

Primjena kompozitnih izolatora za nadzemne vodove

Kučan, Erik

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:502565>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**PRIMJENA KOMPOZITNIH IZOLATORA ZA NADZEMNE
VODOVE**

Rijeka, studeni 2024.

Erik Kućan

0069084114

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**PRIMJENA KOMPOZITNIH IZOLATORA ZA NADZEMNE
VODOVE**

Mentor: prof. dr. sc. Vitomir Komen

Rijeka, studeni 2024.

Erik Kućan

0069084114

Rijeka, 15.03.2024.

Zavod: Zavod za elektroenergetiku
Predmet: Prijenos i distribucija električne energije

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Erik Kućan (0069084114)**
Studij: Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike (1300)
Modul: Elektroenergetika (1332)

Zadatak: **PRIMJENA KOMPOZITNIH IZOLATORA ZA NADZEMNE VODOVE / Experience with and Application Guide for Composite Line Insulators**

Opis zadatka:

Tehnologija kompozitnih izolatora za VN nadzemne vodove. Mehanički i električni aspekti primjene kompozitnih izolatora na nadzemnim vodovima. Zahtjevi na konstrukciju kompozitnih izolatora. Utjecaj onečišćenja površine kompozitnih izolatora na karakteristike. operativno rukovanje sa kompozitnim izolatorima. Primjeri primjene i iskustva.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:
prof. dr. sc. Vitomir Komen

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:
prof. dr. sc. Dubravko Franković

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

IZJAVA

Sukladno članku 8. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod mentorstvom prof. dr. sc. Vitomira Komena sa naslovom „Primjena kompozitnih izolatora za nadzemne vodove“.

Rijeka, studeni 2024.

Ime i prezime

Zahvala

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Vitomiru Komenu na mentorstvu te prenesenom znanju tokom studiranja. Isto tako zahvaljujem se svim profesorima i asistentima Tehničkog fakulteta na prenesenom znanju. Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima na podršci i brigi tokom studiranja, a posebno mami koja se svih šest godina mog studiranja brinula i spremala me za put u Rijeku, vozila na kolodvor, te me čekala kad sam se vraćao kući.

Hvala Vam

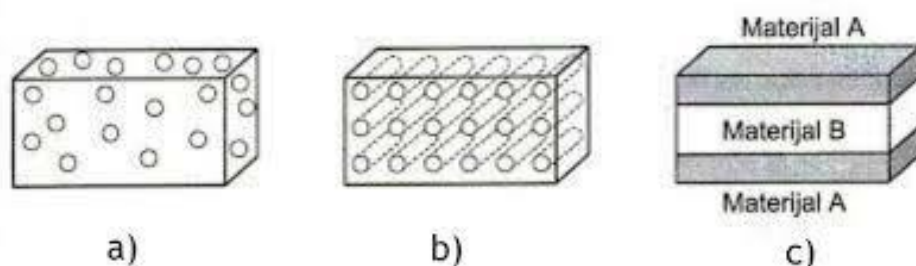
Sadržaj

1. UVOD	8
2. IZOLATORI ZA NADZEMNE VODOVE	10
2.1. Materijali za izradu izolatora za nadzemne vodove	10
2.2. Vrste proboja izolatora	11
2.2.1. Toplinski proboj	12
2.2.2. Unutarnja parcijalna izbijanja	13
2.2.3. Čisto električni proboj	14
2.2.4. Mehanički i elektromehanički proboj	14
2.2.5. Elektrokemijski proboj	15
3. VRSTE IZOLATORA	16
3.1. Potporni izolatori	16
3.2. Ovjesni izolatori	18
4. TEHNOLOGIJA KOMPOZITNI IZOLATORI ZA NADZEMNE VODOVE	21
4.1. Konstrukcija kompozitnih izolatora	21
4.2. Punila za kompozitne izolatore	22
4.2.1. Poboljšanje električnih svojstva punilom	23
4.2.2. Poboljšanje mehaničkih svojstva punilom	25
5. STARENJE KOMPOZITNIH IZOLATORA	26
5.1. Mehanizmi starenja kompozitnih izolatora	26
5.2. Električko starenje	27
5.4. Termičko starenje	28
5.3. Mehaničko starenje	29
5.4. Utjecaj vlage i zagađenja na kompozitni izolator	29
5.5. Starenje kompozitnih izolatora izazvano UV zračenjem	34
5.6. Efekt korone	37
5.7. Biološko starenje kompozitnih izolatora	40
6. USPOREDBA KOMPOZITNIH I KONVENCIONALNIH IZOLATORA	43
7. PRIMJENA I ISKUSTVA SA KOMPOZITNIM IZOLATORIMA	47
7.1. Primjena kompozitnih izolatora	47
7.2. Izazovi u primjeni kompozitnih izolatora	47
8. ZAKLJUČAK	49
LITERATURA	51
SAŽETAK	53
SUMARY	53

POPIS SLIKA.....	54
POPIS TABLICA.....	55

1.UVOD

Kompozitni materijali su materijali koji se sastoje od dvaju ili više osnovnih (jednostavnih) materijala. Vlakna i matrice čine slojeve koji su međusobno povezani i tvore kompozit. Vlakna su osnovni nosivi element i daje čvrstoću kompozitu, a matrica drži vlakna zajedno i ima važnu funkciju u prijenosu opterećenja na vlakno, daje vanjsku formu kompozitu te definira ponašanje kompozita pod utjecajem vremenskih uvjeta. Najčešće se za vlakna koriste ugljična, staklena, aramidna i metalna vlakna, dok se za matrice koriste polimeri, ugljične matrice, metali i sl.

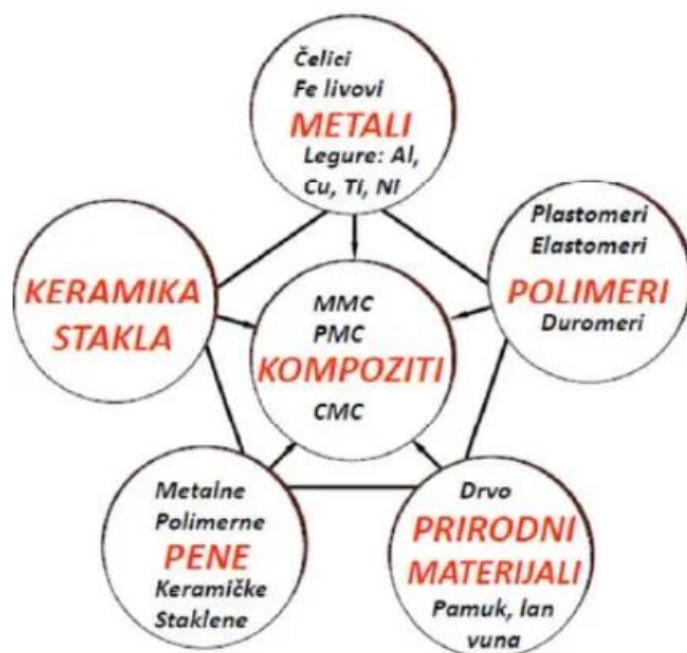


Slika 1.1. Strukture kompozitnih materijala a)kompozit ojačan česticama, b)kompozit ojačan vlaknima, c)slojeviti kompozit[1]

Kompozitni materijali nalaze se svuda oko nas, koriste se u raznim granama od automobilske industrije, avio industrije, svemirske tehnologije, elektrotehnike, pa sve do jednostavnih predmeta u kućanstvu.

Upotreba kompozitnih materijala seže duboko u prošlost. Ljudi su kombinirali nekoliko materijala da bi dobili novi materijal koji bi imao najbolje karakteristike svakog korištenog materijala.

Npr. u prošlosti su ljudi prilikom gradnje kuća koristili glinu, koju su miješali sa slamom koja je služila da bi se ojačala i povezala glinena masa. Čamci pleteni od trske impregnirali su se s katranom da bi se postigla vodo nepropusnost, a u bližoj prošlosti tkanina se impregnirala lanenim uljem i takva se koristila za izradu kabanica i sl.



Slika 1.2. Podjela materijala[2]

U elektrotehnici kompozitni materijali koriste se za izradu elektrotehničkih komponenti koje zahtijevaju visoku čvrstoću, otpornost na visoke temperature, kao i specifična električna svojstva poput izolacije.

Primjena kompozitnih izolatora u elektrotehnici jako je rasprostranjena, od kablova i izolatora pa sve do baterija i električnih uređaja gdje se koriste zbog smanjenja mase, poboljšanja efikasnosti i povećanju otpornosti na koroziju. Napredak u razvoju kompozitnih materijala omogućava integraciju inovativnih rješenja kao što su nano kompoziti i hibridni materijali, što dodatno povećava njihovu primjenu u elektrotehnici.

2. IZOLATORI ZA NADZEMNE VODOVE

Izolatori su komponente koje omogućuju izolaciju između vodiča i stupova, odnosno između vodiča ili nekih drugih elemenata elektroenergetskog sustava. Nadalje, izolatori se koriste da bi držali vodiče i prenosili težinu i naprezanje na vodove, tradicionalno se proizvode od materijala kao što su porculan, steatit, staklo i razne vrste sintetičkih materijala (polimeri).

2.1. Materijali za izradu izolatora za nadzemne vodove

Porculan je smjesa kaolina (50%), kvarca (25%) i glinenca (25%). Glinenac ima dobru dielektričnu čvrstoću na električni proboj, dok kvarc ima veliku mehaničku čvrstoću, a kaolin ima veliku otpornost na temperaturne promjene. Porculan ima gustoću od $2,5 \text{ g/cm}^2$, mehanička čvrstoća na zatezanje iznosi 40-80 MPa, a mehanička čvrstoća na pritisak iznosi 400-800MPa. Dielektrična čvrstoća iznosi 300-400 kV/cm, dok je relativna dielektrična konstanta $\epsilon_r = 6-7$, a specifični električni otpor $\rho = 10^{11} \Omega\text{m}$. Maksimalna radna temperatura je 160°C , a faktor dielektričnih gubitaka pri frekvenciji od 50Hz je $\text{tg}\varphi = (1-3) \cdot 10^{-2}$. Prilikom proizvodnje javljaju se problemi zbog velike volumenske kontrakcije (10-20%) koje se javljaju prilikom procesa sušenja i pečenja porculanske mase. Površina pečenog porculanskog izolatora je hrapava, pa zadržava nečistoće i vlagu što dodatno povećava površinski otpor izolatora, te se zbog toga površina porculanskog izolatora mora glazirati zapečenim slojem premaza od stakla debljine 0,2-0,3mm smeđe ili tamnozeleno boje. Glazura pridonosi bržem isparavanju vlage, omogućava vidljivost mehaničkih oštećenja, štiti porculan od prodora vlage, otporna je na kemijski agresivne materijale, otporna na puzne površinske struje radi zagađivanja nečistoćama ili posolice i otporna je na električni luk.

Steatit je keramički materijal koji se dobiva smjesom kaolina, kvarca i magnezijevog silikata, takav izolator ima veliku mehaničku čvrstoću. Izolatori od steatita nemaju dodatnu glazuru, a obrađuju se brušenjem. Koriste se kod pogonskih uvjeta sa velikim mehaničkim naprezanjima (provodni izolatori, izolatori za prekidače i rastavljače).

Staklo ima veliku primjenu na visokonaponskim vodovima zato što imaju bolja električna i mehanička svojstva od porculanskih izolatora. Staklo se često koristi kao izolator i zbog jednostavnog procesa proizvodnje. Formirani stakleni izolatori se u još zagrijanom stanju posebnim postupkom kale strujom hladnog zraka, što im daje veliku mehaničku čvrstoću i veliku otpornost na temperaturne promjene. Prednost staklenih izolatora u odnosu na porculanske je

vidljivo oštećenje u slučaju proboja (raspadanje izolatora), pa se u tom slučaju oštećenje može vidjeti sa velike udaljenosti dok je kod porculanskog izolatora potrebno pregledati izolator iz blizine. Gustoća stakla je $2,5 \text{ g/cm}^2$, mehanička čvrstoća na zatezanje iznosi 100-120 MPa, a mehanička čvrstoća na pritisak iznosi 700 MPa. Dielektrična čvrstoća je nešto veća od dielektrične čvrstoće porculana, dok je relativna dielektrična konstanta $\epsilon_r = 7$, a specifični električni otpor $\rho = 10^{11} \Omega\text{m}$. Maksimalna radna temperatura je 110°C , a faktor dielektričnih gubitaka pri frekvenciji od 50Hz je $\text{tg}\varphi = 6 \cdot 10^{-2}$.

Kompozitni materijali (polimeri) koriste se za nadzemne vodove, a sastoje se od fiberglasa koji ima veliku mehaničku čvrstoću i polimerne mase(etilensko-propilenska guma i silikonska guma) kojom je presvučen fiberglas za zaštitu od atmosferskih utjecaja. Prednosti polimernih materijala je velika mehanička čvrstoća, dobre električne karakteristike i mala masa. Polimeri imaju gustoću od $1,15 \text{ g/cm}^2$, dielektrična čvrstoća iznosi 160-200 kV/cm, dok je relativna dielektrična konstanta $\epsilon_r = 4$, a specifični električni otpor $\rho = 10^{12} \Omega\text{m}$. Maksimalna radna temperatura je 350°C , a faktor dielektričnih gubitaka pri frekvenciji od 50Hz je $\text{tg}\varphi = (2-3) \cdot 10^{-2}$. Najčešći materijali koji se koriste za proizvodnju izolatora su: etilensko-propilenska guma, silikonska guma, PTFE (politetrafluorethylen) i epoksidne smole.

Zahtjevi koji se postavljaju pred izolatore su:

- mehanička čvrstoća
- električna čvrstoća na proboj
- električna čvrstoća na preskok
- otpornost na atmosferske utjecaje
- otpornost na promjenu temperature
- životni vijek
- ekonomičnost i lako održavanje

2.2.Vrste proboja izolatora

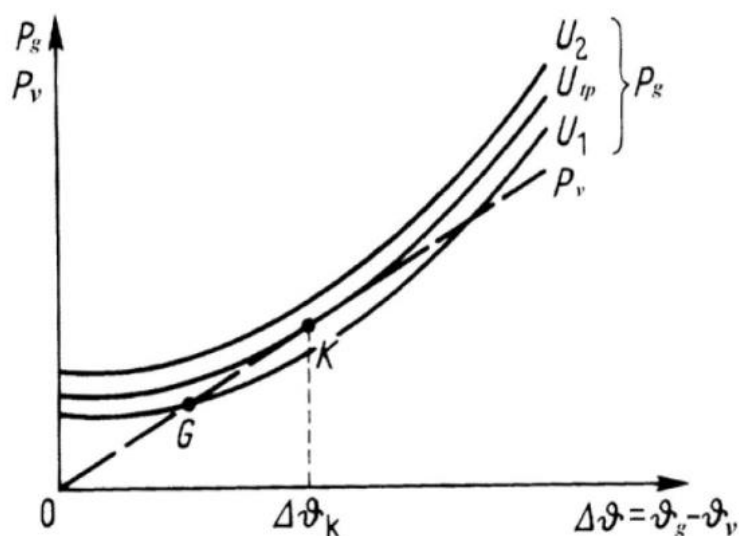
Do pojave proboja izolatora dolazi zbog onečišćenja, šupljina koje nastaju tijekom pogona ili prilikom proizvodnje i zbog zagrijavanja koje je uzrokovano električnim poljem.

Vrste proboja u izolatorima:

- toplinski proboj
- unutarnja parcijalna izbijanja
- čisto električni proboj
- mehanički proboj
- elektrokemijski proboj

2.2.1. Toplinski proboj

Izolatori pod naponom zagrijavaju se zbog dielektričnih gubitaka ili zbog zagrijavanja strujom uslijed male vodljivosti. Izolatoru se konstantno dovodi snaga zagrijavanja P_g koja zagrijava izolator na unutarnju temperaturu ϑ_g . Uslijed razlike temperatura $\Delta\vartheta = \vartheta_g - \vartheta_v$ izolator se hladi, a snaga koja se odvodi označena je sa P_v .



Slika 2.1. Krivulja zagrijavanja izolatora[4]

Kod krivulje snage zagrijavanja i snage hlađenja, P_g nije linearno ovisan sa $\Delta\vartheta$, dok je P_v linearno ovisan sa $\Delta\vartheta$. U slučaju da je $P_g = P_v$ tada se izolator ne može više zagrijati. Ako je $P_g = P_v$ tada nastupi stanje ravnoteže pri naponu U_1 (točka G). Ako se napon poveća na vrijednost kritičnog temperaturnog napona U_{tp} , tada krivulja hlađenja snage P_v dodiruje pravac grijanja snagom P_v u točki K, te to nazivamo stanjem labilne ravnoteže. Ako se i dalje povećava napon na vrijednost U_2

tada je dovedena snaga veća od odvedene, te će unutarnja temperatura ϑ uzrokovati uništenje izolatora (termički proboj). Toplinski probojni napon izračunava se prema relaciji:

$$U = 0.748 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{\sigma f \epsilon_0 \epsilon_{ro}}} \cdot e^{-\frac{\sigma(\vartheta - \vartheta_0)}{2}} \quad (2.1)$$

Pri čemu je:

λ – toplinska vodljivost

σ – temperaturni koeficijent

f – frekvencija

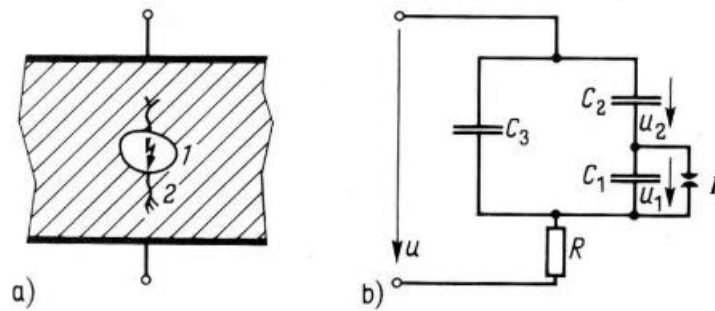
ϵ_{ro} – relativni faktor dielektričnih gubitaka

ϵ_0 – dielektrična konstanta vakuuma

ϑ – temperatura

2.2.2. Unutarnja parcijalna izbijanja

Parcijalna izbijanja možemo definirati kao proboj odnosno preskok dijela puta između dvije metalne elektrode. Intenzitet parcijalnih izbijanja ovisi o dužini puta koja je bila premoštena. Parcijalna izbijanja nastaju u šupljinama (mjehurići zraka) izolatora koje su nastale u proizvodnji ili u pogonu. Parcijalna izbijanja u šupljinama izolatora pri narinutom naponu uzrokuju oštećenja površine u kojima je šupljina. Kroz duži vremenski period kanali parcijalnih izbijanja se proširuju prema elektrodama i dovode do potpunog proboja. U šupljinama je električno polje veće nego u ostatku izolatora pa su ta mjesta bolje podložna proboju. Parcijalna izbijanja najčešće ne izazivaju oštećenja, ali sa vremenom izazivaju postepenu eroziju, pregrijavanja, kemijske reakcije i sl.



Slika 2.2. Prikaz šupljine a) kanal parcijalnih izbijanja b) nadomjesna shema parcijalnih izbijanja[4]

Na slici 2.2. prikazana je nadomjesna shema na kojoj C_1 označuje kapacitet na mjestu šupljine, C_2 predstavlja kapacitet između šupljine i jedne elektrode, a C_3 označava kapacitet ispitnog objekta, dok vanjski otpor R služi za mjerenje. Ako se na nadomjesni model narine napon u tada će se on rastaviti na u_2 koji će biti na kondenzatoru C_2 i na u_1 koji će biti na kondenzatoru C_1 . Kada u_1 dosegne vrijednost probojnog napona U , tada će se preko iskrišta izbiti kapacitet C_1 , a C_2 će se nabiti na trenutačnu vrijednost ukupnog napona.

2.2.3. Čisto električni proboj

Karakteristika čisto električnog proboja je jako brzi razvoj pojave koja traje od 10^{-8} do 10^{-7} sekundi. Ako je električno polje izrazito jako, tada dolazi do elektronske lavine procesom udarne ionizacije. Probój nastaje pri djelovanju visokih atmosferskih ili sklopnih prenapona.

2.2.4. Mehanički i elektromehanički probój

Mehanički probój nastaje pri visokom naponu kod kojeg trajno naprezanje izolacije izazivaju elektrostatičke sile električnog polja. U slučaju kritične deformacije nastupi mehanički probój.

Elektromehanički probój nastaje trajnim mehaničkim naprezanjima koja nastaju u šupljinama izolacije kao posljedica toplinskog širenja izazvanog parcijalnim izbijanjima, takva mehanička naprezanja izazivaju mikroskopske pukotine koje se s vremenom šire i izazivaju mehaničko uništenje izolacije.

2.2.5. Elektrokemijski proboj

Nastaje uslijed dugotrajnih povećanja temperature i visoke vlažnosti u izolatoru što uzrokuje elektrokemijske reakcije. Elektrokemijske reakcije uzrokuju pojave smanjenja električnog otpora izolatora i toplinsko starenje izolacije.

3. VRSTE IZOLATORA

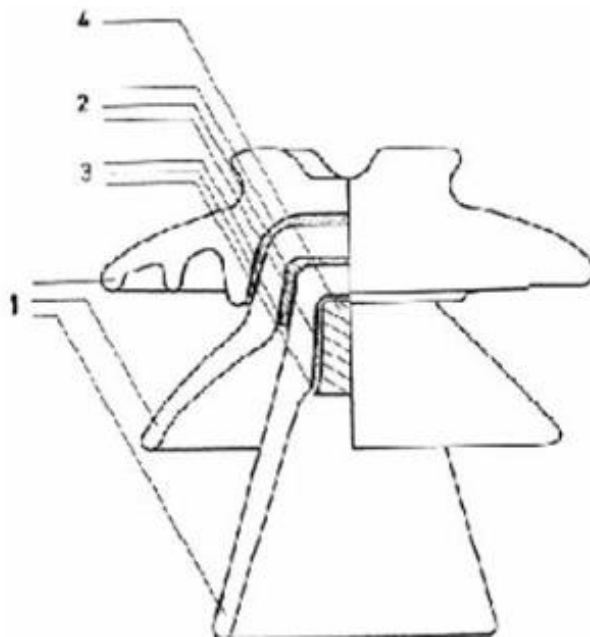
Izolatori za nadzemne vodove mogu se podijeliti na:

- potporne izolatore
- ovjesne izolatore

3.1. Potporni izolatori

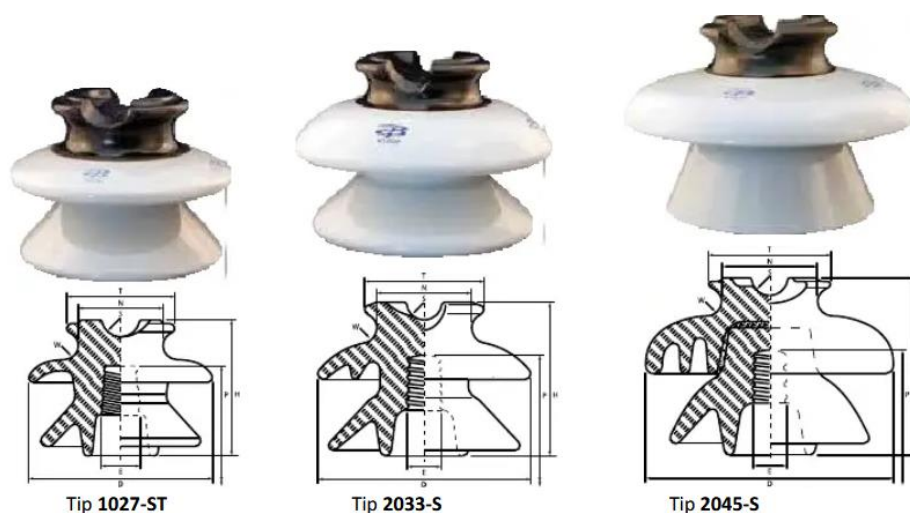
Potporni izolatori prvenstveno se koriste se za nošenje golih vodiča kod nadzemnih vodova i u aparatima srednjeg i niskog napona. Potporni izolatori se izrađuju prema visini pogonskog napona, dužini strujne staze, podnosivom udarnom naponu i podnosivom udarnom naponu u kišnim uvjetima i prema prijelomnoj sili. Prema prijelomnoj sili mogu se podijeliti na:

- izolatore s prijelomnom silom od 375kP
- izolatore s prijelomnom silom od 750kP
- izolatori s prijelomnom silom od 1250Kp



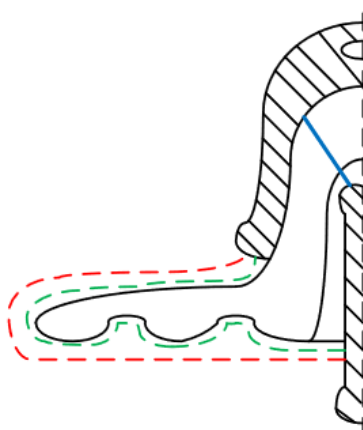
Slika 3.1. Prikaz potpornog izolatora sa dijelovima 1)izolatorska masa, 2) i 3) slojevi pijeska i cementne mase, 4) mjesto montaže s nosačem izolatora na stupu[5]

Ako se izolator postavlja u zagađenim atmosferama kao što su industrijske zone (pogotovo grane industrije koje ispuštaju čestice u atmosferu) ili blizu mora, tada se koriste izolatori s duljim izvodima kako bi se produljila klizna staza izolatora koja je kritična zbog nakupljanja čestica prašine ili posolice.



Slika 3.2. Razne izvedbe potpornih izolatora[3]

Za dimenzioniranje izolatora važne su sljedeće veličine: preskočna staza, strujna klizna staza i probojna staza. Preskočna staza definira se kao najkraća udaljenost kroz zrak između dva metalna dijela (crveno). Strujna klizna staza definira se kao najkraća udaljenost između metalnih dijelova po površini vodiča (zelena), probojna staza je najkraća udaljenost između metalnih dijelova kroz samo tijelo izolatora (plava).



Slika 3.3. Prikaz staza koje su važne za dimenzioniranje izolatora[5]

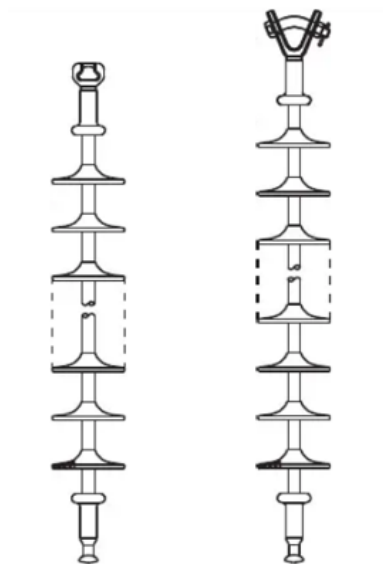
3.2. Ovjesni izolatori

Prema načinu kako nose izolatore ovjesni izolatori mogu se podijeliti na:

- lančane izolatore
- štapne izolatore

Ovjesni izolatori koriste se na visokonaponskim vodovima. Vodič koji nose nalazi se sa donje strane izolatora dok se gornja strana montira na stup. Prednost ovjesnih izolatora je što štite vodiče od udara groma zato što se vodič montira ispod izolatora.

Lančani ovjesni izolatori sastoje se od više ovjesnih izolatora (članaka) spojenih u seriju, odgovarajuća električna čvrstoća dobije se spajanjem više lanaca u paralelu. Takvi izolatori nisu opterećeni na savijanje već samo vlačno. U slučaju da dođe do kvara na izolatoru ostali članci spojeni u seriju će dati dovoljnu električnu čvrstoću do zamjene oštećenog izolatora. Prednost lančanih izolatora je da se prilikom kvara mijenja samo oštećeni članak pa nije potrebno mijenjati cijeli lančani izolator.

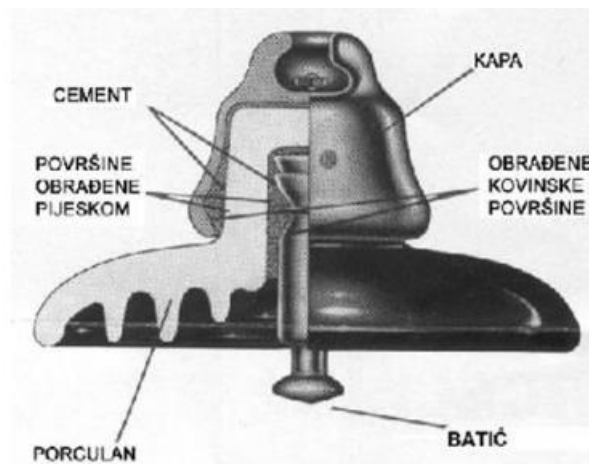


Slika 3.4. Lančani izolatori[3]

Lančani izolatori dijele se na:

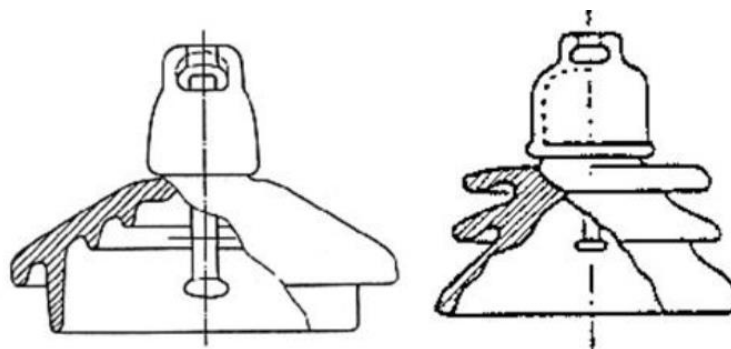
- kapaste izolatore
- masivne izolatore

Kapasti izolatori sastoje se od porculanskog ili staklenog tijela u koje je usađen batić, a odozdo je nasadena kapa s gnijezdom u koje se utakne batić slijedećeg članka. Prednost kapastih izolatora je jednostavna tehnologija proizvodnje i veza između batića i kape koja se ne prekine prilikom proboja članka, pa ne dolazi do pada vodiča.



Slika 3.5. Dijelovi porculanskog kapastog izolatora[5]

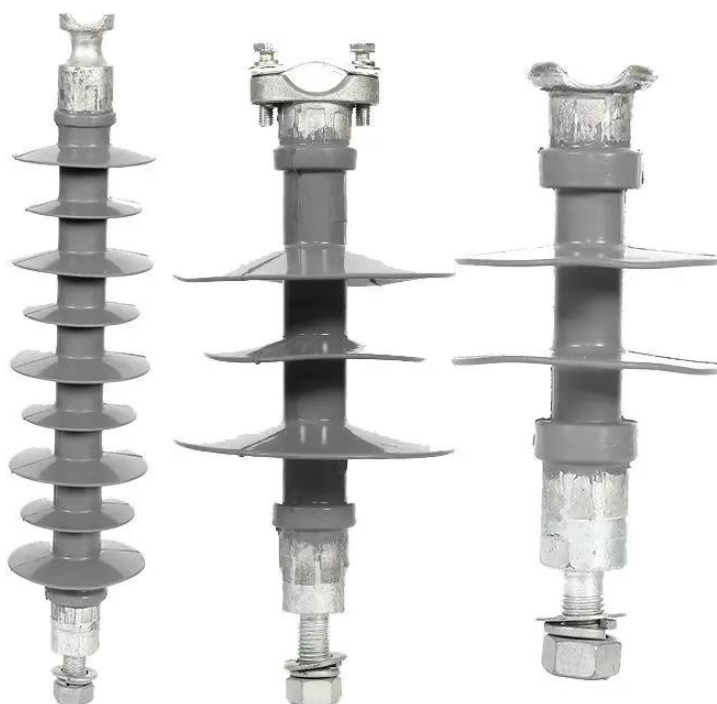
Postoje različite vrste kapastih izolatora koji su namijenjeni za različite uvjete rada. Na primjer u krajevima s dugotrajnim maglama koriste se magleni izolatori, a blizu industrijskog postrojenja koje ispušta čestice prašine koriste se kapasti izolatori za zagađenu atmosferu. Takvi izolatori imaju izvedena rebra kako bi se produljila staza puzajući struja.



Slika 3.6. Magleni kapasti izolatori (lijevo) i izolator za zagađenu atmosferu(desno)[5]

Masivni izolatori dizajnirani su tako da imaju dugu površinsku kliznu stazu kako bi se osigurala visoka električna otpornost na preskok. Na taj način se sprječava pojava puzajućih struja, koje bi posebno u slučajevima kada je izolator onečišćen i vlažan, mogle dovesti do preskoka.

Nadalje, široku upotrebu pronašli su i štapni izolatori. Takvi izolatori sastoje se od jednog dijela što im je i najveći nedostatak jer prilikom proboja mora se zamijeniti cijeli izolator. Štapni izolatori najčešće se izrađuju od kompozitnih materijala o čemu će se više govoriti u nastavku.

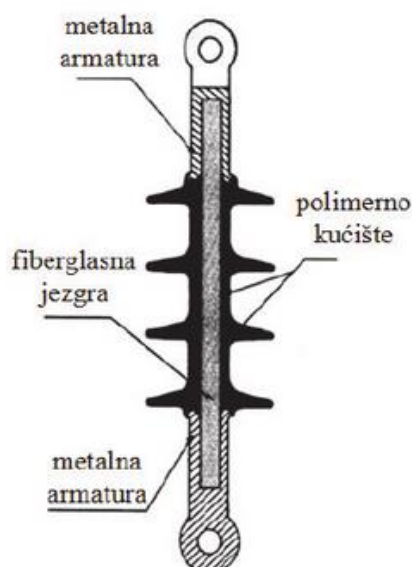


Slika 3.7. Štapni kompozitni izolatori[21]

4. TEHNOLOGIJA KOMPOZITNIH IZOLATORA ZA NADZEMNE VODOVE

4.1. Konstrukcija kompozitnih izolatora

Kompozitni izolatori poznati kao polimerni izolatori su izolatori koji se koriste u visokonaponskim vodovima i postrojenjima. Kompozitni izolatori uvedeni su 1960-ih godina i predstavljali su alternativu keramičkim i staklenim izolatorima. Sastoje se od jezgre izrađene od šipke ili cijevi od fiberglasa ili karbonskih vlakana, vezanih smolom vrlo visoke čvrstoće i vanjskog omotača od izolacijskog polimernog materijala.



Slika 4.1. Konstrukcija kompozitnog izolatora[6]

Najčešće korišteni polimerni materijali za vanjski sloj su: silikonska guma (SiR), etilen-propilen-dien-monomer (EPDM), epoksidne smole i etilen-vinil-acetat (EVA). Najčešće se upotrebljava silikonska guma zbog svojih izvrsnih dielektričnih svojstva, otpornosti na vremenske uvjete i sposobnosti obnavljanja hidrofobnosti. Često se koristi i etilen-propilen-dien-monomer (EPDM) zbog svoje velike mehaničke čvrstoće, manje cijene od silikonske gume i visoke otpornosti na eroziju.

Problem kod polimernih izolatora je životni vijek. Polimerni materijali podložni su starenju tijekom dugog izlaganja vremenskim uvjetima, što dovodi do narušavanja mehaničkih, toplinskih i dielektričnih svojstva što u konačnici dovodi do kvara na izolatoru. U svrhu poboljšanja otpornosti na starenje polimernim materijalima dodaju se punila. Osim poboljšanja otpornosti na starenje mogu se poboljšati električna, toplinska i mehanička svojstva izolatora.

4.2. Punila za kompozitne izolatore

Kao što je na početku spomenuto kompozitni materijali sastoje se od dva materijala koji međusobno tvore kompozit, a novonastali kompozit poprima svojstva oba materijala od kojih se sastoji kompozit. U elektrotehnici najčešće se koristi polimer kao osnovni materijal, dok drugi sastojci uključuju punila.

Punila su tvari raspodijeljene unutar polimernog materijala s ciljem da se modificiraju njihova svojstva tijekom prerade i poboljšaju svojstva gotovog proizvoda. Da bi se polimernom materijalu poboljšala svojstva dodaju se punila, najčešće oksidi kao što su silicijev dioksid (SiO_2), titanijev oksid (TiO_2), aluminijev trioksid (Al_2O_3), cinkov oksid (ZnO), magnezijev oksid (MgO). Nadalje, često se koriste i nitridi kao što su borov nitrid (BN), aluminijev nitrid (AlN), silicijev nitrid (Si_3N_4), te se još koriste i karbidi kao što je silicijev karbid (SiC).

Važno svojstvo polimernih izolacijskih materijala je toplinska vodljivost. Izolacijski materijali trebali bi imati čim veću toplinsku vodljivost u suprotnom može doći do brže degradacije izolacijskog materijala na visokim temperaturama zbog sporog odvođenja topline. Da bi se povećala toplinska vodljivost izolatora dodaju se mikro punila s visokom toplinskom vodljivošću kao što je borov nitrid (BN), aluminijev nitrid (AlN) i silicijev nitrid (Si_3N_4).

Tablica 4.1. Tablica toplinske vodljivosti, relativne permeabilnosti i gustoće pojedinih materijala[8]

Materijal	Toplinska vodljivost W/mK	Relativna permeabilnost	Gustoća g/cm³
silikonska guma (SiR)	0,109	4	1,84

etilen-propilen-dien-monomer (EPDM)	0,25	3,3	1,53
borov nitrid (BN)	29-300	4,3	2,25
aluminijev nitrid (AlN)	150-220	9,2	3,26
silicijev nitrid (Si ₃ N ₄)	86-120	7,5-8,3	3,17
silicijev karbid (SiC)	85	6,5-10	3,21
titanijev oksid (TiO ₂)	63,7	-	4,26
aluminijev trioksid (Al ₂ O ₃)	38-42	9	4
Aluminijev trihidrat (ATH)	25-40	-	2,42
silicijev dioksid (SiO ₂)	3	3,9	2,6
Epoksidne smole	0,17-0,21	3,6	1,16

4.2.1. Pобољшanje električnih svojstva punilom

Dielektrična čvrstoća je otpornost materijala prema električnom probuju pod utjecajem električnog polja. Dodavanjem punila polimernim materijalima može se značajno poboljšati dielektrična čvrstoća. Polimerni izolatori često su izloženi akumuliranju naboja i lokalnih električnih pražnjenja što dovodi do degradacije materijala i naposljetku do kvara. Nano punila su nano čestice poput nano-silicija, nano-cinkovog oksida (ZnO) ili nano-aluminijevog nitrída (AlN). Koriste se zbog svojih iznimno malih dimenzija, što omogućuje bolje vezivanje s polimernom matricom. To rezultira smanjenjem nakupljanja naboja, povećanjem otpornosti na lokalna električna pražnjenja te značajnim povećanjem dielektrične čvrstoće.

Mehanizmi poboljšanja:

- Sprječavaju nakupljanja naboja: punila djeluju kao barijera koja sprječava nakupljanje slobodnih naboja u polimernoj matrici. Nano punila učinkovito smanjuju mobilnost elektrona, što smanjuje mogućnost električnog probuja.

- Poboljšana distribucija električnog polja: punila pomažu u ravnomjernoj raspodjeli električnog polja po cijeloj površini i unutar volumena izolatora, čime se smanjuju lokalni vrhovi koji mogu uzrokovati proboj.
- Međufazne interakcije: kod nano punila dolazi do boljih interakcija između polimera i punila zbog veće specifične površine nano čestica. To rezultira formiranjem stabilnijih struktura koje sprječavaju stvaranje i širenje električnih mikro pražnjenja.

Važan korak kod primjene punila u polimernim izolatorima je odrediti optimalnu koncentraciju punila koja će rezultirati maksimalnim poboljšanjem svojstava. Ovaj fenomen poznat je kao dielektrična perkolacija. Kada koncentracija punila u polimernom materijalu dosegne određenu točku, obično između 5-10% za nano punila, dolazi do maksimalnog poboljšanja dielektrične čvrstoće. Nakon tog praga, prekomjerno dodavanje punila može dovesti do smanjenja čvrstoće zbog stvaranja provodnih putova kroz materijal.

Kod nano-silicija (SiO_2) dodanog u epoksidnu smolu, postignuta je maksimalna dielektrična čvrstoća pri koncentraciji od 5% težine. S druge strane, nano cinkov oksid (ZnO) pri koncentraciji manjoj od 1% pokazao je značajno povećanje dielektrične čvrstoće pod izmjeničnim naponom.

Tablica 4.2. Povećanje dielektrične čvrstoće polimerne matrice dodavanjem različitih punila[8]

Fillers	Filler (s) Weight Fraction (%)	Filler (s) Volume Fraction (%)	Particle Size		Material			Dielectric Strength (kV/mm)
			μm	nm	SiR	Epoxy	EPDM	
BN	10	5.41	-	70	-	✓	-	230.6
Al_2O_3	5	1.50	-	7	-	✓	-	212
micro-AlN/ nano-AlN	20/3	9.6	10	50	-	✓	-	168.1
Al_2O_3	60	30.32	10	-	-	✓	-	90.3
Al_2O_3	1	0.3	-	40	-	✓	-	59.9
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{BN}$	68/10	52	10/4	-	-	✓	-	40
Al_2O_3	10	3.22	-	✓	-	✓	-	25.5
CaCO_3	10	4.54	-	✓	-	✓	-	24.3
TiO_2	10	2.93	-	✓	-	✓	-	19.3
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{BN}$	20/20	29.9	1/10	-	✓	-	-	93
micro- Si_3N_4 / nano- Al_2O_3	80/7	30	3	20	✓	-	-	84.5
BN	12	8.6	-	✓	✓	-	-	25.5
micro-ATH/ nano- SiO_2	20/6	20.18	5	12	✓	-	-	24.3
micro- Al_2O_3 / nano- SiO_2	20/4	17.38	-	-	✓	-	-	23.9
micro-BN/ nano-BN	17.5/2.5	26.5	5	50	-	-	✓	89.2
SiO_2	6	3.62	-	12	-	-	✓	29.7

4.2.2. Poboljšanje mehaničkih svojstva punilom

Dodavanjem punila u polimernu matricu mogu se značajno poboljšati mehanička svojstva polimernih materijala. Punilima se može poboljšati čvrstoća, otpornost na habanje, lom i druge mehaničke karakteristike. Za poboljšanje mehaničkih svojstva najčešće se koriste silicijev dioksid (SiO_2), aluminijev trioksid (Al_2O_3), magnezijev oksid (MgO) i borov nitrid (BN). Navedena punila djeluju kao pojačivači koji smanjuju slabljenje mehaničkih svojstva i povećavaju otpornost na pucanje, trenje i savijanje.

Mehanizmi poboljšanja:

- Ojačanje matrice: Punila povećavaju tvrdoću i krutost polimernog materijala. Čestice manjih dimenzija omogućuju bolju disperziju, što smanjuje unutarnja naprezanja i doprinosi homogenijoj strukturi.
- Povećana otpornost na habanje: Čestice punila, posebno mikro čestice, mogu stvoriti barijeru koja sprječava habanje površine pod mehaničkim opterećenjem.
- Otpornost na pucanje: Dodavanje punila poboljšava žilavost kompozita, smanjujući mogućnost pucanja pod opterećenjem.
- Povećana stabilnost dimenzija: Punila mogu smanjiti termičku i mehaničku deformaciju polimera, što je posebno važno za izolatore koji se koriste u vanjskim uvjetima.

Dodavanjem punila u silikonsku gumu ili epoksidne smole poboljšava se otpornost tih materijala na vremenske uvjete, UV zračenje, vlagu i mehaničke udarce, produžujući njihov radni vijek. Punila poput aluminijevog oksida (Al_2O_3) i silicijevog dioksida (SiO_2) dokazano povećavaju otpornost na habanje, a nano punila također smanjuju mikro praznine unutar polimernih materijala, čime se povećava njihova otpornost na lomove i pukotine.

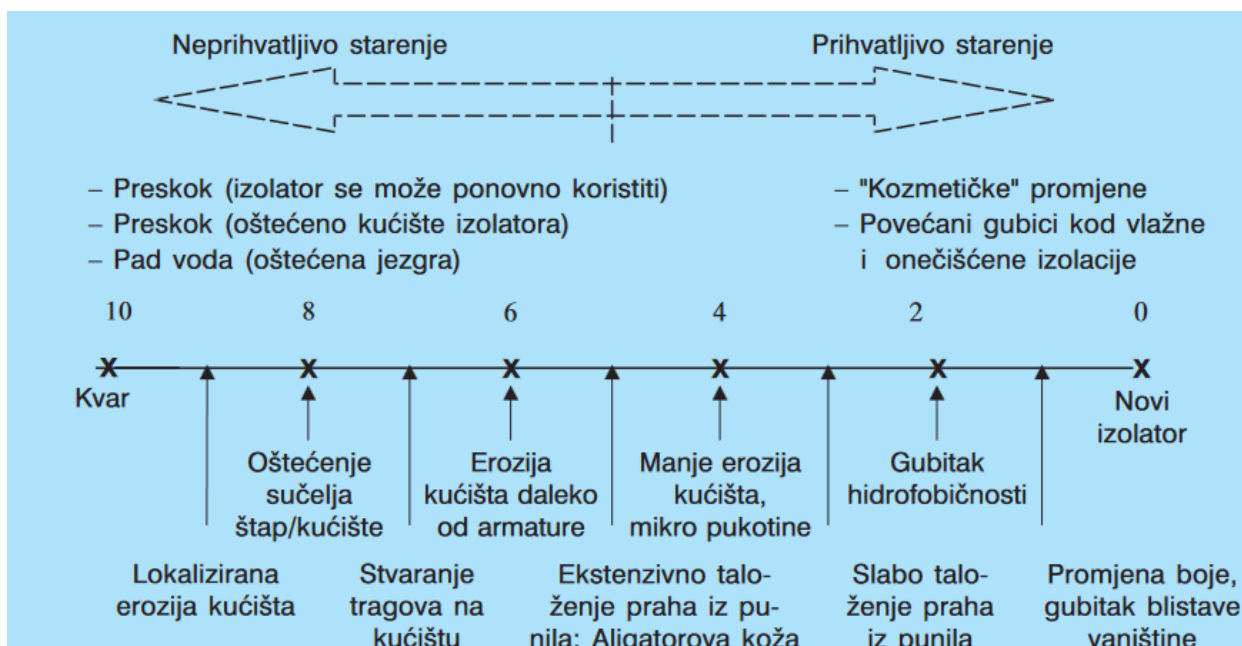
Tablica 4.3. Mehanička svojstva SiR, epoksida i EPDM punjenih mikro i nano SiO_2 punilima[8]

Sample	Ref.	Tensile Strength (MPa)			Elongation at Break (%)			Hardness (Shore A)		
		Virgin	Micro-Filled	Nano-Filled	Virgin	Micro-Filled	Nano-Filled	Virgin	Micro-Filled	Nano-Filled
SiR	[88]	0.5	0.9	1.6	142	123	118	48	54	56
Epoxy	[88]	1.2	1.6	2.7	125	115	110	54	56	58
EPDM	[88]	1.11	1.9	2.04	244.5	223.4	220.2	48.4	57.3	58.1

5. STARENJE KOMPOZITNIH IZOLATORA

5.1. Mehanizmi starenja kompozitnih izolatora

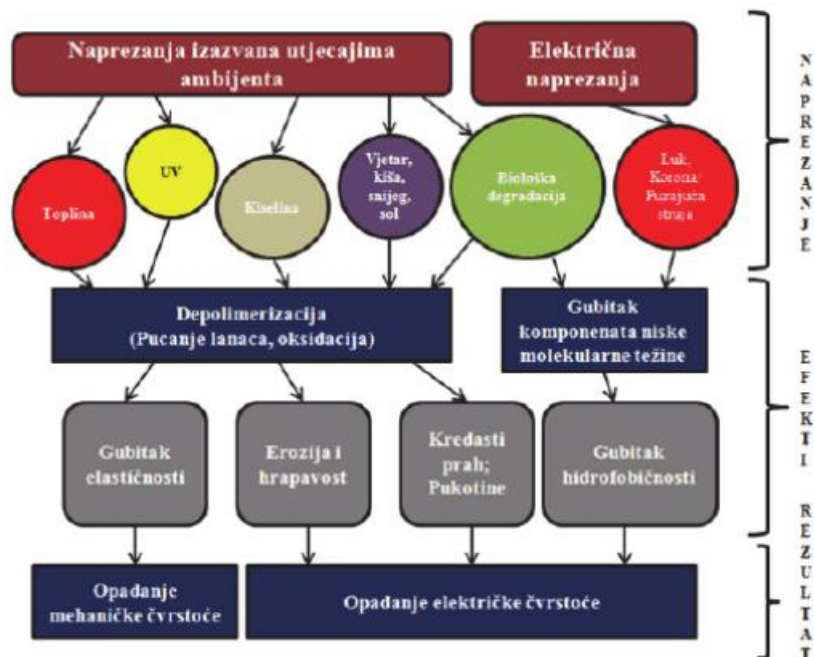
Kao što je već i prije spomenuto kompozitni izolatori izrađeni su od polimernih materijala koji imaju brojne prednosti u odnosu na porculan i staklo. Međutim, polimerni materijali su jako podložni starenju koje se manifestira smanjenjem električnih i mehaničkih svojstva.



Slika 5.1. Gorurova karta starenja kompozitnih izolatora[6]

Prema tome razlikujemo nekoliko mehanizama starenja kompozitnih izolatora:

- Starenje uzrokovano UV zračenjem
- Termičko starenje
- Degradacija uzrokovana vlagom
- Elektrokemijsko starenje
- Mehaničko starenje
- Učinak zagađenja



Slika 5.2. Faktori koji utječu na starenje kompozitnih izolatora[6]

5.2. Električno starenje

Električno starenje izolacije događa se pri jakostima električnog polja koja su niža od dielektrične čvrstoće materijala. Brzina električnog starenja se povećava sa povećanjem napona, dok se trajanje izolacije smanjuje. Električno starenje izolacije određuju parcijalna izbijanja u izolaciji koja se mogu javiti i pri naponima koji su niži od nazivnog napona izolacije. Vrijeme trajanja izolacije može se izračunati pomoću sljedeće relacije:

$$T = \frac{A}{(U - U_{pp})^n} \quad (5.1)$$

Pri čemu je:

U – pogonski napon izolacije

U_{pp} – napon pri kojem nastaju parcijalna izbijanja

A – konstanta (A=6· 10⁹ god/kV)

n – konstanta (n=6)

5.4. Termičko starenje

Termičko starenje odnosi se na degradaciju materijala izolatora uzrokovanu dugotrajnom izloženosti visokim temperaturama, što može značajno utjecati na mehanička i električna svojstva izolatora. Na starenje utječu temperatura zraka i temperatura koja se javlja zbog strujnog opterećenja koje uzrokuje zagrijavanje izolatora.

Dugotrajna izloženost visokim temperaturama može uzrokovati oksidaciju polimernih materijala, što ima za posljedicu gubitak mehaničkih svojstva i stvaranje mikro strukturnih promjena u izolatorima. Termičko starenje može uzrokovati promjene u molekulskoj strukturi polimera, poput cijepanja lanca, što dovodi do smanjenja elastičnosti i otpornosti na lomove. Zbog visokih temperatura može doći do smanjenja hidrofobnih svojstva izolatora, što povećava rizik od površinskih pražnjenja i treckinga. Nadalje, na površini izolatora mogu nastati pukotine, alligatoring ili druga oštećenja zbog termičkog starenja.

Pokazatelji istrošenosti izolacije su:

- Relativna istrošenost izolacija
- Faktor starenja izolacije

Faktor starenja izolacije definira se kao odnos stvarnog životnog vijeka izolacije u stvarnim pogonskim uvjetima T i nazivnog životnog vijeka T_n . Faktor starenja računa se po sljedećoj formuli:

$$\lambda = \frac{T_n}{T} = 2^{\frac{\vartheta - \vartheta_n}{\Delta\vartheta}} \quad (5.2)$$

Pri čemu je:

ϑ – radna temperatura izolacije

ϑ_n – nazivna radna temperatura izolacije

$\Delta\vartheta \approx 8-12 \text{ }^\circ\text{C}$, tipično $\Delta\vartheta = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

Dakle, faktor λ ovisi o radnoj temperaturi izolacije ϑ , odnosno o njezinom odstupanju od nazivne radne temperature ϑ_n .

Montsingerovo pravilo kaže da za svaki porast temperature od $8-12^\circ\text{C}$ iznad preporučene radne temperature, vijek trajanja izolacije se smanjuje za približno polovicu. Na primjer, ako je normalni

vijek trajanja izolatora 20 godina na određenoj temperaturi, povećanje temperature za 10°C smanjit će taj vijek na 10 godina.

Ako neka izolacija u pogonu radi sa promjenjivim dijagramom toplinskog opterećenja, koji se može podijeliti na određeni broj n vremenskih podintervala: $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$ tada relativna istrošenost izolacije za promatrano vremensko razdoblje iznosi:

$$\lambda_e = \frac{\lambda_1 \Delta t_1 + \lambda_2 \Delta t_2 + \dots + \lambda_n \Delta t_n}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n} \quad (5.3)$$

Pri čemu je:

$\lambda(j=1,2,\dots,n)$ - vrijednost relativne istrošenosti izolacije u pojedinom vremenskom intervalu Δt_j

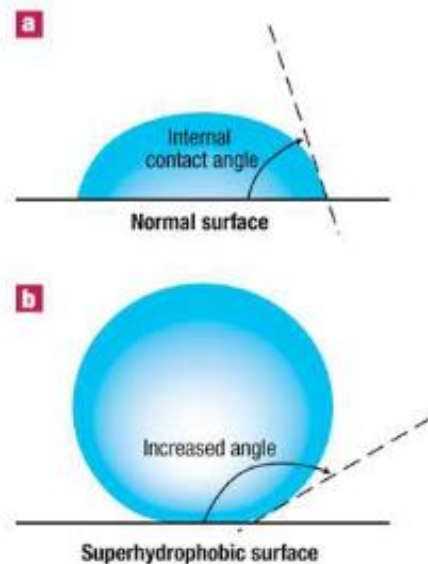
$$\lambda = 2^{\frac{\vartheta_j - \vartheta_n}{\Delta \vartheta}}$$

5.3. Mehaničko starenje

Mehaničko starenje je starenje pod djelovanjem mehaničkih naprezanja u izolaciji, pojavljuju se mikroskopske pukotine koje se trajnim djelovanjem postupno šire. Kada veličina pukotina prijeđe kritičnu vrijednost nastaje proboj izolatora.

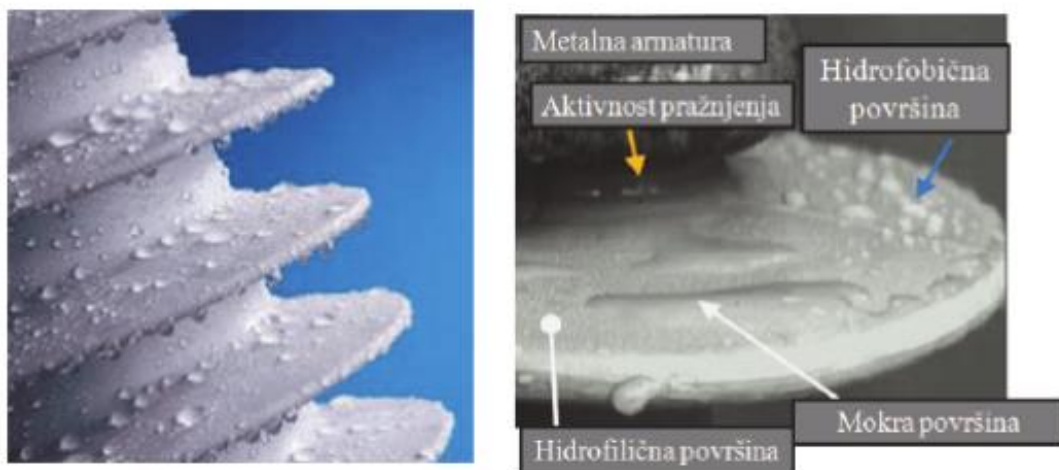
5.4. Utjecaj vlage i zagađenja na kompozitni izolator

Značajnu ulogu u procesu degradacije imaju vlaga i zagađenje. Vlaga u obliku kiše, magle, kondenzacije i slično utječe na električna svojstva kompozitnih izolatora. Polimerni izolatori imaju hidrofobne površine što znači da odbijaju vodu, ali dugotrajna izloženost vodi, zagađenjima, koroni, parcijalnim pražnjenjima na suhim zonama kompozitni izolator izgubi hidrofobično svojstvo i postaje hidrofilčan.



Slika 5.3. Hidrofilična površina (a) i hidrofobična površina (b)[15]

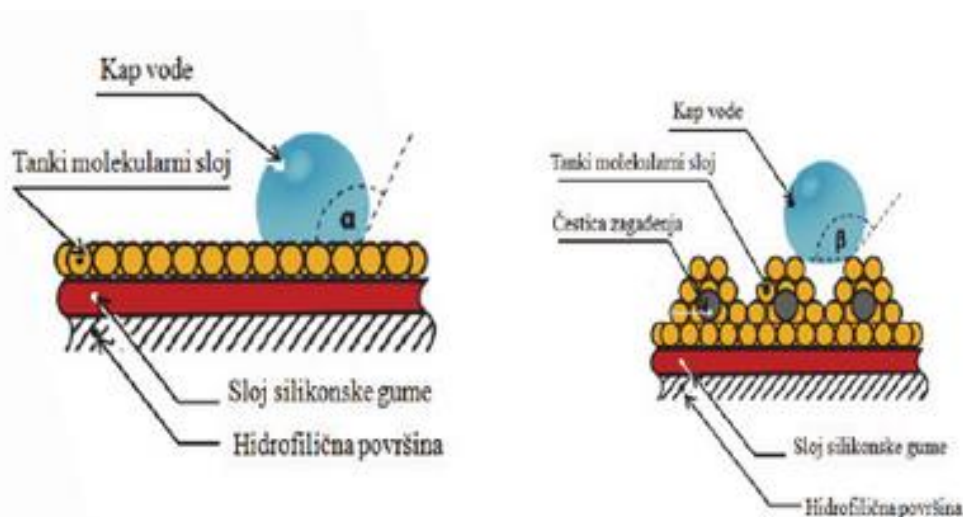
Smanjena otpornost na vlagu povećava vjerojatnost formiranja vodljivih puteva za tokove struja što u konačnici može dovesti do površinskih pražnjenja. Međutim, svojstvo hidrofobičnosti može se obnoviti nakon nekog vremena.



Slika 5.4. Novi kompozitni izolator sa hidrofobičnom površinom (lijevo) i već korišteni kompozitni izolator sa hidrofiličnom površinom (desno)[6]

Kod polimernih materijala (silikonska guma) važno svojstvo je transfer hidrofobičnosti. To svojstvo omogućava dugotrajnu učinkovitost polimernih izolatora. Kada površina izolatora

postane onečišćena odnosno zagađena česticama soli, prašinom, industrijskim dimom i slično, tada transfer hidrofobičnosti omogućava obnovu hidrofobnih svojstva s unutarnjih slojeva na površinu izolatora. Ovo svojstvo primijećeno je samo kod silikonske gume.



Slika 5.5. Obnova izgubljene hidrofobičnosti (lijevo) i transfer hidrofobičnosti (desno)[6]

Kod polimernih materijala koji nemaju svojstvo transfera hidrofobičnosti dolazi do parcijalnih lukova i preskoka. Onečišćenja u suhom stanju imaju veliki električni otpor i ne utječu na raspodjelu napona na površini izolatora. Ako se na izolatoru nalaze čestice onečišćenja i taj je izolator izložen vlazi, električni otpor nečistoća na površinskom sloju izolatora se značajno smanji i to nejednoliko po površini, što značajno promjeni raspodjelu napona po površini izolatora. Po površini izolatora teku struje. Površinske struje su velike na dijelovima izolatora sa velikom vlažnošću, te na tim dijelovima dolazi do zagrijavanja. U gornjem sloju se oslobađa energija koja zagrijavajući smjesu onečišćenja i vlage dovodi do isparavanja vode. Zbog isparavanja vode formiraju se suhe zone, to su zone na površini izolatora koje se prve suše zbog velike količine energije, te imaju veliki električni otpor. Dakle, to su zone s najmanjim površinskim presjekom, odnosno sa najvećom gustoćom struje (dijelovi između rebara izolatora). Kada se formiraju suhe zone tada dolazi do promjene u raspodjeli napona duž izolatora. Napon na izolatoru se raspodjeli na način da je veći dio napona na suhim dijelovima (veći otpor). Ako je električno naprezanje na suhoj zoni veće od izdržljivog naprezanja zraka dolazi do pojave parcijalnog luka iznad suhe zone. U slučaju da se jedan od parcijalnih lukova produlji preko preostale mokre površine doći će do preskoka. Važno je izolator dizajnirati da se lukovi ne presretnu. Hamptonov kriterij za dimenzioniranje glasi:

$$E_a \leq E_p \quad (5.4)$$

Pri čemu je:

E_a – električko naprezanje u parcijalnom luku

E_p – električko naprezanje u preostalom vlažnom sloju zagađenja

Ključ za sprječavanje pojave preskoka je povećanje gradijenta električkog polja unutar luka. Luk ima opadajuću karakteristiku opisanu sljedećom jednadžbom :

$$E_a = A \cdot I^{-n} \quad (5.5)$$

A, n – konstante

I – Puzajuća struja

Da bi se izbjegle puzajuće struje i preskok potrebno je maksimizirati duljinu klizne staze, ali je važno voditi računa da se na taj način ne poremeti aerodinamika profila izolatora. Za najniži stupanj onečišćenja izolatora prema IEC 60815, potrebno je 1,6 kV/cm pogonskog napona. Što znači da je za napon od 400 kV potrebno 640 cm klizne staze.

$$L = U \cdot k = 400 \text{ kV} \cdot 1,6 = 640 \text{ cm} \quad (5.6)$$

U slučaju da je izolator jako onečišćen uzima se 2,5kV/cm, tada duljina klizne staze mora biti:

$$L = U \cdot k = 400 \text{ kV} \cdot 2,5 = 1000 \text{ cm} \quad (5.7)$$

Dok se za veoma jako zagađenje uzima 3,1kV/cm, tada duljina klizne staze iznosi:

$$L = U \cdot k = 400 \text{ kV} \cdot 3,1 = 1200 \text{ cm} \quad (5.8)$$

Napon pri kojem nastaje površinsko pražnjenje na izolatoru može se izračunati prema sljedećoj relaciji:

$$U_0 = \frac{1,36 \cdot 10^{-4}}{C^{0,44}} \text{ [kV]} \quad (5.9)$$

Pri čemu je:

C – površinski kapacitet kondenzatora kojeg formira površina dielektrika zajedno sa ioniziranim slojem u njegovoj blizini (F/cm^2)

Nadalje, dužina iskre površinskog pražnjenja računa se kao:

$$l_p = k \cdot C^2 \cdot U^5 \cdot \sqrt[4]{\frac{dU}{dt}} \quad (5.10)$$

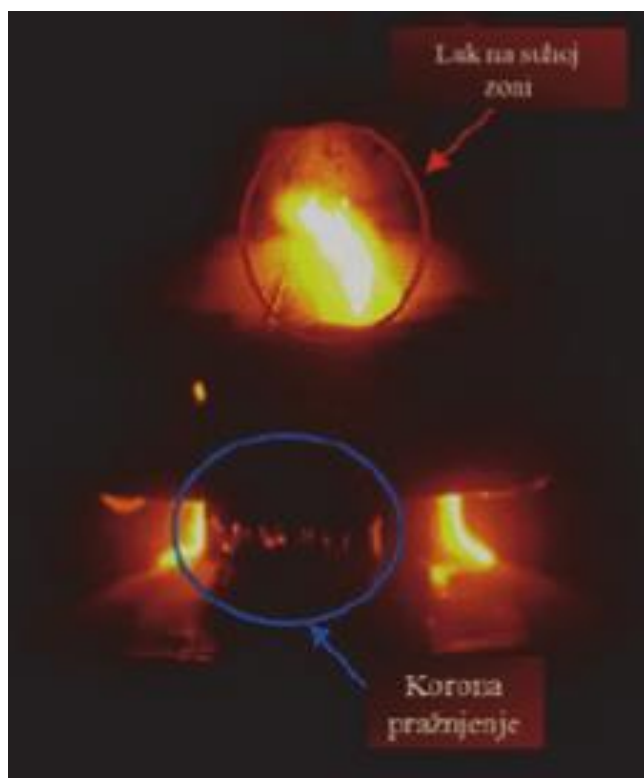
Napon pri kojem nastaje potpuni proboj na površini izolatora računa se prema sljedećoj relaciji:

$$U_p = \frac{1}{k} \cdot \sqrt[5]{\frac{l \cdot i_z}{C^2}} \cdot \left(\frac{1}{20 \sqrt{\frac{dU}{dt}}} \right) \approx \frac{1}{k} \cdot \sqrt[5]{\frac{l \cdot i_z}{C^2}} \quad (5.11)$$

Pri čemu je:

$$l \cdot i_z = l_p$$

$$20 \sqrt{\frac{dU}{dt}} \approx 1$$



Slika 5.6. Preskok na suhoj zoni[6]

Da bi se povećao probojni napon, odnosno smanjio rizik od proboja zbog nečistoća važno je da su izolatori sa rebrima velikog promjera, da se poveća dužina izolatora, te da se smanji površinski kapacitet.

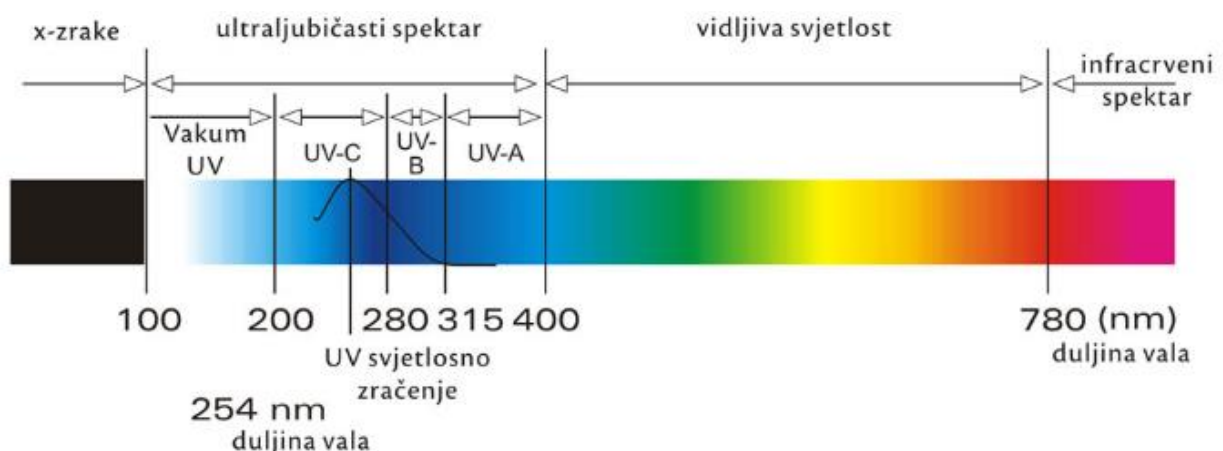
Mjere za smanjenje rizika od proboja:

- Korištenje izolatora sa produženom probojnom stazom
- Korištenje lanca kapastih izolatora
- Periodičko površinsko pranje izolatora
- Smještaj električne opreme u zatvorene prostore
- Korištenje kablskih umjesto nadzemnih vodova
- Korištenje specijalnih izolatora za onečišćenu sredinu i premaza izolatora

5.5. Starenje kompozitnih izolatora izazvano UV zračenjem

Ultraljubičasto zračenje (UV zračenje) je oblik elektromagnetskog zračenja s valnom duljinom koja je kraća od vidljive svjetlosti. UV zračenje spada u nevidljivi dio spektra za ljudsko oko i može se podijeliti na tri osnovna tipa, ovisno o valnoj duljini:

- UV-A je zračenje najbliže vidljivoj svjetlosti i ima valnu duljinu između 315-400 nm. Najveći dio takvog zračenja prolazi kroz atmosferu do površine Zemlje. Dugotrajno izlaganje UV-A zračenju može oštetiti kožu i izazvati starenje kože.
- UV-B je zračenje valne duljine između 280 i 315 nm. Samo mali dio tog zračenja prolazi kroz atmosferu i dolazi do površine Zemlje, zato što veći dio zračenja apsorbira ozonski sloj. UV-B zračenje može izazvati opekline i povećava rizik od raka.
- UV-C je zračenje s valnom duljinom od 100 do 280 nm, može se reći da je najopasnije zračenje, ali se gotovo u potpunosti apsorbira u atmosferi i ne dolazi do površine Zemlje.

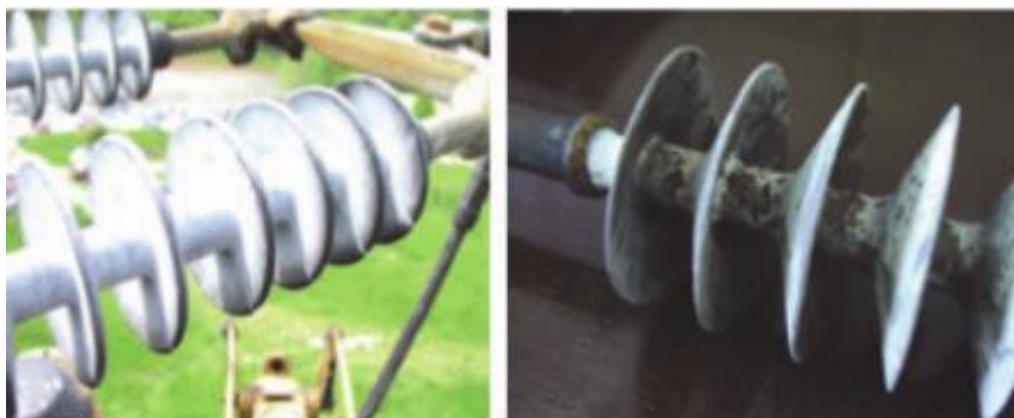


Slika 5.7. Spektar Sunčevog zračenja[s interneta]

Tijekom pogona kompozitni izolatori izloženi su utjecaju UV zračenja koje izaziva starenje materijala. Starenje izazvano UV zračenjem posljedica je fotooksidacije koja se javlja u slučaju kada energija fotona koji pogađaju površinu izolatora bude dovoljna da ionizira površinu i tako prouzroči privlačenje kisika. To može izazvati depolimerizaciju ili umrežavanje površinskih polimernih lanaca. Depolimerizacija i umrežavanje mogu izazvati:

- Pojavu punila u formi kredastog praha
- Pojavu plitkih mikro pukotina s duljinom manjom od 0,1 mm
- Pojavu plitkih mikro pukotina s duljinom većom od 0,1 mm

Pojava punila u formi kredastog praha se javlja kada na površini izolatora dolazi do depolimerizacije zbog djelovanja UV zračenja. Taj prah blokira sunčevu svjetlost i sprječava oštećenje dubljih slojeva izolatora. U slučaju jakog vjetra prah se skida sa izolatora te dovodi do izlaganja dubljih slojeva deterioraciji. To ima za posljedicu taloženje vlage i nečistoća na površini izolatora.



Slika 5.8. Pojava kredastog praha[6]

Pod utjecajem depolimerizacije i umrežavanja mogu se pojaviti plitke pukotine s dubinom manjom od 0,1 mm. Ta pojava često se naziva crazing.



Slika 5.9. Pukotine manje od 0,1 mm[13]

Nadalje, mogu se pojaviti i pukotine dublje od 0,1 mm pri čemu površina izolatora poprimi izgled krokodilove kože pa se ta pojava naziva i aligatoring.



Slika 5.10. Aligatoring površine polimernog izolatora[13]

Svaki materijal od kojih se izrađuju kompozitni izolatori je osjetljiv na određenu valnu duljinu UV zračenja.

Tablica 5.1. Energije veza za pojedine materijale[6]

Veza	Energija veze (kJ/mol)
Si – O (silikon)	445
C – H	414
C – O	360
C – C (etilen-propilen i epoksid)	348
Si – C (lanci u silikonima)	318
Si – H	318

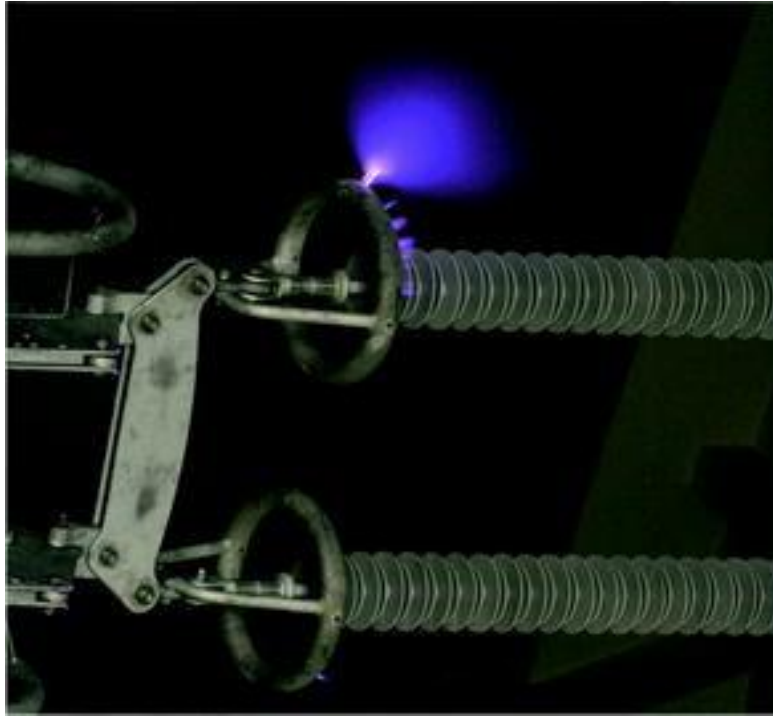
Dakle, ako je energija veze manja od energije koja se oslobodi UV zračenjem tada dolazi do degradacije materijala. Ako se primjerice uzme valna duljina od 300 nm energija oslobođena UV zračenjem iznosi oko 398kJ/molu. Iz tablice je vidljivo da će valna duljina UV zračenja od 300 nm izazvati degradaciju kod etilen – propilena i kod epoksida. Međutim, ne može se zaključiti da su silikonske gume u potpunosti otporne na UV zračenje jer fotoni ne mogu uništiti njihovu Si – O strukturu. Osim Si – O strukture silikoni se sastoje od metilne i vinilne grupe čije su molekule slabije vezane i koje ukoliko se ne pojačaju mogu biti uništene UV zračenjem.

Otpornost na UV zračenje može se povećati dodavanjem punila. Najčešće se dodaje ugljik koji povećava otpornost na UV zračenje, ali se dodavanjem ugljika smanjuju izolacijska svojstva izolatora, odnosno snižava se otpornost na tracking.

5.6. Efekt korone

Efekt korone na nadzemnim vodovima je pojava ionizacije zraka oko vodiča kada je električno polje dovoljno jako da izazove oslobodjenje elektrona iz molekula zraka. To se događa kada električni potencijal oko vodiča premaši dielektričnu čvrstoću zraka, što dovodi do stvaranja plazme i električnog izboja koji nije dovoljno snažan da izazove potpuni preskok, ali stvara svjetlosni fenomen.

Atomi zraka (uglavnom dušik i kisik) gube elektrone i postaju pozitivni ioni, stvarajući plazmu koja postaje djelomično vodljiva. Obično se događa na visokonaponskim sustavima, kao što su nadzemni vodovi, kada napon prelazi kritičnu vrijednost.



Slika 5.11. Korona efekt[s interneta]

Efekt korone je nepoželjna pojava jer predstavlja značajan gubitak energije, te u zraku stvara plinove poput ozona (O_3) i dušikovog oksida (NO), koji se zatim mogu pretvoriti u dušikov dioksid (NO_2) i dušičnu kiselinu (HNO_3) ako je prisutna vodena para. Navedeni plinovi su korozivni i mogu degradirati ili oslabiti okolne materijale, a također su štetni za zdravlje ljudi i okoliš. Korona se obično javlja kao svjetlost plave ili ljubičaste boje oko vodiča i često se može čuti kao šum, zujanje ili pucketanje.

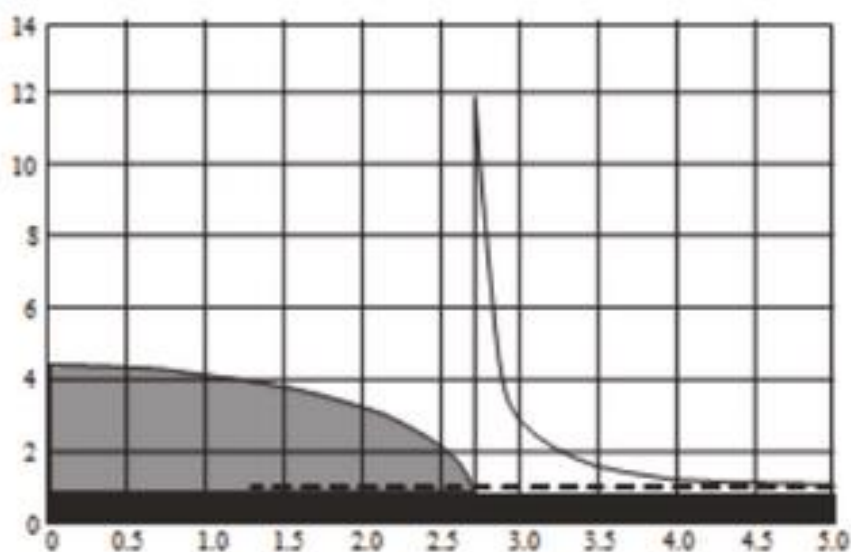
Korona efekt na kompozitnim izolatorima može izazvati jaku eroziju površine izolatora i puknuće rebara na izolatoru.



Slika 5.12. Erozijska površina uzrokovana koronarnim efektom[12]

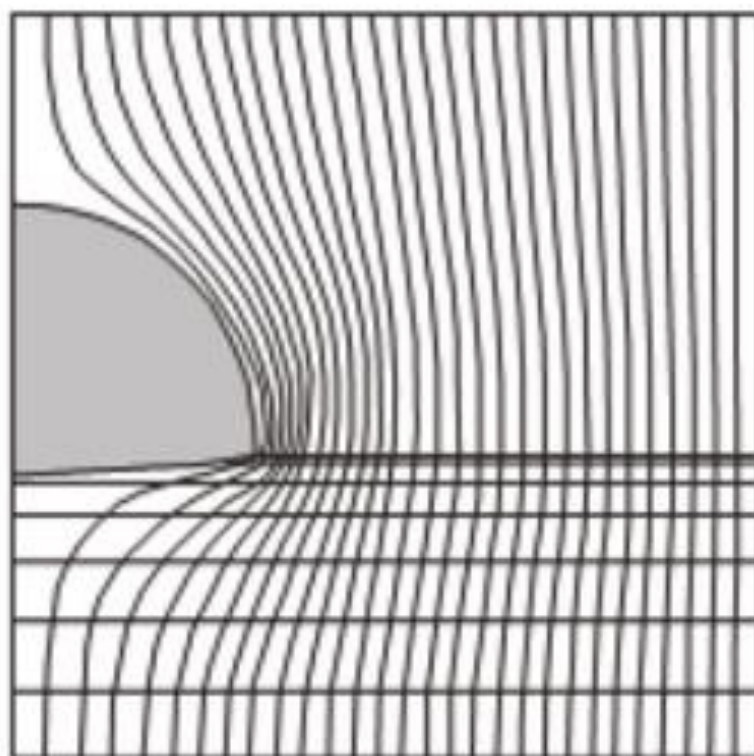
Da bi se izbjegla korona u suhim uvjetima kompozitni izolatori se dimenzioniraju tako da se osigura da električna naprezanja u najopterećenijem dijelu budu značajno niža od praga kod kojeg nastaju pražnjenja. Međutim, u uvjetima vlage i zagađenja tako dimenzionirani izolator ne garantira da se neće javiti korona efekt.

Korona efekt može nastati i kada po površini kompozitnog izolatora ne teče značajna puzajuća struja, odnosno u uvjetima kada je on čist, ali prekriven kapljicama vode (water drop corona). Voda zbog svoje velike relativne dielektrične čvrstoće dovodi do distorzije električnog polja, na isti način kao kad bi se radilo o vodiču istog oblika.



Slika 5.13. Distorzija električnog polja u okolini kapljice vode u obliku sfere[6]

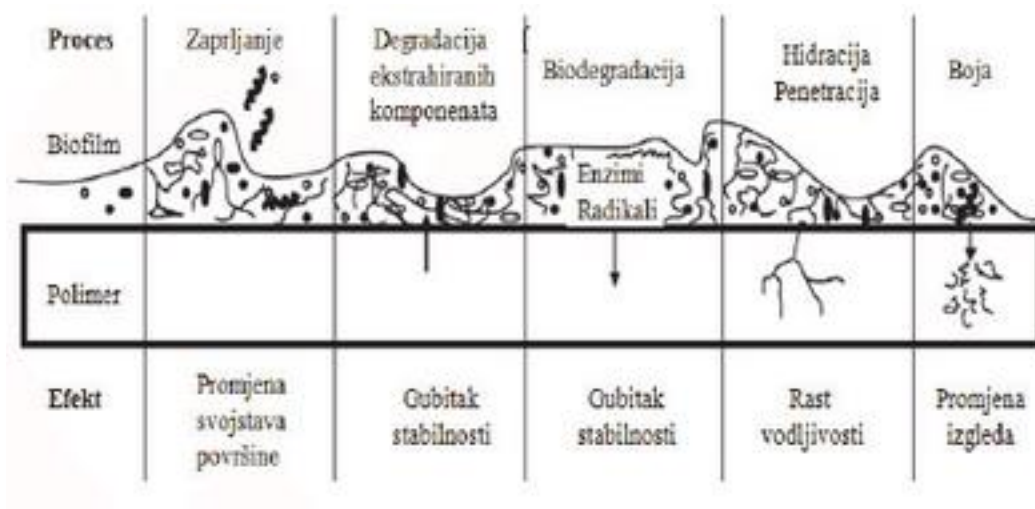
Za sferičnu kapljicu vode faktor pojačanja polja iznosi 3. Nadalje, vodena kapljica se u električnom polju izobličuje u smjeru djelovanja polja, te to polje smanjuje radijus zakrivljenosti kapljice i dovodi do daljnjeg pojačanja polja na njenom vrhu.



Slika 5.14. Pojačanje polja za slučaj elipsoidne kapljice vode[6]

5.7. Biološko starenje kompozitnih izolatora

Biološko starenje kompozitnih izolatora odnosi se na smanjenje njihovih mehaničkih i električnih svojstva pod utjecajem mikroorganizma poput bakterija, gljivica, algi i dr. Ovakvo starenje najčešće se javlja u uvjetima visoke vlage, visokih temperatura i prisutnosti organskih tvari koje služe kao hranjive tvari za mikroorganizme.



Slika 5.15. Neželjeni efekti biosloja formiranog na površini kompozitnog izolatora[6]

Mehanizmi biološkog starenja kompozitnih izolatora:

- Kolonizacija površine izolatora: Mikroorganizmi mogu rasti na površini izolatora, posebno ako su izloženi vlažnim uvjetima i organskim onečišćenjem. Tanki sloj biološkog podrijetla koji se formira na površini izolatora može smanjiti površinsku hidrofobnost izolatora i olakšati prodor vlage.
- Enzimska degradacija: Neki mikroorganizmi oslobađaju enzime koji mogu kemijski napadati polimere u izolatorima, pritom razbijajući njihove strukture i uzrokujući smanjenje mehaničke čvrstoće.
- Promjena električnih svojstva: Prisustvo mikroorganizama može promijeniti dielektrična svojstva kompozitnih izolatora, povećavajući vodljivost i smanjujući otpornost materijala. Ovo svojstvo može uzrokovati pražnjenja i oštećenja.
- Utjecaj na otpornost prema vremenskim uvjetima: Biološko starenje može također imati značajan utjecaj na otpornost kompozitnih izolatora na UV zračenje i vremenske promjene, što dodatno smanjuje njihovu dugovječnost.

Najčešći mikroorganizmi koji se mogu pronaći na površini kompozitnih izolatora su alge i plijesan. One stvaraju površinske naslage koje mogu apsorbirati vodu i ubrzati proces starenja izolatora, čime se smanjuje njihova učinkovitost. Da bi se izbjeglo stvaranje mikroorganizma na površini izolatora koriste se aditivi u polimernim materijalima koji inhibiraju rast mikroorganizama. Nadalje, izolatori se moraju održavati čistima kako bi se izbjeglo nakupljanje organske tvari i vlage.



Slika 5.16. Biološka degradacija kompozitnog izolatora[10]

6. USPOREDBA KOMPOZITNIH I KONVENCIONALNIH IZOLATORA

Usporedba kompozitnih i konvencionalnih (keramičkih ili staklenih) izolatora ističe nekoliko ključnih aspekata vezanih uz njihove primjene, svojstva i prednosti u elektroenergetskim sustavima, posebno u nadzemnim vodovima. Ove razlike pokrivaju područja kao što su težina, otpornost na zagađenje, troškovi održavanja i pouzdanost.

1. Struktura

- Konvencionalni izolatori izrađeni su uglavnom od keramike (porculana) ili stakla. Ovi materijali su vrlo jaki, tvrdi i otporni na visoke temperature, ali su krhki, što znači da su podložni lomljenju pod mehaničkim naprezanjem.
- Kompozitni izolatori, s druge strane, izrađeni su od polimernih materijala s jezgrama od fiberglasa. Ova struktura pruža veću otpornost na udarce, manje su lomljivi i otporniji na mehanička oštećenja.

2. Težina

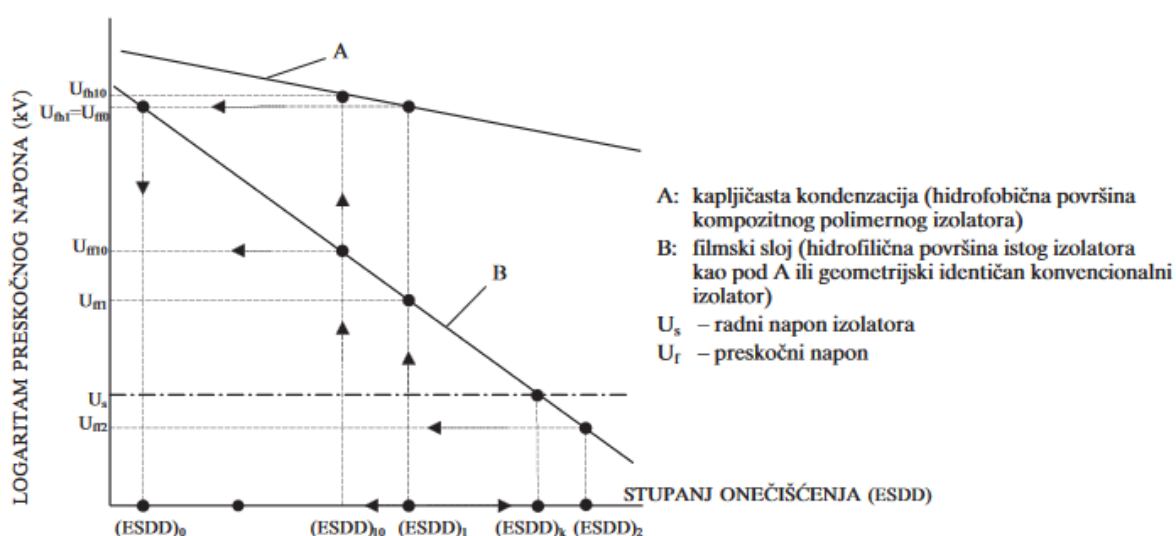
- Konvencionalni izolatori su mnogo teži zbog svoje staklene ili keramičke građe, što zahtijeva jače i skuplje konstrukcije za njihovu instalaciju i održavanje.
- Kompozitni izolatori su znatno lakši, što smanjuje troškove transporta i omogućuje lakšu ugradnju, osobito na visokim nadzemnim vodovima.

Tablica 6.1. Usporedba mase konvencionalnih i kompozitnih izolatora[17]

Napon (kV)	Masa(kg)				
	Konvencionalni izolatori			Kompozitni izolatori	
	Broj jedinica	I-lanac	V-lanac	I-lanac	V-lanac
230	12	205	410	16	32
345	18	306	612	27	54
500	25	427	854	50	100

3. Otpornost na zagađenje i vremenske uvjete

- Keramički i stakleni izolatori imaju glatke površine, ali su podložni nakupljanju naslaga zagađenja poput prašine, soli i drugih nečistoća. S vremenom, ove naslage mogu smanjiti izolacijska svojstva i uzrokovati preskoke (flashover), osobito u vlažnim uvjetima.
- Kompozitni izolatori imaju hidrofobna svojstva zbog polimerne strukture, što znači da odbijaju vodu i sprječavaju nakupljanje prljavštine. Njihova otpornost na zagađenje i vlagu je bolja, a zagađenje na njihovoj površini ne smanjuje značajno njihovu učinkovitost jer se hidrofobnost može prenositi čak i na slojeve nečistoća.



Slika 6.1. Preskočne karakteristike izolatora kod različitih uvjeta što vladaju na površini kompozitnog izolatora[s interneta]

4. Mehanička čvrstoća i otpornost na udarce

- Stakleni izolatori imaju veliku vlačnu čvrstoću, ali su osjetljivi na udarce i pucanje. Kada se slome, potrebno je zamijeniti cijeli niz izolatora.
- Kompozitni izolatori su fleksibilniji i otporniji na udarce, što smanjuje rizik od mehaničkih oštećenja. Čak i ako se dio izolatora ošteti, obično se može popraviti bez potpune zamjene.

Tablica 6.2. Usporedba mehaničkih svojstva konvencionalnih i kompozitnih izolatora[17]

Vrsta materijala		Čvrstoća na vlak (MPa)	Čvrstoća na tlak (MPa)	Čvrstoća na savijanje (MPa)	E-modul (MPa)
Porculan		30-60	450-550	35-90	55000
Kompoziti	Smola ojačana staklenim vlaknima (na mokro)	62-230	95-180	125-210	14000-27000
	Smola ojačana staklenim vlaknima (u vakuumu)	400	320	530	28000

5. Održavanje i dugovječnost

- Konvencionalni izolatori zahtijevaju redovito čišćenje u zagađenim okruženjima kako bi se spriječilo smanjenje dielektrične čvrstoće. Troškovi održavanja, posebno u industrijskim ili obalnim područjima, mogu biti visoki.
- Kompozitni izolatori zahtijevaju manje održavanja zbog svoje bolje otpornosti na zagađenje i sposobnosti samoobnavljanja hidrofobnih svojstava.

6. Troškovi

- Početni troškovi za keramičke i staklene izolatore često su niži nego za kompozitne, no dugoročno, zbog troškova održavanja i zamjene, kompozitni izolatori mogu biti isplativiji.
- Kompozitni izolatori imaju višu početnu cijenu, ali se smatraju isplativijima u dugoročnom korištenju zbog manje potrebe za održavanjem i duljeg radnog vijeka u otežanim uvjetima.

7. Električna otpornost i performanse

- Keramički izolatori su poznati po svojoj izvrsnoj otpornosti na visoke napone i trajnosti u električnim sustavima. Međutim, njihova učinkovitost može se smanjiti zbog zagađenja i promjene u površinskoj provodljivosti.

- Kompozitni izolatori, zahvaljujući punilima i naprednim polimernim materijalima, pružaju poboljšanu otpornost na naponska naprezanja i otpornost na parcijalna pražnjenja. Uz to, manja težina doprinosi manjem opterećenju strukture vodova.

Iako oba tipa izolatora imaju svoje prednosti i mane, kompozitni izolatori postaju sve popularniji zbog svoje male težine, otpornosti na zagađenje i nižih troškova održavanja. Konvencionalni keramički izolatori i dalje su cijenjeni zbog svoje iznimne otpornosti na visoke napone, no njihova krhkost i visoki troškovi održavanja u zagađenim okruženjima mogu predstavljati problem u modernim energetske mrežama.

7. PRIMJENA I ISKUSTVA SA KOMPOZITNIM IZOLATORIMA

7.1. Primjena kompozitnih izolatora

U mnogim zemljama širom svijeta kompozitni izolatori koriste se u visokonaponskim prijenosnim sustavima. Njihova lagana konstrukcija i sposobnost da izdrže visoka mehanička i električna naprezanja čine ih idealnim za visokonaponske sustave gdje je važna dugovječnost i pouzdanost.

U području sa visokim zagađenjem poput industrijskih zona, obalnih područja i slično, kompozitni izolatori pružaju bolju otpornost na naslage soli, čađe i drugih zagađivača, smanjujući pritom rizik od kvarova i potrebe za čišćenjem izolatora.

Kompozitni materijali pronašli su primjenu i u područjima s ekstremnim vremenskim uvjetima, kao što su visoke razine vlage, UV zračenje, niske temperature, vjetrovi i snijeg i slično. Otpornost kompozitnih materijala na koroziju i vremenske uvjete smanjuje troškove održavanja i poboljšava pouzdanost sustava.

7.2. Izazovi u primjeni kompozitnih izolatora

Iako kompozitni izolatori imaju mnoge prednosti u odnosu na konvencionalne izolatore, još uvijek postoje određeni izazovi koji se odnose na njihovu dugoročnu primjenu. Najveći izazovi vezani su uz kvalitetu materijala i proces proizvodnje. Lošija kvaliteta materijala može dovesti do problema poput gubitka hidrofobnosti ili neispravnog spajanja jezgre s vanjskom ovojnicom, što može uzrokovati kvarove i oštećenja.

Tijekom dužeg vremena kompozitni izolatori mogu djelomično izgubiti svoja hidrofobna svojstva zbog utjecaja zagađenja i vremenskih uvjeta. Iako su kompozitni izolatori sposobni obnoviti hidrofobnost, ta sposobnost obnove hidrofobnosti može se smanjiti nakon nekoliko godina te je jako važno da se prate karakteristike i stanje izolatora kroz redovne preglede i testiranja.

Dok su kompozitni izolatori pokazali izvrsne karakteristike u brojnim primjenama, neki problemi poput pucanja i degradacije zbog UV zračenja ili mehaničkih oštećenja mogu utjecati na njihovu dugovječnost.

Kako bi se osigurala kvaliteta kompozitnih izolatora, razvijeni su međunarodni standardi kao što su IEC 61109 i IEC 62217, koji definiraju postupke ispitivanja i tehničke zahtjeve za kompozitne izolatore. Standardizirani testovi kao što su ispitivanja otpornosti na proboj, vremenske uvjete i mehaničke sile važni su za osiguranje dugoročne pouzdanosti izolatora. U posljednje vrijeme se razvijaju dodatni testovi kao što je test ubrzanog starenja kako bi se osigurala pouzdanost u ekstremnim uvjetima.

8. ZAKLJUČAK

Kompozitni izolatori poznati i pod nazivom polimerni izolatori su izolatori koji se koriste na visokonaponskim vodovima i postrojenjima. Uvedeni su 1960-ih godina i predstavljali su alternativu keramičkim i staklenim izolatorima. Sastoje se od jezgre izrađene od šipke ili cijevi izrađene od stakloplastike ili karbonskih vlakana vezanih smolom vrlo visoke čvrstoće i vanjskog omotača od izolacijskog polimernog materijala.

Da bi se polimernom materijalu poboljšala svojstva dodaju mu se razna punila kao što su silicijev dioksid (SiO_2), titanijev oksid (TiO_2), aluminijski trioksid (Al_2O_3), cinkov oksid (ZnO), magnezijev oksid (MgO). Nadalje, često se koriste i nitridi kao što su borov nitrid (BN), aluminijski nitrid (AlN), silicijev nitrid (Si_3N_4), te se još koriste i karbidi kao što je silicijev karbid (SiC).

Kompozitni izolatori u odnosu na porculanske i staklene izolatore jako su podložni starenju pri čemu se gube mehanička i električna svojstva. Starenje kompozitnih izolatora može biti izazvano utjecajem vlage i nečistoća, UV zračenjem, biološkim zagađenjem i djelovanjem visoke temperature. Kompozitni izolatori imaju brojne prednosti u odnosu na porculanske i staklene izolatore. Vлага može značajno utjecati na svojstva kompozitnih izolatora. Kompozitni izolatori imaju hidrofobna svojstva što znači da odbijaju vodu, ali dugotrajno izlaganje vodi, nečistoćama, koroni, parcijalnim pražnjenjima na suhim zonama izolator izgubi hidrofobna svojstva. Izolatori su za vrijeme pogona izloženi UV zračenju koje izaziva starenje izolatora. Starenje izazvano UV zračenjem posljedica je fotooksidacije koja se javlja u slučaju kada energija fotona koji pogađaju površinu izolatora bude dovoljna da ionizira površinu i tako prouzroči privlačenje kisika. Depolimerizacija i umrežavanje mogu izazvati pojavu punila u formi kredastog praha i pojavu plitkih i dubokih mikro pukotina. Efekt korone može degradirajući djelovati na izolator. Efekt korone na nadzemnim vodovima je pojava ionizacije zraka oko vodiča kada je električno polje dovoljno jako da izazove oslobađanje elektrona iz molekula zraka. To je nepoželjna pojava jer predstavlja značajan gubitak energije, te u zraku stvara plinove poput ozona (O_3) i dušikovog oksida (NO), koji se zatim mogu pretvoriti u dušikov dioksid (NO_2) i dušičnu kiselinu (HNO_3) ako je prisutna vodena para. Takvi plinovi su korozivni i degradiraju izolator i slabe okolne materijale. Korona efekt na kompozitnim izolatorima može izazvati jaku eroziju površine izolatora i puknuće rebara na izolatoru.

Kompozitni izolatori imaju brojne prednosti, ali i neke nedostatke u usporedbi sa keramičkim i staklenim izolatorima. Prednosti kompozitnih izolatora su:

- Manja težina: Kompozitni izolatori su mnogo lakši od staklenih i keramičkih izolatora, što olakšava transport, manipulaciju i postavljanje.
- Otpornost na zagađenje: Silikonska guma, koja se najčešće koristi u kompozitnim izolatorima, ima hidrofobna svojstva, koja odbijaju vodu i čestice zagađenja, smanjujući rizik od proboja uzrokovanih zagađenjem i vlagom. Ovo svojstvo čini kompozitne izolatore posebno pogodnima za industrijska i obalna područja s visokim zagađenjem.
- Otpornost na udarce: Kompozitni izolatori su fleksibilniji i otporniji na lomove i udarce za razliku od staklenih i keramičkih izolatora
- Jednostavnije održavanje: Zbog otpornosti na zagađenje i manjih potreba za čišćenjem, kompozitni izolatori zahtijevaju manje održavanja od tradicionalnih izolatora, što smanjuje ukupne troškove održavanja.
- Bolja otpornost na vremenske uvjete: Kompozitni izolatori imaju visoku otpornost ekstremne vremenske uvjete.

Nedostaci kompozitnih izolatora su:

- Visoka cijena: Kompozitni izolatori su osjetno skuplji od tradicionalnih izolatora
- Starenje materijala: Kompozitni izolatori su osjetljivi na dugotrajno izlaganje UV zračenju, što može dovesti do gubitka hidrofobnosti ili degradacije vanjske ovojnice. Premda mnogi kompozitni materijali imaju sposobnost obnavljanja hidrofobnosti, proces starenja može utjecati na dugotrajnost izolatora.
- Kompleksniji proces proizvodnje: Kvaliteta kompozitnih izolatora značajno ovisi o procesu proizvodnje i kvaliteti upotrijebljenih materijala.
- Sklonost pukotinama i oštećenjima pri ekstremnim naprezanjima: Iako su kompozitni izolatori otporni na mehaničke udarce, ekstremna naprezanja poput jakih vjetrova, leda ili vibracija mogu uzrokovati pojavu mikro pukotina koje povećavaju rizik od oštećenja.

LITERATURA

- [1] Štimac M.; „Primjena kompozitnim materijala u zrakoplovnoj industriji“ Visoka tehničko poslovna škola Pula, 2016
- [2] „Kompozitni materijali“; s Interneta, <https://www.scribd.com/document/570660316/Kompozitni-materijali-1>
- [3] Mesić M.; „Izolatori“, Fakultet politehničkih nauka, Sveučilište u Travniku, 2020
- [4] Komen V.; prezentacija sa predavanja – Proboj u dielektricima
- [5] Delimar M. ; „Prijenos i razdjela električne energije“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2016.
- [6] Sokolija K.; Raščić M.; Batalović M.; „Starenje kompozitnih polimernih izolatora“, Sveučilište u Sarajevu, Elektrotehnički fakultet u Sarajevu, Sarajevo
- [7] Uglešić I.; Milardić V.; Milešević B; Filipović-Grčić B.; „Tehnika visokog napona“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2016.
- [8] Zaheer Saleem M.; Akbar M.; „Review of the performance of high-voltage composite insulators“, Pakistan, 2022.
- [9] Haznadar Z.; Sokolija K.; Berberović S.; Štih Ž.; „Kompozitni polimerni izolatori u prijenosu i distribuciji električne energije“ Časopis Hrvatske elektroprivrede, Zagreb, 2003.
- [10] „Impact of biofilms on outdoor insulation“ s Interneta <https://www.inmr.com/impact-of-biofilms-on-outdoor-insulation/> , 2023
- [11] Amin M.; Salman M.; „Aging of polymeric insulators“, University of Engineering and Technology, Taxila, Pakistan, 2006.
- [12] „Corona: Deadly enemy for polymeric insulation“, s Interneta, <https://www.inmr.com/corona-deadly-enemy-polymeric-insulation/> ,2022.
- [13] „Practical Guidelines for Visual Inspection & Condition Assessment of Transmission Insulation“ s Interneta, <https://www.inmr.com/practical-guidelines-for-condition-assessment-of-transmission-insulators/> ,2023
- [14] Batalović M.; „Površinska pražnjenja i problem zagađenja“, Sveučilište u Sarajevu, Sarajevo, 2019/2020

- [15] Grum E.; „Hidrofobni efekt in vpliv na biološke molekule“, Sveučilište u Ljubljani, Ljubljana, 2008.
- [16] Sokolija K.; Hajro A.; „Pogonska iskustva u primjeni kompozitnih polimernih izolatora“, Sarajevo.
- [17] Marković O.; Omeragić A.; Sokolija K.; „Osnovne karakteristike kompozitnih izolatora i dosadašnja iskustva u eksploataciji kompozitnih izolatora u prijenosnoj mreži JP elektroprivreda Bosne i Hercegovine, Sarajevo, 1998
- [18] „Od čega se prave kompozitni izolatori“, s Interneta, <http://ba.gaonenginsulator.com/news/what-are-composite-insulators-made-of-71887678.html> , 08.11.2023
- [19] Horvat D.; „Polimerni izolacijski materijali“, Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2019.
- [20] „Što je kompozitni izolator“, s Interneta, <https://hr.cowin-electrical.com/composite-insulator/>
- [21] Katalog; s Interneta, http://elektroporcelan.com/proizvodni_program.html
- [22] „Dalekovodi“; s Interneta, <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/dalekovodi.pdf>
- [23] „Električni izolator“; s Interneta, https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni_izolator
- [24] Komen V.; prezentacija sa predavanja - Izolacijske strukture
- [25] Komen V.; prezentacija sa predavanja – Starenje izolacije

SAŽETAK

U diplomskom radu opisani su materijali koji se koriste za izradu nadzemnih vodova, te su opisane vrste proboja u izolatorima. Kao uvod u kompozitne izolatore navedene su vrste izolatora koje se koriste u nadzemnim vodovima. Nadalje, opisana je tehnologija kompozitnih izolatora, gdje je detaljno opisana struktura kompozitnog izolatora te kako se mogu poboljšati svojstva izolatora punilima. U radu je detaljno razrađena tema starenja kompozitnih izolatora gdje je opisan utjecaj vlage i zagađenja na kompozitni izolator, starenje kompozitnih izolatora izazvano UV zračenjem, termičko starenje kompozitnih izolatora, efekt korone i biološko starenje. U konačnici, izrađena je usporedba kompozitnih i konvencionalnih izolatora, te je navedena primjena i iskustva sa kompozitnim izolatorima.

Ključne riječi: izolatori, kompozitni izolatori, nadzemni vodovi, starenje kompozitnih izolatora

SUMMARY

In the master thesis, the materials used to make overhead lines are described, and the types of insulator failures are described. As an introduction to composite insulators, the types of insulators used in overhead lines are listed. Furthermore, the technology of making composite insulators is described, in which the structure of the composite insulator is described in detail and how the properties of the insulator can be improved with fillers. The paper elaborates in detail the topic of aging of composite insulators, where the influence of moisture and pollution on composite insulators, aging of composite insulators caused by UV radiation, thermal aging of composite insulators, corona effect and biological aging are described. At the end, a comparison of composite and classic insulators was made, as well as the application and experiences with composite insulators.

Key words: insulators, composite insulators, overhead lines, aging of composite insulators

POPIS SLIKA

Slika 1.1. Strukture kompozitnih materijala a)kompozit ojačan česticama, b)kompozit ojačan vlaknima, c)slojeviti kompozit [1]

Slika 1.2. Podjela materijala[2]

Slika 2.1. Krivulja zagrijavanja izolatora[4]

Slika 2.2. Prikaz šupljine a)kanal parcijalnih izbivanja b)nadomjesna shema parcijalnih izbivanja[4]

Slika 3.1. Prikaz potpornog izolatora sa djelovima 1)izolatorska masa, 2) i 3) slojevi pijeska i cementne mase, 4) mjesto montaže s nosačem izolatora na stupu[5]

Slika 3.2. Razne izvedbe potpornih izolatora[3]

Slika 3.3. Prikaz staza koje su važne za dimenzioniranje izolatora[5]

Slika 3.4. Lančani izolator[3]

Slika 3.5. Dijelovi porculanskog kapastog izolatora[5]

Slika 3.6. Magleni kapasti izolatori (lijevo) i izolator za zagađenu atmosferu(desno) [5]

Slika 3.7. Štapni kompozitni izolatori[21]

Slika 4.1. Konstrukcija kompozitnog izolatora[6]

Slika 5.1. Gorurova karta starenja kompozitnih izolatora[6]

Slika 5.2. Faktori koji utječu na starenje kompozitnih izolatora[6]

Slika 5.3. Hidrofilna površina (a) i hidrofobična površina (b)[15]

Slika 5.4. Novi kompozitni izolator sa hidrofobičnom površinom (lijevo) i već korišteni kompozitni izolator sa hidrofilnom površinom (desno)[6]

Slika 5.5.Obnova izgubljene hidrofobičnosti (lijevo) i transfer hidrofobičnosti (desno)[6]

Slika 5.6. Preskok na suhoj zoni [6]

Slika 5.7. Spektar Sunčevog zračenja[s interneta]

Slika 5.8. Pojava kredastog praha[6]

Slika 5.9. Pukotine manje od 0,1 mm[13]

Slika 5.10. Aligating površine polimernog izolatora[13]

Slika 5.11. Korona efekt[s interneta]

Slika 5.12. Erozija površine uzrokovana korona efektom[12]

Slika 5.13. Distorzija električnog polja u okolini kapljice vode u obliku sfere[6]

Slika 5.14. Pojačanje polja za slučaj elipsoidne kapljice vode[6]

Slika 5.15. Neželjeni efekti biosloja formiranog na površini kompozitnog izolatora[6]

Slika 5.16. Biološka degradacija kompozitnog izolatora[10]

Slika 6.1. Preskočne karakteristike izolatora kod različitih uvjeta što vladaju na površini kompozitnog izolatora[s interneta]

POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Tablica toplinske vodljivosti, relativne permeabilnosti i gustoće pojedinih materijala[8]

Tablica 4.2. Povećanje dielektrične čvrstoće polimerne matrice dodavanjem različitih punila[8]

Tablica 4.3. Mehanička svojstva SiR, epoksida i EPDM punjenih mikro i nano SiO₂ punilima[8]

Tablica 5.1. Energije veza za pojedine materijale[6]

Tablica 6.1. Usporedba mase konvencionalnih i kompozitnih izolatora[17]

Tablica 6.2. Usporedba mehaničkih svojstva konvencionalnih i kompozitnih izolatora[17]

