Broj rada: I3-19
DOI:10.46793/CIRED2026.I3-19_193

ANALIZA POJAVE KVARA NA NISKONAPONSKOM METAL OKSIDNOM ODVODNIKU PRENAPONA SA AKCIDENTOM

ANALYSIS OF THE FAILURE OF A LOW-VOLTAGE METAL OXIDE SURGE ARRESTER WITH AN ACCIDENT

Dušan ČOMIĆ, Plamen doo, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Savremene niskonaponske (NN) distributivne mreže izložene su različitim vrstama prenapona, kako atmosferskog, tako i sklopnog porekla. U cilju zaštite električne opreme i obezbeđenja kontinuiteta napajanja, u NN mrežama se sve češće primenjuju metaloksidni odvodnici prenapona. Njihova osnovna funkcija jeste ograničavanje prenaponskih talasa i njihovo bezbedno odvođenje u zemlju. Iako metaloksidni odvodnici značajno doprinose bezbednosti sistema, njihov otkaz, naročito u kombinaciji sa neadekvatnim uzemljenjem, može dovesti do pojave opasnih napona dodira i koraka u okolini elektroenergetskih objekata. Takvi naponi predstavljaju ozbiljnu opasnost ne samo za ljude, već i za životinje, posebno četvoronožne, koje su zbog svog telesnog položaja posebno izložene dejstvu napona koraka. U radu je prikazan slučaj otkaza metaloksidnog odvodnika prenapona (SPD) u niskonaponskom elektroenergetskom sistemu nazivnog napona 0,4 kV, sa posebnim osvrtom na bezbednosne posledice po ljude, životinje i opremu. Iako je odvodnik bio projektovan u skladu sa zahtevima standarda IEC 61643-11 i opremljen ugrađenom termičkom zaštitom, usled kumulativnog dejstva prenaponskih impulsa došlo je do degradacije ZnO varistorskog materijala i njegovog prelaska u trajno provodno stanje. Kao posledica toga uspostavljena je galvanska veza između faznog provodnika i sistema uzemljenja, što je dovelo do kontinuiranog podizanja potencijala uzemljenja (Earth Potential Rise) na vrednosti bliske faznom naponu. Izmereni nulti otpor između priključaka odvodnika i trajna pojava napona od približno 226 V na uzemljivaču ukazuju na stanje termičkog bega (thermal runaway) i nebezbedan kraj radnog veka odvodnika, pri čemu mehanizam termičkog razdvajanja nije ostvario blagovremeno i potpuno isključenje. Nastalo podizanje potencijala tla prouzrokovalo je pojavu opasnih dodirnih i korak-napona u okolini objekta, što je rezultovalo uginućem domaće životinje u blizini uzemljivača. Ovaj slučaj predstavlja tipičan primer ugrožavanja bezbednosti života prema kriterijumima IEC 62305-3. Analiza događaja ukazuje na značaj pravilnog dimenzionisanja i koordinacije prenaponske zaštite u skladu sa IEC 62305-4, primene odgovarajuće rezervne zaštite, kao i neophodnost kontinuiranog nadzora stanja SPD uređaja. Prikazani primer potvrđuje da neadekvatno detektovan kraj radnog veka metaloksidnog odvodnika može dovesti do ozbiljnih tehničkih i bezbednosnih posledica, uprkos formalnoj usklađenosti sa važećim standardima.

Ključne reči: NN metaloksidni odvodnik prenapona, analiza mogućeg otkaza, posledice.

* Dušan Čomić: dusan.comic52@gmail.com, 064/ 837 2104,

ABSTRACT

Modern low-voltage (LV) distribution networks are exposed to various types of overvoltages, both of atmospheric and circuit origin. In order to protect electrical equipment and ensure continuity of power supply, metal oxide surge arresters are increasingly being used in LV networks. Their basic function is to limit surges and safely lead them to the ground. Although metal oxide arresters contribute significantly to the safety of the system, their failure, especially in combination with inadequate grounding, can lead to the appearance of dangerous touch and step voltages in the vicinity of power facilities. Such voltages represent a serious danger not only for people, but also for animals, especially quadrupeds, which, due to their body position, are particularly exposed to the effect of step voltages. The paper presents a case of failure of a metal oxide surge arrester (SPD) in a low-voltage power system with a nominal voltage of 0.4 kV, with special attention to the safety consequences for people, animals and equipment. Although the arrester was designed in accordance with the requirements of the IEC 61643-11 standard and equipped with built-in thermal protection, due to the cumulative effect of overvoltage pulses there was a degradation of the ZnO varistor material and its transition to a permanent conductive state. As a result, a galvanic connection was established between the phase conductor and the earthing system, which led to a continuous rise of the earth potential (Earth Potential Rise) to a value close to the phase voltage. The measured zero resistance between the arrester connections and the permanent appearance of a voltage of approximately 226 V on the grounding device indicate a state of thermal runaway and the unsafe end of the arrester's working life, where the thermal separation mechanism did not achieve a timely and complete shutdown. The resulting increase in ground potential caused the appearance of dangerous touch and step voltages in the vicinity of the facility, which resulted in the death of a domestic animal near the grounding device. This case is a typical example of endangering life safety according to IEC 62305-3 criteria. The analysis of events indicates the importance of proper dimensioning and coordination of overvoltage protection in accordance with IEC 62305-4, the application of appropriate backup protection, as well as the necessity of continuous monitoring of the state of SPD devices. The presented example confirms that an inadequately detected end of service life of a metal oxide arrester can lead to serious technical and safety consequences, despite formal compliance with applicable standards.• the philosophy of thinking about the fair value of transformers.

Keywords: LV metal oxide surge arrester, analysis of possible failure, consequences.

UVOD

Niskonaponski (NN) metaloksidni odvodnici prenapona (MOP) predstavljaju osnovni element zaštite elektroenergetskih instalacija od prolaznih prenapona atmosferskog i sklopnog porekla. Zasnovani su na varistorskim blokovima od cink-oksida (ZnO), čija je osnovna karakteristika izrazito nelinearna strujno-naponska karakteristika [1].

Pri normalnom radnom naponu kroz odvodnik protiče zanemarljiva struja curenja, dok pri pojavi prenapona njegova impedansa naglo opada, čime se višak energije odvodi ka zemlji i ograničava vršna vrednost napona Up na prihvatljiv nivo. Na taj način metaloksidni odvodnici štite izolaciju opreme, instalacije i potrošače.

Uobičajeni režim rada podrazumeva kratkotrajna opterećenja velikim impulsnim strujama, bez trajnih posledica po funkcionalnost uređaja. Međutim, u uslovima dugotrajnog prenapona (TOV – temporary overvoltage), degradacije varistorskog materijala, prodora vlage ili fabričkih nedostataka, može doći do otkaza odvodnika. Standardna konstrukcija savremenih NN MOP

predviđa mehanizam bezbednog isključenja (termalni rastavljač) koji u slučaju pregrevanja odvaja varistorski element od mreže, sprečavajući eksplozivno razaranje i pojavu trajnog kratkog spoja između faznog provodnika i uzemljenja [2].

U analiziranom slučaju zabeležen je otkaz bez termičkog razaranja kućišta, ali sa trajnom električnom vezom između faznog provodnika i uzemljenja. Takvo stanje ukazuje na specifičan mehanizam kvara, pri kome nije došlo do potpunog prekida strujnog kola putem termičkog rastavljača, već do formiranja stabilnog provodnog kanala unutar varistorskog bloka ili na njegovoj površini. Sve okolnosti upućuju na trajni tačkasti proboj – lokalizovano oštećenje male površine koje je dovelo do koncentracije struje, intenzivnog zagrevanja i karbonizacije materijala, čime je formirana niskoomska veza između faze i zemlje.

Za razliku od klasičnog eksplozivnog otkaza, gde dolazi do mehaničkog razaranja i vidljivih spoljašnjih oštećenja, trajni tačkasti proboj može ostati spolja gotovo neprimetan, dok istovremeno omogućava kontinuirani protok struje mrežne frekvencije. Posledica je pojava trajnog napona na sistemu uzemljenja, odnosno podizanje potencijala tla u okolini uzemljivača. U ruralnim sredinama, gde su životinje u direktnom kontaktu sa zemljom na većoj površini (razmak između prednjih i zadnjih nogu), i relativno mali gradijenti potencijala mogu izazvati strujni udar kroz telo životinje.

U konkretnom slučaju, trajna veza faznog provodnika i uzemljenja dovela je do opasnog naponskog stanja na površini tla, što je rezultovalo strujnim udarom i smrću krave. Ovaj događaj ukazuje na značaj pravilnog dimenzionisanja, izbora i redovne kontrole stanja NN MOP, kao i na važnost ispravnog sistema uzemljenja i zaštite od indirektnog dodira. Posebnu pažnju potrebno je posvetiti mehanizmima otkaza koji ne dovode do vidljivog termičkog razaranja, ali mogu imati ozbiljne bezbednosne posledice po ljude i životinje.

Uticajan problem predstavlja što se odmah nije moglo ući u posed neispravnog MOP. Stoga ćemo teoretski razmatrati sve moguće uzroke ovakvog ponašanja MOP, kako bi se došlo do razloga otkaza i neželjene posledice, dok ne stigne uzorak neispravnog MOP, koji će biti laboratorijski ispitan.

1 IZVEŠTAJ O AKCIDENTU VEZANOM ZA OTKAZ MOP BEZ VIDLJIVOG TERMIČKOG RAZARANJA

U subotu, 22.11.2025. godine, tehničke službe eksploatacije izašle su na teren, po prijavi meštana da je pored drvenog stuba, koji je nosio samonosivi kablovski snop NN mreže, na kome je postojalo uzemljenje za uzemljavanje MOP, prethodne večeri stradala krava, koja je pogođena strujom.

Po dolasku na lice mesta, to jest, pored drvenog stuba NN mreže, izvedene sa SKS provodnicima 4x50 mm^2, identifikovano je mesto akcidenta. Zapaženo je da se na stubu vrši nastavljanje provodnika NN SKS i da zaštitu od prenapona SKS vrše tri MOP Uc=0,440 kV, In=15 kA, koji su povezani za uzemljenje, koje je postojalo, u zemlji pored drvenog stuba. Konstatovano je da je provodnik za uzemljenje pod naponom. Nakon njegovog sečenja, oko 2 m iznad zemlje, meren je napon između jednog kraja uzemljivačkog voda povezanog sa zemljom i drugog kraja uzemljivača povezanog sa MOP. Rezultati merenja napona su pokazali da postoji potencijalna razlika od 226 V.

Isključena je distributivna NN mreža, kako bi bilo omogućeno elektromonteru da se bezbedno popne na stub i utvrdi odakle dolazi napon na uzemljenje.

Nakon testiranja svih MOP (tri komada), utvrđeno je da je MOP na liniji L1 neispravan, koji se ponašao kao provodnik. Korišćeni instrument je pokazao otpor R=0,003 kΩ.

Izolovan je provodnik za uzemljenje prema ovom MOP i ostavljen namotan na stubu izvan ljudskog domašaja.

Defektaža je izvršena zbog sumnje na neispravnost MOP, na osnovu rezultata merenja i indikacija kvara u pogonu NN mreže.

Vizuelnim pregledom utvrđeno je:

- Kućište odvodnika: bez vidljivih mehaničkih oštećenja;
- Tragovi paljenja i termičkog pregrevanja: nisu uočeni;
- Termički odvojnik: **nije aktiviran;**
- Priključci i uzemljivački vod: mehanički ispravni.

Nisu uočeni spoljašnji znaci termičkog ili mehaničkog oštećenja odvodnika.

Dobijena vrednost ukazuje na **trajni električni proboj varistorskog elementa** MOP



Slika 1 – NN mreža sa SKS i neispravni MOP

Izmerena vrednost napona odgovara faznom naponu NN mreže i potvrđuje da je, usled proboja varistora, priključak odvodnika prema uzemljenju doveden na potencijal faznog provodnika.

Kvar nije bio praćen dovoljnim termičkim efektom za aktiviranje termičkog odvojnika.

Ovakav režim kvara predstavlja manje čest, ali poznat oblik otkaza, MOP u NN mrežama.



Slika 2 –Napon između uzemljenja i izlaznog priključka MOP i odsečeni uzemljivački vod

2 ZAPRLJANJE SPOLJNE IZOLACIJE NN MOP KAO MOGUĆI UZROČNIK AKCIDENTA

Kako se vidi, na slici 1, spoljašnji izolovani deo MOP je čist, i bez vidljivih tragova protoka struje po njegovoj spoljnoj površini, te nije postojala mogućnost provodnosti po spoljnoj površini.

Ako se pretpostavi da postoji provodljiv sloj, bez vidljivog oštećenja spoljne izolacije MOP, analiziraće se mogućnost protoka opasne struje u zemlju, koja može izazvati uginuće četvoronožne životinje.

Ne postoje poznati, javno dokumentovani slučajevi da je čovek ili životinja stradala zato što NN metaloksidni odvodnik prenapona (npr. Uc ≈ 0,44 kV, In = 15 kA) nije reagovao usled zaprljanja spoljne izolacije, pa je dugotrajna struja curenja tekla spolja po izolaciji u zemlju.

Kod metaloksidnih (ZnO) odvodnika kod zaprljanja treba znati:

- Zaštitna funkcija je u varistor blokovima, ne u spoljašnjoj izolaciji.
- Zaprljanje spoljne izolacije (so, industrijska prašina, amonijak, ptičji izmet):

povećava površinsku struju curenja [3], može dovesti do lokalnog zagrevanja, suvih zona i eventualno površinskog preskoka, ne sprečava varistore da provode kada se pojavi prenapon.

Na osnovu poznatih karakteristika NN (ZnO) MOP, važećih standarda i dugogodišnje eksploatacione prakse elektrodistributivnih sistema, može se konstatovati sledeće:

- MOP nazivnog trajnog radnog napona Uc = 0,44 kV i nazivne struje pražnjenja In = 15 kA svoju zaštitnu funkciju ostvaruje provođenjem kroz varistorski blok, dok spoljašnja izolacija ima isključivo mehaničku i izolacionu ulogu prema okolini;

- Zaprljanje spoljne izolacije (industrijska prašina, so, atmosferske nečistoće i sl.) može dovesti do povećanja površinske struje curenja prema zemlji, ali takva struja je po svojoj prirodi **malog intenziteta (reda µA do nekoliko mA)** i ne predstavlja opasan izvor napona dodira ili napona koraka.

Klik za unos teksta. ENTER za sledeći pasus / Click to enter text. ENTER for next paragraph

2.1 Numerički proračun struje kvara usled zaprljanje spoljne izolacije NN MOP

Zaprljanje spoljne izolacije može dovesti do povećanja površinske struje curenja prema zemlji, stoga je konkretnoj NN mreži treba proveriti.

Pretpostavljene vrednosti (realne za NN mrežu):

- Fazni napon: $U_f = 230$ V,
- Impedansa NN mreže (transformator + vod): $Z_m \approx 10\ \Omega$,
- Otpor uzemljenja stuba:$R_s \approx 5\ \Omega$,
- Otpor zaprljane spoljne izolacije MOP oko Ro ≈ 400 kΩ.

Ukupna impedansa petlje kvara:

$$Z_{uk} = Z_m + R_s + R_o \approx 400\ \text{k}\Omega \tag{1}$$

Struja kvara:

$$I_k = \frac{U_f}{Z_{uk}} = \frac{230}{400000} = 5{,}75\ \cdot 10^{-4}\text{A} \tag{2}$$

Struja kvara reda $\mathbf{5{,}75\ \cdot 10^{-4}}$ **A** nije dovoljna da izazove bilo kakvu disipaciju snage u varistoru, te nije mogla dovesti do aktiviranja termičkog odvojnika MOP od uzemljenja.

2.2 Procena napona koraka – u slučaju zaprljanje spoljne izolacije NN MOP

Za grubu procenu napona koraka usvojene su realne i najnepovoljne pretpostavke za analizu:

- NN MOP karakteristika: Uc = 0,44 kV, In = 15 kA;
- Dugotrajna površinska struja curenja usled zaprljanja: $I \approx 5$ mA (namerno uzeto, radi sigurnosti, 10 puta više od izračunate vrednosti);
- Specifična otpornost tla: $\rho = 100\ \Omega$m (srednje do nepovoljno tlo);
- Rastojanje između prednjih i zadnjih nogu krave (korak): L = 1,5 m.

Na osnovu ovih pretpostavki za približnu procenu maksimalnog gradijenta potencijala u blizini tačke ulaska struje u zemlju može se koristiti odnos:

$$E \approx \frac{\rho \cdot I}{2\pi r^2} \tag{3}$$

Za procenu napona koraka uzima se srednja vrednost gradijenta na rastojanju reda veličine koraka, što daje praktičnu aproksimaciju:

$$U_k \approx \rho \cdot I \cdot \frac{L}{2\pi r^2} \tag{4}$$

Ako se uzme veoma nepovoljno: r ≈ 0,5 m (životinja stoji praktično „na mestu ulaska struje“),

dobija se:

$$U_k \approx \frac{100 \cdot 0{,}005 \cdot 1{,}5}{2\pi \cdot 0{,}25} \approx 0{,}48 \text{ V}$$

Shodno navedenom, može se zaključiti da opisani scenario ne predstavlja realan bezbednosni rizik i stoga je eliminisan kao mogući uzročnik otkaza MOP koji ima unutrašnji otpor R=0,003 kΩ i da je napon koraka višestruko manji od opasnog napona (50 V).

Prema navedenom čak i u uslovima dugotrajnog zaprljanja i povećane vlažnosti, površinsko curenje struje ne utiče na sposobnost varistora da reaguju na prenaponske pojave, niti može dovesti do situacije u kojoj odvodnik „ne reaguje“ na prenapon, to jest postaje trajno provodan.

U slučaju ozbiljne degradacije izolacije, realan ishod je pojava vidljivog površinskog preskoka, termičko oštećenje ili kvar odvodnika, a ne stabilno i dugotrajno opasno stanje po okolinu.

U dostupnoj stručnoj literaturi, tehničkim izveštajima proizvođača i evidencijama elektrodistributivnih preduzeća ne postoje zabeleženi slučajevi stradanja ljudi ili životinja koji bi bili uzročno-posledično povezani sa nereagovanjem NN MOP usled zaprljanja spoljne izolacije i dugotrajnog površinskog curenja struje prema zemlji.

3 UNUTRAŠNJI LOKALNI PROBOJ NN MOP KAO MOGUĆI UZROČNIK AKCIDENTA

Iako je odvodnik projektovan u skladu sa zahtevima standarda IEC 61643-11 i opremljen ugrađenom termičkom zaštitom, usled kumulativnog dejstva prenaponskih impulsa, MOP može da dođe do degradacije ZnO varistorskog materijala i njegovog prelaska u trajno provodno stanje.

Kod degradacije ZnO varistora, usled kumulativnih prenaponskih impulsa, može se desiti prelazak u trajno provodno stanje. Tehnički gledano to obično nije klasični tačkasti proboj u smislu visokofrekventnog dielektričnog proboja, već mikrostrukturni kvar varistorskog materijala i njegove granice zrna i prelazak u stanje sa veoma niskim otporom zbog promene unutrašnje strukture.

Kada se „trajno provodno stanje“ uspostavi može nastati:

- **Kumulativna degradacija:** Varistor prolazi kroz niz prenaponskih impulsa i svaki put se deo njegove mikrostrukture menja (uglavnom na granici zrna ZnO) i u oblasti kontakata između zrna. To se manifestuje kao smanjenje praga proboja, povećana struja curenja i smanjenje otpornosti.
- **Toplotna šteta i migracija jona:** Tokom jakih prenaponskih šokova, lokalni toplotni efekti i migracija jona (npr. Zn^{2+}, O^{2-}) dovode do trajnih promena u strukturi granica zrna, što može stvoriti kanale sa nižim otporom (ponekad se ovo opisuje kao *soft-short*) i na kraju se metalizuje u stanje koje tehnički omogućava stalnu provodnost.
- **Granularni „proboj“:** U nekim radovima se kao mehanizam oštećenja pominje (*grain boundary melting)* ili prelazak granica zrna u metalno-provodna stanja, što doprinosi menjanju mikrostrukture i promene praga napona.

U varistorima se obično ne govori o “tačkastom proboju” (kao kod izolacionih dielektrika), već o postepenoj degradaciji elektroprovodnih karakteristika i prelasku u stanje niske otpornosti zbog mikrostrukturnih promena i toplotnog oštećenja.

Kod ovakvog NN MOP, prelazak u trajno provodno stanje, nakon kumulativnih impulsa nije klasičan tačkasti proboj, već je to najčešće termičko-električna degradacija ZnO diska.

Svaki impuls (8/20 μs) izaziva lokalno zagrevanje. Posledica je promene barijera na granicama zrna ZnO. Smanjuje se nelinearni koeficijent α. To povećava struja curenja pri Uc.

Vremenom, posledica navedenih pojava, dolazi do termalne nestabilnosti.

3.1 Lokalna mikrotopljenja granica zrna

Lokalna mikrotopljenja granica zrna nastaju pri većem broju impulsa blizu In = 15 kA, kada se formiraju lokalni provodni kanali, pa dolazi do „soft short“ efekta i varistorski element prelazi u nisko otporno stanje, bez potpunog hlađenja, pa zbog toga može doći do otkaza termičke zaštite.

Nakon više impulsa može nastati trajni proboj koji nije dovoljno zagrevao disk varistora da bi termička zaštita varistora delovala i odvojila od uzemljenja neispravan MOP.

Fizički kod višestrukih impulsa (8/20 μs, In ≈ 15 kA) postoji mogućnost da [4]:

- dolazi do lokalnih oštećenja granica zrna,
- na jednom mestu formira se trajni provodni kanal,
- taj kanal ima relativno mali poprečni presek,
- ukupna disipacija pri Uc = 440 V može biti mala,
- temperatura celog diska ostaje ispod praga aktivacije termičkog rastavljača.

Rezultat ovakvog sleda događaja je da varistor postaje trajno provodan, ali bez masivnog zagrevanja, termički mehanizam ne reaguje, MOP ostaje priključen na NN mrežu.

3.2 Zašto nema zagrevanja varistora?

Zagrevanja varistora nema jer je disipacija:

$$P = U_c \times I_{leak} \tag{5}$$

Ako je formiran mikrokanal sa naprimer 1 do 2 A provodnosti, pri 440 V, $P \approx 440–880W,$

pri čemu se mora znati da:

- struja može biti impulsna ili ograničena mrežnom impedansom,
- disipacija može biti raspodeljena lokalno,
- metalne elektrode odvode toplotu,
- je masa diska velika.

Termička zaštita MOP, tipa 2, reaguje na spor porast temperature (thermal runaway), ne na trenutni električni „hard short“.

3.3 Lokalni proboj

Lokalni mikro-defekti i neravnomerna energija tokom više impulsnih udara mogu inicirati trajne provodne kanale u ZnO varistorima, vodeći ka trajnom proboju, bez prethodnog topljenja cele zapremine. Tako da se može reći da je:

- varistor pretrpio prenaponski impuls, ali nije potpuno eksplodirao ili raspao se,

- struja tekla kroz najslabije mesto u keramičkoj strukturi, ostavljajući mikroskopski trag prolaska struje.

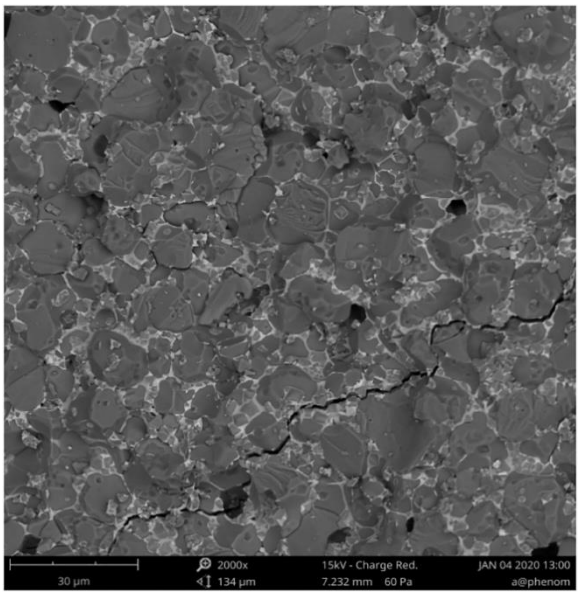
Vrlo često se golim okom na varistoru može videti:

- mala tamna mrlja ili lokalna promena boje na površini diska,
- moguće male pukotine ili ispupčenja, ali varistor ostaje čitav i netaknut u velikoj meri.

Sposobnost varistora da ograniči prenapon može biti delimično degradirana, ali još uvek izgleda „normalno“.

Pod mikroskopom na površini diska se vidi kanal probijanja, često okružen mikroskopskim crnim tragom sagorevanja, granice zrnaca keramike mogu biti lokalno topljene ili deformisane i strukturne promene su male i koncentrisane, za razliku od potpune deformacije.

Na slici 3 se vide kanali proboja, (tamna ili svetla linija) kroz strukturu zrna, to je putanja gde je prošla velika struja. Oslikavaju se mikropukotine u keramici koje nastaju zbog lokalnog pregrevanja i šire se kroz granice ZnO zrna.



Slika 3 – Tipični znaci lokalnog električnog proboja

Vidi se lokalno topljenje zrna (oko kanala se vidi deformisana struktura i granice zrna postaju nejasne). Može se uočiti i porozna ili „kraterska“ zona kao posledica topljenja i ponovnog očvršćavanja materijala.

Kod jakog impulsa može nastati i **šuplji kanal (~20 µm)** gde je materijal bio potpuno istopljen i izbačen.

Ni ovakvi kvarovi na varistoru MOP nisu mogli proizvesti trajnu struju kroz uzemljivač, ukopan pored stuba, koja bi stvorila opasan napon na uzemljivaču.

4 STRUJA I NAPON KORAKA U SLUČAJU TRAJNOG UNUTRAŠNJEG PROBOJA NN MOP

- Podaci o transformatorskoj stanici, NN mreži i otporima uzemljenja:
- Napojni transformator: $S_n = 250$ kVA, $u_c = 4\%$,

- Faza probija MOP (R=3 Ω)→ stub sa uzemljenjem,
- Napojni fazni provodnik: 560 m, tipa Al 4×50 mm²,
- Otpor uzemljenja stuba tj uzemljenja na koji se veže na MOP: *Rs*= 5Ω,
- Otpor odvodnika prenapona: $R_{odv} = 3\ \Omega$,
- Otpor združenog uzemljenja transformatorske stanice: $R_t = 2\ \Omega$,
- Zaštitni osigurač NN izvoda: 80 A,
- Fazni napon: $U_f = 230\ V$,

Otpor faznog provodnika R_l:

$$R_l = \rho \frac{l}{S} = \frac{0.028 \cdot 560}{50} \approx 0.314\ \Omega \tag{6}$$

Nazivna struja transformatora:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_L} = \frac{250000}{\sqrt{3} \cdot 400} \approx 361\ A \tag{7}$$

Struja kratkog spoja na sabirnicama:

$$I_k = \frac{I_n}{U_c} = \frac{361}{0.04} \approx 9025\ A \tag{8}$$

Jednofazna impedansa transformatora:

$$Z_t = \frac{U_f}{I_k} = \frac{230}{9025} \approx 0.0255\ \Omega \tag{9}$$

Ukupna impedansa petlje kvara:

$$Z_{uk} = R_L + R_s + R_{odv} + R_t + Z_t \tag{10}$$

$$Z_{uk} = 0.314 + 5 + 3 + 2 + 0.0255 \approx 10.3395\ \Omega$$

Struja kvara faza–zemlja:

$$I_k = \frac{U_f}{Z_{uk}} = \frac{230}{10.3395} \approx 22.2\ A \tag{11}$$

Zaključak: Napojni osigurač 80 A neće reagovati, što znači da će preko voda uzemljivača i kroz zemlju trajno teći struja 22,2 A.

Napon dodira zavisi **samo od struje kroz uzemljenja stuba** R_s:

$$U_d = I_k \cdot R_s = 22.2 \cdot 5 \approx 111\ V \tag{12}$$

U srpskim i evropskim propisima za NN mreže (npr. pravilnici o NN mrežama i zaštiti od indirektnog kontakta) [5]:

- dozvoljeni napon dodira, u normalnim uslovima, je do 50 V AC,
- dozvoljeni napon koraka, zavisi od terena i životne sredine, ali obično do 50 V AC.

Fiziološki opasni naponi za goveda počinju tek od nekoliko desetina volti, ali su smrtni ishodi vezani za napone koraka > 50–70 V, uz znatne struje u tlu.

Kako je u vreme akcidenta padala kiša, praćena atmosferskim pražnjenjima, postojao je specifičan trajni režim kvara, to je dovelo do provođenja struje u zemlju preko uzemljivača. Pošto je zemlja bila vlažna, područje oko stuba je bilo pod naponom. Naelektrisano tlo je stvorilo visok napon između prednjih i zadnjih nogu životinje, koja je stajala u blizini stuba, što je dovelo do njene smrti.

Jasno je da je ovo trajno nedozvoljeno stanje i zato će se dalji rad baviti uzročnikom ovakvog trajnog proboja MOP bez termičkog odvajanja od uzemljenja.

Nije moguće, da energija koja se trajno proizvodi u varistoru, prema (5):

$$\boldsymbol{P = 440 \times 22,2 = 9768\,W,}$$

ne aktivira termičku zaštitu.

5 ISPITIVANJE NEISPRAVNOG MOP U LABORATORIJI

Kako je neispravni MOP bio nedostupan, za bilo kakva laboratorijska ispitivanja, jedino moguće su bile pretpostavke, koje su poznate u literaturi, koje su prethodno razmatrane, koje nisu mogle pomoći kod utvrđivanja vrste kvara. Stoga je insistirano na dostavljanju uzorka i strpljivo se čekao njegov dolazak do laboratorije. Posle dužeg vremena, uzorak je stigao u ispiitnu laboratoriju (slika 4).



Slika 4 – Uzorak neispravnog MOP sa koga je skinuta natpisna pločica

Nakon skidanja natpisne pločice (slika 4) utvrđeno je da se ne vidi nikakav spoljni nedostatak niti je primećeno toplotno dejstvo na termički član.

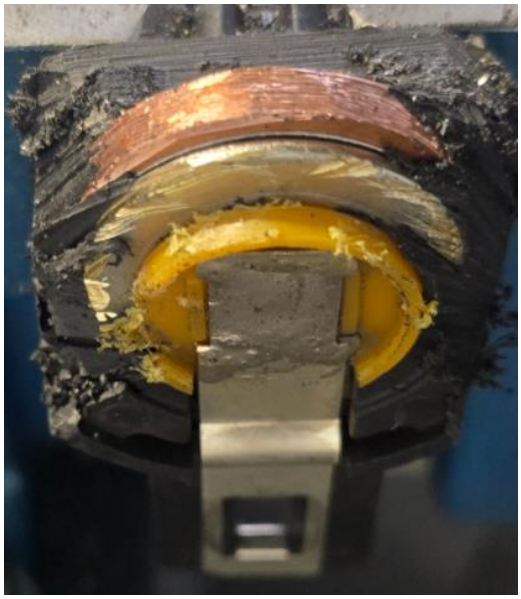
Stoga se pristupilo testiranjem MOP, to jest njegovog varistora, na ispitnom uređaju za NN varistore, što se vidi na slici 5. Vidi se da dovođenjem vrlo malog napona na priključke MOP struja na mA naglo raste, što ukazuje na direktan kratki spoj, i ispitivanje se automatski prekida.



Slika 5 – Uzorak neispravnog MOP na ispitnom uređaju za NN varistore

Nakon toga se pristupa skidanju spoljne izolacije i utvrđuje se da je umesto varistora na MOP postojao bakarni disk, što se vidi na slici 6.

Ovim je utvrđeno zašto termička zaštita nije odvojila MOP od NN mreže i definitivno potvrđena nefunkcionalna greška na MOP.



Slika 6 – Uzorak neispravnog MOP sa bakarnim diskom umesto varistora

Moguća pretpostavka je da je konkretni MOP mogao biti ispitni uzorak, koji se pravi za ispitivanje MOP na kratki spoj, koji je greškom isporučen korisniku.

6 ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedene analize događaja, teorijskih razmatranja i laboratorijskog ispitivanja uzorka, utvrđeno je da neaktiviranje termičke zaštite metal-oksidnog prenaponskog odvodnika (MOP) nije posledica spoljašnjih uticaja niti radnih uslova u mreži. Analizirani su mogući mehanizmi kao što su zaprljanje izolacione površine usled soli i prašine, pojava površinskih struja, kao i mogućnost lokalnog tačkastog proboja izolacije. Međutim, utvrđeno je da navedeni fenomeni nisu mogli dovesti do izostanka reakcije termičkog člana.

Laboratorijskim pregledom dopremljenog uzorka ustanovljeno je da unutar kućišta MOP-a nije bio ugrađen metal-oksidni varistorski element, već bakarni disk. Ovakva konstrukcija onemogućava ostvarivanje nelinearne naponsko-strujne karakteristike tipične za MOP, kao i pravilno funkcionisanje termičke zaštite.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da je uzrok neaktiviranja termičkog člana nefunkcionalna konstrukcija samog uređaja, odnosno odsustvo varistorskog elementa. Pretpostavlja se da je predmetni MOP predstavljao ispitni uzorak namenjen laboratorijskim ispitivanjima u uslovima kratkog spoja, koji je usled greške u procesu rukovanja ili distribucije dospeo u eksploataciju u elektroenergetskoj mreži.

Ovaj slučaj ukazuje na značaj stroge kontrole proizvodnje, ispitivanja i distribucije MOP, kao i na potrebu za dodatnim procedurama verifikacije pre njihove ugradnje u elektroenergetski sistem.

LITERATURA

[1] Čomić D., Izbor metaloksidnih odvodnika prenapona za primenu u elektrodistributivnoj mreži, Novi Sad, april 2000;

[2] Čomić D., Jedan od mogućih načina izbora metaloksidnih odvodnika prenapona u elektrodistributivnoj mreži, *Cired-Juko Cired, Herceg Novi,* septembar 2000;

[3] Anil S. Khopkar; Katik S. Pandya, Online Condition Monitoring Technique for Metal Oxide Surge Arresters Based on Leakage Current Components, *Engineering and Technology Journal,* 2025;

[4] J. Zhang, X. Li, Y. Zhang, Breakdown phenomenon of ZnO varistors caused by non-uniform distribution of internal pores, *Microelectronics Reliability*, 2019;