

Dragutin Jordanić
Elka d.o.o.
Dragutin.jordanic@elka.hr

Lidija Kovačić
Elka d.o.o.
Lidija.kovacic@elka.hr

NASTANAK VODENIH GRANČICA-NOVE SPOZNAJE

SAŽETAK

Efekt vodenih grančica(eng.watertreeing) je efekt koji nastaje u izolaciji kabela te pridonosi njegovom ubrzanom starenju.Vodene grančice su dendritskog oblika koji raste u hidrofbnim polimerima uz prisustvo vode/vlage, električnog polja i drugih nepovoljnih uvjeta. Odnosno, vodene grančice se javljaju parcijalno te vremenom rastu i time smanjuju životni vijek kabela.Zbog pojačanog električnog polja na vrhovima kanalića se mogu pojaviti i električne grančice gdje dolazi do karbonizacije materijala izolacije. Napredovanjem karbonizacije proces se autokatalitički ubrzava, tj. grančice se ubrzano šire. Zbog svega toga na kraju dolazi do proboja izolacije i bitnog smanjenja životnog vijeka kabela. Postoje dvije vrste vodenih grančica: ventilirajući(eng.vented) i oblik leptir mašne(eng.bow-tie). Ventilirajući oblik vodenih grančica može nastati na rubovima izolacije uz zaslon vodiča ili uz zaslon izolacije, a oblik leptir mašne nastaje unutar izolacije. U radu je detaljnije objašnjen mehanizam nastanka efekta vodenih grančica uz zaslon vodiča. Budući da je važno spriječiti pojavu vodenih grančica u izolaciji kabela, u radu su objašnjena rješenja u konstrukciji kabela te tehnologiji izrade kojima se sprječava prisustvo vode u kabeu tj. pojava vodenih grančica.

Ključne riječi: vodene grančice, kabel, izolacija kabela, životni vijek

WATERTREEING EFFECT-NEW FINDINGS

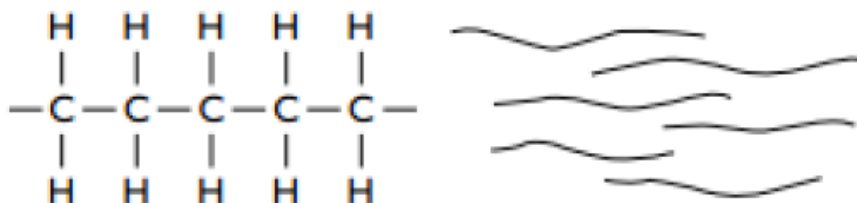
SUMMARY

Watertreeing effect is an effect that occurs in the cable insulation and contributes to its accelerated aging. Watertrees are dendritic forms that grow inside of hydrophobic polymers in the presence of water/moisture, electrical field and other unfavourable conditions. Watertreeing occurs partially and increases with time, reducing the cable's expected lifespan. Due to the increased electrical field at the tips of the channels, electrical trees can also appear and cause carbonization of the insulating material. With the progression of carbonization, the process gets autocatalytic accelerated, i.e. the trees grow rapidly. That finally leads to the breach of an insulation and a significant reduction in the cable's lifespan. There are two types of watertrees: vented and bow-tie trees. Vented trees may occur at the edges of an insulation, along the conductor or the insulation screen, and the bow-tie trees occur within the insulation. This paper describes the effect of watertreeing formation, with emphasis on the formation along the conductor screen. As important as it is to prevent the formation of the watertrees in the insulation, the paper describes solutions in the cable construction and the technology of production, that prevent the presence of water within the cables, i.e. the generation of watertreeing.

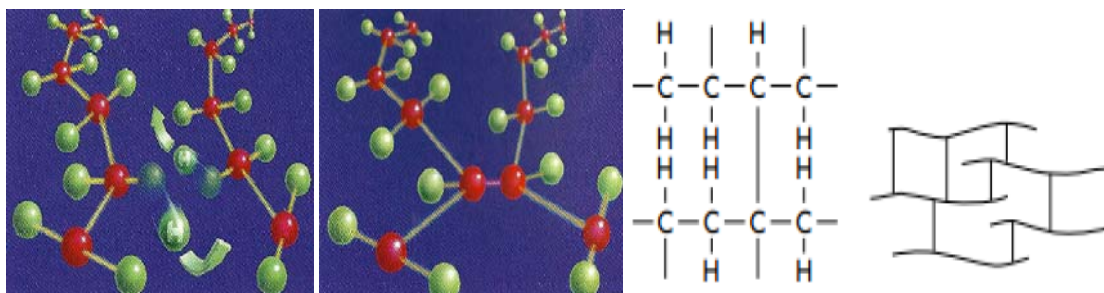
Key words: watertreeing, cable, cable insulation

1. UVOD

Za izoliranje modernih srednjenaponskih i visokonaponskih kabela najviše se koristi umreženi polietilen XLPE. Obični polietilen ima linearnu molekularnu strukturu gdje molekule međusobno nemaju kemijsku vezu (slika 1). Takve molekule se mogu deformirati na višim temperaturama. Umrežavanje polietilena najčešće nastaje tako da u polietilenu niske gustoće u koji su dodani peroksidi, pod utjecajem visokog tlaka i visoke temperature popucaju neke kemijske veze između ugljika i vodika te se na tim mjestima kemijski spoje atomi ugljika iz susjednih molekula (slika 2). Na taj se način dobije materijal manje-više sličan kao termoplastični polietilen, ali sa boljim mehaničkim karakteristikama, posebno na višim temperaturama.



Slika 1. Molekularna struktura polietilena[1]



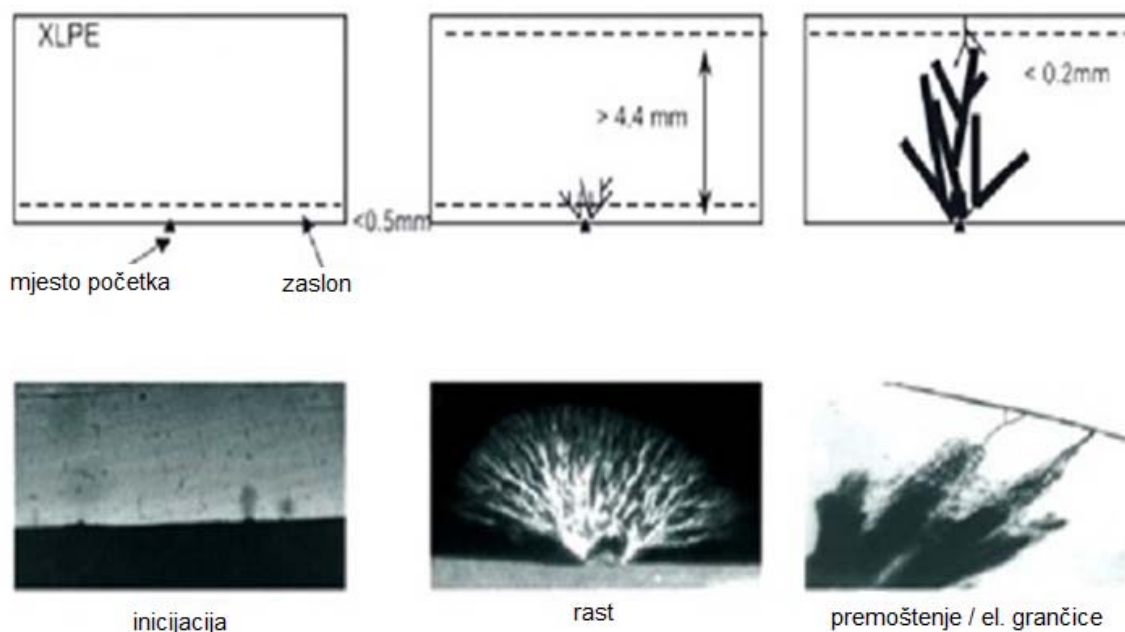
Slika 2. Nastanak umreženja i molekularna struktura XLPE[1]

Bitne prednosti kabela s izolacijom od umreženog polietilena u odnosu na stare tipove kabela su:

- Odlična električka i mehanička svojstva
- Odlična otpornost na termičke deformacije pa kabele mogu raditi na trajnim temperaturama vodiča od 90°C, u nužnom pogonu 130°C te prilikom kratkog spoja 250°C
- Lagano instaliranje i spajanje
- Mogu se instalirati svugdje, te se ne mora paziti na visinske razlike
- Nije potrebno održavanje
- Mali dielektrični gubici
- Male kapacitivne struje, itd

Efekt vodenih grančica (watertreeing) već je dobro poznat i može se pojaviti u kabelima izoliranim umreženim polietilenom. Ovaj efekt naziva se i elektrokemijski treeing. Bitan utjecaj na pojavu ovog efekta ima slijedeće: prisustvo vode/vlage, mikro šupljine u izolaciji, nečistoće, ionska onečišćenja, temperatura, temperaturni gradijent, mehanička oštećenja, električno polje. [1]

Razvoj vodenih grančica možemo podijeliti u tri faze (slika 3). Prva faza je inicijacija koja se javlja zbog prisustva vode (i u nivou ppm-a) te neujednačene i neravne izolacije ili nekih onečišćenja. Druga faza je rast grančica uz prisustvo vode, iona, povećane temperature. Pri procesu tog rasta javlja se deformacija električnog polja u izolaciji, tj. na vrhovima grančica dolazi do povećanog iznosa električnog polja, što ima za posljedicu širenje tih grančica. Rast vodenih grančica je relativno spor, može trajati godinama. Treća faza je premoštenje izolacije, što ima za posljedicu električni proboj.



Slika 3. Proces razvoja vodenih grančica

2. VRSTE VODENIH GRANČICA

Po načinu širenja postoje dvije vrste vodenih grančica: vodene grančice u obliku leptir mašne (bow-tie trees) i ventilirajuće vodene grančice (vented trees). Ova dva tipa vodenih grančica imaju različite oblike.

2.1. Vodene grančice oblika leptir mašne

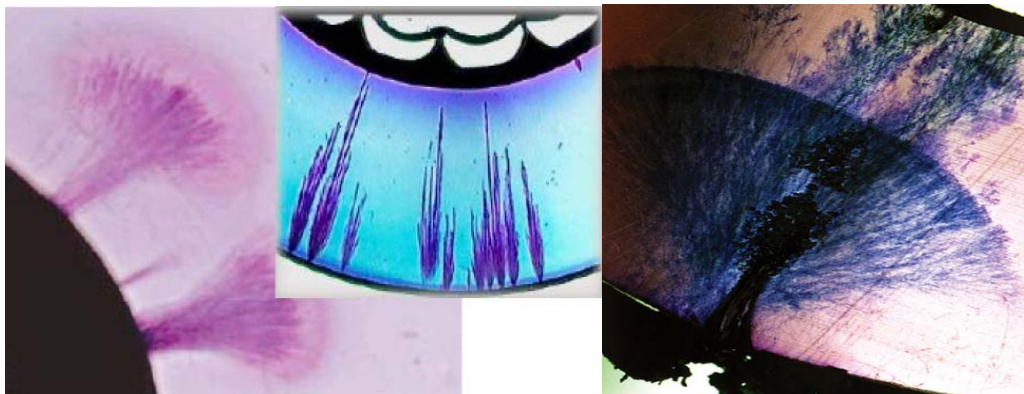
Kod grančica oblika leptir mašne, vodene kapljice (ili neka druga onečišćenja) zarobljene su unutar izolacije kabela, pa je na taj način i utjecaj vodenih grančica na proboj izolacije ograničen. Definirane su kao vodene grančice koje započinju unutar volumena izolacije kabela. Ovaj tip vodenih grančica javlja se brže nego ventilirajući tip. Takve grančice rastu u suprotnim smjerovima, a u smjeru električnog polja. Daljni rast vodenih grančica oblika leptir mašne s vremenom se smanjuje, pa je ukupna duljina nastalih grančica ograničena, te ne mogu narasti da bi bile opasne za funkcionalnost kabela. Zato uglavnom nemaju veći utjecaj na potpuni proboj izolacije.[2]



Slika 4. Vodene grančice u obliku leptir mašne[3][1]

2.2. Ventilirajuće vodene grančice

Puno opasnije od grančica oblika leptir mašne su tzv. ventilirajuće vodene grančice. To su vodene grančice koje nastaju na rubovima izolacije, sa strane zaslona vodiča ili sa strane zaslona izolacije kabela, a šire se u smjeru električnog polja. Kako ventilirajuće vodene grančice nastaju u prisustvu vode koja se ne nalazi u samoj izolaciji, već na njenim rubovima, zbog mogućnosti dospjeća daljnje količine vode na rubove izolacije, takva vrsta vodenih grančica može se proširiti do drugog ruba izolacije i/ili može biti preduvjet za nastanak električnih grančica što može dovesti do proboja izolacije. Obzirom na mjesto početka ovih vodenih grančica oblik im se malo razlikuje. Ako nastanu s vanjske strane izolacije (zaslon izolacije) imaju manje grančica, oblika su olovke, šire se direktno prema zaslonu vodiča. Kada nastaju sa strane vodiča grančice su više razgranate.



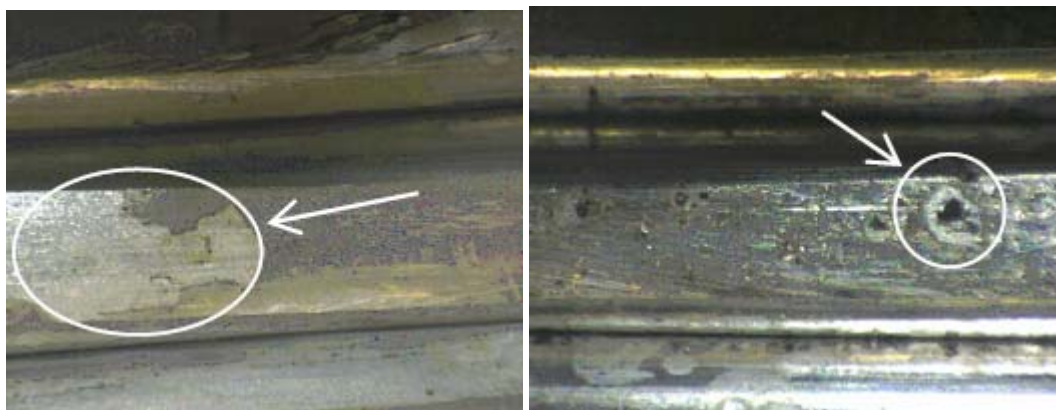
Slika 5. Ventilirajuće vodene grančice(lijevo)[1] i ventilirajuće vodene grančice na mjestu proboja(desno)[4]

Iako je često točan uzrok inicijacije ovih vodenih grančica teško utvrditi, pored prisustva vode, to može biti mehaničko oštećenje izolacije, ogrebotine, nečistoće, nekvalitetno nanijeti zasloni vodiča ili izolacije koji nemaju dobar kontakt sa izolacijom itd.

2.2.1 Ventilirajuće vodene grančice sa strane vodiča

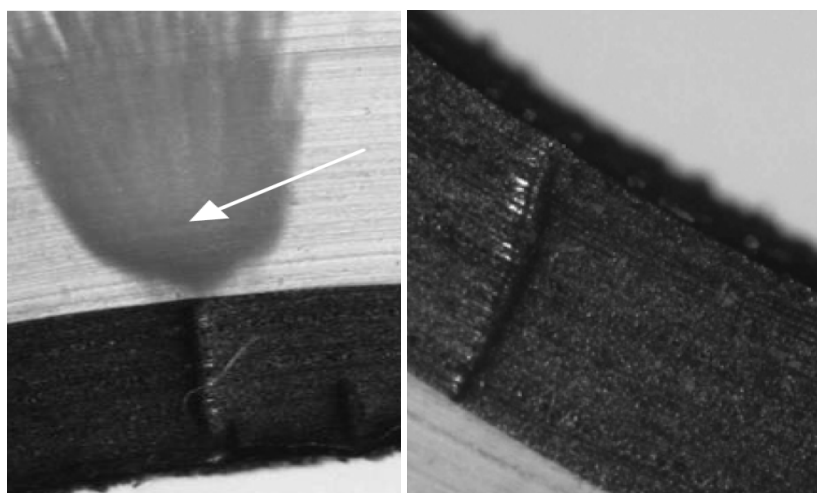
Studija objavljena 2009. godine(Hvidsten, Kvande) [5] pokazuje kako dospjeće vode u aluminijski vodič žile kabela može uzrokovati pojavu ventilirajućih vodenih grančica. Naime, otkriveno je da porozni kanalići u zaslonu vodiča nastaju elektrokemijskom reakcijom između aluminija i poluvodljivog zaslona vodiča pod utjecajem mehaničkog stresa. Ova pojava se naziva eng. *stress-induced electrochemical degradation (SIED)* [5].

Naime, dospjeće vode u aluminijski vodič izaziva koroziju aluminija. U tom kemijskom procesu nastaje vodik koji difundira u zaslon vodiča gdje pod povećanim tlakom uzrokuje mehanička oštećenja u zaslonu vodiča formirajući porozne zone. Na tim mjestima se javljaju kanalići gdje kasnije mogu nastati počeci vodenih grančica.



Slika 6. Mjesta korozije na aluminijskim žicama vodiča[5]

Nadalje, uočeno je kako dolazi do nastanka poroznih zona u zaslonu vodiča točno na mjestima gdje je na aluminiju došlo do korozije. Na nekim poroznim zonama također dolazi i do pojave poroznih kanalića, te na kraju njih do ventilirajućih vodenih grančica. Valja napomenuti kako do ventilirajućih vodenih grančica ne dolazi kod svakog poroznog kanalića, međutim njihova pojava istih na području korozije aluminija govori o tome kako su dvije pojave međusobno povezane [5].



Slika 7. Kanalići u zaslonu vodiča sa i bez vodenih grančica

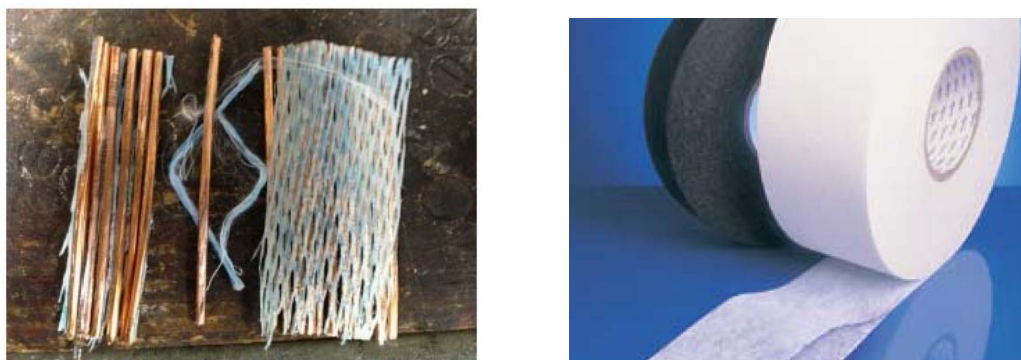
3. TEHNOLOGIJE SPREČAVANJA POJAVE VODENIH GRANČICA

Životni vijek modernih kabela sa XLPE izolacijom mora biti minimalno četrdesetak godina. Pojava ventilirajućih vodenih grančica u izolaciji je vrlo opasna i može bitno smanjiti taj životni vijek. Da bi se to izbjeglo potrebno je:

- koristiti kabele takvih konstrukcija koje sprječavaju prodiranje vode
- koristiti kvalitetne materijale i modernu tehnologiju proizvodnje
- prilikom instaliranja i u primjeni kabela spriječiti razna mehanička oštećenja i paziti da se ne prekorače sva propisana naprezanja

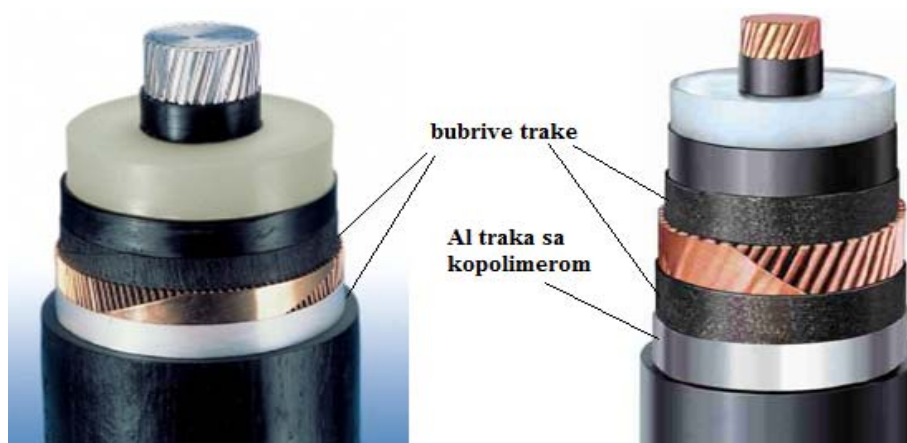
3.1. Konstrukcije kabela

Konstruktivnim rješenjima može se spriječiti prodiranje vode u kabel, uzdužno i poprečno. Najvažnije je da se u slučaju oštećenja vanjskog zaštitnog plašta ili kod električnog proboja kabela spriječi prodor vode uzduž kabela u području metalnog zaslona i vodiča kabela, tj. s vanjske i unutrašnje strane izolacije. U tu se svrhu najviše koristi bubriv prah koji se u proizvodnji kabela može direktno nanositi u područje metalnog zaslona te u vodič ili se nanosi u trake ili uzice koje se kasnije ugrađuju u kabel. Kada taj prah dođe u kontakt s vodom, jako nabubri te na taj način napravi čep na mjestu prodora vode te spriječi prodor vode duž kabela [6],[7].



Slika 8. Predivo i trake sa ugrađenim bubrivim prahom

Važno je sprečavanje i poprečnog prodora vode/vlage kroz plašt kabela kad on nije oštećen. Naime, termoplastični materijali su hidrofbni, ali imaju svojstvo apsorpcije vode. Ta apsorpcija je vrlo malena, ali za početak vodenih grančica dovoljne su i vrlo male količine (u ppm). Zato se u kabele koji moraju biti posebno pouzdani u radu, kojima se želi produžiti životni vijek ili su položeni u vlažnoj okolini ugrađuje uzdužno ispod plašta metalna traka sa slojem kopolimera sa jedne strane koja onemogućava bilo kakvo poprečno prodiranje vode. Uobičajeno se koriste aluminijske trake, a mogu biti i bakrene. Te se trake ugrađuju za vrijeme ekstrudiranja plašta kabela na način da formiraju cijev, a vrući plašt rastopi kopolimer tako da se traka nakon hlađenja čvrsto zalijepi na preklopu i za plašt kabela.

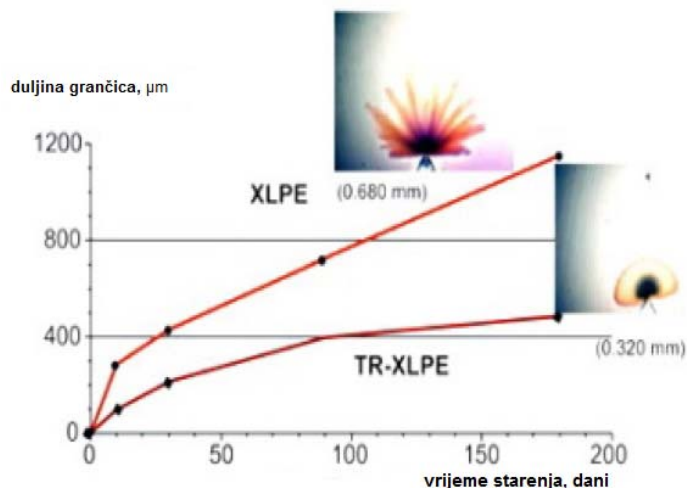


Slika 9. Sprječavanje prodora vode u metalni zaslon kabela - uzdužno (lijevo), uzdužno i poprečno (desno)

3.2 Materijali i tehnologija

Izbor materijala može znatno utjecati na pojavu i brzinu širenja vodenih grančica. Važno je koristiti kvalitetne materijale za plašt, izolaciju, zaslone te materijale za sprječavanje prodora vode. Pokazalo se da je polietilen visoke gustoće (HDPE) vrlo kvalitetan materijal za izradu vanjskog zaštitnog plašta. Ima jako dobra mehanička svojstva, a upijanje vode je vrlo malo. Zato se koristi čak i za plašteve podmorskih kabela.

Umreženi polietilen je odličan materijal za izolaciju energetskih kabela. Zbog svojih izvrsnih karakteristika danas se koristi za izoliranje energetskih kabela svih napona, od niskonaponskih kabela, sve do kabela ekstra visokih napona (EHV kabela). Poboljšanjem tehnologije izrade i dodavanjem posebnih aditiva ovi materijali se sve više razvijaju i raste im kvaliteta. Što se tiče otpornosti na vodene grančice, postoje materijali koji su dodatno poboljšani u tom smislu. Takvi materijali imaju naziv TR-XLPE (Tree Resistant XLPE). Na slici 10 prikazan je dijagram u kojemu je prikazana razlika u rastu vodenih grančica na običnom XLPE i TR-XLPE na umjetno starenim uzorcima.



Slika 10. Usporedba rasta vodenih grančica[1]

Važna je i kvaliteta poluvodljivog XLPE-a koji se koristi za izradu ekstrudiranih zaslona vodiča i izolacije. Taj materijal također ne smije biti porozan, ne smije imati nečistoće veće od propisanih te se mora dobro zalijepiti na izolaciju kabela.

Bubrivi materijali koji se koriste za sprječavanje uzdužnog prodiranja vode u kabel u području metalnog zaslona i u vodiču moraju biti tako izabrani da mogu zadovoljiti uvjete brtvljenja propisane normama za odgovarajuće kabele. Važno je da se koriste materijali koji imaju dovoljan stupanj bubrenja kako bi mogli zabrtviti određeni prostor i na taj način spriječiti širenje vode. Isto tako važna je brzina bubrenja. Dakle, u slučaju pojave vode u kabelu bubrivi materijali moraju brzo i dovoljno ekspandirati da bi kvalitetno obavili brtvljenje i zadovoljili zahtjeve normi.

Kabeli srednjeg i visokog napona moraju biti izolirani suvremenom tehnologijom trostruke ekstruzije u jednoj glavi. Umrežavanje se obavezno mora odvijati tzv. suhim postupkom, u inertnoj atmosferi dušika. Umrežavanje u vodenoj pari nije dozvoljeno. Važno je da se koristi tehnologija koja osigurava da su materijali kvalitetno prerađeni, da su ekstrudirani zasloni vodiča i izolacije dobro zalijepljeni sa izolacijom, da se postiže dovoljan stupanj umreženja, da nema nedozvoljenih mehaničkih naprezanja u izolaciji zbog čega bi moglo doći do oštećenja izolacije ili pojave mikro pukotina. Prije ekstrudiranja plašta izolacija mora biti dobro otplinuta.

3.3 Instaliranje i primjena

Prilikom polaganja kabela treba se strogo pridržavati uputa proizvođača u vezi dozvoljenih sila tijekom polaganja, dozvoljenih minimalnih promjera polaganja, temperature polaganja. Nepridržavanjem tih uputa može doći do ozbiljnih oštećenja koja mogu uzrokovati ubrzani razvoj vodenih grančica tj. do ubrzanog starenja. U primjeni je važno da se ne pojavljuju česta strujna preopterećenja, kao i prenaponi. Jedno i drugo ubrzava rast vodenih grančica.

4. ZAKLJUČAK

Do efekta vodenih grančica dolazi u izolaciji kabela u prisustvu sitnih kapljica vode te ostalih nepovoljnih uvjeta. Postoje dvije vrste vodenih grančica: ventilirajuće vodene grančice i vodene grančice u obliku leptir mašne. Grančice oblika leptir mašne ograničene su veličine te ne utječu znatno na životni vijek kabela. Ventilirajuće vodene grančice mogu dovesti do pojave električnih grančica, te sve do potpunog proboja izolacije i znatnog smanjenja životnog vijeka kabela. Kapljice vode mogu u izolaciju dospjeti preko plašta kabela (apsorpcijom i adsorpcijom vode iz okoline) ili vanjskim oštećenjem kabela. Do pojave ventilirajućih vodenih grančica može doći sa strane metalnog zaslona kabela, ili sa strane vodiča. Ako je vodič aluminijski opasna je pojava korozije aluminija. Pokazalo se kako se na mjestima korozije vodiča (aluminija) stvaraju kanalići, iz kojih se dalje mogu širiti vodene grančice te kako dolazi do nastanka poroznih zona u zaslonu vodiča točno na mjestima gdje je na aluminiju došlo do korozije. Kako bi se spriječila pojava vodenih grančica, važno je kabel zaštititi od prodora vode – poprečno i uzdužno. Na suvremenim kabelima to se najčešće radi ugrađivanjem metalne trake s kopolimerom, te bubrivih elemenata. Isto tako se mora posvetiti posebna pažnja instaliranju kabela kako bi se spriječilo bilo kakvo mehaničko oštećenje koje bi moglo imati za posljedicu pojavu vodenih grančica.

5. LITERATURA

- [1] S. Priya, A. Mubashira Anjum, „Analysis of water trees and characterization techniques in Xlpe cables“, Indian Journal of Science and Technology, Vol. 7 studeni 2014, str.127.
- [2] T. Skoršepová, " The growth of water trees in XLPE cable's insulation“, Posterus, rujan 2013.
- [3] N. Ramparsad, " Testing of water blocked cables“, ESI Africa Maintenance workshop, svibanj 2014. IEC 61850-3 Communication networks and systems in substations - part 3 General requirements, siječanj 2002.
- [4] V. Buchholz, „Finding the root cause of power cable failures“, Electric energy online, s Interneta, http://www.electricenergyonline.com/show_article.php?article=186, studeni/prosinac 2004.
- [5] S. Hvidsten, S. Kvande, A. Ryen, P. B. Larsen " Severe Degradation of the Conductor Screen of Service and Laboratory Aged Medium Voltage XLPE Insulated Cables“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.6, No1, veljača 2009., str 155.
- [6] IEC 61850-3 Communication networks and systems in substations - part 3 General requirements, siječanj 2002.
- [7] http://www.cablejoints.co.uk/upload/SCAPA___Insulative_Water_Swellable___Nylon_Polyester_Hessian_Tapes.pdf, s Interneta, siječanj 2016.
- [8] P.J. Caronia, A. Mendelsohn, L.H. Gross, J.B. Kjellqvist, "Global Trends in MV Utility Cables“, Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES, Dallas, TX, SAD, svibanj 2006., str.621