

## İSTİSMARDAKI KABELLƏRDƏ ZƏDƏLƏRİN ARADAN QALDIRILMASININ MÜASİR ÜSULLARI

**Mehti Əvəz oğlu Camalov**

*Azərbaycan Texniki Universiteti, Bakı, Azərbaycan*

### ADVANCED TECHNIQUES FOR DAMAGE REMOVAL OF CABLE IN USE

**Mehti Avaz Camalov**

*Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan: mehticamal@aztu.edu.az*

*https://orcid.org/0000-0001-6393-4503*

**Abstract.** XLPE insulated power cables serve as essential components in medium and high voltage power transmission lines, yet maximizing their resource duration poses a significant challenge for consumers. Issues such as water treeing, electric treeing, and partial discharges within the insulation system accelerate cable aging over time. In response, a novel approach has been proposed in this study to mitigate these detrimental factors. The method involves injecting a specially formulated liquid into the cable insulation to address inhomogeneities, effectively rejuvenating the cable and extending its service life by 20-30 years, as indicated by the technology's name. Furthermore, to provide context on the practical implications, a succinct analysis of the Azerbaijani cable network is presented in this article. Also, in order to explain the real situation of power cables, a brief analysis of the Azerbaijani cable network was conducted in the article.

**Keywords:** XLPE, water treeing, partial discharges, rejuvenation.

© 2024 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

### 1. Giriş

Şəhərlərin inkişafı ilə elektrik şəbəkələrinin elektrik ötürücü xətlərində artan tendensiya ilə yüksək gərginlikli kabellərdən istifadə olunur. Elektrik enerjisi ötürməsinə və paylanmasına ən vacib hissələrdən biri kimi yüksək gərginlikli kabellər mühüm rol oynayır. Orta və yüksək gərginlik sistemlərində kabellərin izolyasiyasında əsasən polimer izolyasiyadan istifadə olunur. Ənənəvi kağız-yağ izolyasiyalı kabellərlə müqayisədə, polimer izolyasiyalı elektrik kabellərinin əsas üstünlükləri daha yaxşı elektrik xassələri, yüksək istilik xüsusiyyətləri, yaxşı nəmliyə davamlılığı və kimyəvi maddələrə, həlledicilərə qarşı yüksək müqavimətə malik olmasıdır. İzolyasiya materialları arasında tikilmiş polietilen izolyasiya (TPE) əla elektrik və istilik xüsusiyyətlərinə görə yüksək gərginlikli kabellərdə geniş istifadə olunur [1].

Bu tip kabellər istismarda olduğu müddətdə, onlara qoyulan əsas tələblər izolyasiyanın aşağı səviyyəli imtina dərəcəsi və uzunömürlülüyüdür. Uzunmüddətli istismar dövründə izolyasiyanın dəşilməsi qaçılmaz olaraq baş verir və bu hadisə tədqiqatçıların böyük diqqətini cəlb etmişdir [2]. Müxtəlif şəraitlərdə deqradasiya və inkişaf mexanizmi daxil olmaqla, kabel izolyasiyasının köhnəlməsinin qiymətləndirilməsi üzrə tədqiqatlar 1960-cı illərdə başlamış və o vaxtdan bəri bir çox effektiv texnologiyalar hazırlanmışdır [3,4]. Belə tədqiqatların məqsədi kabel izolyasiyasının deqradasiya dərəcəsini müəyyən etmək və köhnə kabellərin lazımı vaxtda dəyişdirilməsini təmin etməkdir [5].

Adətən, 110 kV dəyişən gərginlikli kabellər üçün nəzərdə tutulmuş istismar müddəti 30 ildir, lakin əksər kabellər nisbətən aşağı cərəyan və temperaturda işləyir. Nəticədə, bir çox kabel öz izolyasiya xüsusiyyətlərini saxlayır. Bu kabellərin bəziləri hətta nəzərdə tutulmuş xidmət müddətinə çatmasalar da, hələ də kabel istismar standartlarına cavab verir [6]. Bir çox tədqiqatlar bildirmişdir ki, köhnəlmiş kabellər yaxşı elektrik xassələrini saxlayır və onlardan bəziləri nəzərdə tutulmuş istismar müddətinə çatmasına və izolyasiyasının deqradasiyaya məruz qalmasına baxmayaraq, kabel istismarı standartlarına cavab verdiyi üçün istifadə olunmaqdadır [7].

TPE izolyasiyalı elektrik kabellərinin ümumi köhnəlmə mexanizmlərinə su və elektrik triinqləri eləcə də, qismən boşalma mexanizmləri daxildir [8] və başqa istinadlarda orta gərginlikli bərk dielektrik kabelin əksər nasazlıqlarının əsas səbəbi kimi su triinqləri və əlaqəli hadisələr göstərilmişdir. İstinad [8]-a görə, su triinqi “bant və yelpik formasında bərk dielektriklərdə yayılmış bir quruluş”

kimi təsvir edilir (Şəkil 1). Su triinq mexanizmləri 1970-ci illərdən 1990-cı illərə qədər PE (polietilen) izolyasiyalı kabellərinin bir çox erkən imtinalarının və deşilmələrinin səbəbidir. Həmçinin, su triinqləri nəmli mühitdə TPE kabellərinin izolyasiyasının deşilməsinin əsas səbəbi kimi qəbul edilir [9-11]. Su triinqlərinin yaranması və böyümə mexanizmi bir çox nəşr olunmuş məqalələrdə müzakirə edilmişdir [12-17].

Digər tərəfdən, qismi boşalmaların baş verməsi isə bərk dielektriklərin fiziki və kimyəvi proseslər nəticəsində sıradan çıxmasına səbəb olur [18].



Şəkil 1. İzolyasiya meydana gələn su triinqləri

Polimer izolyasiyalı kabellərin köhnəlməsinin və vaxtından əvvəl sıradan çıxmasının əsas səbəblərindən biri də izolyasiyadakı qeyri-bircins oblastlarda baş verən qismi boşalma hadisəsidir [19, s.140], [20], [21]. Bu qismi boşalmalar əsasən izolyasiyanın daxilindəki hava boşluqlarında baş verir. Hava boşluqlarında qismi boşalma baş verdikdə yaranan elektron və ionlar boşluğun divarını bombardman edir və polimer molekullarının parçalanmasına səbəb olur. Bu halda, eyni zamanda azot və ozon oksidləri yaranır, bunlarda öz növbəsində güclü oksidləşdiricilər hesab olunur. Bu oksidləşdiricilər, boşluğu əhatə edən izolyasiya hissəsinin eroziyasına səbəb olan turşular yaranır. Bu proseslərin nəticəsində yavaş-yavaş boşluğun divarları dağılır, boşluq genişlənir. Uyğun olaraq ionlaşma prosesi deşilmə kanalı inkişaf edənə qədər güclənir. Əksər hallarda qismi boşalmalar (QB) dendritlərin – yəni izolyasiyanın bütün qalınlığında yayılan şaxəli kanalların əmələ gəlməsinə səbəb olur. Buna görə də ionlaşma prosesinin öyrənilməsi böyük praktiki əhəmiyyət kəsb edir. Qismi boşalma prosesi tətbiq olunmuş gərginliyin müəyyən səviyyəsində baş verir.

Elektrik triinqlərinin yaratdığı köhnəlmə isə daha da təhlükəlidir [22-25].

Bu köhnəlmə mexanizmlərini müəyyən etmək və kabel izolyasiyasının vəziyyətini aşkar etmək üçün ümumi istifadə edilən üsullara 50 Hz dielektrik itkisi, sızma cərəyanı, qismi boşalma və s. daxildir [26,27].

Lakin izolyasiyanın deqradasiyası şiddətləndikcə, izolyasiyanın nasazlığı ilə bağlı qəza ehtimalı artır. Bu halda, nəzərdə tutulmuş xidmət ilinə çatmış kabellər üçün bir problem ortaya çıxdı: istismara davam etmək və ya yeni kabellərlə əvəz etmək?

Biz burada bir çox ölkələrdə tətbiq olunsada, Azərbaycanda hələ ki, tətbiqi olmayan bir sistem barədə danışacağıq. Lakin bundan əvvəl Azərbaycanda kabel sisteminin real vəziyyəti tanış olmağı məqsəduyğun hesab edirik.

## 2. Azərbaycan kabel şəbəkəsinin qısa təhlili

“Azərişiq” ASC şərti adı X olan rayonun RETSİ üzrə 6, 10, 35 kV gərginlikli, TPE izolyasiyalı kabel xətlərində BAUR avtolaboratoriyası ilə diaqnostika sınaqları aparılmış və dielektrik itki bucağı tangensini ( $\text{tg}\delta$ ) və qismi boşalmaların səviyyəsini təyin etmək üzrə həyata keçirilmişdir. Kabel xətlərinin vəziyyəti  $\text{tg}\delta$  və qismi boşalmada ölçülən elektrik yüklərinin qiymətlərinə görə qiymətləndirilmişdir. Qərb ölkələrinin təcrübəsini nəzərə alaraq, Cədvəl 1-də aşağıdakı kriteriyalar qəbul edilmişdir:

Dielektrik itki bucağının tangensi və qismi boşalmaların səviyyəsi üçün qəbul edilmiş kriteriyalar

$\operatorname{tg}\delta (2U_0)$	QB (2U <sub>0</sub> ) pKl	
$\operatorname{tg}\delta \leq 5 \cdot 10^{-3}$	QB < 500 pKl	yararlı
$5 \cdot 10^{-3} < \operatorname{tg}\delta < 9 \cdot 10^{-3}$	500 < QB < 2000 pKl	qismən yararlı
$\operatorname{tg}\delta > 9 \cdot 10^{-3}$	QB > 2000 pKl	yararsız

Ölçmələrin nəticələrinin təhlili göstərdi ki, diaqnostika sınağı aparılmış 100 kabel xəttindən, qəbul olunmuş kriteriyalara görə 48-i yararlı, 14-ü qismən yararlı, 38-i yararsızdır.

Yararsız hesab olunan kabel xətləri illər üzrə aşağıdakı kimi bölüşür:

2001-2003 illərdə çəkilən 8 xətdən 8- i (100 %);

2004-2006- da çəkilən 9 xətdən heç biri (0 %);

2007-2009- 24- dən 8- i (33 %);

2010-2011- 50- dən 19- u (38 %);

2012-2013- 9- dan 3- ü (33 %).

Kabel xətlərində bir qismi  $\operatorname{tg}\delta$ -ın, bir qismi isə QB-ın göstəricilərinə əsaslanaraq, yararsız hesab edilmişdir. Diaqnostik sınağı aparılan və yararsız hesab edilən xətlərin iki və ya bir fazasında göstəricilər norma daxilindədir.

Yararsız hesab olunan kabellərin hamısı işlək vəziyyətdədir və imtinalar müşahidə olunmamışdır. Yararsız kimi qiymətləndirilən xətlərin əksəriyyətində muftaların sayı da çoxdur. Məsələn, elə xətlər vardır ki, hər 140-150 m-dən bir mufta quraşdırılmışdır.

Dielektrik itki bucağı tangensinin artımı ( $\operatorname{tg}\delta$ ) müxtəlif səbəblərdən ola bilər: temperaturdan, nəmlikdən, sınaq gərginliyinin qiymətindən, qismi boşalmaların səviyyəsindən. Sınaq aparılan müddətdə hər hansı səbəbdən xətlərdə lokal temperatur artımı baş verə bilər ki, bu da  $\operatorname{tg}\delta$ -nın artmasına səbəb olar və s.

Kabel xətləri çəkilən ilk anlarda onun parametrləri haqda məlumat olmadığından, istismar müddətində köhnəlmənin intensivliyi haqda da konkret fikir söyləmək çətinidir.

Yararsız kabel xətləri haqda müəyyən bir nəticəyə gəlmək üçün, istismarda olan trassın vəziyyəti, ölçü aparılan zaman kabel xəttinin yüklənmə dərəcəsi, izolyasiyanın nəmlənib-nəmlənməsi, ölçünün xətası və s. Faktorlar nəzərə alınmalıdır.

Dünya təcrübəsi göstərir ki, kabel xətləri haqda tam və dolğun fikir söyləmək üçün bir neçə istiqamətdə diaqnostik sınaqlar aparmalı, alınmış nəticələrin kompleks təhlilinə görə qərar qəbul etmək daha düzgün olardı.

Lakin bütün bunlara baxmayaraq, diaqnostik sınağın nəticələri kabel xətlərinin istismarı ilə məşğul olan təşkilat və mütəxəssislər üçün çox faydalı informasiya mənbəyidir. Belə ki, sınağın nəticələrinə pis vəziyyətdə olan kabel xətlərilə daha ehtiyatla davranmalı, normalar çərçivəsində istismar etməli, yük cərəyanının qiymətini, sınağın nəticələrini nəzərə almaqla tənzimləmək lazımdır. Bununla yanaşı, həmin xətlərdə təkrar sınaqların aparılması və nəticələrin müqaisəsinə görə kabelin köhnəlmə intensivliyini təyin etməkdə əhəmiyyətli olardı.

### 3. Təklif olunan “cavanlaşdırma” texnologiyası

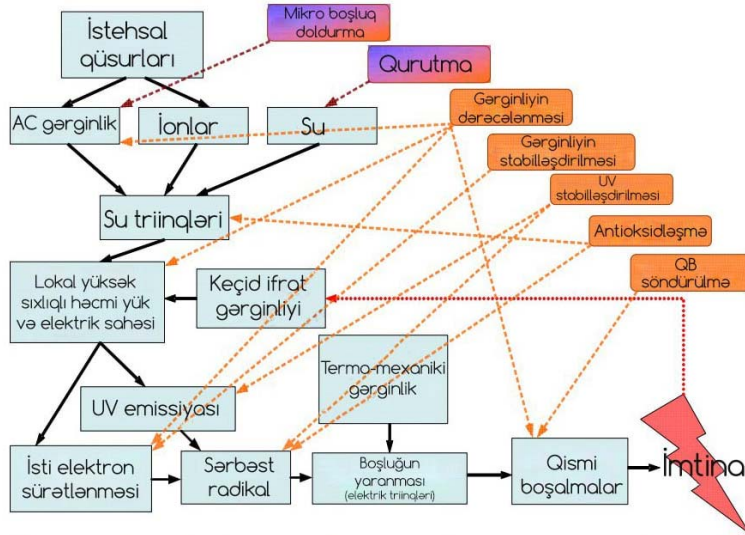
Azərbaycanın kabel sisteminin vəziyyəti ilə barəsində məlumatlandıqdan sonra təklif olunan texnologiya ilə tanış olaq. İstifadə olunduğu ölkələrdə kabelin “cavanlaşdırılması” adı ilə tanınan bu texnologiya izolyasiyaya silikon mayenin yeridilməsi yolu ilə onun yaşam müddətini azaldan hava boşlukları, su triinqləri və s kimi qeyri bircinsliklərin qarşısını almaq və kabelin ömrünü daha 20-30 il uzatmağa xidmət edir [28]. Bu sistem alçaq və yüksək təzyiqli yağla doldurulmuş kağız izolyasiyalı kabellərdə, yağın izolyasiyadakı qeyri-bircinslikləri doldurulması prinsipinə anoloji. Biz bu məqalədə bu sistem haqqında ümumi məlumat verib, onun daha detallı izahını isə növbəti məqalələrdə bildirəcəyik.

Kabelin cavanlaşması güc kabelinə onun damarı vasitəsilə silikon maye yeridilir. Maye izolyasiyada su triinqləri ilə zədələnmiş nöqtələri bərpa edən materialların qarışığından ibarətdir və yeni su triinqlərinin böyüməsinin qarşısını alır, bəzi hallarda kabeli müasir kabellərdə olan maddələrlə təkmilləşdirir. Mayenin tərkibi bu məqalədə qeyd olunmur.

Diffuziya prosesində injeksiya edilmiş maye naqillərin arasından izolyasiyadakı su triinqləri olan hissələrə keçir. İnjeksiya üçün istifadə olunan təzyiqin qiyməti cavanlaşdırma sürətinə böyük təsir göstərir. Bu baxımdan iki üsul tətbiq olunur. Birincisi alçaq təzyiq altında kabelə xüsusi mayenin injeksiyası, digəri isə yüksək təzyiqli kabel cavanlaşma prosesidir. Lakin biz burada ümumi cavanlaşma prosesi haqqında danışacağıq.

İnjeksiya mayeləri daha sonra su triinqləri olan hissələri doldurmaqla, yeni su triinqlərinin əmələ gəlməsini gecikdirməklə və bəzi hallarda izolyasiya xüsusiyyətlərini təkmilləşdirməklə kabel sisteminin etibarlı ömrünü uzatmaq üçün izolyasiyanın kimyasını və kabelin fizikasını dəyişdirir.

Şəkil 2-də kabelin köhnəlməsi və imtina mexanizmləri (düzbucaqlılar) və kabel cavanlaşmasının (dairəvi düzbucaqlılar) köhnəlməyə və qəzalara müdaxilə etdiyi mexanizmlərə dair ümumi məlumat verilir. Su triinqlərinin inkişaf mexanizmlərini və bu su triinqlərinin nəticədə necə imtinalara səbəb olduğunu izah etmək məqalənin məqsədi xaricindədir. Bunun əvəzinə Şəkil 2-də təsvir olunan prosesi qısaca nəzərdən keçiririk.



Şəkil 2. Kabelin köhnəlmə, imtina və cavanlaşma mexanizmləri

**İstehsal qüsurları** – su triinqlərinin böyüməsi üçün mütləq tələb olunmasa da, su triinqlərinin böyüməsini və yayılmasını sürətləndirir və buna görə də kabelin hər hansı bir hissəsindəki ən uzun su triinqlərin yaranma səbəbləri bu qüsurlar ola bilər [29].

**Dəyişən cərəyan gərginliyi, ionlar və su** – Bunlar su triinqlərinin böyüməsi üçün üç vacib parametrdir (Şəkil 2). Ümumiyyətlə, bu üç elementdən hər hansı birinin azalması su triinqlərinin inkişafını ləngidir.

**Lokal yüksək sıxlıqlı həcmi yük və elektrik sahələri** – böyük su triinqlərinin qaçılmaz nəticəsidir və kommutasiya, qəza, ildırım vurması və mənbədən açılmış kabel sınağı kimi keçid ifrat gərginliklər hadisələri ilə kəskinləşir.

**UV emissiyası** – həcmi yüklərin əsas vəziyyətinə qayıtmasının nəticəsidir. Polietilen rabitələrini qırmaq və zədəli sərbəst radikalları artırmaq üçün kifayət qədər enerjili ultrabənövşəyi fotonlar yayılır.

**İsti elektron sürətlənməsi** – həcmi yüklər də daxil olmaqla bəzi dielektrik defektləri ətrafında yaranan çox yüksək lokal sahələrin nəticəsidir. İsti elektronlar polietilen rabitələrini qıra və sərbəst radikallar yarada bilər.

**Termo-mexaniki gərginlik** – nəmliyin təsirinə və 24 saatlıq temperatur perioduna məruz qalan əksər köhnə kabellərdə görünən parlaq halqanın yaranmasına səbəb olur və [30]-də təsvir edilmişdir. Kabel qızdıqca, suyun polietiləndə həllolma qabiliyyəti əhəmiyyətli dərəcədə artır və ətrafdakı torpaqdan daha sürətlə kabelə su yayılır. Kabelin temperaturu aşağı düşdükcə suyun həllolma qabiliyyəti azalır və su həddindən artıq doymadan qaçmaq üçün kabeldən kifayət qədər sürətlə kənara çıxma bilmir. Termodinamik qüvvələr tərəfindən idarə olunan həddindən artıq doymuş su maye vəziyyətini keçmək yolunu axtarır və nəticədə mikro boşluqlarda kondensasiya olunur.

**Boşluğun əmələ gəlməsi** – əsasən su triinqi prosesi və termo-mexaniki gərginlik nəticəsində yaranan UV fotonları və isti elektronlar tərəfindən yaranır.

**QB (qismi boşalmalar)** – qazın elektrik sahəsi ilə ionlaşması üçün kifayət qədər böyük olan boşluqlarda özünü göstərir. Qismi boşalmaların başlanğıc gərginliyi sönmə gərginliyindən böyükdür, çünki boşluqdakı qaz bir dəfə ionlaşır.

**İmtina (qəza)** – qismi boşalmaların meydana gəldiyi boşluğun divarınının aşındırması ilə nəticələnir. PE izolyasiyadakı boşluqlarda hər bir boşalmadan sonra aşınma nəticəsində boşluğun ölçüsü artır və beləliklə, bu boşluq üçün qismi boşalmanın başlanğıc və sönmə gərginliyi azalır. Bu öz-özünə sürətlənmə o deməkdir ki, polietiləndə istismar gərginliklərində baş verən hər hansı bir QB-nin kabelin sürətli imtinalarına səbəb ola biləcəyi ehtimalı var.

Şəkil 2-də qarşısını aldığı köhnəlmə və imtina prosesinin mərhələlərini göstərən oxlarla birlikdə yeddi cavanlaşma mexanizmi (dairəvi düzbucaqlılar kimi) göstərilmişdir. Yeddi cavanlaşma mexanizmi aşağıda təsvir edilmişdir.

**MİKRO-BOŞLUQ DOLDURMA** – Optik mikroskopla çəkilə bilən boşluqlara nəzərən mikro boşluqlar daha kiçik miqyasdadır. Bu mikro-boşluqlar adətən polietiləndə kimyəvi qüsurlardır və triinq olmayan PE ilə müqayisədə suya yaxınlığı olan oksigenin, çox vaxt karboksil qruplarının olması ilə xarakterizə olunur. Silanlar su triinqlərinin içərisində oksidləşmiş PE hissələrində su ilə reaksiya verir və onları əvəzləyir (QURUTMA-ya baxın). Keçirici ionlu suyun silikon dielektriklə əvəz edilməsi izolyasiyanın elektrik möhkəmliyini artırır.

**QURUTMA** – İki qurutma effekti mövcuddur. Birincisi, silanların su ilə kimyəvi reaksiyası, lakin iki qurutma təsirindən daha az əhəmiyyətli olanıdır. Kimyəvi qurutmadan daha vacib olanı suyun yenidən daxil olmasını azaltmaq qabiliyyətidir. Bu məqsədlə, polietilen üçün təkmilləşdirilmiş materiallar istifadə olunur ki, bu yaxşı suyu itələmə qabiliyyətini təmin edir.

**GƏRGİNLİYİN DƏRƏCƏLƏNMƏSİ** – Kabellər və kabel komponentləri daxilində elektrik sahəsini qiymətləndirmək üçün yüksək dielektrik sabiti olan təbəqələrin daxil edilməsi geniş şəkildə tətbiq edilir. Kabelin cavanlaşması boşluqların içərisində mikro miqyasda gərginlik dərəcələnməsini təmin edir.

**GƏRİLMƏNİN STABİLİZASİYASI** – Ketonların gərginlik stabilizasiyası təsirləri keto-enol-tautomerizmlə bağlıdır və [31]-də izah olunmuşdur. Tautomerlər isti elektronlar üçün sabit reseptor təmin edir. Tautomerin enol forması isti elektronların enerjisinin çox hissəsini udur və keçid formalarına və sərbəst protona çevrilir. Bu rezonans keçid formaları artıq mənfəi yükü delokalizasiya edir. Nəzəriyyə ondan ibarətdir ki, isti elektron əvvəlcə tutulur, sonra termikləşir və nəhayət sərbəst buraxılır.

**UV STABİLİZASİYASI** – Cavanlaşdırma texnologiyasına 275-400 nm diapazonunda fotonları udan komponentlər daxildir. Bunlara ultrabənövşəyi absorberlər və ya qısaca UVA deyilir. Xüsusilə Tinuvin 1130 və ferrosen müvafiq udma təmin edir. Tinuvin 1130 və ferrosen hər biri PE-də yaxşı həll olur, lakin yavaş-yavaş diffuziya olunur. Onların faydalı UVA effektləri əksərən 4 onillikdən çox davam edir. UVA komponentinə əlavə olaraq, maneəli amin işıq stabilizatoru və ya HALS komponenti daxildir. HALS, sonrakı reaksiya polimerin deqradasiyasına gətirib çıxarmazdan əvvəl radikalları tutan sərbəst radikal təmizləyiciləridir. [32]-də göstəriləndiyi kimi, HALS özünü bərpa edir. Sərbəst radikalı söndürdükdən sonra HALS bərpa olunur və sonra başqa bir sərbəst radikalı söndürə bilər. Birlikdə UVA və HALS tək başına olduğundan daha çox UV dayanıqlığını təmin edir.

**ANTIOKSIDLƏŞMƏ** – Antioksidantlar demək olar ki, bütün müasir kabel birləşmələrinin tərkibinə daxildir. Əvvəlcə ekstruziya prosesi zamanı oksidləşmənin qarşısını almaq üçün istifadə edilsə də, [33]-də antioksidantların su triinqlərinin böyüməsini də yavaşlatdığı göstərilmişdir. [34]-

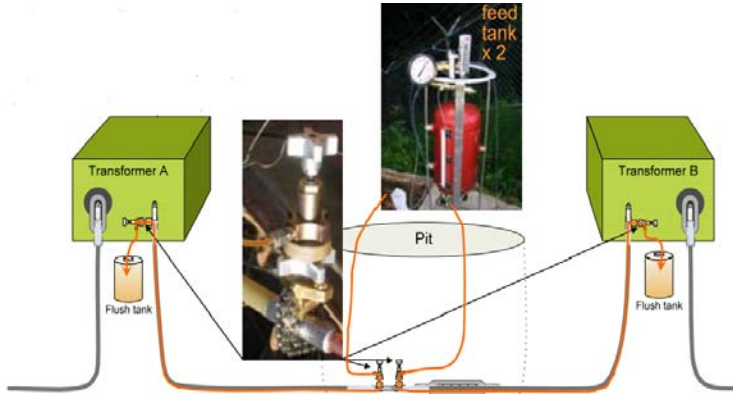
də antioksidantların mövcudluğu elektrik triinqlərinin başlanğıc gərginliyini artırır. Fenolik antioksidant olan kükürd tərkibli KV10 su triinqlərinin böyüməsini dörd dəfə ləngidir. Tərkibində fenolik antioksidant olan bu kükürd sinfinin elektrik triinqinin başlanğıc gərginliyini yalnız 0,2% konsentrasiya ilə 75%-ə qədər artırdığı göstərilmişdir. KV10 polietilendə çox yüksək həll qabiliyyətinə malikdir və yüksək molekulyar çəkisi 424,7 olduğuna görə çox aşağı diffuziya sürətinə malikdir.

**QB SÖNDÜRÜLMƏSİ** – Qismi boşalmaların qarşısının alınmasında bir neçə mexanizm var [35]. Əvvəlcə qeyd edildiyi kimi, gərginliyin dərəcələnməsi qismi boşalmanın başlanğıc və sönmə gərginliyini artırır. [36]-də təsvir olunduğu kimi, bəzən kosmik şüalardan çıxan sərbəst elektron QB-nin başlaması üçün zəruri olur. Buna görə də, ikinci mexanizm [30] və [31]-də qeyd olunmuş gərginlik stabilizatorunu (geranilaseton) və [37]-də göstəriləndiyi kimi ferroseni qəbul edən elektron tərəfindən təmin edilir.

Üçüncü və dördüncü mexanizmlər də ferrosen tərəfindən təmin edilir. Ferrosenin olması qismi boşalmaların başlanmasının qarşısını almaq üçün nəzərdə tutulmuşdur. Bu təsirlər başlanğıcda olan qismi boşalmaları tez bir zamanda söndürür və boşalma baş verdikdə normal olaraq dəymiş zərəri azaldır.

**İnjesiya prosesinin ümumi strukturu aşağıda göstərilmişdir.**

- Xətti şəbəkədən ayırmaq, sınaq etmək və torpaqlamaq (A-B)
- Bütün birləşmələri aşkar etmək, qazmaq
- Bütün sonluq və birləşdirici muftaları ləğv etmək
- Yeni birləşdiriciləri, inyeksiya adapterini və yeni muftaları yerləşdirmək
- İnjesiya adapter və birləşdiriciləri bərkitmək
- Orta təzyiqdə inyeksiya etmək



Şəkil 3. İnjesiya prosesinin ümumi strukturu

İnjesiya prosesində istifadə olunan adapter və birləşdiricilərin görünüşü şəkil 4-də göstərilmişdir. Bildirmək istərdik ki, Azərbaycanda yerləşən kabel şəbəkəsində istifadə olunacaq adapterin və birləşdiricilərin konstruktiv quruluşu növbəti məqaləmizdə əks olunacaqdır.



Şəkil 4. İnjesiya prosesində istifadə olunan adapter və birləşdirici



### Cavanlaşmanın Faydaları

• **Xərclərə qənaət.** Orta hesabla, cavanlaşma proqramı kabelin dəyişdirilməsinə nəzərən xərclərə 40% qənaət edir. Bununla yanaşı, eyni büdcə ilə daha çox kilometr uzunluqlu kabeli bərpa etməyə kömək edir.

• **Ekoloji Təsir.** Kabelin cavanlaşması proqramı ilə ətraf mühit çirkənlənməsi azaldılır. Yeni kabel istehsalı üçün heç bir resurs sərf olunmur. Quraşdırmaya heç bir yanacaq sərf edilmir.

• **Daha az fasilələr.** Cavanlaşma sürətli şəkildə həyata keçirə bildiyindən, işlədiciyə enerji qalacağı hallar daha az olur.

• **Aşağı imtina dərəcəsi.** Son 30 ildə 50 min kilometrədən çox kabel cavanlaşdırılıb və dünyanın beş qitəsində 300-dən çox kommunal xidmət kabel cavanlaşdırılmasından istifadə edib. Bu müddət ərzində inyeksiyadan sonrakı ümumi imtina dərəcəsi 3,5 faizdən azdır.

### 4. Nəticə

TPE izolyasiyalı kabellərin köhnəlməsinin və qısa zamanda sıradan çıxmasının başlıca səbəbləri olan su triinqlərin aradan qaldırılması və inkişafının ləngidilməsi məsələsi ədəbiyyatlarda müxtəlif metodlar tətbiq olunmaqla həll edilə biləcəyi vurğulanmışdır. Başqa ölkələrin praktikasında mövcud olsa da, ölkəmizdə istifadə olunmayan cavanlaşma texnologiyasının analizi bu məqalənin əsas mövzusu olmuşdur. Məqalədə bu texnologiyanın köhnəlməsinin qarşısı alma mexanizmləri qısa şəkildə qeyd olunmuşdur. Xüsusilə də, izolyasiyanın su triinqləri olan hissəsinə kabelin damarı vasitəsilə injeksiya olunan xüsusi tərkibli silikon mayenin bu qeyri-bircinliyin inkişafını ləngitdiyi qeyd olunmuşdur. İnjeksiya prosesinin mərhələləri və bu prosesdə istifadə olunan bəzi birləşdirici elementlər, onların təsviri prosesi daha aydın izah etmişdir. Son olaraq, cavanlaşma texnologiyasının kapital qoyuluşunun artan xeyir tendensiyası bu sistemin ölkəmizdə də inşa edilə biləcəyini istisna etmir. İnjeksiya prosesinin icra məsələləri, mövcud sistemə adaptasiya olunması və injeksiyanın həyata keçirilməsi ilə bağlı işlərin davam etdiyini qeyd etmək lazımdır və gələcək məqalələrdə aparılmış sahə sınaqlarının nəticələri barədə daha ətraflı məlumat veriləcəkdir.

### ƏDƏBİYYAT

1. Su C.Q. "Failure analysis of three 230kV XLPE cables," 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), Sao Paulo, Brazil, 2010, pp. 22-25, doi: 10.1109/TDC-LA.2010.5762855.
2. Fothergill J.C., Montanari G.C., Stevens G.C., Laurent C., Teyssedre G., Dissado L.A., Nilsson U.H., and Platbrood G. "Electrical, microstructural, physical and chemical characterization of HV XLPE cable peelings for an electrical aging diagnostic data base," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 10, no. 3, pp. 514-527, Jun. 2003.
3. Green C.D., Vaughan A.S., Stevens G.C., Sutton S.J., Geussens T., and Fairhurst M.J. "On the temperature dependence of electrical and mechanical properties of recyclable cable insulation materials based upon polyethylene blends," presented at the Elect. Insul. Dielectric Phenomena, Oct. 19, 2011. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6232590>
4. Aras F., Alekperov V., Can N., and Kirkici H. "Aging of 154 kV underground power cable insulation under combined thermal and electrical stresses," IEEE Elect. Insul. Mag., vol. 23, no. 5, pp. 25-33, Sep. 2007.
5. Durman V., Váry M., Pačka J., Lelák J., Šály V. "Assessment of dielectric properties of cable insulation," presented at the Int. Sci. Conf. Electr. Power Eng., May 19, 2017. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7967226>
6. Gao W. and Tang Z. "Characteristic analysis of the insulation state of single-core XLPE Cables," Adv. Mater. Res., vols. 805-806, pp. 902-905, Sep. 2013. [6] C. Katz and W. Zenger, "Service aged 69 and 115 kV XLPE cables," IEEE Trans. Power Del., vol. 14, no. 3, pp. 685-689, Jul. 1999.
7. Li W., Li J., Wang X., Li S., Chen G., Zhao J., and Ouyang B. "Physicochemical origin of space charge dynamics for aged XLPE cable insulation," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Apr. 2014, vol. 21, no. 2, pp. 809-820
8. Steennis F., Boone W., and Monfoort A. "Water Treeing in Service Aged Cables, Experience and Evaluation Procedure," IEEE Trans. Power Del., vol. 5, no. 1, Jan 1990.
9. Chmura L., Cichecki P., Gulski E., Smit J. J., and De Vries F. "Life time estimation of serviced aged oil-paper insulated HV power cables based on the dielectric loss measurements (tan  $\delta$ )," in Proc. Conf. Rec. IEEE Int. Symp. Electr. Insul., Jun. 2010, pp. 1-4.
10. Ghorbani H., Saltzer M., and Olsson C.O. "Observation of nonmonotonic dependence of leakage current with temperature during thermal cycling," in Proc. 34th Electr. Insul. Conf. (EIC), Jun. 2016, pp. 488-491.

11. Fynes-Clinton D. and Nyamupangedengu C. "Partial discharge characterization of cross-linked polyethylene medium voltage power cable termination defects at very low frequency (0.1 Hz) and power frequency test voltages," IEEE Elect. Insul. Mag., vol. 32, no. 4, pp. 15-23, Jul. 2016.
12. Boggs S. and Xu J. "Water Treeing-Filled versus Unfilled Cable Insulation", IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 17, No. 1, pp. 23-29, 2001.
13. Hampton N., Hartlei R., Lennartsson H., Harry O. and Ram R. "Long-life XLPE Insulated Power Cable", Proc. Jicable07 Conf., pp. 350-356, 2007.
14. Ross R. "Inception and Propagation Mechanisms of Water Treeing", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, pp. 660- 680, 1998.
15. Zhou K., Zhao W. and Tao X. "Toward understanding the relationship between insulation recovery and micro structure in water tree degraded XLPE cables," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20, no. 6, pp. 2135-2142, December 2013, doi: 10.1109/TDEI.2013.6678862.
16. Zhou K., Huang M., Tao W., He M. and Yang M. "A possible water tree initiation mechanism for service-aged XLPE cables: Conversion of electrical tree to water tree," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 23, no. 3, pp. 1854-1861, June 2016, doi: 10.1109/TDEI.2016.005405.
17. Li J., Zhao X., Yin G., Li S., Zhao J., & Ouyang B. The effect of accelerated water tree ageing on the properties of XLPE cable insulation. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011,18(5), 1562-1569. doi:10.1109/tdei.2011.603282
18. Morshuis P.H.F. "Degradation of Solid Dielectrics due to Internal Partial Discharges: Some thoughts on progress made and where to go now," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, No. 5, pp. 905- 914, 2005.
19. Orucov A.O., Rzayev R.H., Niftiyev S.N. Yüksək istismar xarakteristikalarına malik tikilmiş polietilen izolyasiyalı güc kabelləri. Bakı , ELM, 2013, 341 s.
20. Rosle N., Muhamad N.A., Rohani M.N. K.H. and Jamil M.K.M. "Partial Discharges Classification Methods in XLPE Cable: A Review," in IEEE Access, vol. 9, pp. 133258-133273, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3115519.
21. Gouda O.E., ElFarskoury A.A., Elsinnary A.R. and Farag A.A. Investigating the effect of cavity size within medium-voltage power cable on partial discharge behaviour. IET Gener. Transm. Distrib., 12: 1190-1197. 2018. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1012>
22. Dissado L.A., "Understanding Electrical Trees in Solids: From Experiment to Theory," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 9, No. 4, pp. 483-497, 2002.
23. Shimizu N., Laurent C. "Electrical Tree Initiation," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 5, No. 5, pp. 651-659, 1998.
24. Minghui Bao et al. "The initiation phenomena of electrical treeing in XLPE cable insulation," 2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application, Shanghai, 2012, pp. 431-434, doi: 10.1109/ICHVE.2012.6357142.
25. Liu M., Liu Y., Li Y., Zheng P. and Rui H. "Growth and partial discharge characteristics of electrical tree in XLPE under AC-DC composite voltage," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 24, no. 4, pp. 2282-2290, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006537.
26. Elayyan H.S.B. and Abderrazzaq M.H. "Electric Field Computation in Wet Cable Insulation Using Finite Element Approach" IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, pp. 1125- 1133, 2005.
27. Hvidsten S., Ildstad E., Sletbak J. and Faremo H. "Understanding Water Treeing Mechanisms in the Development of Diagnostic Test Methods", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 15, pp. 754- 759, 1998.
28. Bertini G.J. "New developments in solid dielectric life extension technology," Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, IN, USA, 2004, pp. 527-531, doi: 10.1109/ELINSL.2004.1380678.
29. Həşimov A.M., Orucov A.O., Camalov M.Ə. "İstehsal prosesində kabellərin polimer izolyasiyasında yaranan defektlər" "Azərbaycan və Türkiyə Universitetləri: təhsil, elm, texnologiya" I Beynəlxalq elmi-praktiki konfrans Azərbaycan Texniki Universiteti 18-20 dekabr 2019. s. 329-332
30. Bertini G.J. "Molecular thermodynamics of water in direct-buried power cables," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 22, no. 6, pp. 17-23, Nov. -Dec. 2006, doi: 10.1109/MEI.2006.253417.
31. Wartusch. "Increased voltage endurance of polyolefin insulating materials by means of voltage stabilizers," IEEE 1980.
32. Step et al. "Mechanism of Polymer Stabilization by Hindered-Amine Light Stabilizers (HALS). Model Investigations of the Interaction of Peroxy Radicals with HALS, Amines, and Amino Ethers", Macromolecules 1994, v. 27, pp. 2529-2539.
33. Matey & Labbe. "Exploring the Water Treeing Inhibition Effect of Antioxidants for XLPE Insulation", Jicable '07, 7th International Conf. on Insulated Power Cables, pp. 754-757.
34. Sekii et al. "Effects of Antioxidants on Electrical Tree Generation in XLPE", 2001 IEEE 7th Int'l Conf. on Solid Dielectrics, June 25-29, pp 460-464.
35. Bertini G.J. and Chy H. "Rejuvenation Addresses Partial Discharge in Power Cables," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 28, no. 2, pp. 688-696, April 2021, doi: 10.1109/TDEI.2020.009286.
36. Boggs. "Diagnostic Techniques for Medium and High Voltage Cable", 2003 Spring ICC, Subcommittee A.



37. Gubin et al. "Redox Properties of Cyclopentadienylmetal Compounds Ferrocene, Ruthenocene, Osmocene", J. Organometallic Chem., v. 30 (1971), pp 243-255.

## İSTİSMARDAKI KABELLƏRDƏ ZƏDƏLƏRİN ARADAN QALDIRILMASININ MÜASİR ÜSULLARI

M.Ə.Camalov

**Xülasə.** TPE izolyasiyalı güc kabelləri orta və yüksək gərginlik elektrik veriliş xətlərində əvəzəlməz rol oynayır. Bununla yanaşı həmin kabellərin resurs müddətlərindən maksimum istifadə olunması istehlakçılar qarşısında duran ən böyük məsələlərdəndir. Lakin izolyasiya sistemində yaranan su və elektrik triinqləri, qismi boşalmalar kabellərin tez zamanda köhnəlməsinə gətirib çıxarır. Məqalədə izolyasiya sisteminə təsir göstərən bu faktorların aradan qaldırılması üçün yeni bir üsul təklif olunmuşdur. Bu üsulun mahiyyəti kabel izolyasiyasında yaranmış qeyri-bircinsliklərin onun daxilinə injeksiya edilmiş xüsusi tərkibli maye ilə bərpa olunmasıdır. Bu işə texnologiyanın adına uyğun olaraq kabelin cavanlaşmasına və istismar müddətinin 20-30 il artmasına səbəb olur. Həmçinin, məqalədə güc kabellərin real vəziyyətini izah etmək üçün Azərbaycan kabel şəbəkəsinin qısa təhlili də aparılmışdır.

**Açar sözlər:** TPE, su triinqləri, qismi boşalmalar, cavanlaşdırma.

Accepted: 12.03.2024