Broj rada: R1-07
DOI:10.46793/CIRED2026.R1-07_124

MOGUĆNOSTI ODRŽAVANJA IZOLATORA VN OPREME POD NAPONOM

MAINTENANCE POSSIBILITIES OF HV INSULATORS DURING OPERATION

Ninoslav SIMIĆ*, Elektrotehnički institut Nikola Tesla Beograd, Srbija
Nenad TRKULJA, Aerodrom Nikola Tesla, Beograd, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

U Srbiji postoje tri tipa održavanja visokonaponske (VN) opreme u elektroenergetskim postrojenjima: preventivno održavanje (remonti), održavanje po nastalom događaju i održavanje na osnovu procene stanja VN opreme. Prvi tip održavanja je najčešći i obavlja se po utvrđenim preporukama proizvođača ili na osnovu stečenih iskustava, uvek u planiranim zastojima. U poslednje vreme, težeći manjim troškovima, za ovaj tip održavanja se skraćuju vreme i obim radova, čime se narušava pouzdanost VN opreme. Drugi tip održavanja je praktično najskuplji i sprovodi se po hitnom postupku, nakon vremenskih nepogoda i/ili havarijskih ispada pogona. Treći tip održavanja je ono čemu se danas teži, i ovde se kombinuju rezultati kompleksnih ispitivanja i preporuka standarda, u cilju sagledavanja stanja i procene preostalog vremena eksploatacije VN opreme. Mana ovog tipa održavanja su veći troškovi na početku primene kompleksnih ispitivanja, odabir odgovarajućih graničnih vrednosti merenih veličina iz standarda i pouzdanost primenjenih softvera za procenu stanja opreme. Ako navedene tipove održavanja razmatramo za VN izolatore, dosadašnja praksa u Srbiji je uvek podrazumevala primenu jednog od prva dva tipa održavanja i to isključivo u beznaponskom stanju. Danas se u nekim zemljama površina VN izolatora čisti pranjem pod pritiskom posebnim tečnim elektroizolacionim sredstvom, u normalnim pogonskim uslovima, bez prekidanja napajanja. Svrha ovog rada je da se sagleda mogućnost primene ovog načina održavanja VN izolatora u našoj zemlji. Na početku rada biće dat primer električnog preskoka po VN izolatoru i nastalog havarijskog događaja. Potom će se prezentovati stečena iskustva sa primenom ove tečnosti u svetu, ali i u Srbiji. Biće prikazani prikupljeni podaci od značaja (maksimalni radni napon, izolacione karakteristike, ispunjenost ekoloških normi). Konkretno će se predložiti ispitivanja koja bi se mogla obaviti, u cilju odabira izolatora koji zahtevaju čišćenje površine, čime bi se i u Srbiji ostvarili uslovi za početak primene pranja izolatora bez isključenja pogona.

Ključne reči: održavanje VN izolatora, tipovi održavanja, VN oprema

* Autor za korespondenciju / Corresponding author: Ninoslav Simić, ninoslav.simic@ieent.org
Nenad Trkulja, nenad.trkulja@gmail.com

ABSTRACT

In Serbia, three types of maintenance of high-voltage (HV) equipment in power plants and substations are practiced: preventive maintenance (overhauls), maintenance after an incident, and maintenance based on the assessment of the condition of HV equipment. The first type of maintenance is the most common and is carried out in accordance with the manufacturer's recommendations or based on operational experience, always during planned outages. In recent years, in an effort to reduce costs, the time and scope of work for this type of maintenance have been reduced, which can negatively affect the reliability of HV equipment. The second type of maintenance is the most expensive and is carried out as an emergency procedure, after severe weather events and/or major equipment failures. The third type of maintenance is the approach that is increasingly being pursued today, combining the results of complex tests and standard recommendations in order to assess the condition and estimate the remaining service life of HV equipment. The disadvantages of this type of maintenance are the higher initial costs of implementing complex testing, the selection of appropriate limit values of measured quantities from standards, and the reliability of the software used for condition assessment. When these maintenance types are considered for HV insulators, past practice in Serbia has always involved the application of one of the first two types of maintenance, exclusively on de-energized insulators. Today, in some countries the surface of HV insulators is pressure washed using special insulating oil under normal operating conditions, without disconnecting from the grid. The purpose of this paper is to examine the possibility of applying this method of HV insulator maintenance in our country. At the beginning of the paper, an example of HV insulator contamination and the resulting failure will be presented. This will be followed by a presentation of the experience gained with the use of this fluid worldwide, as well as in Serbia. Relevant collected data will also be presented (maximum operating voltage, insulation characteristics, and compliance with environmental standards). Specific tests that could be carried out will be proposed in order to identify insulators that require surface cleaning, which would create the conditions in Serbia for the introduction of insulator washing without disconnecting from the grid.

Keywords: HV equipment, HV insulator maintenance, types of maintenance

1. UVOD

Ustaljena je praksa u elektroenergetskim sistemima visokog i srednjeg napona da se redovne godišnje revizije („remonti"), odnosno održavanje, obavlja u unapred planiranim vremenskim intervalima. U zavisnosti od naponskog nivoa i važnosti postrojenja ti intervali održavanja se kreću od jednogodišnjih do višegodišnjih perioda. U periodu revizije, oprema se dovodi u beznaponsko stanje i pristupa se održavanju. To održavanje obuhvata i čišćenje izolatora. Ovo stvara velike probleme jer su zahtevi za kontinuiranim napajanjem električnom energijom sve veći, a često su proizvodni procesi takvi da nije moguće obezbediti beznaponsko stanje na bezbednoj udaljenosti da bi se izolatori očistili. Ovo se pogotovo odnosi na srednjenaposka postrojenja, kao i na postrojenja sa pantografskim rastavljačima. Pored ovoga, u nekim industrijskim pogonima postoji veliki uticaj aerozagađenja. Najosetljivija na ova zagađenja su postrojenja za spoljnju montažu, bez obzira da li se koriste porcelanski ili silikonski izolatori. Autori su imali priliku da se tokom posete sajmu energetske opreme u Južnoj Koreji upoznaju sa proizvodom koji se u Koreji i drugim zemljama Azije uveliko koristi. U ovom radu biće prikazana specijalna tečnost koja istovremeno ima visoka elektroizolaciona svojstva i sposobnost čišćenja prljavštine sa izolatora. Ona se nanosi na izolatore prskanjem specijalnim

priborom atestiranim za rad u blizini visokog napona. Samo sredstvo je biorazgradivo, i ne ostavlja zagađujuće ostatke. U prvom delu rada biće dat primer havarije koja je nastala kao posledica preskoka po površini zaprljanih izolatora i koja je mogla biti sprečena preventivnim korišćenjem ove tečnosti. Ako se posmatra dosadašnje iskustvo u Srbiji, održavanje izolatora obuhvata vizuelni pregled u cilju pronalaženja napuklina ili fizičkih oštećenja, periodično čišćenje i pranje i termovizijsko ispitivanje. U svetu se nivo zaprljanosti površine izolatora u pogonu, osim tremovizijskim ispitivanjem, može odrediti i ispitivanjem struje curenja i merenjem nivoa parcijalnih pražnjenja [1]. Pri tome, ispitivanje struje curenja zahteva specifične preduslove za izvođenje ispitivanja (mesto merenja struje odvoda, odnosno zemljovod mora biti jednoznačno definisan i izolovan od drugih metalnih masa), kao i vreme za detaljne analize oblika struje curenja.

2. EKSPLOZIJA ODVODNIKA PRENAPONA PROUZROKOVANA ZAPRLJANIM IZOLATOROM

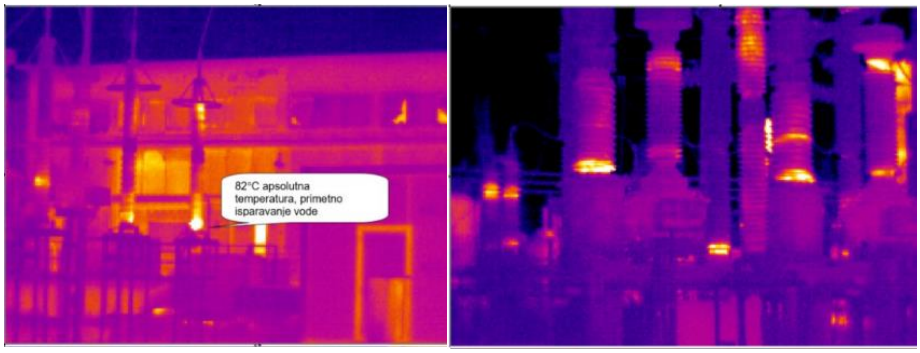
U jednom industrijskom postrojenju, na naponskom nivou 110 kV, zabeležene su tri eksplozije SiC odvodnika prenapona, koje su se dogodile u transformatorskom polju T2. Vremenski period dešavanja je tokom dve godine, a pri tome su dva odvodnika prenapona bila u fazi L_1, a jedan odvodnik prenapona je bio u fazi L_2. Podaci sa natpisne pločice jednog odvodnika su tip VOP, godina proizvodnje 2000, nazivni napon 105 kV, nazivna struja odvođenja 10 kA (8/20 μs), maksimalna struja odvođenja 100 kA (4/10 μs), nazivna učestanost 40-62 Hz, nadmorska visina 1200 m. Svi događaji su bili odvojeni, rezultovali su ispadom transformatora iz pogona i s obzirom na veliko iskustvo stručnog osoblja za održavanje u ovom objektu, a koji su dali opise dešavanja, prikupljeni podaci nisu ukazivali na direktnu vezu između pojedinih događaja. Pri tome su dva odvodnika prenapona bili u eksploataciji 20 godina, a poslednji je bio iz rezerve, uskladišten u odgovarajućim uslovima u magacinu. Od momenta kada je montiran, ovaj poslednji odvodnik je radio manje od godinu dana i on je prikazan na Slici 1.



Slika 1 – Izgled odvodnika prenapona u polju (levo) i izgled odvodnika prenapona nakon havarijskog događaja (desno)

Za analizu uzroka eksplozija obavljen je niz kompleksnih ispitivanja i ovde će biti naveden samo rezultat termovizijskog ispitivanja, koji je od značaja za razumevanje uticaja aerozagađenja izolatora. Objašnjenja i slike koje slede dobijeni su u kišnim uslovima. Pod uticajem visokog napona i nakupljenih čestica prljavštine uspostavlja se struja curenja prema donjoj prirubnici odvodnika, i tada se termovizijskom kamerom u ograničenom vremenskom intervalu od par minuta moglo uočiti zagrevanje po površini izolatora odvodnika prenapona (Slika 2 levo). Najveće pregrevanje je bilo po površini poslednja tri izolatorska rebra, najbliža

dnu, odnosno ka uzemljenom delu odvodnika. Izmerena vrednost temperature u fazi L_1 bila je 82°C, dok je temperatura površine referentnog izolatora 14°C. Razlika ove dve temperature se naziva pregrevanje, i ono postoji i na rebrima izolatora iznad opisane lokacije, tako da se može posmatrati kao da se uzemljena tačka odvodnika zapravo pomera uvis, ka sredini odvodnika. Istovremeno, pregrevanje je uočeno i pri vrhu odvodnika u ovoj fazi, na prva tri rebra najbliža visokom naponu. Na taj način, izolator odvodnika ima značajno skraćeno izolaciono rastojanje i tokom izvođenja ovog ispitivanja bila je uočena varnica po površini izolatora. Na fazama L_2 i L_3 uočena je slična pojava, ali manje izražena sa izmerenim temperaturama do 16°C. Na osnovu ovog zapažanja, termovizijskim ispitivanjem je obuhvaćena i druga oprema u postrojenju: prekidači, strujni i naponski transformatori, energetski transformator (Slika 2 desno). Uočeno je da se odmah kako je kiša počela padati, i na ovim elementima uočava zagrevanje po površini, na pojedinim mestima (većinom ispod metalne kape sa priključnim bolcnom i na prva dva-tri rebra najbliža visokom naponu), ali su temperature i površina zahvaćena grejanjem bile daleko manje zbog veličine i oblika pojedinih elemenata i nisu predstavljale opasnost za opremu. Za razliku od pregrevanja priključaka elektroenergetske opreme, gde je granična temperatura nakon koje se preporučuje hitna sanacija toplog mesta 30°C, pregrevanja na površinama elektroenergetske opreme se u zavisnosti od uzroka grejanja posebno razmatraju. Granične temperature pregrevanja mogu biti i male, npr. 2°C i ove analize i definisanje graničnih vrednosti zavise isključivo od iskustva ispitivača i vrste, odnosno tipa, ispitivane VN opreme.



Slika 2 – Zagrevanja po površini izolatora VN opreme usled aerozgađenja
(odvodnici prenapona – levo, prekidači i strujni transformatori – desno)

3. TEHNIČKI OPIS I KARAKTERISTIKE, DOSADAŠNJA ISKUSTVA

Prilikom odabira tipa izolatora za smanjenje uticaja aerozagađenja mogu se koristi sve preporuke iz dokumenata [2] – [5], kao i izbor izolatora sa produženom puznom stazom. Ali ukoliko se jave struje curenja po površini izolatora jedini način da se njihov uticaj eliminiše jeste čišćenje izolatora. Dosadašnja iskustva u Srbiji su podrazumevala isključenje napona i pranje izolatora VN opreme u beznaponskom stanju. Nažalost, to više nije moguće jednostavno obaviti, jer su isključenja razvoda praktično nemoguća zbog neprekidnosti procesa proizvodnje. U ovom slučaju bi primena tečnosti za pranje izolatora koja se može upotrebljavati bez isključenja pogona bila veoma značajna.

Proizvođač je ovu tečnost deklarisao kao „elektroizolaciono ulje“, koje se primenjuje za pranje elektroenergetske opreme najvišeg naponskog nivoa do 220 kV. Takođe, u njegovim tehničkim karakteristikama stoji da je to *Ekološki bezbedan proizvod*, bez posebnih uslova korišćenja, i za

njega je dobijen *International Green Technology Certificate*. Na Slici 3 dat je zadovoljavajući rezultat ispitivanja probojnim naponom 100 kV na rastojanju 2,5 mm (jedno ispitivanje).

Report No. : TSC2020-0122L (Copy report No.) TSC2020-0044C
Test Sample : 3) NAUCLEAN_D

Test Item	Unit	Result	Test Method
Water(Coulometric Karl Fischer Titration)	mg/kg	7 note1)	ASTM D6304-16
Breakdown voltage (25℃ 2.5mm)	kV	over than 100.0 note5)	KS C IEC 60156:2013

Slika 3 – Izvod iz ispitivanja tečnog elektroizolacionog sredstva za čišćenje

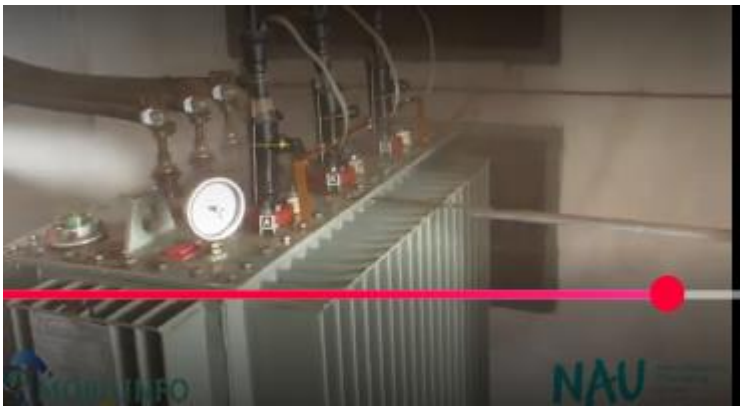
Potom je ispitivanje ponovljeno u drugoj laboratoriji, i prema standardu [5], koji predviđa šest ispitivanja, dobijena je srednja vrednost probojnog napona 92 kV. Ove vrednosti svakako prevazilaze vrednost minimalnog probojnog napona za izolaciona ulja za primenu u VN opremi prema IEC 60296:2020 (Tabela I).

Tabela I – Minimalni probojni napon tečnosti za čišćenje izolatora

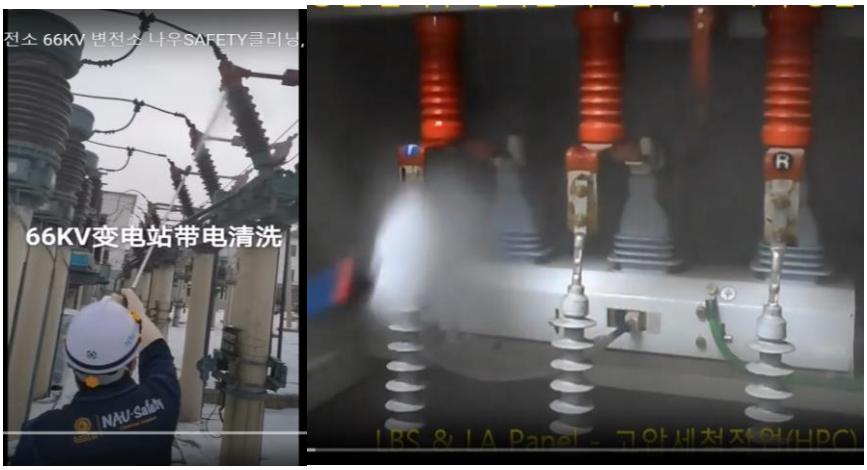
Osobina	Test metoda	Transformatorsko ulje	Niskotemperaturna ulja za prekidače
Probojni napon	IEC 60156	Min. 30 kV / 70 kV	

3.1 Iskustva iz pogona u drugim zemljama

Iskustva sa primenom elektroizolacione tečnosti su stečena u kompanijama širom Južne Koreje Takođe, prema dostupnim podacima, ova tečnost je našla primenu u Saudijskoj Arabiji, UAE, Kuvajtu, Kini, Vijetnamu i Ekvadoru. Autori nisu naišli na podatak da je tečnost primenjivana u zemljama Evropske unije (EU). U Srbiji se ovo sredstvo za čišćenje koristi u više pogona o čemu će u radu biti više reči. Na slikama koje slede prikazana su neka od iskustava iz primene ovog sredstva.



Slika 4 – Čišćenje izolatora transformatora 20/0,4 kV (mlaz je levo sa strane NN izvoda)



Slika 5 – Čišćenje izolatora rastavljača 66 kV (levo), čišćenje izolatora različite VN opreme 24 kV (desno)



Slika 6 – Čišćenje izolatora prekidača 110 kV

Na osnovu višedecenijskog iskustva u održavanju visokonaponske opreme, autori su mišljenja da je potrebno u svrhu povećanja pouzdanosti rada energetskih postrojenja uvesti i mogućnost održavanja izolatora u blizini napona i pod naponom, i to kombinovanjem više vrsta radova. Opisani postupak koji sledi može se u potpunosti primeniti za niskonaponske razvode.

1. Najpre bi se termovizijskim ispitivanjem odredili loši spojevi, odnosno „topla mesta“ u postrojenjima, prvenstveno na spoljašnjim površinama izolatora. Na ovaj način bi se odredila mesta na kojima je potrebno detaljnije čišćenje.
2. Na osnovu dosadašnjih iskustava, u niskonaponskim ormanima potrebno je usisavanje krupnijih čestica. Kod opreme visokog napona ovo nije moguće.
3. Nakon ovakve pripreme usledilo bi čišćenje elektroizolacionim sredstvom za čišćenje pod pritiskom sporohodnom industrijskom mašinom za ove namene. Maksimalni pritisak pranja je 190 bara, sa mogućnošću podešavanja jačine i širine mlaza. Mlaznica

ovog uređaja mora biti sertifikovana za rad na različitim naponskim nivoima. Bezbednosna udaljenost na kojoj stoji čovek kada koristi uređaj veća je od vrednosti definisanih u Tabeli II i ovo se odnosi na obučeno osoblje za rad sa mašinom za pranje.

4. Za razliku od ovoga, osetljiva elektroenergetska oprema bi se morala čistiti uređajem koji radi sa promenljivim niskim pritiskom. Neophodna je posebna obuka osoblja za čišćenje osetljivih elemenata u sistemu (npr. elektronske komponente).
5. Elektroizolaciono tečno sredstvo za čišćenje izolatora prirodno isparava u kontaktu sa vazduhom, ali je u slučaju zatvorenih prostora, odnosno prostora sa smanjenom ventilacijom poželjno ovaj proces ubrzati korišćenjem kompresora za uduvavanje vazduha.
6. Nakon završetka pranja ovim sredstvom trebalo bi kontrolisati izvršene radove, ponovnim termovizijskim ispitivanjem.

Za primenu ovog sredstva je neophodna dobra obuka osoblja koje ulazi u postrojenje i radi u blizini napona. Ukoliko se radi o višim naponskim nivoima, radovi definisani u tački 2 ne izvode se.

Bezbednosno rastojanje se računa prema formuli datoj u standardima IEC 60479 i EN 50110-1, kao

$$D = kU^n , \quad (1)$$

gde je:

D bezbednosno rastojanje (m);
U je napon (kV);
k je konstanta, vrednosti 0,1-0,2, u zavisnosti od standarda;
n je eksponent, vrednosti 0,5-0,7 u zavisnosti od standarda.

Tabela II – Minimalno bezbednosno rastojanje tečnosti za čišćenje izolatora

Naponski nivo (kV)	Minimalno bezbednosno rastojanje (m)
10	0,7
35	1,0
110	1,5

3.2 Iskustva iz Srbije

Što se tiče Srbije i zemalja regiona, primena ove elektroizolacione tečnosti za čišćenje je još u fazi ispitivanja. Na slikama koje slede prikazana su iskustva iz jedne TE u Srbiji, naponski nivo je 0,4 kV, u ormanima sopstvene potrošnje.



Slika 7 – Pranje i usisavanje unutrašnjosti ormana sopstvene potrošnje 0,4 kV



Slika 8 – Sušenje i izgled unutrašnjosti ormana sopstvene potrošnje 0,4 kV

S obzirom da je ova tečnost napravljena na bazi izolacionog ulja, zanimljivo je uporediti podatke iz Tabele III, izvod iz IEC 60296:2020

Tabela III – Opšta specifikacija, Tip A (inhibirana ulja visokog kvaliteta) prema IEC 60296:2020

4 – Zdravlje, bezbednost i zaštita životne sredine		
Tačka paljenja	ISO 2719	Min 135 °C

Na osnovu tabele, minimalna tačka paljenja bi trebalo da bude 135°C, a prema odgovorima koje smo dobili od proizvođača, kod ove elektroizolacione tečnosti minimalna tačka paljenja je 230°C.

S obzirom na to da nije poznat detaljan sastav elektroizolacione tečnosti za čišćenje autori su kontaktirali proizvođača pitanjem da li je upotreba ovog proizvoda ekološki bezbedna, odnosno postoji li neka referentna EU norma? Ovde prenosimo odgovor koji nam je dostavljen.

> „Tečnost je u skladu sa *OECD Guideline 301 F (Ready Biodegradability: Manometric Respirometry Test*), jednim od EU dokumenta koji se odnosi na biorazgradljivost. U ovom slučaju ona iznosi 76% što zadovoljava standard od minimalno 60% biorazgradljivosti."

Što se posebnih mera opreza u radu sa ovim proizvodom tiče, napomenuto je da u slučaju da se proguta ili inhalira, mogu nastupiti teže posledice usled trovanja, te je obavezno obratiti se lekaru. Takođe se napominje da tečnost ne izaziva požar, ali može učestvovati u gorenju, shodno vrednosti tačke paljenja, koja je dosta iznad minimalne vrednosti definisane za izolaciona ulja.

4 ZAKLJUČAK

Upotreba elektroizolacione tečnosti za čišćenje površina izolatora elektroenergetske opreme svakako bi mogla doprineti povećanju pouzdanosti rada VN opreme i smanjenju broja planiranih isključenja pogona.

Trenutno, u našoj zemlji nedostaje regulativa koja bi jasno definisala uslove i pripremne radnje za upotrebu elektroizolacionih tečnosti u svrhu čišćenja postrojenja pod naponom. Ovo se prvenstveno odnosi na proveru izolacionih svojstva pre same upotrebe tečnosti, na licu mesta. Takođe bi se morale definisati i bezbednosne mere, minimalna rastojanja za sve naponske nivoe i lična zaštitna sredstva, koja su neophodna za stručno osoblje koje radi tokom čišćenja VN opreme pod naponom. U sadržaju ovih dokumenata bi se morale definisati obavezna provera hemijskog sastava tečnosti, koji sad nedostaje, i prateće mere zaštite životne sredine. Ovakva regulativa bi predstavljala zamah i budućim vrstama održavanja koje bi se mogle obavljati na opremi pod naponom (rad iz helikoptera na dalekovodima, pa čak i zamena delova VN opreme pod naponom – sanacija kvarova na kablovima bez isključenja i sl.).
S obzirom da u našoj zemlji postoji nekoliko naponskih nivoa, logičan put za uvođenje ovakvog načina održavanja bio bi najpre primena na naponskim nivoima 10 kV, 20 kV odnosno 35 kV, gde bi se steklo značajno iskustvo, a posle izvesnog perioda i upotreba na naponskom nivou 110 kV.

LITERATURA

[1] Maraaba, Al-Soufi, Ssennoga i dr,. Energies Open Acess Journals, Vol. 15, 2022, ‚Contamination Level Monitoring Techniques for High Voltage Insulators, https://doi.org/10.3390/en15207656
[2] SRPS EN IEC 60071-1:2020, Insulation Co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules
[3] IEC TS 60815-1:2025 Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 1: Definitions, information and general principles

[4] IEC TS 60815-2:2025 Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 2: Ceramic and glass insulators for a.c. systems
[5] Studija 310217 Istraživanje ponašanja izolacionih konstrukcija na zagađenim lokacijama Elektroprivrede Srbije – IV faza, Institut Nikola Tesla, 2002
[6] IEC 60156: 2025-1 Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method