da pravilno rasporedi distribuciju napona duž odvodnika. Usljed povećanja dužine kućišta smanjuje se uticaj podužnih kapaciteta odvodnika i povećava se nelinearnost raspodjele napona po blokovima ZnO odvodnika (iskrištima u slučaju SiC odvodnika). Ukoliko se navedena mjera

primijeni na odvodnik na visokonaponskom kraju, on će biti izložen većim naprezanju u odnosu na donji dio.

Raspodjela napona duž kućišta odvodnika prenapona definisana je njegovim parazitnim kapacitetima. Parazitni kapaciteti dovode do nesimetrične raspodjele električnog polja i do pojave tzv. „vrućih tačaka“ (*eng. hot-spots*), smanjene energetske izdržljivosti i smanjenja zaštitnih svojstava.

4.3. Modeli i ekvivalentne šeme odvodnika prenapona

Nakon dugogodišnjih istraživanja, definisani su modeli odnosno ekvivalentne šeme OP, koji na najefikasniji način reprezentuju sve bitne karakteristike OP. Radna grupa IEEE je još 1992. godine predložila dinamički, frekvencijski zavistan model OP koji se najčešće koristi prilikom dinamičkih analiza [22]. Ovaj model je prikazan na slici 12. Model odvodnika bez iskrišta uzima u obzir nelinearnu karakteristiku odvodnika i njegovo dinamičko ponašanje. Nelinearnost je određena $U-I$ karakteristikom, dok frekvencijski zavistan model odvodnika uzima u obzir i njegovo dinamičko ponašanje.



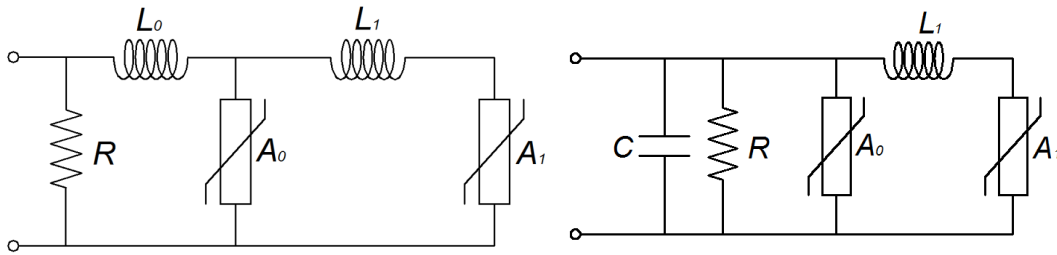
Slika 12. Frekvencijski zavistan dinamički model odvodnika prenapona

Nelinearna $U-I$ karakteristika modelovana je s dva nelinearna otpornika (A_0 i A_1), koji su odvojeni $R-L$ filtrom. Za prenapone niskih frekvencija impedansa filtra je zanemariva, pa su nelinearni otpornici spojeni u paralelu. Za prenapone visokih frekvencija impedancija $R-L$ filtra raste, pa se struja drugačije raspodijeli između dvije grane. Struja koja teče kroz granu nelinearnog otpornika A_0 raste sa smanjenjem trajanja čela talasa. Otpornik A_0 uvijek je veći od A_1 . Pri brzim prenaponima (struje visokih frekvencija) veći je preostali napon odvodnika zbog toga što induktivitet L_1 tjera struje visokih frekvencija više u granu otpornika A_0 nego li u granu otpornika A_1 . Poređenje proračuna s mjerenjima pokazuje da frekvencijski zavistan model odvodnika daje dobre rezultate za struje groma s trajanjem čela između $0,5 \mu\text{s}$ i $45 \mu\text{s}$ [23].

Pojednostavljeni frekvencijski zavistan model je model u kojem je moguće odrediti parametre zamjenske šeme bez iterativnog postupka, koristeći samo podatke proizvođača. Pojednostavljeni model nastao je iz IEEE modela eliminisanjem kapaciteta C (njegov uticaj na ponašanje cjelokupnog modela je zanemarljiv) i otpornika R_0 i R_1 koji su ekvivalentirani s otpornošću R (oko $1 \text{ M}\Omega$) između ulaznih priključaka kako bi se izbjegla numerička nestabilnost u proračunima.

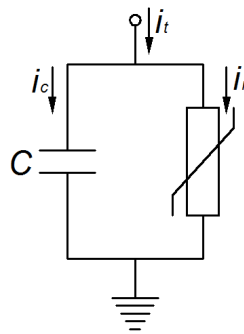
Pored IEEE dinamičkog modela, postoje i alternativni modeli koji se često mogu sresti u literaturi [18, 22]. Dva najčešće korišćena modela su Picenti-Giannettoni model i Fernandez-Diaz model. Ekvivalentne šeme ovih modela su prikazane na slici 13.

Osim modela koji su razvijeni za anлізу ponašanja OP pri odvođenju udarnih struja, veoma su značajni i statički modeli OP za analizu odziva odvodnika u normalnim uslovima rada. Upravo ovi modeli su značajni kod razmatranja metoda monitoringa i dijagnostike OP.



Slika 13. Picenti-Giannettoni (lijevo) i Fernandez-Diaz-ov (desno) dinamički model odvodnika prenapona

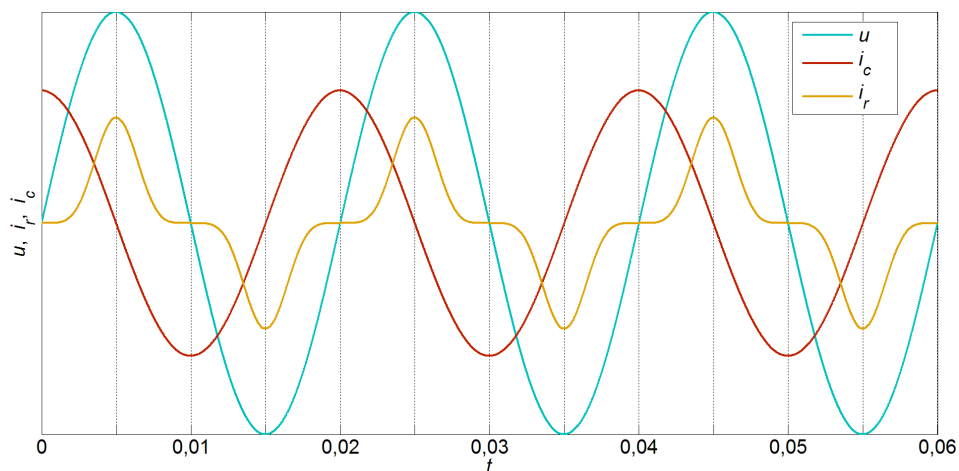
Kao što je više puta rečeno, u normalnim uslovima rada kroz ZnO OP konstantno protiče mala struja odvođenja koja se sastoji od dominantne linearne kapacitivne komponente i za red veličine manje nelinearne rezistivne komponente. U skladu sa tim se dominantno koristi tkz. „uprošćeni model MOP“-a koji se sastoji od dvije paralelne grane, prikazano na slici 14.



Slika 14. Uprošćeni model odvodnika prenapona

Osim ovog, postoje i modeli koji na red sa paralelnom vezom kapacitivnosti i nelinearne otpornosti uzimaju u obzir i linearnu otpornost ZnO granula. Međutim, ta otpornost je veoma mala i najčešće se zanemaruje u analizama.

U slučaju primjene uprošćenog modela sa čisto prostoperiodičnim naponom napajanja, talasni oblici napona i struje odvođenja su prikazani na slici 15.

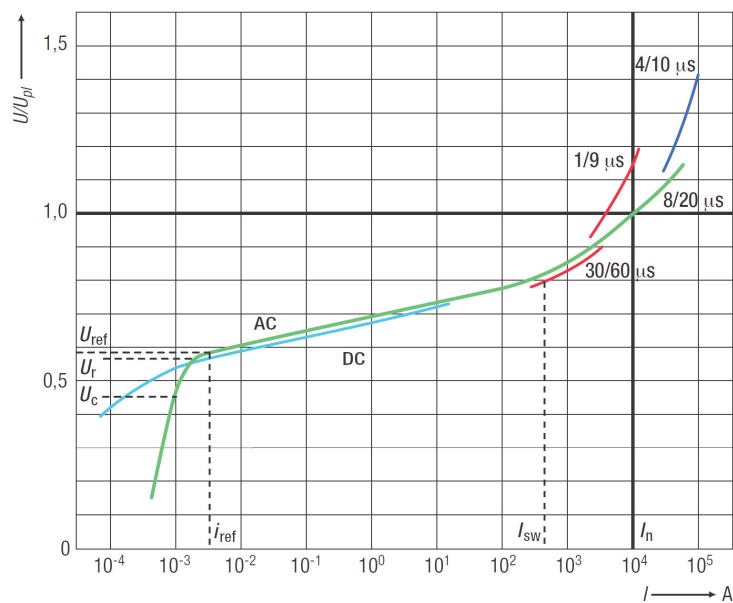


Slika 15. Talasni oblici napona i struje uprošćenog modela odvodnika prenapona

4.4. Energetsko opterećenje odvodnika prenapona

Kao posljedica privremenih prenapona, OP se energetski znatno opterećuju, a sa druge strane moraju štititi opremu na način da što uspješnije ograničavaju atmosferske i sklopne prenapone ispod nivoa podnosivog napona opreme.

Uslovi atmosferskih (8/20 μ s i 4/10 μ s) i sklopnih (30/60 μ s) prenapona se simuliraju strujnim impulsima, tako da se karakteristike odvodnika snimaju se pri naizmjeničnom i jednosmjernom naponu, što je ilustrativno prikazano U - I karakteristikom odvodnika prenapona na slici 16. Pojave povratnog preskoka i sklopne operacije vakuumskim prekidačima ili rastavljačima simuliraju se pri strmom strujnom impulsu (1/9 μ s). Na slici 16. označeni su osnovni parametri odvodnika prema standardu IEC 60099-4 [3], a navedeni su u prvom poglavlju.



Slika 16. U - I karakteristike odvodnika prenapona

Energija koju odvodnik može apsorbirati u jednom ili više strujnih impulsa bez oštećenja i bez gubitka termičke stabilnosti definiše energetska sposobnost (*eng. energy capability*) OP. Naravno, za različite talasne oblike i različita vremena trajanja impulsa, različita je i energetska sposobnost OP, a oslikana je kroz najmanje dvije vrste energetske sposobnosti OP: energetska sposobnost jednog impulsa i termička energetska sposobnost.

Maksimalna energija koju odvodnik može podnijeti u trajanju od 4 ms ili duže je energetska sposobnost jednog impulsa. Pri tom OP mora da ostane termički stabilan na nazivnom naponu U_r u trajanju od 10 s i trajnom radnom naponu U_c u trajanju 30 min.

Do spoljašnjeg preskoka ili čak pucanja blokova može dovesti određena injektirana energija, koja uzrokuje vrlo brzi porast temperature MO blokova. Istovremeno, ova energija uzrokuje i pojavu velikih dinamičkih sila na istežanje odnosno „vrućih provodnih kanala“ koji se formiraju na mjestima najveće gustine struje. Svi ovi efekti su posljedica nehomogenosti MO blokova, koja se uprkos visokotehnološkom procesu proizvodnje, ne može izbjeći. Ovo se ne odnosi na ostale dijelove odvodnika (konstrukcija ili kućište), jer je energija jednog impulsa karakteristika isključivo otporničkih MO blokova.

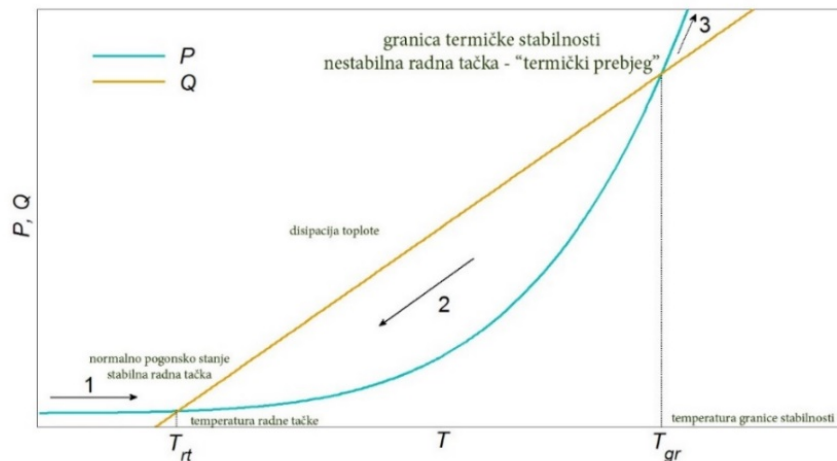
Maksimalna energija pri kojoj se odvodnik može ohladiti na normalnu pogonsku temperaturu definiše termička energetska sposobnost (*eng. thermal energy handling capability*) OP. Na nju utiču električne karakteristike i starost MO blokova. Isto se misli i kada je riječ o

njihovom specifičnom električnom naprezanju u stvarnom pogonu, materijalu kućišta (porculan ili silikon) i dimenzijama, tako da termička energetska sposobnost prilično zavisi od samog konstruktivnog rješenja određenog tipa OP.

Termička energetska sposobnost određena je granicom termičke stabilnosti odvodnika. Naime, usljed trajnog radnog napona kroz aktivni dio OP stalno protiče struja odvođenja. Iako mala po svojoj jačini, ova struja ipak izaziva Džulove gubitke, tj. izaziva zagrijevanje OP.

Rezistivna struja zavisi od temperature sa pozitivnim temperaturnim koeficijentom, tj. rezistivna struja i temperatura obrazuju pozitivnu povratnu spregu. Zagrijevanje odvodnika dovodi do povećanja struje odvođenja, a njeno povećanje do dodatnog zagrijavanja. Reklo bi se da je sistem neodrživ, ali u slučaju umjerenog radnog napona OP ipak dostiže temperaturni ekvilibrijum kada se snaga zagrijavanja OP izjednači sa snagom disipacije toplote sa površine OP. Ukoliko je radni napon previsok, tj. veći od granične vrijednosti, nije mogući dostići temperaturni ekvilibrijum i temperatura OP se povećava sve do njegovog uništenja [24].

Trajni rad OP je održiv samo na temperaturi radne tačke (slika 17.).



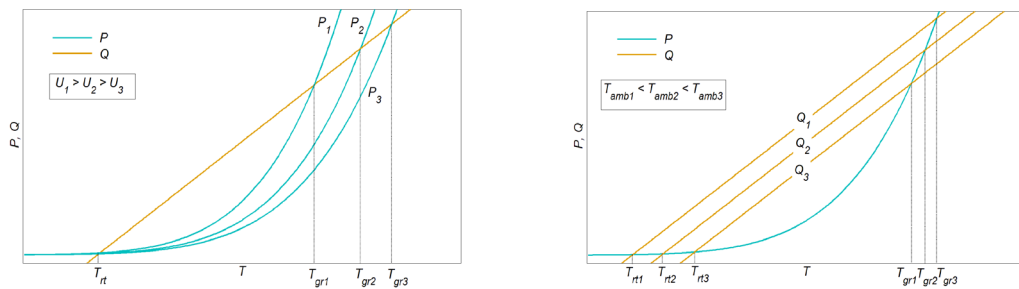
Slika 17. Dinamička stabilnost rada odvodnika prenapona

Ako se u prelaznom procesu temperatura OP nalazi u oblasti 1, tada je snaga generisanja veća od snage disipacije i temperatura će se povećavati sve dok ne postigne vrijednost T_{rt} . Ako se u prelaznom procesu temperatura OP nalazi u oblasti 2 tada je snaga generisanja manja od snage disipacije i temperatura će se smanjivati sve dok ne postigne vrijednost T_{rt} . Međutim, ako se u prelaznom procesu temperatura OP nađe u oblasti 3, tada je snaga generisanja veća od snage disipacije i temperatura će se povećavati sve do termičkog uništenja OP. U literaturi se ova pojava naziva „termički prebješk“ OP. Uslov dinamičke stabilnosti OP je da radni režim mora ostati u oblasti 2, tako da apsorpciona moć OP zavisi od razlike temperatura T_{rt} i T_{gr} , tj. od veličine oblasti 2. Proizvođači deklarišu apsorpcionu sposobnost odvodnika koja iznosi oko 200 J/cm^3 , međutim stvarne vrijednosti iznose čak oko $400\text{-}500 \text{ J/cm}^3$ [36].

Pored materijala od kojih je varistor OP napravljen, na apsorpcionu moć OP utiču i vrijednost napona i ambijentalna temperatura. Na slici 18. su prikazane karakteristike generisanja i disipacije toplote OP u zavisnosti od radnog napona i ambijentalne temperature.

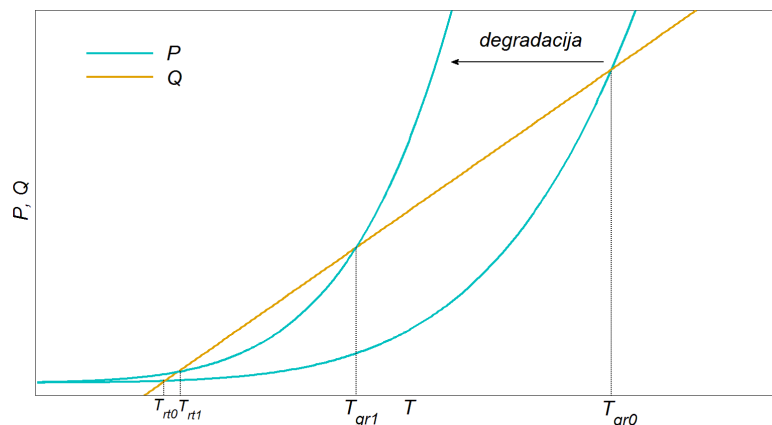
Povećanje napona utiče na smanjenje apsorpcione moći OP kao posljedica smanjenja temperature granice stabilnosti. Isto tako, povećanje napona dominantno utiče na temperaturne granice stabilnosti OP, dok je uticaj na temperaturu radne tačke praktično zanemarljiv. Postoji i dovoljno velika granična vrijednost napona za koju se temperatura radne tačke i temperatura granice stabilnosti izjednačavaju (u realnom pogonu se ipak ne dostižu).

Povećanje ambijentalne temperature utiče na smanjenje apsorpcione moći OP, kao i na temperaturu radne tačke i na temperaturu granice stabilnosti.



Slika 18. Karakteristike generisanja i disipacije toplote odvodnika prenapona u zavisnosti od radnog napona (lijevo) i ambijentalne temperature (desno)

Degradacija OP je uzrok trajne promjene U-I karakteristike, a samim tim i trajnog povećanja temperature radne tačke pri istim ambijentalnim uslovima. Degradacija usljed atmosferskih pražnjenja zavisi od više faktora, kao što su: gustina struje pražnjenja, talasni oblik struje pražnjenja, broj apsorbiranih prenapona, temperatura odvodnika i radni napon odvodnika. Usljed degradacije radna temperatura OP, pri istom naponu i istoj ambijentalnoj temperaturi, se povećava (slika 19.). Ova činjenica se koristi za realizaciju nekih metoda za monitoring i dijagnostiku OP.



Slika 19. Uticaj degradacije odvodnika prenapona na dodatno zagrijavanje

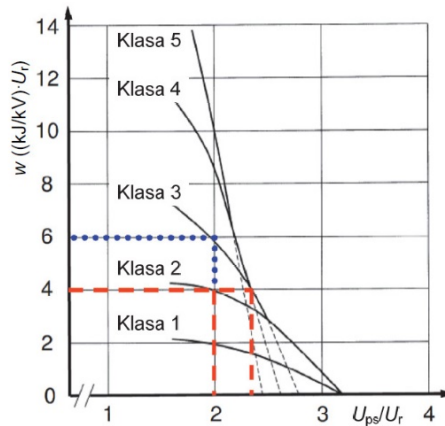
U slučaju atmosferskih prenapona, zbog velike energije pražnjenja, radna tačka se ne kreće po istoj krivoj snage generisanja toplote, nego se zbog tkz. privremene degradacije ova kriva mijenja u vremenu – prelazi se sa jedne na drugu, degradiranu, a poslije prolaska prenapona se vraća u prvobitno stanje. Nakon nailaska prenapona, degradirani OP najčešće više nije u stanju da apsorbira energiju bez ulaska u oblast nestabilnog rada. Tako se za određeni odvodnik i definisanu potrebnu minimalnu apsorpcionu moć OP, može odrediti preostali životni vijek OP za poznate koeficijente degradacije.

Važno je napomenuti da na stepen degradacije bitno utiče i medijum u kome se nalazi odvodnik. Naime, smanjenjem koncentracije kiseonika brže dolazi do degradacije OP. Iz tog razloga se ubrzano starenje može obavljati i u N_2 , CO_2 , SF_6 ili u ulju, što se objašnjava pojavom elektro-hemijskih reakcija, a u ulju čak i u odsustvu napona na odvodniku.

Za nazivne odvodne struje od 10 kA i 20 kA definisane su energetske klase odvodnika (1 do 5) koje se ispituju dugotrajnim strujnim impulsima. Energetska klasa odvodnika ispituje se

s dva strujna impulsa propisanih amplituda i trajanja, poslije kojih odvodnik mora ostati termički stabilan s obzirom na trajni radni napon U_c .

Očekivana vrijednost energije koju odvodnik može apsorbirati definisana je kao klasa odvodnika. Na slici 20. prikazano je specifično energetske opterećenje w odvodnika prenapona.



Slika 20. Specifično energetske opterećenje w (u kJ/kV od nazivnog napona U_r) u zavisnosti od odnosa preostalog sklopnog napona i efektivne vrijednosti nazivnog napona odvodnika (izvor IEC 60099-4)

Ova zavistnost je prikazana kao specifično energetske opterećenje u kJ/kV u zavistnosti od odnosa preostalog sklopnog napona i efektivne vrijednosti nazivnog napona OP. Očigledno je da, zavisno od preostalog napona odvodnika U_{ps} pri sklopnim prenaponima, energetske opterećenje nije konstantno. Energetske opterećenje OP je utoliko manje što je viši preostali napon na odvodniku. Crvene linije na slici 20. prikazuju da OP s određenim specifičnim energetske opterećenjem w odgovaraju različite energetske klase i direktno su zavisne od preostalog napona. S obzirom na sklopne prenapone, primjera radi, odvodniku sa specifičnim energetske opterećenjem 4 kJ/kV (prema ispitivanju energetske klase) odgovara energetska klasa 2 za odnos $U_{ps}/U_r=2$, a energetska klasa 3 za odnos $U_{ps}/U_r=2,35$. Na prvi pogled, zbog lošijeg zaštitnog nivoa i višeg preostalog napona, „bolji“ odvodnik energetske klase 3 može biti lošiji izbor. Plava linija na slici 20. prikazuje odnos $U_{ps}/U_r=2$ za energetske klasu 3 kojem odgovara $w=6$ kJ/kV, tj. odvodnik s MO blokovima većeg prečnika [3].

Isto tako, iz energetske klase i preostalog napona može se odrediti specifično energetske opterećenje odvodnika. Zato matične fabrike odvodnika daju dodatne podatke o energetske sposobnosti odvodnika pri dugotrajnom strujnom impulsu. Kakav je kvalitet i prečnik MO blokova, odnosno kakvo je energetske opterećenje, reći će upravo ovaj podatak. To je i njegoa osnovna prednost u odnosu na ostale podatke koji se odnose na energetske opterećenje OP.

Neki proizvođači definišu energetske sposobnost odvodnika pri jednom strujnom impulsu (u ovom slučaju radi se o većim amplitudama struje). Prilikom definisanja privremenog prenapona i trajnog radnog napona, to definiše maksimalnu energija koju odvodnik može apsorbirati pri jednom impulsu, a da pri tome ostane termički stabilan.

Kada je riječ o atmosferskim prenaponima, energetske opterećenje OP približno se može definisati kao:

$$E = \left[2 \cdot U_{pr} - N \cdot U_{pl} \left(1 + \ln \left(\frac{2 \cdot U_{pr}}{U_{pl}} \right) \right) \right] \cdot \frac{U_{pl} \cdot T_1}{z} \quad (18)$$

gdje je:

U_{pl} - preostali napon odvodnika s obzirom na atmosferske prenapone,

U_{pr} - negativni preskočni napon izolatorskog lanca,

N - broj dalekovoda u tački priključka odvodnika,

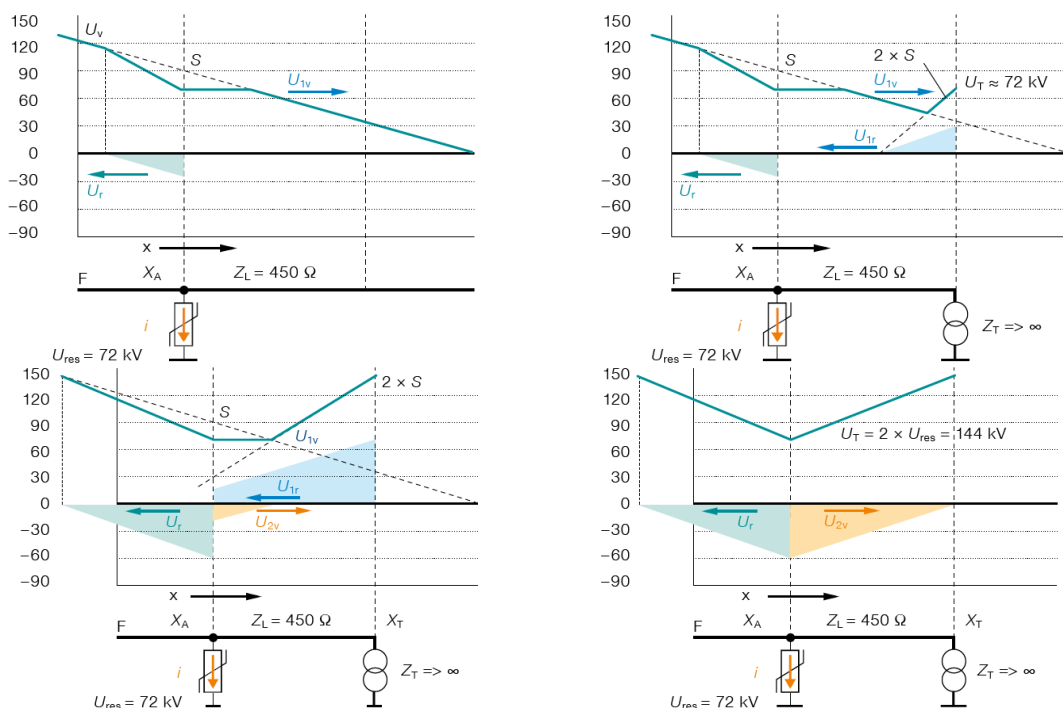
T_1 - ekvivalentno trajanje struje groma (uključuje prvi udar i uzastopne udare).

Ovo je samo gruba procjena. Nakon izbora modela okolne mreže i detaljnog proračuna atmosferskih prenapona, za tačnije određivanje energetskog opterećenja OP potrebno je detaljno modelovati i sam odvodnik.

4.5. Primjena odvodnika prenapona u prenosnim mrežama

Analizom dugogodišnje eksploatacije od preko 40 godina pokazano je da značajan broj (29%) kvarova visokonaponskih mjernih transformatora i prekidača su uzrokovani atmosferskim pražnjenjima [24, 29]. U najvećem broju izveštaja prijavljeni su dielektrički kvarovi na visokonaponskim prekidačima. Problem se javlja usljed direktnih višestrukih udara u fazne provodnike nadzemnog voda, kada se udar javlja na dalekovodu do 2 km od trafostanice. Prenaponski talas se djelimično reflektuje na krajevima otvorenog prekidača tokom „mrtvog vremena“ APU-a, uzrokujući porast nagiba i magnitude prenaponskog talasa.

Na teritoriji Crne Gore realizaciju efikasne zaštite od prenapona značajno otežavaju područja velike otpornosti tla i visok izokeraunički nivo, odnosno broj grmljavinskih dana u godini. Analiza statističkih podataka pogonskih događaja u poslednjih pet godina govori da je prosječan broj ispada dalekovoda u toku godine bio 8.42, dok je prosječan broj ispada trafostanica u toku godine bio 1.94 do posmatrane 2021. godine. Potrebno je napomenuti da prikazani broj ispada predstavlja situaciju kada APU nije bilo u mogućnosti da otkloni kvar usljed udara groma. Stvarni broj pražnjenja u dalekovode je mnogostruko veći na godišnjem nivou.

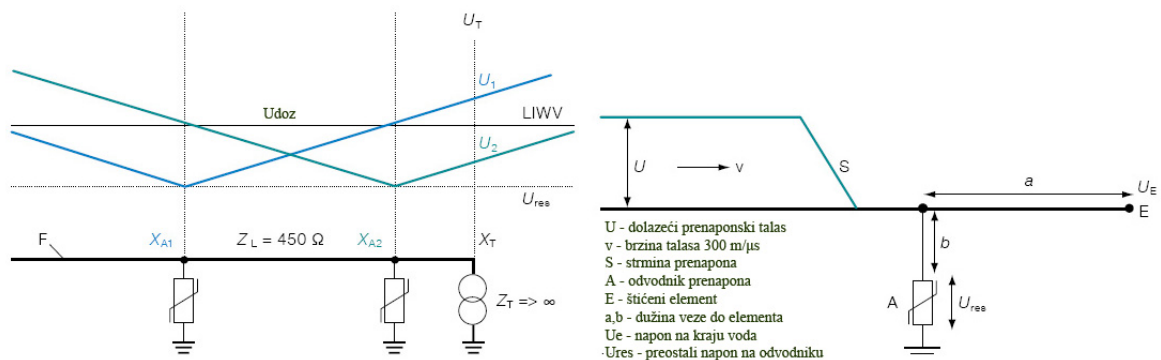


Slika 21. Prostiranje prenaponskog talasa i porast amplitude i strmine talasa usljed refleksije

Kod analiza prenapona od značaja je samo prenaponski talas. Kada putujući talas naiđe na tačku diskontinuiteta, tj. promjene impedanse - dio naponskog talasa se „odbija“ dok ostatak nastavlja putanju. To znači da se na spojevima (kabal, nadzemni provodnik, završetak voda, itd.) javljaju pad i porast napona. Posebno na krajevima voda, na otvorenim rastavljačima ili transformatoru, dolazi do refleksije talasa i udvostručavanja napona. Amplituda talasa u svakom trenutku jednaka je sumi trenutnih vrijednosti svih talasa [25, 29]. Fenomen putujućeg talasa prikazan je po koracima na slici 21.

Putujući talas koji nailazi na odvodnik prenapona ograničava se na preostalu vrijednost odvodnika U_{res} . Talas koji se prostire dalje, reflektuje se kao pozitivan od transformatora. Na samom transformatoru nastaje napon sa dvostruko većim nagibom. Ovakav naponski talas vraća se ka odvodniku prenapona. Odvodnik provodi struju pražnjenja stoga se može tretirati kao tačka kratkog spoja. Stoga se napon negativno reflektuje ponovo nastavljajući ka transformatoru. Amplituda i nagib naponskog talasa između odvodnika i transformatora se smanjuje.

Da bi odvodnik prenapona adekvatno zaštitio element prenosnog sistema neophodno je da bude postavljen na odgovarajućoj razdaljini od štice elementa. Koncept određivanja rastojanja podrazumijeva da razdaljina bude takva da vrijednost prenapona ne prelazi vrijednost dozvoljenog prenapona štice objekta U_{doz} (slika 22.). Navedeni primjer podrazumijeva prenaponski talas koji nailazi na visoko-omski otpor (transformator, otvoreni prekidač), pozitivno se reflektuje sa porastom napona do $2U$.



Slika 22. Napon na štice elementu u zavisnosti od udaljenosti odvodnika prenapona

U isto vrijeme, kako odvodnik počinje sa ograničavanjem prenapona, negativni naponski talas polazi od odvodnika u suprotnom smjeru od dolazećeg prenapona. Prema tome, odvodnik praktično štiti u oba pravca. Pojednostavljeno govoreći, oblik lijevka napona pojačava uticaj odvodnika kao što je prikazano na slici 22. Jasno se može uočiti da što je odvodnik bliže elementu koji štiti, u ovom slučaju transformatoru, zaštita elementa će utoliko biti bolja.

Rastojanje L sa dovoljnom tačnošću se može provjeriti pomoću sljedećih jednačina:

$$\frac{U_{doz}}{k_s} \geq U_e = U_{res} + \frac{2 \cdot S \cdot L}{v} \quad (19)$$

$$L \leq \frac{v}{2 \cdot S} \cdot \frac{U_{doz}}{k_s} - U_{res} \quad (20)$$

gdje je:

$$L = a + b,$$

k_s - sigurnosni faktor preporučeno je između dozvoljenog prenapona opreme U_{doz} i maksimalnog prenapona koji se može dogoditi. Ovaj faktor između ostalog uzima u obzir

starenje izolacije, statičke nepoznanice u definisanju napona atmosferskog impulsa koji oprema treba da izdrži. Ukoliko nije drugačije definisano, k_s ima vrijednost 1.2 [21, 22].

Osnovni cilj postavljanja zaštite od atmosferskih pražnjenja u neposrednoj blizini trafostanice na dalekovodu je zaštita opreme u trafostanicama, preciznije rečeno opreme dalekovodnog polja. Postoje dva osnovna alternativna rešenja problema zaštite opreme u dalekovodnim poljima od atmosferskih pražnjenja u blizini trafostanice:

- Postavljanje drugog zaštitnog užeta i poboljšanje uzemljenja smanjenjem otpora na stubovima dalekovoda u okolini trafostanice.
- Ugradnja odvodnika prenapona na ulazu u trafostanicu, odnosno u dalekovodna polja.

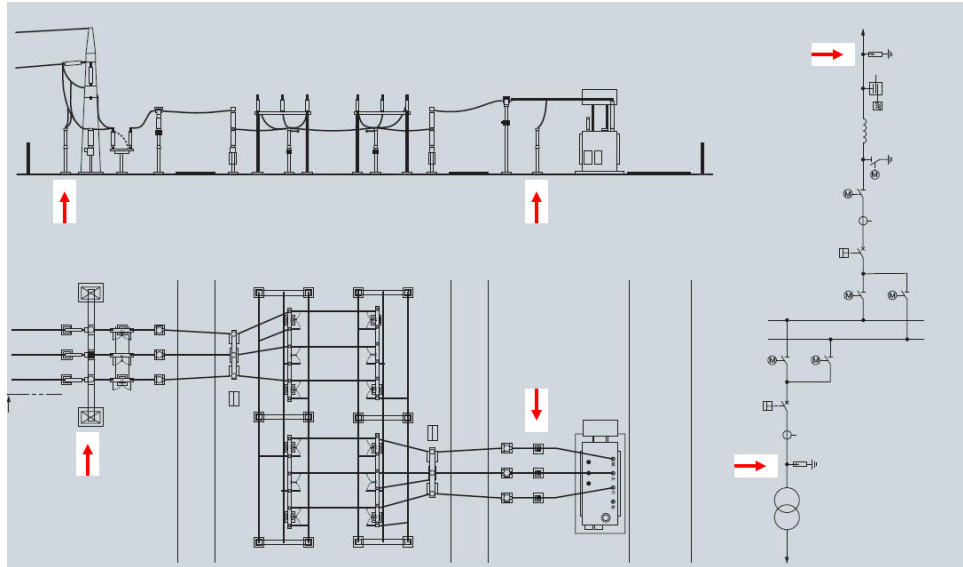
Zaštita transformatora je primarni cilj postavljanja odvodnika prenapona u trafostanicama. Svi relevantni standardi predviđaju ugradnju odvodnika prenapona za zaštitu najskupljeg elementa trafostanice – transformatora (slika 23.).



Slika 23. Maksimalno skraćanje rastojanja odvodnika prenapona u zaštiti transformatora

Odvodnici prenapona postavljeni na ulaz trafostanice (slika 24.) mogu efikasno da zaštite prekidače i mjerne transformatore od direktnog atmosferskog pražnjenja u fazni provodnik u neposrednoj blizini trafostanice. Čak i za nova postrojenja zahtjevi za dodatnim prostorom predstavljaju problem, dok naknadna ugradnja na ulazu dalekovoda nerijetko je neizvodljiva. Rešenje u ovakvim slučajevima je integracija odvodnika u rastavljač na strani dalekovoda ili na sličan način kod uzemljivača gdje je izolatorsko postolje zamijenjeno odvodnikom prenapona.

U novije vrijeme razvijene su posebne konstrukcije odvodnika koji se postavljaju na nadzemne vodove. Odvodnici na dalekovodu ugrađuju se između faznog provodnika i stuba tako da ograničavaju napon između njihovih priključaka ispod preskočnog napona izolatorskih lanaca. Na taj način onemogućava se preskok preko izolatorskih lanaca [26, 29].



Slika 24. Principijelna šema i dispozicija dijela trafostanice sa mogućim lokacijama odvodnika prenapona

Ukoliko nijesu ugrađeni odvodnici može npr. uslijed atmosferskog ili sklopnog prenapona nastati preskok na izolatorskom lancu, usljed čega dolazi do kratkog spoja (slika 25.).



Slika 25. Atmosfersko pražnjenje u dalekovod bez odvodnika prenapona (lijevo) i dalekovod sa ugrađenim odvodnicima u svakoj fazi na jednom sistemu provodnika (desno)

Dakle, u slučaju odvodnika prenapona na dalekovodima, cilj je da se spriječi odvođenje atmosferskog pražnjenja u zemlju preko vazduha, stvaranjem druge putanje. Ne postoji mogućnost da radna struja nastavi tok ka zemlji nakon što je pražnjenje završeno. Bez naknadnog kratkog spoja - radne struje, zaštitni releji i prekidač na krajevima dalekovoda se ne pobuđuju i nema njihovog djelovanja. Krajnji rezultat je pražnjenje nakon udara u dalekovod preko stuba bez ispada dalekovoda.

Pored navedene, osnovne namjene OP u trafostanici, postoji niz drugih oblika primjena OP za zaštitu različite opreme od prenapona i unapređenja kvaliteta električne energije i smanjenja troškova održavanja. Nakon uvođenja polimernih kućišta odvodnika mogućnosti ugradnje su se proširile (horizontalni, potporni, viseći). Potrebno je imati na umu da je cijena odvodnika reda veličine 1% od opreme koju štiti.

4.6. Izbor odvodnika prenapona

Na osnovu privremenih prenapona koji se mogu javiti u mreži na mjestu ugradnje OP, bira se i nazivni napon odvodnika. Privremeni prenaponi nastaju kod jednopolnih i/ili dvopolnih kratkih spojeva sa istovremenim spojem sa zemljom. Tada usljed dozemnih kratkih spojeva dolazi do porasta napona zdravih faza.

Efektivna vrijednost privremenih prenapona određuje se izrazom:

$$U_{TOV} = k_z \cdot \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

pri čemu su:

k_z - koeficijent zemljospoja,

U_m - najviši napon mreže u kV.

U mrežama s efikasno uzemljenim zvjezdastima i mrežama s automatskim otklanjanjem kvara, za odvodnike ugrađene između faze i zemlje, osnovni zahtjev koji se postavlja pri izboru trajnog radnog napona U_c jeste da vršna vrijednost napona mora biti jednaka ili veća od vršne vrijednosti najvišeg faznog napona mreže. U slučajevima kada vršna vrijednost najvišeg faznog napona mreže nije poznata, proračun može ići s najvišim naponom opreme U_m . Na taj način, trajni radni napon odvodnika mora zadovoljiti sljedeću nejednakost:

$$U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (22)$$

gdje je:

U_m - najviši napon opreme.

Vrijednost privremenih prenapona na mjestu ugradnje OP određuju i njegov nazivni napon. Nakon što je odvodnik apsorbirao dozvoljeni (nazivni) iznos energije, nazivni napon odvodnika U_r predstavlja maksimalno dozvoljenu efektivnu vrijednost napona, nazivne frekvencije i ograničenog trajanja (10 s). U mrežama visokog napona privremeni prenaponi imaju različita vremena trajanja. Za praktične proračune privremene prenapone je korektno izraziti ekvivalentnim privremenim prenaponima s amplitudama U_{eqi} i trajanjem 10 s, na sljedeći način [19, 22, 23]:

$$U_{eqi} = U_{TOVi} \left(\frac{t_{TOVi}}{10} \right)^m \quad (23)$$

gdje je:

U_{TOVi} - amplituda i -tog privremenog prenapona,

t_{TOVi} - vrijeme trajanja i -tog privremenog prenapona,

U_{eqi} - amplituda i -tog ekvivalentnog privremenog prenapona s trajanjem 10 s,

m - eksponent koji se kreće u granicama od 0,018 do 0,022, obično se usvaja $m=0,02$.

Zahtjev kojeg je neophodno zadovoljiti pri izboru nazivnog napona odvodnika je [21]:

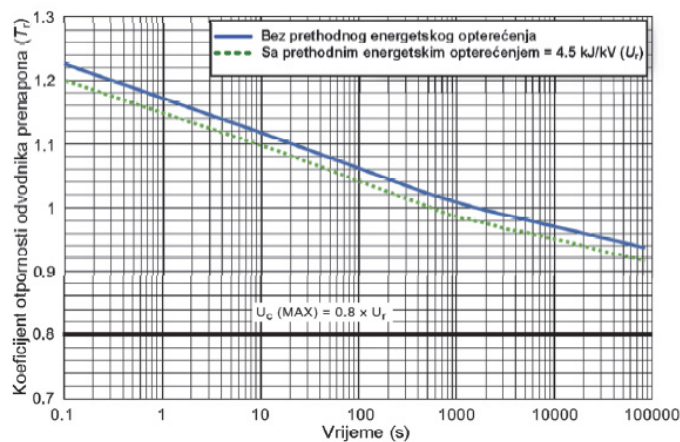
$$U_r \geq \max(U_{eq1}, U_{eq2}, U_{eq3}, \dots) \quad (24)$$

Krive koje prikazuju sposobnost podnošenja privremenih prenapona zavisno od njihovog trajanja, matične fabrike [21] predstavljaju u proizvođačkim katalozima (slika 26.). Kako je engleski izraz za privremene prenapone *Temporary Overvoltage*, ovi dijagrami su poznati i pod

nazivom TOV dijagrami. Odnos između amplituda privremenih prenapona i nazivnog napona odvodnika predstavljen je krivom $T_r=f(t_{TOV})$ gdje T_r predstavlja koeficijent otpornosti odvodnika, odnosno:

$$T_r = \frac{U_{TOV}}{U_r} \quad (25)$$

Na osnovu više privremenih prenapona uporede se vrijednosti dobijenih potencijalnih naznačenih napona. Najveća vrijednost od njih se zatim poredi sa vrijednošću naznačenog napona koja je dobijena na prvi način. Za konačan naznačen napon uzima se veća vrijednost (ukoliko u katalogu proizvođača nije prikazana ta vrijednost, za izbor se uzima prva katalogski veća). Tako izabranom naznačenom naponu odgovara katalogski izabrana vrijednost trajnog radnog napona OP-a.



Slika 26. Karakteristike otpornosti odvodnika prenapona prema privremenim prenaponima

Sada je zahtjev kojeg treba zadovoljiti pri izboru nazivnog napona odvodnika dat kao:

$$U_r \geq \max(U_{r1}, U_{r2}, U_{r3}, \dots) \quad (26)$$

Izbor nazivne odvodne struje OP zavisi od važnosti i stepena željene prenaponske zaštite (odvodnik s većom I_n znači veću pouzdanost prenaponske zaštite). Osim toga mora se voditi računa i o broju uključenih vodova tokom rada odvodnika i izolaciji voda (veći izolacioni nivo znači povećanje očekivane struje odvođenja odvodnika). U područjima s većim izokerauničkim nivoom vjerojatniji su udari groma većih amplituda struje, pa je neophodno uzeti u razmatranje i grmljavinske aktivnosti i vjerojatnoću pojave struje groma većih amplituda. Treba voditi računa i o tome da zaštitno uže utiče na broj povratnih preskoka i direktnih udara groma u fazni provodnik, pa je u razmatranjima neizostavna i konstrukcija odnosnog voda.

Mjera sposobnosti OP-a da podnese struju kratkog spoja bez pojave štetnih posljedica definiše se kao klasa zaštite od nadpritiska predstavlja. Prema naznačenoj struji kratkog spoja, standard IEC 60099-1 [5] klasifikuje OP prema maksimalnoj podnosivoj struji kratkog spoja, odnosno na 5, 10, 16, 20, 31.5, 40, 50, 63, i 80 kA. Pravilo je da se pri izboru bira prva veća vrijednost od one koja se očekuje na mestu ugradnje OP-a. Izbor OP odgovarajuće struje odvođenja vrši se u skladu s podacima proizvođača [18, 20, 21].

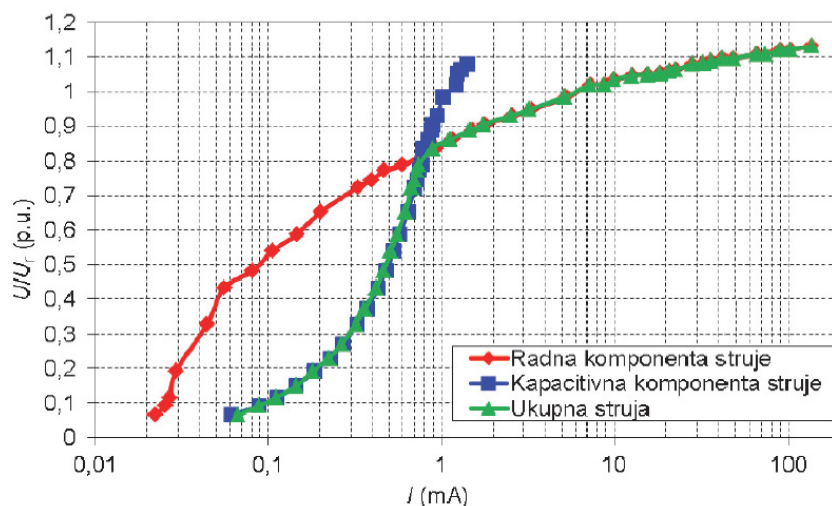
5. MONITORING I DIJAGNOSTIKA ODVODNIKA PRENAPONA

Ispitivanja OP krajem prošlog vijeka su pokazala da je, čak u 85% slučajeva, najčešći uzrok otkaza odvodnika prodor vlage unutar kućišta [28]. Ovaj problem je dominantan za OP koji imaju sistem za zaptivanje, a procedura proizvodnje igra najvažniju ulogu u smanjenju otkaza izazvanog prodorom vlage. Direktno izlivanje polimera na aktivni dio OP je praktično eliminisao mogućnost pojave vlage, tako da je električno starenje OP ostalo kao najvjerovatniji uzrok degradacije savremenih OP. Električno starenje OP je dominantno uzrokovano udarnim strujama, dok se degradacija usljed trajnog radnog napona, razvojem tehnologije proizvodnje, praktično eliminisala. Takođe je pokazano i da zaprljanje površine tijela može uzrokovati ubrzano starenje [19, 22, 23].

Najčešći uzroci degradacije i skraćenja životnog vijeka OP-a su:

- Degradacija usljed udarnih struja.
- Degradacija usljed trajnog radnog napona.
- Degradacija usljed prodora vlage unutar kućišta.
- Degradacija kao posljedica atmosferskih uslova.
- Degradacija usljed hemijskih reakcija.
- Degradacija usljed neravnomjerne raspodjele napona.

Svaki od pomenutih uzroka degradacije dovodi po promjene struja odvođenja, tj. promjene U-I karakteristike (slika 27.), promjene termičkog profila OP, a mogu se javiti i parcijalna pražnjenja u zavisnosti od vrste degradacije koja se javlja. Iz tih razloga se mogu izdvojiti tri grupe metoda koje se koriste za monitoring i dijagnostiku stanja OP. Riječ je o metodama baziranih na analizi struje odvođenja pri radnom naponu mreže, metode bazirane na analizi termičke slike OP i metode bazirane na detekciji parcijalnih pražnjenja.



Slika 27. U-I karakteristika odvodnika prenapona pri naizmjeničnom naponu

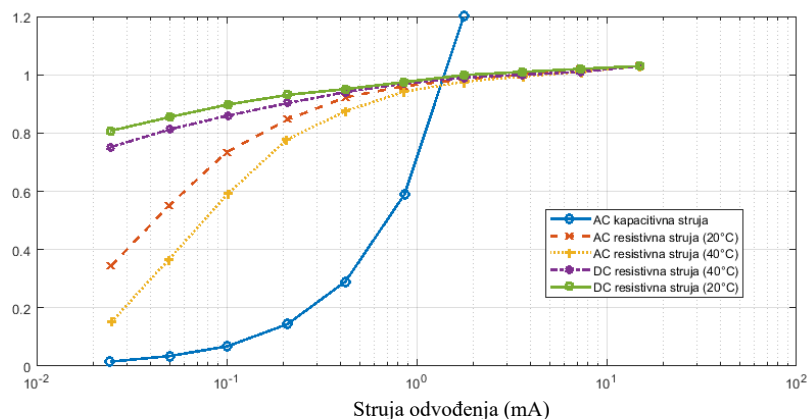
U okviru svake od ovih grupa postoji veći broj razvijenih metoda za monitoring i dijagnostiku OP, od kojih su neke našle širu primjenu i implementirane su u određene uređaje za monitoring, dok su druge ostale na nivou akademskog značaja [23, 31, 33, 34], što je prezentovano u narednom tekstu ovog poglavlja.

5.1. Metode za monitoring odvodnika prenapona bazirane na analizi struje odvođenja

Najstarije i ujedno najrasprostranjenije metode za ocjenu stanja odvodnika su metode zasnovane na analizi struje odvođenja pri radnom naponu mreže. Dok su ove metode imale ograničenu primjenu kod klasičnih odvodnika zbog postojanja iskrišta, pojavom MOP-a raste njihova upotreba i značaj. Razlog leži u činjenici da MOP nema iskrište pa kroz ovaj odvodnik uvijek protiče mala struja, čak i pri radnom naponu. Ova struja odvođenja se često naziva struja "curenja" odvodnika (eng. *leakage current*), s obzirom da ne prelazi vrijednost od 2 mA. Struja "curenja" predstavlja odličan indikator stanja odvodnika. Pri tome ona nije imuna ni na spoljašnje uticaje, ni na uticaj mreže, pa je pri ocjeni stanja MOP-a neophodno uzimati u razmatranje ove faktore.

Referentni napon je napon na OP pri kome je struja jednaka referentnoj struji koja je definisana od strane proizvođača i obično je u opsegu od 1-10 mA. Referentna struja je na koljenu krive U-I karakteristike i sastavljena je od relativno male kapacitivne i dosta veće rezistivne komponente. U zavisnosti od toga kako je definisana referentna struja u odnosu na koljeno krive, degradacija može izazvati povećanje referentnog napona, smanjenje ili referentni napon može ostati isti. Zbog toga referentni napon nije dobar indikator stanja OP.

Savremene metode monitoringa OP su dominantno bazirane na dekompoziciji ukupne struje odvođenja (slika 28.) odnosno na njenu kapacitivnu i rezistivnu komponentu i na harmonijskoj analizi tih komponenti ili na harmonijskoj analizi ukupne struje odvođenja.



Slika 28. Tipična U-I karakteristika metal-oksidnog odvodnika prenapona

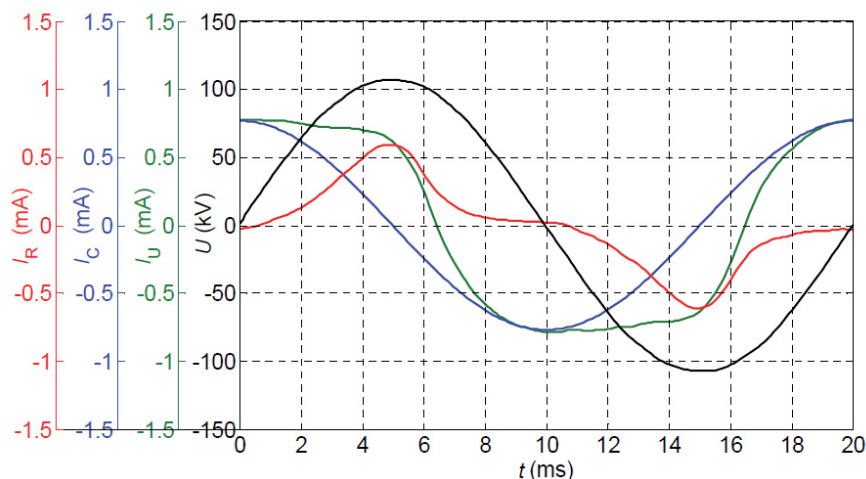
Metode bazirane na mjerenju struje odvođenja odnose se na metode zasnovane na harmonijskoj analizi struje odvođenja, mjerenje ukupne struje odvođenja, mjerenje faktora dielektričnih gubitaka i disipacije snage korišćenjem singularnog naponskog izvora i metode mjerenja i procjene aktivne komponente struje odvođenja.

Metode zasnovane na harmonijskoj analizi struje odvođenja su najpouzdanije iz razloga što pojave koje se mjere ovim metodama su u direktnoj vezi sa degradacijom izolacionih svojstava OP i najpouzdanije su s aspekta kvalitativne procjene stanja odvodnika [30, 34, 36].

Ukupna struja odvođenja, zbog nelinearne karakteristike OP, sadrži više harmonike čak i kada je radni napon prostoperiodičan. Nivo viših harmonika u ukupnoj struji pri istom radnom naponu zavisi od stepena nelinearnosti odvodnika. S obzirom da stepen nelinearnosti OP zavisi od njegovog stanja (što je OP više degradiran to je njegova nelinearnost slabije izražena), prisustvo viših harmonika u ukupnoj struji odvođenja se može koristiti kao indikator stanja OP.

Razvojem signala ukupne struje odvođenja (slika 29.), mogu se precizno odrediti amplitude viših harmonika ukupne struje. U slučaju prostoperiodičnog napona napajanja OP, ti

viši harmonici odgovaraju višim harmonicima rezistivne komponente i direktni su pokazatelji stanja OP za isti radni napon. Međutim, u slučaju pojave viših harmonika napona, harmonici ukupne struje su posljedica kako nelinearnosti OP, tako i postojanja viših harmonika kapacitivne i rezistivne komponente struje koji su posljedica harmonika napona. U tom slučaju je potrebno odrediti samo harmonike rezistivne komponente struje da bi se dobili adekvatni pokazatelji stanja OP. Primjera radi, sadržaj trećeg harmonika u rezistivnoj komponenti struje odvođenja iznosi 10-40% [23].



Slika 29. Talasni oblici napona i struje uprošćenog modela odvodnika prenapona
Ukupna struja I_U , kapacitivna I_C i radna I_R komponenta struje pri naponu U_c

Direktno očitavanje rezistivne komponente struje odvođenja predstavlja najjednostavniju metodu za monitoring i dijagnostiku OP. Uz uvođenje određenih pretpostavki, maksimalna vrijednost rezistivne komponente struje se direktno očitava sa snimljenog talasnog oblika ukupne struje odvođenja. Jedan od načina izvođenja ove metode predstavlja očitavanje vrijednosti ukupne struje odvođenja u trenutku u kojem je prvi izvod radnog napona u vremenu jednak nuli.

Metoda gubitaka aktivne snage ogleda se u mjerenju i napona OP i struje odvođenja na osnovu kojih se izračunavaju gubici aktivne snage u OP. Metoda koristi činjenicu da su gubici aktivne snage direktno povezani sa jačinom rezistivne komponente struje odvođenja koja usljed ovih gubitaka zagrijeva odvodnik. Zbog potrebe za sinhronim mjerenjem radnog napona OP, ova metoda se široko primjenjuje u laboratoriji (off-site), a rijetko u pogonu (on-site). Tipične vrijednosti gubitaka snage iznose 500 mW/kV pri U_c i na 20 °C [23].

Primjena **metode kompenzacije kapacitivne komponente struje odvođenja** podrazumijeva da je OP modelovan uprošćenim modelom. Metoda je bazirana na manipulacijama nad izmjerenim signalima radnog napona i struje odvođenja. Naime, tim manipulacijama se eliminiše (kompenzuje) kapacitivna komponenta iz ukupne struje odvođenja OP.

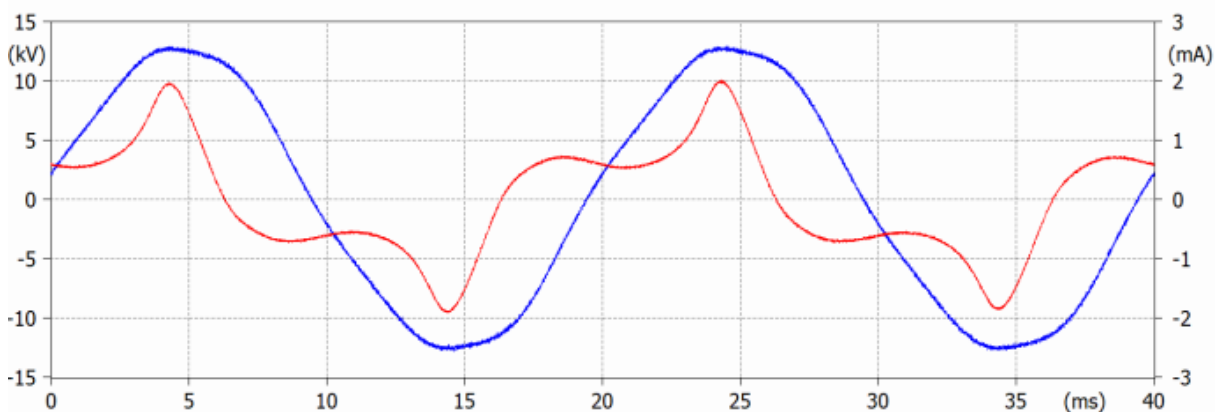
Direktno određivanje trećeg harmonika rezistivne komponente struje odvođenja predstavlja jednu od metoda za monitoring i dijagnostiku OP koja se često pominje u literaturi i koja je našla i praktičnu primjenu kroz više uređaja za monitoring OP, a prema nekim autorima [24, 27] se može svrstati u metodu kompenzacije kapacitivne komponente struje. Međutim, ona je zasnovana na kompenzaciji primjenom dodatnih uređaja. Da bi se metoda direktnog određivanja trećeg harmonika rezistivne komponente mogla primijeniti, potrebno je izvršiti mjerenje ukupne struje odvođenja pri radnom naponu mreže i mjerenje indukovane struje u kapacitivnoj sondi. Povoljni efekti ove metode se baziraju na činjenici da nije potrebno mjerenje napona i da se prilikom mjerenja koristi kapacitivna sonda koja omogućava eliminisanje

harmonijskih komponenti kapacitivne struje odvođenja koje su posljedica postojanja viših harmonika u radnom naponu mreže.

Direktno određivanje osnovnog harmonika rezistivne komponente struje odvođenja je metoda bazirana na linearnoj zavisnosti koja postoji između vršne vrijednosti osnovnog harmonika rezistivne komponente struje odvođenja i faznog pomjeraja između vršne vrijednosti osnovnog harmonika kapacitivne i ukupne struje odvođenja. Eksperimentalno je pokazano da je ova zavisnost nezavisna od stanja OP (nov-degradiran) i temperature odvodnika (u opsegu od 23 °C do 100 °C), kao i da je ista za isti tip OP [28, 30].

U literaturi postoji više radova koji se bave tematikom određivanja parametara ekvivalentnih šema OP na bazi **primjene optimizacionih algoritama**. Tako su autori Li, Birlasekaran i Choi predložili *DFP* algoritam optimizacije za minimizaciju sume kvadrata odstupanja izmjerene vrijednosti zaostalog napona od simulirane vrijednosti [31]. Sličan pristup imao je i B. Abdelhafid koji je optimizacioni zadatak riješio primjenom genetskog algoritma [32], a primjenu *Levenberg-Marquardt-ove* optimizacije su prikazali Lira, Fernandes i Costa [33]. Nešto drugačiji pristup su pokazali Christodoulou, Gonos i Stathopoulos, koji su koristili genetski algoritam kao alat za optimizaciju [34], ali je objektivna funkcija predstavljena kao zbir relativnih grešaka simuliranog zaostalog napona za različite amplitude i talasne oblike udarnih struja. Kombinaciju optimizacionih algoritama *PSO* i *ACO* su predstavili Nafar, Gharehpetian i Niknam [35]. Svi navedeni algoritmi razmatrali su slučajeve zaostalih napona prilikom odvođenja udarnih struja, gdje su u njima određivani parametri dinamičkih, frekvencijski zavisnih modela OP. Potrebno je napomenuti da se nijedan od navedenih radova ne bavi problematikom monitoringa OP. Za razliku od njih Dobrić [36] se bavi metodom koja je bazirana na mjerenju radnog napona i struje odvođenja OP za određivanje parametara OP u normalnim radnim uslovima, pogodnom za monitoring u pogonu jer ne zahtijeva sinhrona mjerenja ovih veličina.

Snimanje talasnih oblika napona i struje odvođenja na odvodniku prenapona se relativno lako obavlja u realnim pogonskim uslovima za niže naponske nivoe. Naravno, uvijek je moguće snimanje obaviti i u laboratoriji, a ograničenje za izvođenje metode je posjedovanje odgovarajućeg visokonaponskog izvora, industrijske učestanosti, promenljive vrijednosti napona. Odvodnici se ispituju u off-line režimu. Ilustrativno, na slici 30. je prikazan talasni oblik napona i struje odvođenja pri naznačenom naponu $U_r=9kV$ [34].



Slika 30. Talasni oblici napona na odvodniku (plava kriva sa ordinatom lijevo) i struje odvođenja (crvena kriva sa ordinatom desno) pri $U_r=9kV$

Poređenjem rezultata ispitivanja sa podacima proizvođača, kao i međusobnim upoređivanjem rezultata svih ispitivanih odvodnika, može se zaključiti da li su izmjerene vrijednosti rezistivnih struja odvoda u okviru očekivanih vrijednosti, te da li su talasni oblici

struja odvoda pri trajnom radnom naponu U_c i naznačenom naponu U_r karakteristični za ispravne odvodnike prenapona.

Metode na bazi direktnog mjerenja struje odvođenja ogledaju se u mjerenju struje na provodniku za uzemljenje odvodnika pomoću amper (strujnih) kliješta, obuhvatnog strujnog transformatora ili ugrađenog transformatora [30, 34]. Pri tome se mjeri ukupna struja odvođenja koja se sastoji iz dominantne kapacitivne komponente i rezistivne (aktivne, otporne) komponente koja je za red veličine manja. Prenosni instrumenti za mjerenje radne komponente trećeg harmonika struje odvođenja, posebno u VNRP najviših napona, u principu, se sastoje od sklopova koji:

- sakupljaju treći harmonik kapacitivne komponente struje uzrokovane harmonicima napona mreže. To su obično bežične sonde za mjerenje električnog polja s antenskim diskovima.
- mjeri ukupnu struju odvođenja koja kroz odvodnik ide u zemlju, a izrađen je kao strujni transformator.
- na osnovu harmonijske analize određuje radnu komponentu struje odvođenja. Predstavlja jednostavan uređaj s antenom, na koji se šalju podaci sa mjernih sondi.

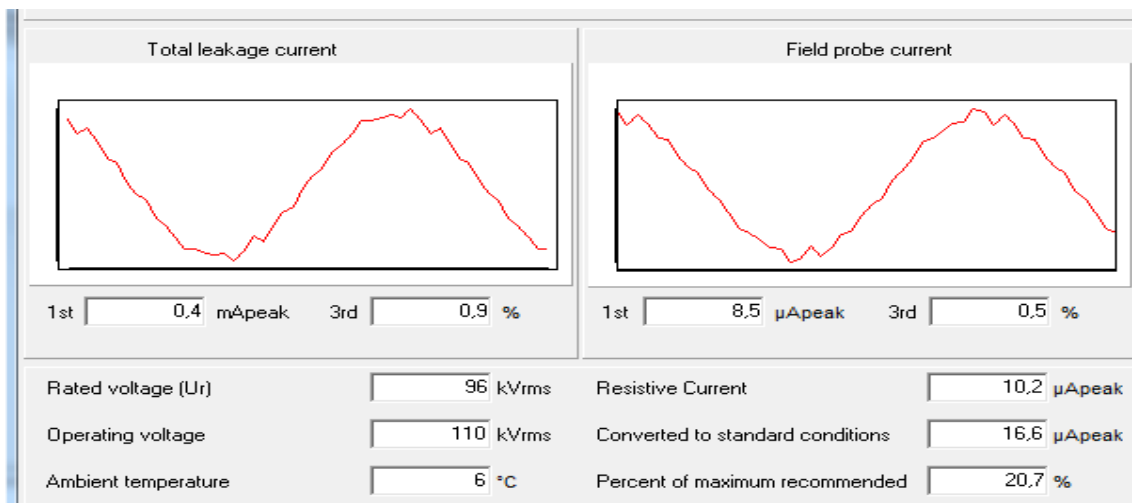
Ovim i sličnim uređajima baziranim na metodi poznatoj pod nazivom **LCM** (*Leakage Current Monitor*) koja je međunarodno priznata od 1989. godine, moguće je izvoditi periodična ispitivanja u svrhu regularne provjere ispravnosti odvodnika u postrojenju (preporučena ispitivanja svakih 3-5 godina) ili kontinuirano praćenje stanja pojedinog odvodnika u pogonu (duži ili kraći period). Takođe se može koristiti za mjerenje na metalnom kućištu OP u gasom izolovanim postrojenjima (GIS). Ispitivanje se izvodi prema standardu IEC 60099-5:2018 [16] na način da se ulazni parametri mjernog uređaja unaprijed podese na osnovu čega on koriguje mjerene vrijednosti s obzirom na napon i temperaturu. Korekcija se radi na osnovu unesenih korekcionih tablica za pojedini tip odvodnika.

Metod prikupljanja podataka iz pogona je zasnovan na primjeni brojača prorada posljednje generacije. Senzor se montira uz svaki odvodnik prenapona slično kao i obični brojači (slika 31.), ali uz brojanje broja prorada, takođe bilježi i amplitude prenapona svaki put kada kroz OP protekne struja pražnjenja veća od 10A, zajedno sa njihovim vremenom i datumom nastanka [18, 21, 38].



Slika 31. Savremeni brojač prorada odvodnika prenapona

Oscilogram ukupne struje odvođenja, u ilustrativnom primjeru na slici 32., odnosi se na ispitani OP u fazi „0“ u 110 kV trafu polju T1 u TS 220/110/35 kV Mojkovac. Pri nazivnom naponu OP od 96 kV i temperaturi ambijenta od 6 °C, izmjerena ukupna struja odvođenja iznosila je 10.2 μA, odnosno korigovana na standardne uslove 16.6 μA. Sadržaj izmjerene trećeg harmonika rezistivne komponente struje odvođenja od 20.7% od maksimalno preporučene je nizak, što direktno upućuje na dobro stanje OP.



Slika 32. Struja odvođenja OP u fazi „0“ 110kV trafo polja T1 u TS 220/110/35 kV Mojkovac

5.2. Termovizijska kontrola

Termografija (*thermo, grafija*), je postupak snimanja objekata koji emituju infracrveno zračenje. Sprovodi se termografskim kamerama koje registruju emitovanu energiju zračenja objekata, s primarnim ciljem određivanja temperature njihove površine. U tim kamerama zračenje prolazi kroz optički sistem za izoštravanje te pada na senzor - fotodetektor koji energiju zračenja pretvara u naponski signal. Signal se se nakon pojačavanja i obrade sprovodi na zaslon, na kojem se prikazuje termogram. To je zapis trenutne raspodjele temperature na posmatranoj površini objekta prikazane različitim tonovima. Niz takvih zapisa čuva se tokom trajanja snimanja u obliku termografskog zapisa (filma) u memorijsku jedinicu uređaja.

Slika nastala termovizijskim sistemom predstavlja objekte i scenu u kojima je kontrast slike rezultat zračenja i emisivnosti tijela na različitim temperaturama objekta i pozadine. Sam proces stvaranja termalne slike se razlikuje od načina formiranja slike u vidljivom dijelu spektra.

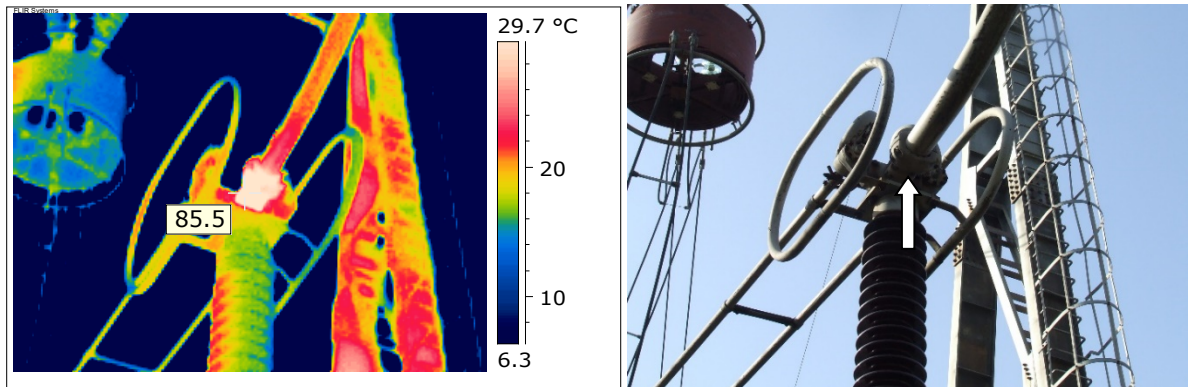
Termalno zračenje zavisi samo od temperature i emisivnosti tijela i ako je temperatura tijela veća od apsolutne nule po teorijskom modelu zračenja crnog tijela, elektromagnetni spektar teorijski obuhvata sve talasne dužine. Međutim, u praksi objekti se nalaze na pozadini koja mijenja njihovu temperaturnu signaturu, i objekti ne zrače kao idealna crna tijela. Ove činjenice ukazuju da termalna slika nosi više informacija nego standardna slika u vidljivom dijelu spektra, dobijena procesom refleksije zračenja izvan samih objekata.

Pouzdanost elementa u postrojenju, između ostalog, obezbjeđuje se i sistematskim preventivnim metodama ispitivanja, među koje spada i termovizijska kontrola. Ona ima za cilj da blagovremeno otkrije sva mjesta i djelove, na visokom naponu, koji se griju iznad dozvoljenih granica [39, 40, 41, 42].

Neispravnost iskazana povećanim zagrijevanjem naziva se “toplo mjesto”, a definiše se: lokacijom, pregrijevanjem, karakteristikom aparata i strujnim opterećenjem u vrijeme

ispitivanja. Primjera radi, na slici 33. prikazan je uporedni snimak termografa i fotografije registrovane neispravnosti na 400 kV izlaznom rastavljaču u DV 400 kV polju Čevo, u TS 400/110 kV Podgorica 2. Neispravnost sa temperaturom toplog mjesta od 85 °C, pri referentnoj temperaturi od 21 °C je registrovana u fazi "0", kontakta prema strujnom transformatoru, pri opterećenju od 200 A.

Izmjerene temperature zagrijanih dijelova elementa u postrojenju, upoređuju se sa istim elementima susjednih faza u istom polju pod istim opterećenjem, a na kojima su registrovane normalne radne temperature [41, 43, 44].



Slika 33. Karakterističan primjer termograma

Po pravilu, referentna temperatura, pri normalnim radnim uslovima i istom strujnom opterećenju, je ista na sve tri faze i posmatra se kao radna temperatura elementa. Zavisno od isijavanja sunca i refleksije na elementima u postrojenju, referentna temperatura je približno jednaka temperaturi okoline ili je neznatno veća. Ako se analizom rezultata mjerenja uoči da na nekom dijelu dolazi do odstupanja mjerene od referentne temperature, smatra se da je taj dio zagrijan i da je u analizi potrebno sačiniti preporuku za sanaciju tog zagrijavanja. Razlika temperature ΔT zagrijanog dijela i referentne temperature za posmatrani element je tzv. „nadtemperatura“ toplog mjesta.

Da li je neophodna intervencija na odnosnom elementu na kojem je registrovana neispravnost, u praksi preporučuje sam korisnik. Naravno, nikad se ne isključuje ni faktor obezbjeđenja neophodnih uslova (trajanje zahtijevanog isključenja, rezervni djelovi, mehanizacija i sl.). Mada, u određenim IEC standardima su isto tako, date preporuke stepena intervencije i vremenskih rokova za izvršenje intervencije.

Ilustrativno, u Tabeli 5. prikazane su iskustvene preporuke kao kriterijumi za utvrđivanje neispravnosti ispitivanog elementa na osnovu dobijene razlike ΔT pri analizi termograma [43, 45, 46].

Tabela 5: Kriterijumi za utvrđivanje registrovanih neispravnosti ispitivanog elementa

ΔT_1	ΔT_2	Ocjena stanja	Preporuka
1 °C – 3 °C	1 °C – 10 °C	Redovno	Bez intervencije
4 °C – 10 °C	11 °C – 20 °C	Moguć nedostatak	Dodatno ispitivanje
10 °C - 15 °C	21 °C – 40 °C	Vjerovatan nedostatak	Opravka
>15 °C	>40 °C	Oštećenje	Hitna zamjena

ΔT_1 - Razlika temperatura kod sličnih ispitivanih elemenata pri istom opterećenju

ΔT_2 - Razlika temperatura ispitivanog elemenata i ambijentalne temperature

5.3. Mjerenje povratnog napona - RVM

Nove ispitne metode na bazi dielektričnog odziva temelje se na činjenici da se dielektrični materijali pod uticajem električnog polja polarizuju. Proces polarizacije dielektrika ne dešava se istovremeno sa dejstvom primenjenog električnog polja, već zaostaje za neku faznu razliku. Razlike u dielektričnom odzivu (u vremenu ili sa frekvencijom) ovih materijala omogućavaju razdvajanje efekata koje uzrokuje stanje izolacije na dodirnim površinama. Dielektrični odziv različitih materijala u velikoj mjeri zavisi od količine vlage u njima. Analiza ove zavisnosti čini osnovu za dobijanje informacija o sadržaju vlage u izolaciji.

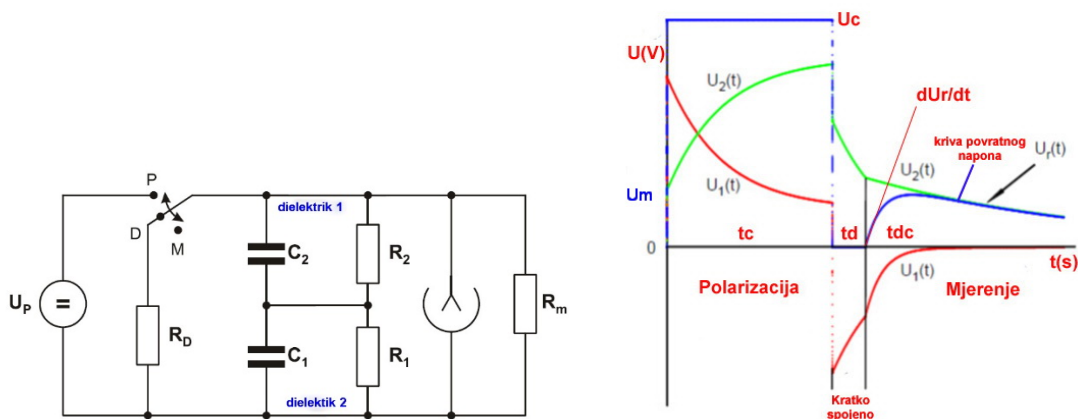
Iako odavno poznata, u novije vrijeme u regionu, jedna od nedestruktivnih metoda ispitivanja izolacionog sistema VNO je i metoda mjerenja povratnog napona – RVM metoda (*eng. Recovery Voltage Method*). Ova off-line metoda dozvoljava prepoznavanje nehomogene raspodjele vlage i/ili drugih produkata izolacije, na osnovu promjene provodnosti dvojnog dielektrika, obezbjeđujući detaljnu individualnu karakteristiku ispitivanog elementa.

Ideja na kojoj je baziran sam RVM metod polazi od činjenice da se jedan izolacioni sistem može predstaviti kao kombinacija: otpora izolacije (prema masi), geometrijskih kapaciteta (međuzavisnosti izolacije) i RC elemenata kao rezultata različitih polarizacionih procesa same izolacije [47, 48, 49, 50].

Kako je mikrostruktura izolacionog bloka kod OP praktično dvoslojni dielektrik sa međuslojnom izolacijom na graničnoj površini dva dielektrika, sa različitim relativnim permitivnostima ϵ_r i specifičnim otpornostima ρ , to bi se ekvivalentno kolo OP, praktično, moglo predstaviti kao kombinacija različitih redno-paralelnih veza miliona poluprovodničkih dioda.

Za razliku od numeričkih metoda, praktično snimanje krive polarizacionog spektra zasnovano je na principu „dvije elektrode“ (slika 34, a). U određenom vremenu t_c , izolacija VNO se izlaže djelovanju jednosmernog napona (P-polarizacija). Potom se u kratkom vremenskom periodu t_d primjenjuje kratko spajanje na ispitivanom objektu ($t_d = t_c/2$), što uzrokuje djelimičnu depolarizaciju molekula (D-depolarizacija). Na kraju kratko spojeno kolo se otvara, što opet, uzrokuje porast napona na izvodima izolacije (M-mjerenje). Ovaj porast napona se naziva „povratni napon“ [52, 54].

Ciklusi „punjenja“ i „pražnjenja“, odnosno polarizacije i depolarizacije se ponavljaju, zavisno od zahtijevanih uslova mjerenja, u trajanju od 0.02s do 10000s. Na taj način se dobija kriva „povratnog napona“ (slika 34., b).



Slika 34. a) Princip RVM tehnike mjerenja b) Kriva „povratnog napona“

U toku jednog ciklusa mjerenja kao na slici 34.b., registruju se vrijednosti: maksimalnog povratnog napona U_m u funkciji vremena punjenja (u stručnoj literaturi ova kriva zavisnosti je

poznata pod nazivom „polarizacioni spektar“), početnog nagiba dU_r/dt (eng. S_r - inicial slope) i proteklog vremena do postizanja maksimuma povratnog napona. Vrijeme pojave maksimalnog povratnog napona naziva se „dominantna vremenska konstanta“ – t_{dc} . Kako je vremenska konstanta polarizacije $\tau_p=R_pC_p$ i ako je $t_c/t_d=2$, tada je ekvivalentni sadržaj vlage proporcionalan dominantnoj vremenskoj konstanti ($\tau_p \approx t_{dc}$).

S obzirom da se OP ponaša skoro kao izolator pri radnim naponima mreže koji su ispod njegovog naznačenog napona, RVM metoda se pokazala kao najpraktičnija, jer je najosjetljivija na najmanje promjene unutar samog ZnO bloka, i isto tako, najotpornija je na spoljašnje smetnje koje mogu nastati od uticaja stranog polja u toku mjerenja. Sa druge strane, RVM metodom se mogu uspješno ispratiti procesi polarizacije i depolarizacije dipolnog dielektrika unutar bloka, pa čak i najmanje promjene intergranularnog sloja. Posebno jer je njegovo oštećenje i/ili starenje uzrokovano propagacijom prenapona i promjenama temperature bloka nastalih od istog uzroka [47, 48, 49, 50, 51, 52, 53].

Primjena RVM metode za procjenu pogonske raspoloživosti OP u realnom pogonu, na osnovu podataka iz dostupne literature, nije do sada nikada rađena. Ovo, vjerovatno iz opravdanog razloga što su ispitivanja u pogonu prilično zahtjevna, ne samo zbog ograničenog vremena trajanja beznaponskog stanja, već i zbog činjenice da je osim isključenja odnosno polja sa mreže neophodno izvršiti montažu/demontažu primarnih strujnih veza i povezivanje ispitivanog elementa na pogonsko uzemljenje, uz obavezno obezbjeđenje sigurnosnih mjera i postupaka zbog blizine visokog napona susjednih polja.

Da bi se ova mjerenja izvršila na najprihvatljiviji način, priprema za ista je izvršena u laboratorijskim uslovima, na približno konstantnoj temperaturi od 25 °C i relativnom sadržaju vlage od 25-30 %. Mjerenja su izvršena primjenom komercijalnog automatskog RVM uređaja, proizvodnje Tettex, tip RVM 5462. Za svako pojedinačno mjerenje bilježeni su podaci o maksimalnom povratnom naponu, vremenu postizanja maksimalnog povratnog napona i brzini njegovog postizanja. Osim što su rezultati ispitivanja arhivirani kao zapisi korišćenjem interno ugrađenog štampača, isti su i fotografisani.

Ispitivani OP je povezan na ispitni uređaj na način što je (+) pol odnosno crvena krokodil klema postavljena na početak, a (-) pol tj. crna klema na kraj OP i uzemjavana, što je prikazano i na slici 35. Objekat ispitivanja su bili odvodnici prenapona za mrežu nazivnog napona 35 kV, tip POLIM D, naznačenog napona 35 kV, trajnog radnog napona 28 kV i nazivnom strujom odvođenja 10 kA.



Slika 35. Eksperimentalna ispitivanja odvodnika prenapona primjenom RVM metode

U prvoj fazi ekperimenta, promjenom vrijednosti napona mjerenja, pri konstantnom vremenu punjenja t_c od 600 s i vremenu pražnjenja t_d od 60 s, pokazano je da se vrijednosti maksimalnog povratnog napona U_m i brzina postizanja istog S_r , značajno mijenjaju, odnosno naglo rastu pri neznatnoj promjeni dominantne vremenske konstante.

Zatim su se, pri konstantnoj vrijednosti napona mjerenja, mijenjala vremena t_c i t_d , zadržavajući pri tom njihov odnos konstantnim u iznosu $t_c/t_d=10$. I u ovom slučaju se pokazalo da se vrijednosti U_m i S_r , značajno mijenjaju, odnosno naglo opadaju pri neznatnoj promjeni t_{dc} .

Konačno, pri konstantnom primijenjenom naponu mjerenja od 500 V i konstantnom t_c od 600 s, mijenjano je t_d , respektivno na 60 s, 120 s i 300 s. Na ovaj način se htjelo doći do zaključka kako odnos vremena punjenja i pražnjenja utiče na karakteristične parametre RVM mjerenja. Rezultati su predstavljeni u Tabeli 6. i pokazuju da sa smanjenjem odnosa t_c/t_d smanjuju i U_m i S_r , dok t_{dc} bilježi značajan rast.

Tabela 6. Rezultati RVM mjerenja za različita vremena pražnjenja

Uzorak POLIM D	U_{mj} (V)	t_c (s)	t_d (s)	t_c/t_d odnos	U_m (V)	t_{dc} (s)	S_r (V/s)
1	500	600	60	10	16.80	34.9	13.11
2	500	600	120	5	10.81	44.1	12.34
3	500	600	300	2	4.83	57.4	11.60

Niže vrijednosti maksimalnog povratnog napona U_m kao i t_{dc} - vremena proteklog do postizanja U_m direktno upućuju na zaključak da je izolacija pretrpjela značajnu degradaciju, bilo da je uzrok ovlaženost ili temperaturno oštećenje usljed uticaja akumuliranih prenaponskih stresova. Kako izolacioni sloj slabi, otpornost opada, provodnost raste, a samim tim raste i brzina porasta povratnog napona S_r .

Dakle, na osnovu rezultata svih eksperimentalnih rezultata, može se donijeti opšti zaključak, da je preporučljivo da se ispitivanja OP u realnom pogonu izvode primjenom konstantnog izvora napajanja vrijednosti 2000 V, a da se za vrijednosti vremena t_c i t_d izaberu vrijednosti od 600 s i 60 s, odnosno da se njihov odnos zadrži na iznos $t_c/t_d = 10$.

5.4. Parcijalna pražnjenja

Parcijalna pražnjenja (*eng. partial discharge - PD*) su posljedica lokalne koncentracije električnog naelektrisanja na površini izolacije ili u samoj izolaciji, pri čemu predstavljaju samo djelimične proboje izolacije. Pojave PD nastaju u početnoj fazi oštećenja visokonaponske izolacije i smatraju se najboljim pokazateljem degradacije izolacije. Postoji više klasifikacija i više tipova PD u zavisnosti koja karakteristika se želi istaći. Generalno u standardima i preporukama nema jasne definicije, ali imajući u vidu prirodu procesa koji prate pražnjenje, najčešći tipovi PD [55, 56] jesu:

- korona,
- površinska ili klizna pražnjenja,
- pražnjenja u šupljinama ispunjenim gasom,
- pražnjenja u laminarnim materijalima,
- pražnjenja u čvrstim dielektricima.

Unutrašnja parcijalna pražnjenja se dešavaju unutar ograničenog (izolovanog) prostora izolacionog materijala kao što su zatvorene šupljine u materijalu (mjehurovi, razni defekti, delaminacija itd.). Šupljine karakteriše ispunjenost vazduhom ili nekim drugim gasovima. Sa

stanovišta PD bitan je njihov oblik, način pružanja duž električnog polja i učešće metalnih površina. Dijagnostikom pražnjenja se otkrivaju tipovi defekata (unutrašnja delaminacija, delaminacija prema provodnoj površini - bakarnom provodniku, željeznom jezgru itd., mehuraste šupljine, drvenaste strukture itd.) kao i stepen degradacije izolacionog sistema.

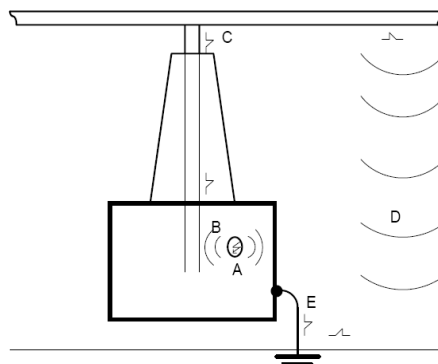
Spoljašnja površinska parcijalna pražnjenja u ambijentnoj atmosferi se dešavaju na površini dodira dva različita dielektrika, kao što je slučaj kod čvrstog izolaciono-konstrukcionog dielektrika i atmosfere. Preduslov je da se pojave jaka tangencijalna polja koja su obično posledica degradacije izolacionog sistema.

Spoljašnja parcijalna pražnjenja u ambijentnoj atmosferi su lokalna pražnjenja u vidu korone i dešavaju se u malim volumenima ograničenim potrebnom jačinom normalnog lokalnog polja (ivični efekti, lokalni šiljci itd.). Ne postoje uslovi razvoja proboja prema drugoj elektrodi tako da korona ne predstavlja veliku opasnost po izolacioni sistem [57].

Upotrebom različitih dijagnostičkih metoda može se odrediti trend degradacije izolacije i dinamika primjene preventivnih mjera. Pri pražnjenju dolazi do konverzije energije i do pojave pratećih efekata parcijalnog pražnjenja kao što su: dielektrični gubici, promjena u gasnom pritisku, hemijska promjena u sastavu materijala, zvučna radijacija, optički efekti, termički efekti, elektromagnetska radijacija, pojava impulsa u strujnom kolu i pojava napona [58].

Brz razvoj elektronske opreme i IT tehnologija je uticao da su se metode detekcije i mjerenja parcijalnih pražnjenja posebno razvijale tokom poslednjih decenija. Osnovni fenomeni koji nastaju tom prilikom parcijalnih pražnjenja [58, 59, 60] predstavljeni su na slici 36., a sadržani su kroz:

- Detekciju elektromagnetnog polja pomoću elektromagnetnih antena, induktivnih petlji ili kapacitivnih sondi. Za detekciju lokacije pražnjenja služi elektromagnetna sonda.
- Detekciju parcijalnih pražnjenja koja se ostvaruje pomoću sprežnih kondenzatora, tj. kompenzovanih razdjelnika napona.
- Detekciju parcijalnih pražnjenja koja se ostvaruje pomoću mjernih impedansi, induktivnih petlji (strujni transformatori, induktivno spregnuti kalemovi itd.).
- Detekciju parcijalnih pražnjenja koja se ostvaruje pomoću ultrazvučnih i zvučnih efekata sa mjesta pražnjenja (A) i vrši se pomoću odgovarajućih sondi, selektivnih ili širokopoljanskih.
- Detekciju parcijalnih pražnjenja koja se ostvaruje pomoću odgovarajućih detektora vidljivog i ultraljubičastog radijacionog efekta.
- Detekciju parcijalnih pražnjenja koja se ostvaruje pomoću elektrohemijske dekompozicije materijala (A, B), koja dovodi do pojave gasova u medijima pražnjenja (vodonik, ugljovodonici, ozon itd.).



Slika 36. Ilustrativni prikaz osnovnih fenomena parcijalnih pražnjenja

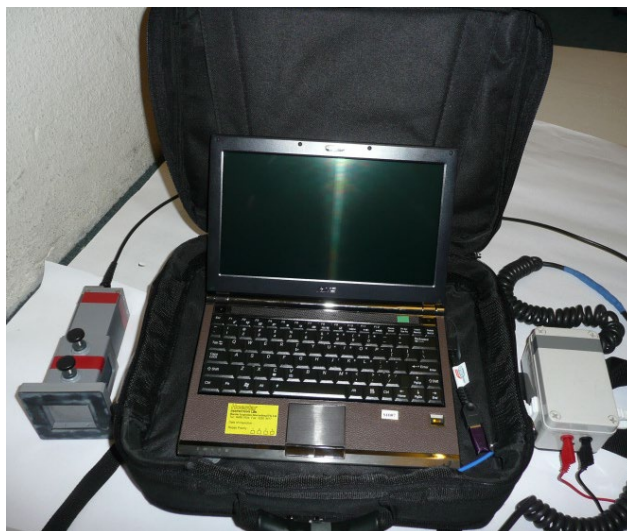
Program merenja i dijagnostike parijalnih pražnjenja može se podijeliti u tri kategorije: off-line, on-line i monitoring. Off-line merenja su u situaciji kada je VN oprema van pogona. Ona omogućuju merenje izabranog objekta ili djelova objekta. To omogućuje izbor i kontrolu uslova odnosno kontrolu i praćenje parametara pražnjenja (naponi, raspodjele napona, uzemljenja, odnosi prema okruženju, generisanje gasova, lokalne vibracije i elektromagnetne emisije itd).

On-line merenja su u situaciji kada je oprema u pogonu, odnosno kada postoje realni pogonski uslovi. To pruža dodatne mogućnosti merenja parcijalnih pražnjenja u uslovima koje eksperimentalno i off-line se teško mogu postići. On-line merenja u osnovi podrazumijevaju povremeno pristupanje merenju parcijalnih pražnjenja uz praćenje svih relevantnih pogonskih parametara. On-line mjerne metode mogu biti električne (naponski i strujni impulsi, elektromagnetne emisije itd.), akustična i ultrazvučna merenja, praćenje emisije ozona ili drugih gasova, on-line uzimanje uzoraka ulja itd.

Ne postoji optimalna i jedinstvena metoda mjerenja parcijalnih pražnjenja zbog velikih varijacija objekata, uslova i pojava. Sve metode mjerenja PD-a su komplementarne medjusobno ali i sa drugim dijagnostičkim metodama, a ponekad i sa onima koje nijesu metode dijagnostike izolacionog sistema. No uvijek u konkretnoj situaciji može da se odredi koja je metoda optimalna (najbolje pokriva zahtjeve dijagnostike) i u kojoj mjeri je neophodna neka dopunska metoda.

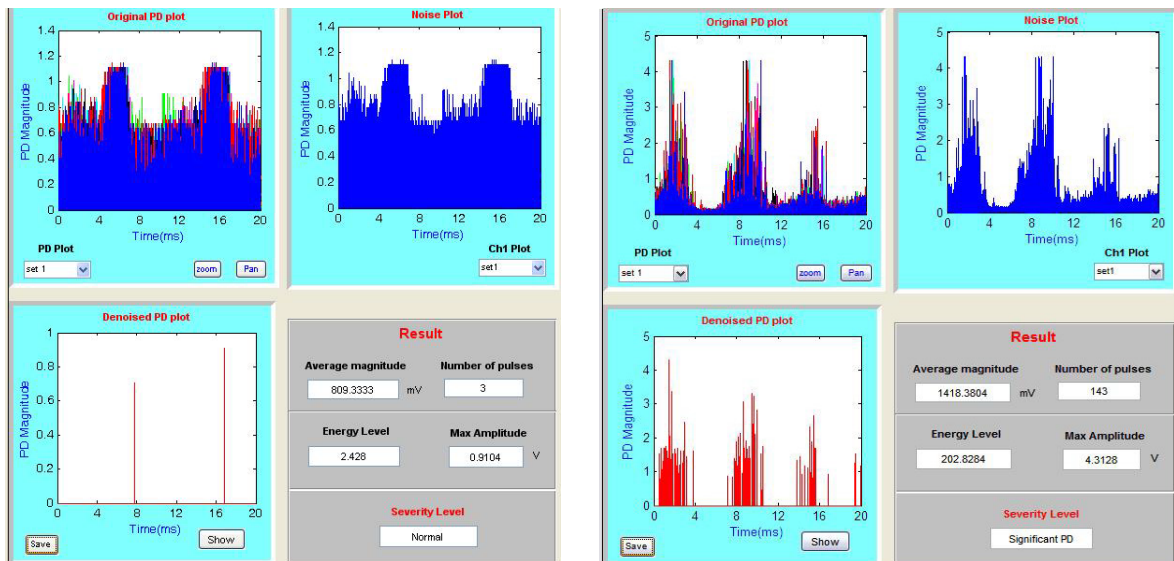
Preventivna kontrola odvodnika prenapona u pogonu obavljena je mjerenjem parcijalnih pražnjenja primjenom sljedećih mjernih uređaja i opreme:

- Primjenom mjernog uređaja PDPAC (slika 37.), sa softverom PDFusion, u baznom modu kontrole, mjerenjem amplitude (mV) i broja impulsa - primjenom visokoosjetljivog elektromagnetnog senzora na prirubnici OP, u opsegu 30 - 100 MHz sa osjetljivošću 10 μ V.
- Primjenom mjernog uređaja PDPAC, mjerenjem amplitude (mV) i broja impulsa - primjenom visokofrekventnog obuhvatnog strujnog transformatora na uzemljenju ispitivanog OP, u opsegu 100 kHz - 20 MHz sa osjetljivošću 2 V/A.
- Primjenom mjernog uređaja LDP 5, mjerenjem prividnog naelektrisanja induktivnim davačem kalibrisanim na 2000 pC na uzemljenju OP, u opsegu 1-20 MHz sa osjetljivošću 1 pC.



Slika 37. Komplet mjernog uređaja PDPAC (*Partial Discharge Portable Analyzer Console*)

Nakon eliminisanja smetnji iz rezultata mjerenja – telekomukacionih, radio, korone i drugih - interpretacija parcijalnih pražnjenja je obavljena amplitudno-faznom analizom. Ilustrativno, na slici 38. (lijevo), dat je prikaz izmjerenih parcijalnih pražnjenja na 110 kV OP tipa 3EL2 105-2PJ31-4ZA1-Z, trajnog radnog napona 84 kV, klase odvođenja 10 kA i kratkospojne moći 100 kA, u DV 110 kV polju Podgorica 2/I, faza “0” u TS 220/110/35 kV Podgorica 1. Mjerenja su izvršena primjenom mjernog uređaja PDPAC u baznom modu kontrole, mjerenjem amplitude (mV) i broja impulsa - primjenom visokoosjetljivog elektromagnetnog senzora na prirubnici OP, u opsegu 30 - 100 MHz sa osjetljivošću 10 μ V. Kako se može i vidjeti na samim graficima, riječ je o zanemarljivim registrovanim pražnjenjima kavitacionog tipa, maksimalnog napona 0.9104 V.



Slika 38. Grafici parcijalnih pražnjenja OP u DV 110 kV polju Podgorica 2/I, faza 0 (lijevo)
Grafici parcijalnih pražnjenja OP u DV 400 kV polju Čevo, faza 8 (desno)

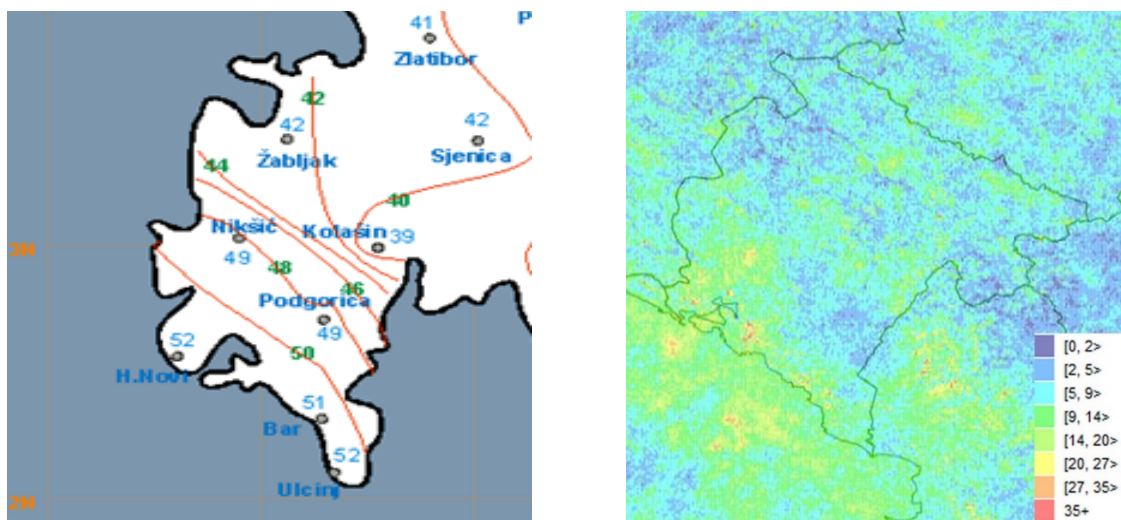
Na slici 38. (desno) dat je prikaz izmjerenih parcijalnih pražnjenja na 400 kV OP tipa PEXLIMQ 330-XH420, trajnog radnog napona 264 kV, klase odvođenja 10 kA i kratkospojne moći 50 kA. Ispitani uzorak OP je u pogonu u polju DV 400 kV Čevo, faza 8 u TS 400/110 kV Podgorica 2. Mjerenja su izvršena primjenom mjernog uređaja PDPAC, mjerenjem amplitude (mV) i broja impulsa - primjenom visokofrekventnog obuhvatnog strujnog transformatora na uzemljenju ispitivanog OP, u opsegu 100 kHz - 20 MHz sa osjetljivošću 2 V/A.

Rezultati ukazuju na značajna parcijalna pražnjenja impulsnog karaktera sa 143 registrovana uzorka i maksimalne amplitude 4.31 V, koja su, prvenstveno, rezultat uticaja jakog elektromagnetnog polja u postrojenju 400 kV, ali ne i neispravnosti ispitivanog OP, što su potvrdili i komparativni rezultati ispitivanja ostalih primijenjenih metoda, posebno termovizijska kontrola u ovom polju.

Primjenom mjernog uređaja LDP 5, mjerenjem prividnog naelektrisanja induktivnim davačem kalibrisanim na 2000 pC na uzemljenju OP, u opsegu 1-20 MHz sa osjetljivošću 1 pC izvršena je kontrola više OP na svim naponskim nivoima u različitim transformatorskim i vodnim poljima. Jačina registrovanih signala iznosila je u rasponu od 10 pC do 350 pC, dok je sa uticajem elektromagnetnog polja na odnosnom objektu, red veličine jačine polja iznosio od 500 pC do 2500 pC.

5.5. Detekcija atmosferskog pražnjenja

Karta grmljavinskih dana prikazuje postojanje grmljavinska aktivnost u nekom području i stručno je nazvana *izokeraunička karta*. Područje sa jednakim brojem grmljavinskih dana u godini naziva se *izokeraunički nivo*. Ipak, za dobijanje statistički relevantnog podatka, kroz veći niz godina se prate svi relevantni podaci. Koliko je vrijeme praćenja duže, i sakupljeni podaci su statistički vjerodostojniji. U praksi se smatra da saupkljeni statistički relevantni podaci nakon 8 godina posmatranja mogu biti relevantni. Srednji broj grmljavinskih dana (izokeraunički nivo) u Crnoj Gori iznosi 23, dok područje s najvećim brojem grmljavinskih dana bilježi 52 grmljavinska dana u godini [interna obrada statističkih podataka]. Izokeraunička karta Crne Gore sa gustom atmosferskih pražnjenja oblak-zemlja u periodu posmatranja 2015.-2020. prikazani su na slici 41. Područje s najvećom gustom u Crnoj Gori bilježi 56.45 [udara / (km² god)], dok se srednja vrijednost kreće između 5.23 i 13.88 [udara / (km² god)].



Slika 41. Izokeraunička karta Crne Gore i gustina atmosferskih pražnjenja u Crnoj Gori za period 2015.-2020.

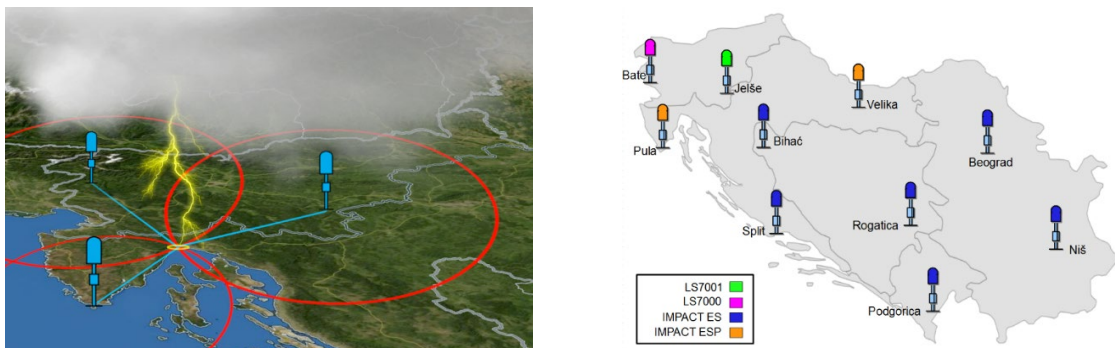
Neophodno je napomenuti da nije uvijek prvi udar najveće amplitude, niti prvi udar mora izazvati kvar na vodu koji za posljedicu ima isključenje prekidača. Kod udara malih amplituda moguć je direktni udar u fazni provodnik, pojava poznata kao greška štice (eng. *shielding failure*), pri čemu dolazi do nastanka smetnje na vodu koja može prouzrokovati kvar. Kod udara velikih amplituda moguć je udar u zaštitno uže ili stub voda kada dolazi do preskoka na izolatorskom lancu, pojava definisana kao povratni preskok (eng. *backflashover*), pri čemu dolazi do smetnje, odnosno mogućeg kvara na vodu [61, 62, 63].

Za detekciju udara groma, prije razvoja IT tehnologija, najprimjenjiva metoda detekcije je bila metoda zasnovana na detekciji pronalaženja pravca elektromagnetnog talasa groma, poznata kao MDF metoda (eng. *Magnetic Direction Finding method*) ili „Tragač pravca“. Lokacija udara groma određivana je na osnovu pokazivanja najmanje dva senzora, koji detektuju azimut (ugao između sjevera i pravca prema udaru groma), između senzora i munje. To je način da se povuče linija kroz senzor i udarnu tačku, a na presjeku linija senzora se definiše i udarna tačka.

Postupak razlikovanja pražnjenja u zemlju i pražnjenja između oblaka za koju je razvijen 3D su oni koji još uvijek koriste vremensku metodu ili metodu vremenskog postizanja TOA (eng. *Time of Arrival*). Za primjenu metode TOA potrebne su najmanje četiri detekcije senzora za određivanje lokacije udara. Takođe, za udaljenost između susjednih senzora preporučuje se da udaljenost iznosi 250 km ili manje [62]. Za tačno mjerenje vremena sistem koristi GPS

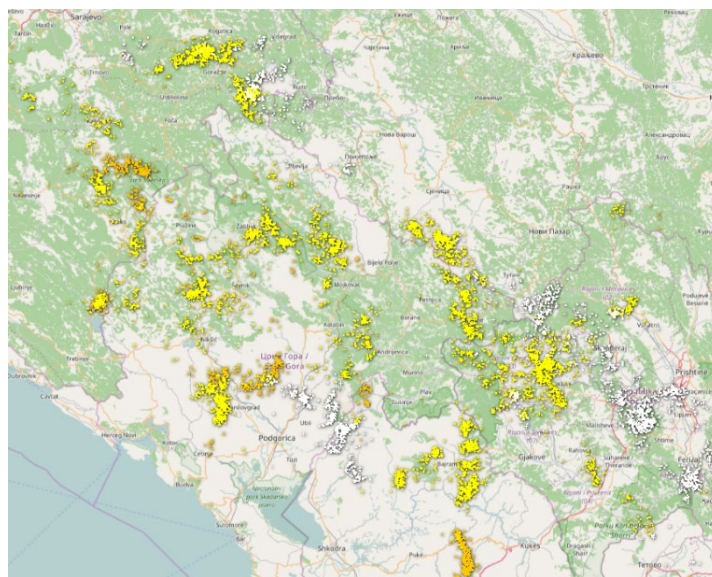
sistem mjerenja vremena, tačnosti do 300 ns. Svaki od senzora predstavljen je hiperbolom događaja moguće lokacije udara, a tačna lokacija se nalazi u presjeku ovih linija.

Sve novije generacije detektora koriste kombinovani metod, prethodna dva, sa očitavanjem i azimuta (vektora pravca) i vremena (slika 42. lijevo). Kompletne podatke o detekciji udara groma, elektromagnetni senzori (slika 42., desno) kao neobrađene, šalju u centralni anlizator, gdje se obrađuju i optimizuju podaci u realnom vremenu i paralelno, određuju konkretne lokacije udara groma. Rezultati se u trenutku bliskom realnom (*Corelator server*), prosljeđuju krajnjim korisnicima uz pomoć internet mreže preko TCP/IP protokola. Time je omogućeno da korisnik ima mogućnost pristupa arhiviranim zapisima atmosferskih prenapona u realnom vremenu. Kako cjelokupan sistem podrazumijeva i dodatne aplikacije on-line prikaza i alarmiranja, korelacija svih podataka i Web Servis-a sa izvornim SCADA (eng. *Supervisory control and data acquisition*) podacima nastalih kvarova u odnosnom EES-u i djelovanja zaštita, daju izuzetno dobre rezultate paralelnih analiza i donošenja pravovremenih odluka [63].



Slika 42. Kombinovani metod detekcije udara groma (lijevo) i regionalni raspored određenih tipova senzora sistema „SCALAR“

Ilustracije radi, na slici 43. predstavljene su grmljavinske aktivnosti zabilježene na teritoriji Crne Gore i regiona 17. juna 2021. godine. Registrovano je 15260 udara, od čega 12686 vidljiva, i to 1143 pozitivnog i 11543 negativnog polariteta. Broj direktnih udara tog dana iznosio je 7476 [statistička interna obrada podataka registrovanih događaja].



Slika 43. Registrovane grmljavinske aktivnosti na području Crne Gore, 17. jun 2021.g.

6. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Posljedica nehomogenosti MO blokova jeste pojava znatnih dinamičkih sila na istežanje koji se formiraju na mjestima najveće gustine struje. Kako je navedeni efekat karakteristika isključivo otporničkih blokova, to je isti iskorišćen kao osnov kod analize rezultata ispitivanja OP u realnom pogonu.

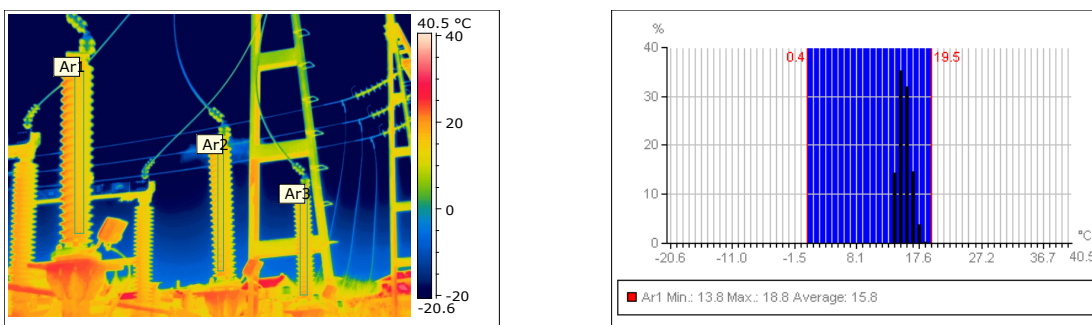
U prvom dijelu su prikazani karakteristični rezultati ispitivanja konkretnih OP, primjenom određenih ispitnih metoda i njihova komparacija. Korelacija rezultata ispitivanja izvršena je za primijenjene metode, a zbog obimnosti, prikazani su samo rezultati koji jasno oslikavaju pretpostavljena očekivanja.

Uočene zakonitosti analize rezultata ispitivanja primjenom „hibridnog metoda“ poslužile su kao osnov za definisanje interne originalne metodologije procjene stanja OP-a u mrežama visokog napona, bazirana na kvantitativnoj matričnoj ocjeni njegovih pet podsistema pomoću pet indikatora parametara stanja. Tako je u drugom dijelu ovog poglavlja dat opis primijenjene metodologije sa primjenom u realnom pogonu kao i statistička obrada rezultata procjene stanja 152 OP prilikom njihovih redovnih ispitivanja u mrežama visokog napona, primjenom ove metodologije. Sama metodologija je primjenjena za OP na svim naponskim nivoima.

6.1. Uporedne analize kombinovanih metoda

Mjerenja u realnom pogonu su, gotovo po pravilu, podložna raznim uticajima. Počev od vremenskih uslova, doba godine, isijavanja sunca, prisustva vjetra, pa do visokofrekventnih radio smetnji i jakih elektromagnetnih polja u postrojenjima najviših napona.

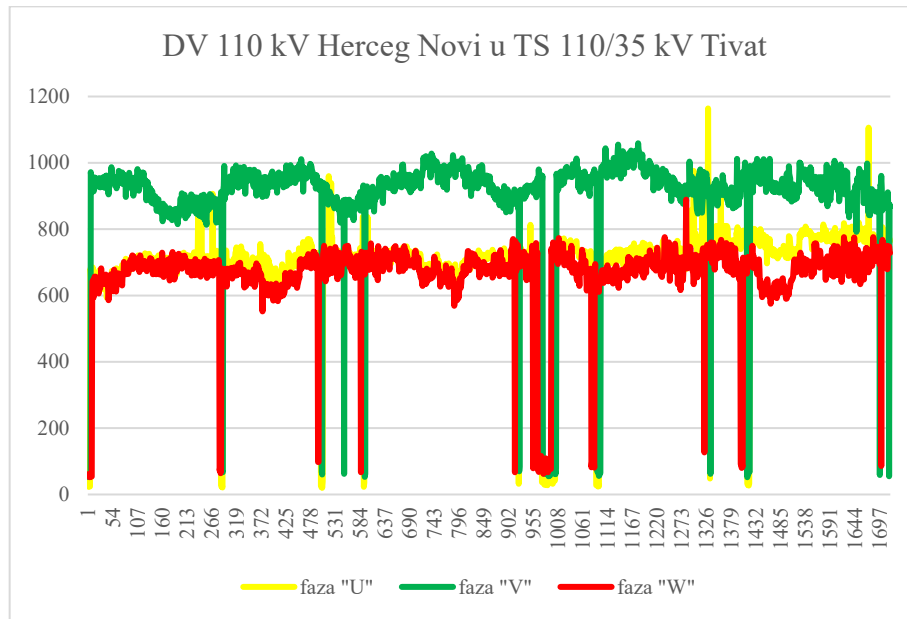
Primjer uticaja „isijavanja sunca“ predstavljen je na slici 44. Analizom histograma raspodjele temperatura za ispitivane OP u polju DV 110 kV Herceg Novi u TS 110/35 kV Tivat, pri srednjoj temperaturi od 15.8 °C, zabilježena je razlika u temperaturama otporničkih blokova u fazama „U“ i „W“ od $\Delta T=4.2$ °C, odnosno $\Delta T(\%)=26,58\%$, što bi u konačnom značilo da je OP u fazi „W“ pretrpio značajno oštećenje.



Slika 44. Termogram odvodnika prenapona u polju DV 110 kV Herceg Novi u TS 110/35 kV Tivat sa histogramom raspodjele temperatura

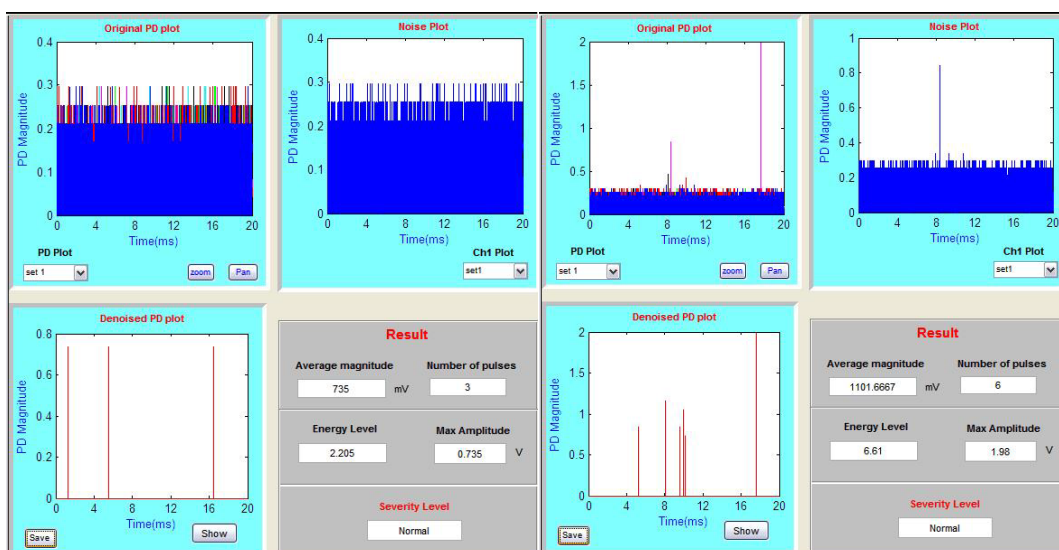
Međutim, uticaj sunčevog zračenja na izmjerenu temperaturu je reda veličine 3-5 °C u toku dana, dok se u toku noći temperaturna razlika kreće u rezlikama od 1-2.5 °C. Da su predmetni OP u sve tri faze sa dovoljnom pogonskom raspoloživošću, potvrdilo je i mjerenje struja odvođenja. Uporedni dijagram struja odvođenja za predmetne OP predstavljen je na slici 45. Maksimalno izmjerene vrijednosti ukupne struje odvođenja za predmetne OP su reda

veličine 1000 μA . Zabilježene su 34 prorade OP sa srednjom energijom impulsa od 11.76 kJ, pretežno pozitivnog polariteta.



Slika 45. Dijagram ukupnih struja odvođenja odvodnika prenapona u polju DV 110 kV Herceg Novi u TS 110/35 kV Tivat, po fazama sistema

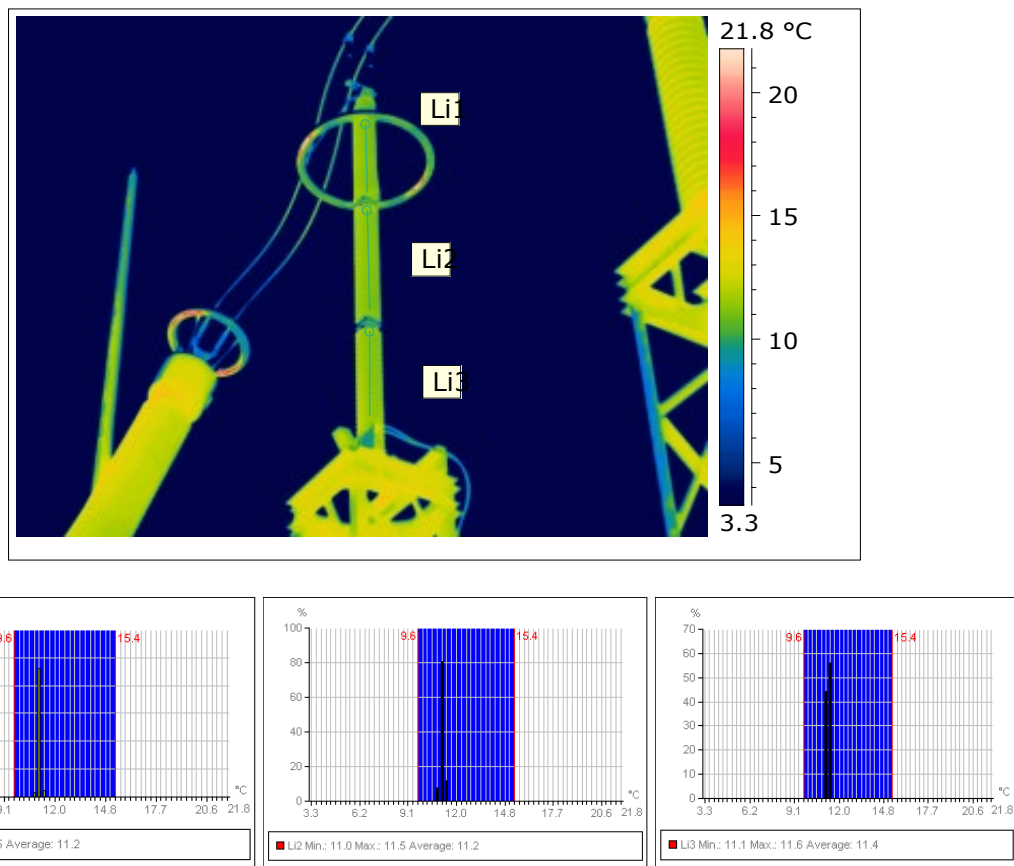
Nakon eliminisanja smetnji iz rezultata mjerenja – telekomukacionih, radio, korone i drugih - interpretacija parcijalnih pražnjenja je obavljena amplitudno-faznom analizom. Mjerenja su izvršena primjenom mjernog uređaja PDPAC u baznom modu kontrole, mjerenjem amplitude (mV) i broja impulsa - primjenom visokoosjetljivog elektromagnetnog senzora na pribnici OP, u opsegu 30 - 100 MHz sa osjetljivošću 10 μV . Kako se može i vidjeti na samim graficima na slici 46., riječ je o zanemarljivim registrovanim pražnjenjima kavitacionog tipa, maksimalnog napona 1.98 V.



Slika 46. Grafici registrovanih pražnjenja kavitacionog tipa na odvodnicima prenapona u polju DV 110 kV Herceg Novi u TS 110/35 kV Tivat, faza „U“ i faza „V“

Sa degradacijom izolacije raste vrijednost rezistivne komponente struje odvođenja OP, što opet dovodi do zagrijavanja otporničkih blokova. Rezultujuća maksimalna temperaturna razlika pojedinih djelova direktno ukazuje na veći stepen degradacije OP. Zbog pojave lokalnih parazitnih kapaciteta temperatura otporničkih blokova se može trenutno neznatno promijeniti, što takođe može dovesti do pogrešnog zaključka o degradaciji OP. Zato se uporedna primjena on-line metoda pokazala u potpunosti ispravnom.

Uniformna raspodjela temperatura po otporničkim blokovima za slogove 400 kV OP sa prstenom za oblikovanje polja prikazana je na slici 47. Riječ je o OP tipa PEXLIM Q 330-XH 420, $U_r=336$ kV, $U_c=264$ kV, $I_o=10$ kA. Odvodnik je u pogonu u trafo polju T1 u TS 400/110/35 kV Podgorica 2.



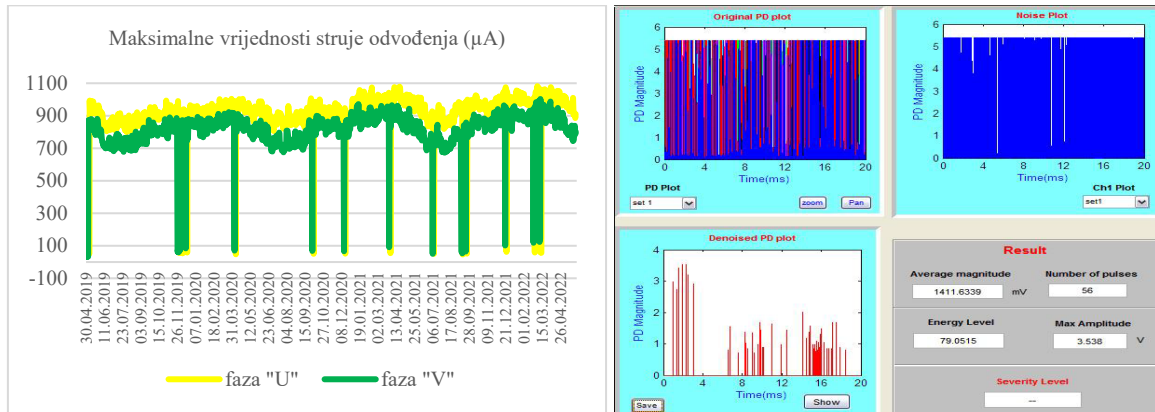
Slika 47. Termogram odvodnika prenapona 400 kV sa histogramima raspodjele temperatura po slogovima kolone

Lako je uočljivo da temperaturna razlika slogova iznosi $\Delta T_{0,4-8}=0.2$ °C, tako da je predmetni OP ocijenjen kao odličan, bez potrebe za daljom kontrolom primjenom ostalih dijagnostičkih metoda. Sa namjerom su izvršena i ostala ispitivanja, tako da su u konačnom prethodni zaključak potvrdili i rezultati izmjerenih struja odvođenja u ovom polju, kao i izmjerene vrijednosti parcijalnih pražnjenja.

Naime, senzor prorada je u ovom polju zabilježio svega dvije prorade OP, za negativni polaritet talasa sa strujom od 494 A, i sa trajanjem impulsa od 95 μ s, energije 10 kJ. Maksimalno izmjerene vrijednosti ukupne struje odvođenja za predmetne OP su reda veličine 900 μ A (slika 48., lijevo).

Na graficima parcijalnih pražnjenja uočavaju se pražnjenja po površini tijela OP, čak njih 55 sa jednim značajnim pražnjenjem u obliku korone. Razumljivo za jako elektromagnetno

polje u postrojenju 400 kV. Ipak, kavitaciona pražnjenja nijesu zabilježena, a maksimalna amplituda napona iznosila je 3.538 V, pri srednjoj amplitudi 1411.63 mV (slika 48., desno).

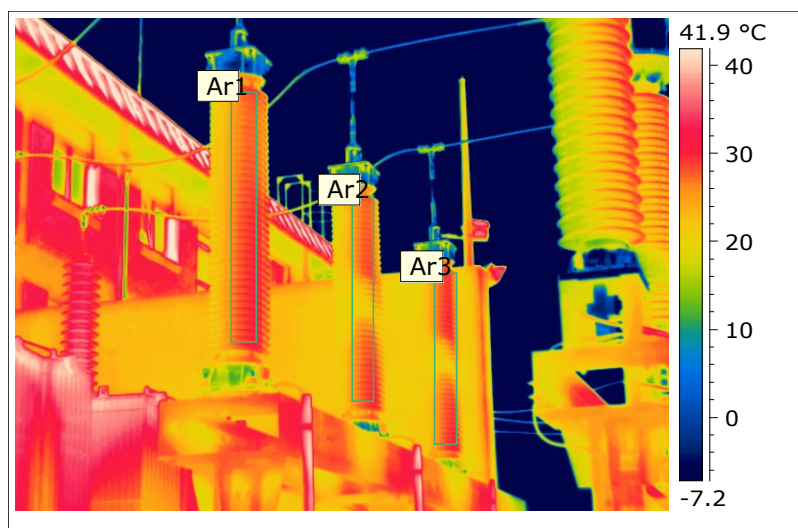


Slika 48. Maksimalne vrijednosti ukupne struje odvođenja (lijevo) sa graficima registrovanih pražnjenja po površini izolatora na odvodnicima prenapona (desno) u polju T1 u TS 400/110 kV Podgorica 2

Inače, tradicionalan, lako primjenjiv i opšte prihvaćen metod klasičnog mjerenja otpora izolacije je još uvijek nezamjenjiva ispitna metoda za interventnu i blic kontrolu stanja izolacije visokonaponske opreme. Rezultati od 100 MΩ do par hiljada MΩ su često upitni, a procjena stanja ispitivanog elementa se uvijek svodi na procjeni zasnovanoj na višegodišnjem iskustvu ispitivača. Posebno kada je riječ o OP.

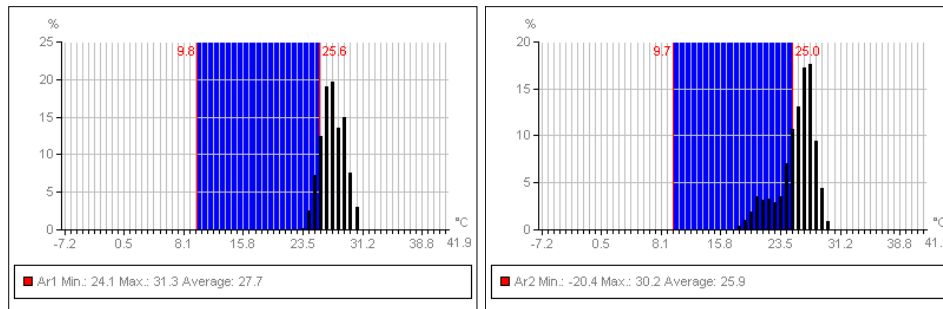
Kako još uvijek ne postoje standardom definisane dijagnostičke metode za ispitivanje OP u realnom pogonu, primjena „hibridnog metoda“ pokazala se u potpunosti opravdanom. Primjer na slici 49. to i potvrđuje.

Odvodnici prenapona sa porculanskim kućištem tip 3EP, karakteristika $U_i=102$ kV, $U_c=84$ kV, $I_o=10$ kA, su u pogonu u polju energetskog transformatora T2 u TS 110/10 kV Podgorica 5. Rezultati redovne termovizijske kontrole su pokazali da se raspodjela temperatura na ovim OP razlikuje u znatnoj mjeri (slika 49.).

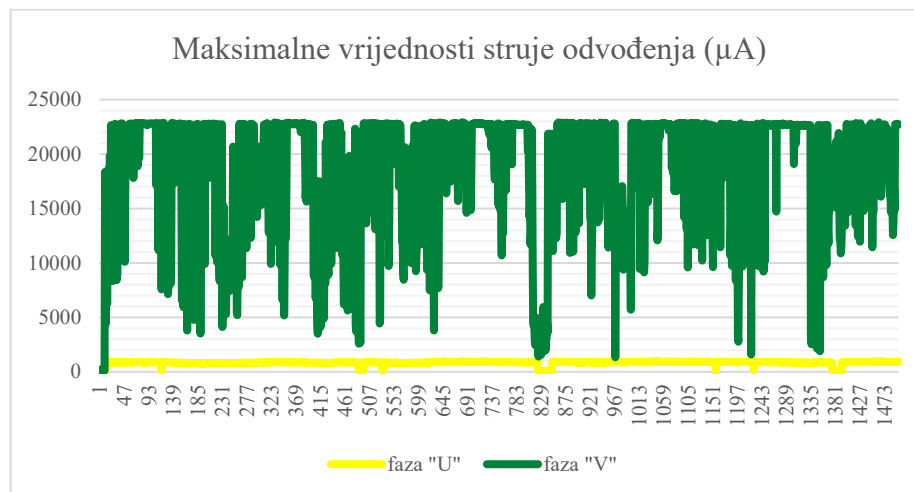


Slika 49. Termogram odvodnika prenapona u 110 kV polju T2 u TS 110/10 kV Podgorica 5

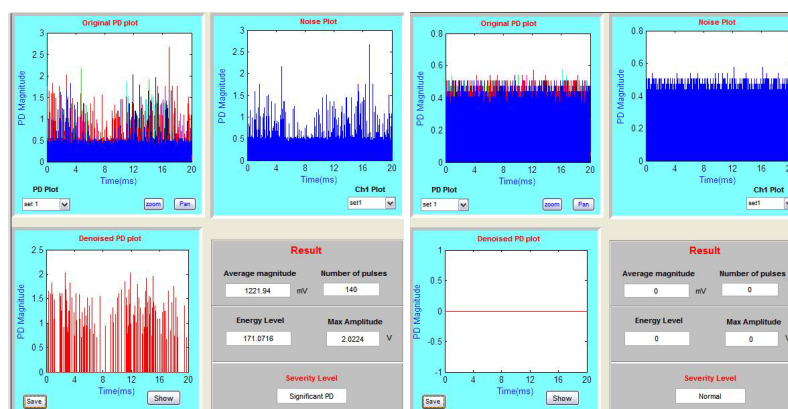
Razlika izmjerenih srednjih vrijednosti temperatura iznosila je $\Delta T_{U-V}=1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, dok je u središnjem dijelu otporničkih blokova iznosila $\Delta T_{U-V}=12.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (slika 50.). Dalje, senzor prorada je u ovom polju zabilježio osam prorada OP, za pozitivni polaritet talasa sa strujom od 12500 A, i sa trajanjem impulsa od 135 μs , energije 45 kJ. Maksimalno izmjerene vrijednosti ukupne struje odvođenja za predmetne OP su reda veličine 22000 μA u fazi „U“, odnosno 870 μA u fazi „V“ (slika 51.).



Slika 50. Histogram odvodnika prenapona u pogonu na fazama „U“ i „V“ sistema 110 kV polja T2 u TS 110/10 kV Podgorica 5



Slika 51. Maksimalne vrijednosti ukupne struje odvođenja na odvodnicima prenapona u pogonu na fazama „U“ i „V“ sistema 110 kV polja T2 u TS 110/10 kV Podgorica 5

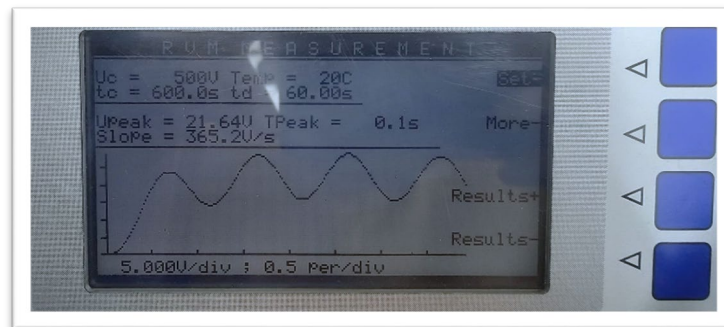


Slika 52. Maksimalne vrijednosti registrovanih parcijalnih pražnjenja na odvodnicima prenapona u pogonu na fazama „U“ i „V“ 110 kV polja T2 u TS 110/10 kV Podgorica 5

Uporedni rezultati mjerenja parcijalnih pražnjenja (slika 52.) pokazala su da je na OP u fazi „U“ zabilježeno ukupno 140 impulsa, od čega 133 površinska pražnjenja, 5 kavitacionih pražnjenja i 2 dvije izraženije korone sa srednjom amplitudom 1221.94 mV i maksimalnom amplitudom od 2.0224 mV. Za razliku od njega, kod OP u fazi „V“, nijesu zabilježeni bilo kakvi impulsi.

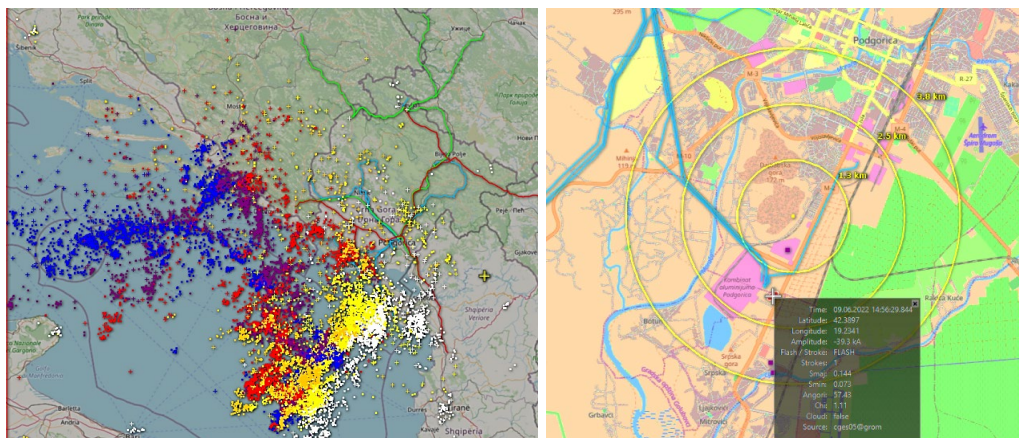
Kontrola stanja izolacije je provjerena i klasičnim mjerenjem otpora. Za OP u fazi „U“ otpor izolacije je iznosio 250 MΩ, dok je za OP u fazi „V“ on iznosio 34800 MΩ.

Konačno, mjerenjem povratnog napona pri 500 V DC, i vremenima punjenja i pražnjenja od 600s i 60 s, respektivno, izmjerena je vrijednost povratnog napona od 21.64 V, pri čemu je vrijednost vremena do postizanja maksimalnog povratnog napona iznosila 0.1 s, a brzina postizanja istog je iznosila 365.2 V/s, što je prikazano i originalnom fotografijom sa displeja mjernog instrumenta na slici 53.



Slika 53. Rezultat mjerenja povratnog napona na odvodniku prenapona u fazi „U“ 110 kV polja T2 u TS 110/10 kV Podgorica 5

Kako je senzor prorada OP zabilježio da je 09. juna 2022. vrijeme prorada OP bilo 14.56h, pretragom arhiviranih podataka senzora „Scalar“, utvrđeno je da je u tom periodu usljed olujnog nevremena i intezivnih grmljavinskih procesa u regionu, zabilježeno 46652 udara groma sa 1755 pozitivnih i 20018 negativnih talasa, i 13293 direktna udara groma (slika 54.). Na 200 m od samog postrojenja, nakon direktnog udara groma u treći stub od postrojenja, propagacija prenaponskog talasa izazvala je proradu i oštećenje OP u fazi „U“.



Slika 54. Intezivni grmljavinski procesi u regionu 09. juna 2022.
(izvor: senzor sistema „Scalar“)

Problem kod ovog OP izvjesno postoji što je na osnovu svih ispitivanja i zaključeno, tako da dalje zadržavanje OP ovih karakteristika u pogonu bi ni u kom slučaju ne bi bilo bezbjedno. Zamjena OP je odmah i izvršena.

6.2. Metodologija kvantitativne procjene stanja odvodnika prenapona

Tokom eksploatacije OP je izložen procesima starenja pod uticajem niza normalnih i vanrednih pogonskih naprezanja: električnih, termičkih, hemijskih i mehaničkih. To zakonomjerno rezultira, većim ili manjim, smanjenjem stepena njegove pogonske pouzdanosti. Iz te činjenice i proizlazi neophodnost procjene faktičkog stanja OP tokom eksploatacije.

Dijagnostika čije su osnovne komponente: mjerne metode, procedure, ekspertska i iskustvena znanja - predstavlja periodično i blagovremeno određivanje stanja OP. Pouzdanost dijagnostičkih metoda determinisana je stepenom korelacije – koja je u osnovi stohastička – između stvarnog stanja i mjenenog parametra koji to stanje oslikava. Dijagnostička kontrola u principu daje „tačkastu ocjenu“, pa se za relevantnu procjenu stanja OP koriste analiza trenda dijagnostičkog parametra i njegova eksploataciona istorija.

Metodologija za ocjenu faktičkog stanja OP bazirana je na sljedećim pretpostavkama:

1. OP se sastoji od niza funkcionalnih podsistema koji omogućavaju ispunjenje osnovnih funkcija.
2. Izbor korišćenih kontrola, mjerenja, analiza i dijagnostike, baziran je na funkcionalnom modelu kvara koji definiše potencijalne neispravnosti i osjetljiva mjesta u konstrukciji OP pri zadatim uslovima eksploatacije.
3. Ocjena stanja je definisana u formi odgovora na niz pitanja o stanju funkcionalnih podsistema OP-a utemeljenim na vjerovatnom scenariju razvoja kvara.

Da bi se stanje OP kvantitativno procijenilo, neophodno je definisati pod sisteme OP i odrediti im adekvatne težinske koeficijente. Pod sistemi OP su:

1. Primarne strujne veze.
2. Uzemljenje i uzemljivački sistem.
3. Izolaciono postolje.
4. Izolator.
5. Brojač pražnjenja.

Vrijednosti težinskih koeficijenata, za pod sisteme, iznose od 0.5 do 2.5 i određeni su na osnovu uloge i značaja podsistema za funkcionalnost odvodnika. Takođe, odabrani su indikatori parametra stanja: kontrola, analiza, mjerenja i dijagnostika. Pet indikatora parametara stanja su: vizuelna kontrola, životni vijek, monitoring, održavanje i termografija. Njima su dodijeljeni težinski koeficijenti od 1 do 2.5 - određeni na osnovu njihove: dijagnostičke vjerodostojnosti, informativnosti i nivoa korelacije indikatora parametara stanja sa fizičkim procesima koji se dešavaju unutar OP.

Na osnovu kriterijuma procjene ocjenjuju se svi pod sistemi na osnovu svih indikatora parametara stanja - ocjenama od 0 do 10. Tamo gdje određeni indikator stanja ne može dati adekvatnu ocjenu nekog podsistema podrazumijeva se ocjena nula (nije primjenjivo). Primjenom matematičkog algoritma, dobija se rutinski indeks stanja OP (RIS):

$$RIS = \frac{\sum_{K=1,5}^{J=1,5} Sc(K,J)*F(K)*F(J)}{\sum_{K=1,5}^{J=1,5} F(K)*F(J)} \quad (27)$$

gdje je:

$S_c(K,J)$ - ocjena stanja jednog podsistema OP na osnovu jednog indikatora parametara stanja.

$F(K)$ - težinski koeficijent podsistema OP.

$F(J)$ - težinski koeficijent indikatora parametara stanja.

Tabela 7. Vrijednosti težinskih koeficijenata parametara stanja odvodnika prenapona

Odvodnik prenapona		Parametar stanja						Indikator kvaliteta	Koeficijent komponenti
		1	2	3	4	5			
Komponenta		Vizuelna kontrola	Životni vijek	Monitoring	Održavanje	Termografija			
1	PRIMARNA VEZA	22.5	22.5	45	22.5	37.5	10	1.50	
2	UZEMLJENJE	22.5	22.5	45	22.5	37.5	10	1.50	
3	IZOLACIONO POSTOLJE	22.5	22.5	45	22.5	37.5	10	1.50	
4	IZOLATOR	37.5	37.5	75	37.5	62.5	10	2.50	
5	BROJAČ PRAŽNENJA	45	45	90	45	75	10	3.00	
F(J)		1.50	1.50	3.00	1.50	2.50	SF(K)	50.00	

Tabela 8. Ocjena podsistema parametara stanja odvodnika prenapona

F(K)F(J)	1	2	3	4	5
1	2.25	2.25	4.5	2.25	3.75
2	2.25	2.25	4.5	2.25	3.75
3	2.25	2.25	4.5	2.25	3.75
4	3.75	3.75	7.5	3.75	6.25
5	4.5	4.5	9	4.5	7.5
SF(K)F(J)	100				
SSc(K,J)*F(K)*F(J)	1000				
Ocjena stanja	10				

Indikator kvaliteta podataka je numerički izraz vrednovanja kvaliteta, dostupnosti i vjerodostojnosti informacija korišćenih u procjeni stanja OP. Daje se u nezavisnoj koloni i direktno definiše sam kvalitet procjene stanja.

Indikator kvaliteta podataka (IKP) sa ocjenama od 0 do 10, dat je kao:

$$IKP = \frac{\sum_{K=1,5} S_c(K) * F(K)}{\sum_{K=1,5} F(K)} \quad (28)$$

Specijalna ispitivanja podrazumijevaju sljedeća mjerenja: struje odvođenja, termovizijska kontrola, otpor izolacije, mjerenje parcijalnih pražnjenja i mjerenje povratnog napona, sa ocjenama od 0 do -5.

Tabela 9. Pojedinačne ocjene specijalnih ispitivanja stanja odvodnika prenapona

Specijalna ispitivanja						Ocjena
Struja odvođenja	0	-0.5	-1	-2	-5	0
Termografija	0	-0.5	-1	-2	-5	0
Otpor izolacije	0	-0.5	-1	-2	-5	0
Parcijalna pražnjenja	0	-0.5	-1	-2	-5	0
RVM	0	-0.5	-1	-2	-5	0
Ukupna ocjena SI						0

Ukoliko rezultati jednog i/ili više ispitivanja nijesu u očekivanim granicama odnosno zadovoljavajući, bira se jedan od ponuđenih iznosa koeficijenta odnosno specijalnog ispitivanja. Konačna ocjena svih specijalnih ispitivanja je algebarski zbir pojedinačnih ispitivanja.

Konačni indeks stanja (KIS) - koji i definiše nivo pouzdanosti i raspoloživosti OP - izračunava se oduzimanjem kvantifikovanog zbirnog indikatora specijalnih ispitivanja (ISI) od rutinskog indeksa stanja (RIS):

$$KIS = RIS - ISI \quad (29)$$

Tabela 10. Konačni indeks stanja odvodnika prenapona

Indeks stanja	Ocjena stanja
≥ 8	Odličan
6-8	Dobar
3-5	Oslabljen
0-2	Kritičan

Primjena originalne metodologije za kvantitativnu procjenu stanja OP, ilustrativno je prikazana u Tabeli 11. U konkretnom primjeru je analiziran OP tipa PEXLIM Q192-XH245, $U_r=192$ kV, $U_c=154$ kV, $I_o=10$ kA, koji se nalazi u redovnom pogonu trafo polja autotransformatora T2, 150 MVA u TS 220/110/35 kV Podgorica 1 (slika 55.). Kako su vizuelna kontrola i rezultati svih ispitivanja ovog OP bili iznad granica zadovoljavajućih normi, isti je na osnovu konačnog indeksa stanja ocijenjen kao odličan.



Slika 55. Analizirani odvodnik prenapona primjenom kvalitativne procjene stanja

Detaljan opis pojedinačnih kriterijuma ocjene stanja odvodnika prenapona predstavljen je u Tabeli 12. Parametri stanja opisani su na osnovu komentara višegodišnjeg pogonskog iskustva ispitnog osoblja i oslikavaju najčešće uočene i evidentirane pojave tokom eksploatacije odvodnika prenapona u realnom pogonu.

Tabela 11. Konačan indeks stanja 220 kV odvodnika prenapona u polju ATR T2

Odvodnik prenapona PEXLIM Q192-XH245		Parametar stanja						Indikator kvaliteta SF(K)	Koeficijent komponenti
		1	2	3	4	5			
Komponenta		Vizuelna kontrola	Životni vijek	Monitoring	Održavanje	Termografija			
1	PRIMARNA VEZA	8	9	8	6	9	8	1.50	
2	UZEMLJENJE	8	8	8	6	9	8	1.50	
3	IZOLACIONO POSTOLJE	8	8	8	6	9	8	1.50	
4	IZOLATOR	8	8	8	9	9	8	2.50	
5	BROJAČ PRAŽNENJA	8	8	8	9	9	6	3.00	
Koeficijent parametara stanja		1.50	1.50	3.00	1.50	2.50	7.60	10.00	
PROCJENA STANJA ODVODNIKA PRENAPONA								8.22	
SPECIJALNA ISPITIVANJA								0.00	
KONAČAN INDEKS STANJA - ODLIČAN								8.22	

Tabela 12. Opis pojedinačnih kriterijuma ocjene stanja odvodnika prenapona

I Vizuelna kontrola	
Opis	Ocjena
Evidentirane marginalne pojave i neispravnosti bez uticaja na funkcionalnu spremnost.	8-10
Uočene pojedinačna slaba mjesta; manje površine zahvaćene korozijom; ljušpanje boje i/ ili manje neispravnosti instrumenata.	5-7
Umjerena degradacija koja još uvijek ne ugrožava funkcionalnu raspoloživost ali efikasnost i pouzdanost mogu biti ugroženi. Manje neispravnosti i/ili neispravnosti temperturnih indikatora.	3-4
Dotrajalost ili oštećenje makar jednog od kontrolisanih elementa: neodgovarajuća funkcionalnost; ugrožena pogonska spremnost i raspoloživost; velike površine zahvaćene korozijom; ozbiljni problemi u sistemu hlađenja; defekt provodnog izolatora; pregrijavanja ili preopterećenja; oštećenja indikatorske i kontrolne opreme; prekomjerne vibracije.	0-2

II Životni vijek	
Opis	Ocjena
Za eksploatacioni vijek odvodnika < 20 godina	8-10
Za eksploatacioni vijek odvodnika od 20-25 godina	6-7

Za eksploatacioni vijek odvodnika 25-30 godina	3-5
Za eksploatacioni vijek odvodnika >30 godina	0-2

III Monitoring	
Opis	Ocjena
On-line monitoring struja odvođenja sa brojačem pražnjenja; mjerenje parcijalnih pražnjenja i povratnog napona; detaljna snimanja i analize termografskih zapisa uz kompartivni prikaz zapisa atmosferskih pražnjenja; mjerenje otpora ozolacije.	9-10
Periodični on-line monitoring struja odvođenja sa brojačem pražnjenja i termografska kontrola.	6-8
Brojač pražnjenja sa periodičnom termografijom.	3-5
Termograska kontrola bez postojećeg monitoringa na odvodniku prenapona	0-2

IV Održavanje i uslovi eksploatacije	
Opis	Ocjena
Rutinsko preventivno održavanje; obavezna rutinska električna ispitivanja se obavljaju planiranom učestanošću. Niska cijena održavanja.	7-10
Plansko korektivno održavanje. Učvršćenje na konstrukciju, primarne strujne veze, sistem izolacionih postolja i uzemljenja, kontrola rada ugrađenog monitoringa, zamjena baterijskog napajanja.	4-6
Zahtijeva značajno dodatno korektivno održavanje. Značajne vrijednosti registrovanih struja odvođenja i/ili broja prorada; značajno pregrijavanje tijela odvodnika, kontaktnih i spojnih mjesta; abnormalnosti u termičkoj slici.	1-4
Ozbiljni i skupi zahvati korektivnog održavanja sa isključenjem iz pogona i/ili zamjenom.	0

V Termografija	
Opis	Ocjena
Termička slika kontrolisanih elemenata ne ukazuje na prisustvo neispravnosti.	7-10
Na termogramu su uočena odstupanja - abnormalnosti termičkog polja na identičnim simetričnim površinama.	3-6
Na termogramu su uočene izrazite anomalije na identičnim simetričnim površinama.	0-2

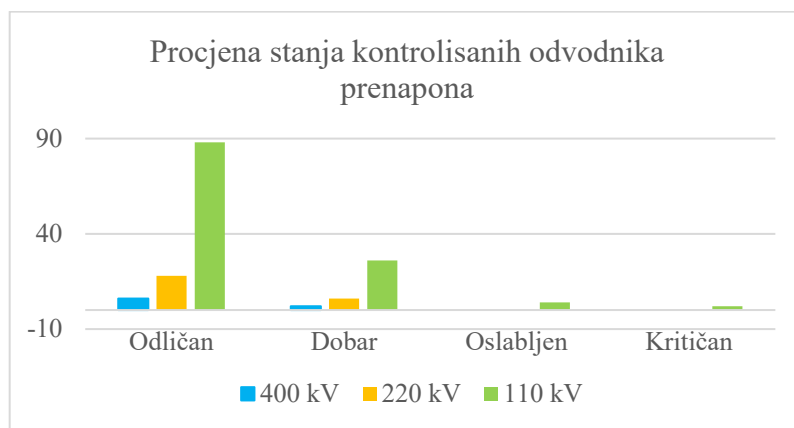
VI Vjerodostojnost podataka	
Opis	Ocjena
Redovni pregledi; ispitivanja; mjerenja; kontrole; održavanje; uredna eksploataciona i dokumentacija održavanja; dostupni su svi podaci i informacije neophodne za obavljanje procjene.	6-10
Najmanje jedan pregled, ispitivanje; mjerenje; kontrola; održavanje; nije obavljeno u predviđenom roku; neažurirani podaci.	2-5
Ne obavljaju se pregledi, ispitivanja; mjerenja; kontrole; održavanje; u predviđenim rokovima; nema podataka ili su zastarjeli.	0-2

Statistička procjena stanja kontrolisanih odvodnika prenapona u mrežama visokog napona EES-a Crne Gore predstavljena je rezultatima u Tabeli 13. U periodu od februara do oktobra 2022. godine, od ukupno 441 OP koji su u redovnom pogonu, kontrolisano je 152 OP na svim naponskim nivoima ili 34.46%.

Tabela 13. Procjena stanja kontrolisanih odvodnika prenapona u EES-u Crne Gore

Red. br.	Procjena stanja	Naponski nivo			Ukupno kontrolisanih	% ukupno kontrolisanih
		400 kV	220 kV	110 kV		
1.	Odličan	6	18	88	112	73.68
2.	Dobar	2	6	26	34	22.36
3.	Oslabljen	0	0	4	4	2.63
4.	Kritičan	0	0	2	2	1.31
Ukupno instalisanih		57	54	330	152	34.46

Na kraju, histogramom na slici 56. data je procjena stanja kontrolisanih OP, a na slici 57. predstavljeno je učešće ukupnog broja kontrolisanih odvodnika prenapona primjenom kvalitativne procjene stanja.



Slika 56. Histogram procjene stanja kontrolisanih odvodnika prenapona



Slika 57. Učešće ukupnog broja kontrolisanih odvodnika prenapona primjenom kvalitativne procjene stanja

7. ZAKLJUČCI

Izolacioni sistemi visokonaponske opreme, tokom rada u postrojenjima visokog napona, neprekidno su izloženi djelovanju različitih vrsta prenapona koji mogu izazvati razorna pražnjenja. Iako se izolacija dimenzioniše da izdrži dielektrična naprezanja, neophodna je i dodatna zaštita. Posljednjih decenija primjena savremenih tehnologija omogućila je proizvodnju široke lepeze odvodnika prenapona, uređaja koji efikasno štiti elemente postrojenja visokog napona.

Narušavanje zaštitnih karakteristika odvodnika, njegovo starenje i moguće oštećenje uzrokuje stalna izloženost naponskim naprezanjima. Kako bi se na vrijeme uočile promjene osnovnih parametara i omogućilo preventivno djelovanje u cilju sprečavanja većih posljedica koje mogu nastati eventualnom eksplozijom odvodnika, praksa pokazuje da je ispitivanje odvodnika prenapona u eksploataciji sasvim opravdano i neophodno.

Postojeća praksa prepoznaje veći broj dijagnostičkih metoda kojima se utvrđuje stanje pogonske raspoloživost odvodnika prenapona. Ipak, svaka od njih ima određeni limitirani opseg primjene i parametre stanja. Iz tih razloga je u radu analizirana mogućnost određivanja pogonske raspoloživosti odvodnika prenapona u mrežama visokog napona, na presjeku rezultata više ovih primjenjivih dijagnostičkih metoda.

Analiza rezultata mjerenja struje odvođenja na 152 uzorka ispitanih OP, ugrađenih u najznačajnijim dalekovodnim i transformatorskim poljima EES-a Crne Gore, dokazala je direktan uticaj radnog napona mreže. Iz obilja izvornih podataka statističkom obradom rezultata je utvrđeno da prosječna vrijednost ukupne struje odvođenja iznosi $820.11 \mu\text{A}$, dok je srednja vrijednost rezistivne komponente struje odvođenja reda $10.2 \mu\text{A}$. Sadržaj trećeg harmonika je na nivou od 1.2%, a njegova srednja vrijednost u ukupnom uzorku je reda veličine 20.7% od maksimalno dozvoljenog.

Kada je riječ o maksimalno izmjerenim vrijednostima samih prenaponskih impulsa, treba reći da je isti zabilježen 01. 06. 2022. na odvodniku prenapona 220 kV u polju DV Mojkovac u postrojenju TS 220/110/35 kV i iznosio je 70550 A, srednje vrijednosti 43740 A u trajanju od 10 μs , sa energijom pražnjenja od 257 kJ, pozitivnog polariteta.

Neznatno povećanje temperature usljed defekata na kućištu, zabilježeno je kod tri OP i svega jedan prodor vlage. Detaljnom analizom termograma uočena su i dva pregrijavanja gornjih slogova kao posljedica grijanja samih spojnih mjesta na primarnim priključcima OP.

Različiti međuslojni polarizacioni procesi na razdvojnoj površini dva dielektrika unutar samog OP su snimani primjenom metode mjerenja povratnog napona. Kako je upotreba ove metode tek u začetku, za očekivati je da će generalni zaključci o njoj primjeni u realnom pogonu, moći biti donešeni tek nakon dugotrajnijih ispitivanja.

Uporedni rezultati mjerenja parcijalnih pražnjenja na OP su pokazala da je najčešće riječ o površinskim pražnjenjima, sa malim brojem izraženijih korona i veoma rijetkim kavitacionim pražnjenjima.

Naravno, ni jedna od primijenjenih metoda nije univerzalna, jer za razliku od laboratorijskih ispitivanja, mjerenja u pogonu su krajnje specifična, što je u radu i pokazano. Pored niza ograničavajućih faktora, kao što su: temperaturna zavisnost, uticaj elektromagnetnog polja okolnog postrojenja, tačnost mjernih uređaja i dr., poseban problem predstavlja nedostatak jasno definisanih kriterijuma za ocjenu pogonske raspoloživosti odvodnika na osnovu izmjerenih veličina.

Podaci kontrole radnih režima OP s pojavom atmosferskih pražnjenja su paralelno, poređenjem sa pregledom broja ispada usljed grmljavinskih procesa primjenom sofisticiranog sistema za lociranje atmosferskih pražnjenja, bili osnova korelacije broja ispada i kvarova u mreži registrovanih mikroprocesorskim zaštitnim uređajima.

Analiza pogonske raspoloživosti odvodnika prenapona u mrežama visokog napona primjenom različitih dijagnostičkih metoda zaokružena je u radu primjenom originalno predložene metodologije za procjenu stanja. Nezavisno kreirani i predloženi korekcionni faktori omogućavaju utvrđivanje jasnih granica i kriterijuma do koje mjere se dati OP može bezbjedno i pouzdano koristiti u pogonu, kolika je njegova pogonska raspoloživost, odnosno može se donijeti sud o tome koliki je njegov preostali "životni vijek".

Dobijeni rezultati u procesu procjene pogonske raspoloživosti OP u realnom pogonu elektroprenosne mreže EES-a u Crnoj Gori govore o tome da je 73.68% ukupno kontrolisanih OP u odličnom stanju, njih 22.36% je dobro, a 2.63% je oslabljeno. Konačno, samo njih 1.31% je kritično i neophodno ih je zamijeniti.

Na osnovu svega izloženog, ostaje preporuka da je kontrolu stanja odvodnika prenapona u pogonu neophodno sprovesti odmah nakon ugradnje. Tako dobijeni rezultati mjerenja struje odvođenja su najbolja referenca – „otisak prsta“ za buduće komparacije i praćenje pogonske raspoloživosti odvodnika prenapona. Mjerenja u pogonu treba sprovoditi redovno, posebno na lokacijama gdje su odvodnici češće izloženi propagacijama prenapona. Isto tako, mjerenja je obavezno vršiti i nakon vremenskih neprilika i kvarova u mreži sa havarijskim posljedicama. Poređenje izmjerenih vrijednosti na odvodnicima u sve tri faze sistema, pri čemu se mogu porediti samo odvodnici istog proizvođača i tipa bi bio osnov pri tumačenju rezultata. Uz usvajanje i implementaciju algoritamskog „indeksa stanja“, završni korak u verifikaciji zaključaka omogućila bi periodična merenja na OP-a u pogonu, što bi omogućilo efikasan postupak monitoringa i dijagnostike stanja OP-a tokom eksploatacije.

Osnov budućih istraživanja, osim detaljnijih ispitivanja u realnom pogonu sa analizom karaktera uticajnih faktora, bila bi programska simulacija varijacije napona napajanja i varijacije sadržaja viših harmonika u naponu napajanja, primjenom jednog od simulink aplikativnih softvera. Računarskim simulacijama bila bi izvršena komparativna analiza postojećih i novorazvijenih metoda, a sam program bi omogućio, kako studentima tako i inženjerima u praksi, različite analize pogonske raspoloživosti odvodnika prenapona u cjelokupnom EES-u.

LITERATURA

- [1] Zakon o energetici, Službeni list Crne Gore, br. 005/16 od 20.01.2016, 051/17 od 03.08.2017, 082/20 od 06.08.2020, Podgorica, 2020.
- [2] Pravilnik o funkcionisanju prenosnog sistema električne energije Crne Gore, Službeni list Crne Gore, br. 5/2012, Podgorica, 2012.
- [3] International Electrotechnical Commission, IEC 60099-4: „Surge Arresters“, Part 4 – Metal oxid surge arresters without gaps for a.c. systems“, Ed.3., 2014.
- [4] International Electrotechnical Commission, IEC 60099-5: „Surge Arresters“, Part 5 – Selection and application recommendations, Ed.3., 2018.
- [5] International Electrotechnical Commission IEC 60099-1: „Surge arresters“ – Part 1: Non-linear resistor type gapped surge arresters for a.c. systems, Ed. 3.1., 1999.
- [6] Nahman J., „Metode analize pouzdanosti elektroenergetskih sistema, Naučna knjiga, Beograd, 1992.
- [7] Zdravković Z., Vukelja P., Mrvić J., „Koordinacija izolacije objekata visokih napona trofaznih mreža, Institut „Nikola Tesla“, Monografija, Beograd, 2001.
- [8] Ilić B., Adamović Ž., Savić B., Grujić G., „Uticaj termografskih dijagnostičkih kontrola na pouzdanost i energetska efikasnost elektroenergetskih postrojenja“, Tehnička dijagnostika, Tehdis, br. 3, Beograd, 2014.
- [9] International Electrotechnical Commission, IEC 60071-1: „Insulation co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules“, Ed.8., 2011.
- [10] Savić M., Stojković Z., „Tehnika visokog napona“ – Atmosferski prenaponi, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Beograd, 1996.
- [11] Mijajlović P., „Sklopni prenaponi u mrežama visokih napona“, Magistarski rad, UCG, ETF, Podgorica, 2003.
- [12] Working Group 06 of Study Committee 33: Metal Oxide Arresters in AC Systems, CIGRE Technical Brochure 60, 1991.
- [13] Swaffield D.J., Lewin P.L., Dao N.L. and Hallstrom J.K., „Lightning impulse wave-shapes: defining the true origin and it’s impact on parameter evaluation“, University of Southampton, Southampton, Hampshire, SO17 1BJ, UK; Helsinki University of Technology, 02015 TKK, Finland, 2012.
- [14] JUS IEC 99-4 Odvodnici prenapona, deo 4: „Metaloksidni odvodnici prenapona bez iskrišta za naizmjenične struje“, Beograd, 1995.
- [15] JUS IEC 99-1 Odvodnici prenapona, deo 1: „Odvodnici prenapona sa otpornikom nelinearne otpornosti i iskrištem za mreže naizmjenične struje“, Beograd, 1997.
- [16] International Electrotechnical Commission, IEC 60071-2: „Insulation coordination – Part 2: Application guidelines“, 2011.
- [17] Woodworth J., „History of Arresters on Power Systems 1930-1965“, ArresterWorks, 2011.
- [18] Hinrichsen V., „Metal-oxide Surge Arresters in High Voltage Power Systems“, Fundamentals, Siemens AG, 3rd Edition, Berlin, 2011.
- [19] ABB, Technical information, TOV capability and protective characteristics for surge arresters type EXLIM and PEXLIM, Edition 2, 2004.
- [20] ABB Switzerland Ltd., „Overvoltage protection - Metal oxide surge arresters in medium voltage systems“, Wettingen, 2011.
- [21] ABB Switzerland, „High Voltage Surge Arresters - Buyer’s Guide“, 2015.
- [22] Filipović-Grčić B., „Metoda izbora odvodnika prenapona za unapređenje koordinacije izolacije u visokonaponskim sustavima“, Disertacija, FER, Zagreb, 2013.
- [23] Working Group C4.301: Use of Surge Arresters for Lightning Protection of Transmission Lines, CIGRE Technical Brochure No. 440, 2010.

- [24] Metwally I. A., „Performance of distribution-class surge arresters under dry and artificial pollution conditions“, *Electrical Engineering*, vol. 93, no. 1, pp. 55-62, 2011.
- [25] Oros A., Šijaković B., Vuković M., „Tehnoekonomska analiza opravdanosti ugradnje odvodnika prenapona u DV poljima u TS CGES-a svih naponskih nivoa“, Studija, CGES, Podgorica, 2013.
- [26] Đorđević D., Stojković Z., „Automatizacija izbora odvodnika prenapona“, Infoteh-Jahorina, Vol.12, 2013.
- [27] Da Silva D. A. et al., „Reliability of directly-molded polymer surge arresters: Degradation by immersion test versus electrical performance“, *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 53, 2013.
- [28] Mobedjina M., Johnnerfelt B., Stenstrom L., „Design and testing of polymer-housed surge arresters“, GCC CIGRE 9th Symposium, Abu Dhabi, 1998.
- [29] Pliškić S., Škarica D., Levačić G., Curin L., „Iskustva u primjeni odvodnika prenapona na dalekovodima u prijenosnoj elektroenergetskoj mreži RH“, RB2-04, 14. Savjetovanje CRO CIGRE, Šibenik, 2019.
- [30] Yan X., Wen Y., Yi X., „Stady on the resistive leakage current characteristic of MOV surge arresters“, IEEE/PES, Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Vol. 2, Asia Pacific, 2002.
- [31] Li H.J., Birlasekaran S., and Choi S. S., „A Parameter Identification Technique for Metal-Oxide Surge Arrester Models“, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 3, 2002.
- [32] Bayadi Abdelhafid, „Parameter identification of ZnO surge arrester models based on genetic algorithms“, *Electric Power Systems Research*, vol. 78, 2008.
- [33] Lira G. R. S., Fernandes D. Jr., and Costa E. G., „Parameter identification technique for a dynamic metal-oxide surge arrester model“, *International Conference on Power Systems Transients*, Kyoto, Japan, 2009.
- [34] Stojanović Z., Stojković Z., „Procena stanja metaloksidnog odvodnika prenapona primenom metoda zasnovanih na analizi struje odvođenja pri radnom naponu mreže, 29. Savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, 2009., RC4-04
- [35] Nafar M., Gharehpetian G.B., and Niknam T., „Improvement of estimation of surge arrester parameters by using Modified Particle Swarm Optimization“, *Energy*, vol. 36, 2011.
- [36] Dobrić G., „Monitoring i dijagnostika stanja metaloksidnih odvodnika prenapona na bazi analize struje odvođenja pri radnom naponu mreže“, *Disertacija, ETF, Beograd*, 2016.
- [37] Shariff1 B.M.R. , Abdullah M.F.L., Latiff Y.B.A., Ahmad B.M., Iszaizul B.I. , „Detecting leakage current by infrared thermography method“, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, Vol. 16, No. 1, October 2019, pp. 200~207
- [38] Rahmanović T., Vehabović M., Imširović Dž., „Procjena životne dobi metal-oksidnih odvodnika prenapona u Elektroprenosu BIH“, 14. Savjetovanje BIH KO CIGRE, RA3.02, Neum, 2019.
- [39] „Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals“, IEC TR 60943:1998, Ed.2
- [40] Pasho S., Raymer R, „Infrared Thermography for Cost-Effective Utility Service Reliability“, FLIR Systems, InfraMation, 2001.
- [41] Ilić B., Adamović Ž., Savić B., Grujić G., [x] „Uticaj termografskih dijagnostičkih kontrola na pouzdanost i energetska efikasnost elektroenergetskih postrojenja“, *Tehnička dijagnostika*, Broj 1, Visoka tehnička škola, Beograd, 2002.
- [42] „FLIR Tools“, User's manual, Wilsonville, 2011.
- [43] Huang S. J., Hsieh C.H., „A method to enhance the predictive maintenance of ZnO arresres in energy systems“, *Electrical Power and Energy Systems*, N.62, 183-188, 2014.
- [44] „Infrared Thermal Imaging Survey Procedure for Electrical Equipment ML-STD-2194 (SH)“, *Naval Publications and Printing Service*, 700 Robbins Ave., Bldg. 4D, Philadelphia, Pennsylvania 19111, 2016.

- [45] Harada R., „Automated Substation Monitoring with Thermal Imaging“, Transformer Technology, Issue 3, 2019.
- [46] Vipin, P. M., Nagabhushana, G. R. and Jayaram B. N., „Investigations on Electro-Thermal Ageing of Metal Oxide Surge Arrester Elements - A Realistic Laboratory Simulation“, Proceedings of The 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Tokyo, 1991.
- [47] Gafvert U., „Condition Assessment of Insulation System - Analysis of Dielectric Response Methods“, Nordic Insulation Symposium, Bergen, Norway, 1996.
- [48] Nemeth E., „Measuring Voltage Response: a Non Destructive Diagnostic Test Method of High Voltage Insulation“, IEE Proc.Sci. Measur. Techn., Vol. 146, pp. 249-252, 1999.
- [49] Bolhuis, Gulski, Smit, „Interpretation of RVM measurements, beyond the polarisation spectrum“, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA, USA, 2002.
- [50] Mardira K.P., Saha T.K., „Modern Electrical Diagnostics for Metal Oxide Surge Arresters“, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Yokohama, Japan, 2002.
- [51] Mardira K.P., Saha T.K., Sutton R.A., „Investigation od Diagnostic Techniques for Metal Oxide Surge Arresters“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12; No. 1, 2005.
- [52] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV), IEEE Std C62.11., 2005.
- [53] Zulkurnain A.M., „A New technique for Metal Oxide Surge Arresters Failure Diagnostic Using Return Voltage Measurement“, Universiti Teknologi Malaysia, 2009.
- [54] Mijajlović P., „Osnove analize sadržaja vlage u izolacionom sistemu energetskog transformatora primjenom RVM metode“, 3. Savjetovanje CG KO CIGRE, Ref. A2-03, Pržno, 2013.
- [55] Nenad Kartalović, „Stohastičnost dielektrične čvrstoće gasne izolacije“, *disertacija*, ETF, Beograd, 2000.
- [56] International standard 60270, „Partial Discharge measurements“, Ed.12., 2000.
- [57] Eberhard Lemke, et al., „Guide for Partial Discharge measurements in compliance to IEC 60270“, CIGRE, WG D1.33 , ISBN: 978-2-85873-053-7, 2008.
- [58] Nenad Kartalović, Ljubiša Nikolić, Djordje Jovanović, Jelena Lukić, Savo Marinković, Dragan Teslić, „Upoređenje metoda za mjerenje parcijalnih pražnjenja“, 1. Savjetovanje CG KO CIGRE, Pržno, Crna Gora, 2009., RA2-05
- [59] CIGRE Working Group D1.33, „Guidelines for Unconventional Partial Discharge Measurements“, 2010.
- [60] E. Gulski, W. Koltunowicz, S. Tenbohlen, „Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC 60270) and unconventional methods“, Electra No. 288, 2016.
- [61] Schmidt, Betz, Oettinger, Wirz, Diendorfer, „A New Lightning Detection Network in Southern Germany“, 27th ICLP 2004, Avignon, France, 2004.
- [62] Silvija Pliškić, Bojan Franc, „ Analiza utjecaja atmosferskih pražnjenja na ispade prijenosnih vodova usporedbom podataka sustava za lociranje munja i podataka relejne zaštite“, 10. Simpozijum o sustavu vođenja EES-a, HRO KO CIGRE, Opatija, 2012.
- [63] Bojan Franc i dr., „Statistika udara munja u vodove prijenosne mreže RH za 2014. godinu“, HOP, Zagreb, 2014.