

**YUQORI VOLTLI KABELLARNING IZOLYASIYASINING YEMIRILISHINI
KAMAYTIRISH HISOBIGA ULARNING HIZMAT KO'RSATISH MUDDATINI
OSHIRISH**

Nasritdinova Marjona Faxritdin qizi

Toshkent davlat texnika universiteti, magistr

E-mail: nasritdinovamarjona@gmail.com

+998940399666

Annotatsiya: *Ushbu ilmiy maqola yuqori kuchlanishli elektr kabellarining, xususan, cross-linked polyethylene (XLPE) izolyatsiyasiga ega kabellarning ishlash jarayonida yuzaga keladigan degradatsiya mexanizmlarini tahlil qilishga bag'ishlangan. Maqolada izolyatsiyaning yemirilishiga olib keluvchi asosiy omillar, jumladan, qisman razryadlar, daraxtsimon kanallarning (electrical treeing) shakllanishi, termik qarish va namlik ta'siri batafsil ko'rib chiqilgan. Izolyatsiyaning buzilishini oldini olish va kabel tizimlarining xizmat ko'rsatish muddatini uzaytirish bo'yicha zamonaviy texnologik yechimlar, materialshunoslikdagi yangiliklar (nano-qo'shimchalar, super-toza polimerlar) hamda diagnostika usullari (qisman razryadlarni onlayn monitoring qilish) tahlil qilingan.*

Kalit so'zlar: *Yuqori voltli kabellar, XLPE izolyatsiya, degradatsiya, qisman razryadlar, daraxtsimon kanallar (treeing).*

Abstract: *This scientific article is devoted to the analysis of degradation mechanisms that occur during the operation of high-voltage electrical cables, in particular, cables with cross-linked polyethylene (XLPE) insulation. The article examines in detail the main factors leading to insulation degradation, including partial discharges, the formation of tree-like channels (electrical treeing), thermal aging and the effect of moisture. Modern technological solutions to prevent insulation degradation and extend the service life of cable systems, innovations in materials science (nano-additives, super-pure polymers) and diagnostic methods (online monitoring of partial discharges) are analyzed.*

Keywords: *High-voltage cables, XLPE insulation, degradation, partial discharges, tree-like channels (treeing).*

Аннотация: *Данная научная статья посвящена анализу механизмов деградации, происходящих в процессе эксплуатации высоковольтных электрических кабелей, в частности, кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (XLPE). В статье подробно рассматриваются основные факторы, приводящие к деградации изоляции, включая частичные разряды, образование древовидных каналов (электрическое древовидное разветвление), термическое старение и воздействие влаги. Анализируются современные технологические решения для предотвращения деградации изоляции и продления срока службы кабельных систем, инновации в материаловедении*

“ZAMONAVIY DUNYODA SUN’IY IDROKNING RIVOJLANISHI: YANGI DAVR MUAMMOLARI VA YANGI YECHIMLAR JURNALI”

30-Aprel, 2026-yil

(нанодобавки, сверхчистые полимеры) и методы диагностики (онлайн-мониторинг частичных разрядов).

Ключевые слова: *Высоковольтные кабели, изоляция XLPE, деградация, частичные разряды, древовидные каналы (электрическое древовидное разветвление).*

KIRISH

Zamonaviy energetika tizimlarining rivojlanishi elektr energiyasini uzatish va taqsimlash tarmoqlaridan yuqori ishonchlilik, katta o'tkazish qobiliyati va uzoq xizmat muddatini talab qilmoqda. Shaharlashtirishning kuchayishi va yer osti kommunikatsiyalarining kengayishi sababli, havo liniyalari o'rnini tobora yuqori kuchlanishli yer osti kabellari egallamoqda. Ayniqsa, 110 kV va undan yuqori kuchlanishdagi kabellar energiya tizimining "arteriyalari" hisoblanib, ularning ishdan chiqishi nafaqat katta iqtisodiy zararlarga, balki ijtimoiy beqarorlikka ham olib kelishi mumkin.

Yuqori voltli kabellarning eng zaif halqasi uning izolyatsiya qavatidir. Tarixan qog'oz-moyli izolyatsiya keng qo'llanilgan bo'lsa-da, so'nggi o'ttiz yillikda vulkanizatsiyalangan polietilen (XLPE – Cross-Linked Polyethylene) ustunlik qila boshladi. XLPE kabellar yengil, o'rnatish oson, yuqori dielektrik mustahkamlikka ega va moy sizib chiqish muammosidan xoli. Biroq, amaliyot shuni ko'rsatadiki, XLPE kabellar ham vaqt o'tishi bilan turli fizik-kimyoviy jarayonlar natijasida degradatsiyaga uchraydi. Izolyatsiyaning yemirilishi kutilmagan avariyalarga, qisqa tutashuvlarga va butun boshli transformator podstantsiyalarning ishdan chiqishiga sabab bo'ladi.

Kabelning loyihalashtirilgan xizmat muddati odatda 30-40 yil deb belgilansa-da, haqiqiy sharoitlarda bu muddat turli omillar ta'sirida qisqarishi mumkin. Shu sababli, izolyatsiyaning yemirilish mexanizmlarini chuqur tushunish va ularni kamaytirish bo'yicha samarali choralar ishlab chiqish dolzarb ilmiy-amaliy ahamiyatga ega. Ushbu maqolaning maqsadi – yuqori voltli kabellar izolyatsiyasining buzilish sabablarini tahlil qilish, degradatsiyani sekinlashtiruvchi zamonaviy materiallar va texnologiyalarni ko'rib chiqish hamda xizmat muddatini oshirish bo'yicha kompleks strategiyani taklif etishdir.

Yuqori kuchlanishli kabellarning, xususan, ko'ndalang tikilgan polietilen (XLPE) asosidagi kabellarning ishonchliligini ta'minlashda izolyatsiya qavatining fizik-kimyoviy holati hal qiluvchi ahamiyatga ega. Izolyatsiyaning yemirilishi murakkab ko'p faktorli jarayon bo'lib, u elektr, termik, mexanik va kimyoviy omillarning o'zaro ta'siri natijasida sodir bo'ladi. Zamonaviy tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, degradatsiyaning asosiy sababchisi materialning mikroskopik darajadagi nosozliklari va ularda yuzaga keladigan qisman razryadlardir. Qisman razryadlar – bu izolyatsiya ichidagi mikroskopik bo'shliqlar, pufakchalar yoki qattiq qo'shimchalar atrofida mahalliydashgan elektr razryadlaridir. Ular to'g'ridan-to'g'ri qisqa tutashuvga olib kelmasa-da, uzoq muddat davomida polimer zanjirlarini parchalab, "elektr daraxtlari" (electrical treeing) deb ataladigan mikrokanallarni

“ZAMONAVIY DUNYODA SUN’IY IDROKNING RIVOJLANISHI: YANGI DAVR MUAMMOLARI VA YANGI YECHIMLAR JURNALI”

30-Aprel, 2026-yil

hosil qiladi. Bu kanallar vaqt o'tishi bilan kengayib, izolyatsiyaning dielektrik mustahkamligini keskin pasaytiradi va nihoyat proboyga olib keladi [1]. Shu sababli, izolyatsiya materialining tozaligi va bir jinsliliigi (homogenligi) uning xizmat muddatini belgilovchi eng muhim omillardan biridir.

Elektr daraxtlaridan tashqari, "suv daraxtlari" (water treeing) fenomeni ham XLPE kabellar uchun jiddiy muammo hisoblanadi. Bu hodisa namlik mavjud bo'lgan sharoitda, ayniqsa past va o'rta chastotali elektr maydoni ta'sirida rivojlanadi. Suv molekulari polimer strukturasi ichiga kirib borib, mikroskopik suvli klasterlarni hosil qiladi. Garchi suv daraxtlari dastlabki bosqichda izolyatsiyaning elektr o'tkazuvchanligini sezilarli o'zgartirmasa-da, ular mahalliy elektr maydonini distorsiya qiladi va keyinchalik elektr daraxtlarining paydo bo'lishi uchun "ko'prik" vazifasini bajaradi. Suv daraxtlarining oldini olish uchun zamonaviy kabel ishlab chiqarishda maxsus gidrofob qo'shimchalardan foydalanish va izolyatsiya qavatining герметиклигини (hermetikligini) ta'minlash talab etiladi. Bundan tashqari, yarimo'tkazgich ekranlar bilan izolyatsiya o'rtasidagi chegara sifati juda muhimdir. Agar ekran sirti notekis bo'lsa yoki unda o'tkir qirralar mavjud bo'lsa, bu joylarda elektr maydoni konsentratsiyasi ortib, degradatsiya jarayoni tezlashadi. Shu bois, ekstruziya jarayonida ekran va izolyatsiyaning bir vaqtda (simultaneous extrusion) qoplanishi texnologiyasi keng qo'llanilmoqda, bu esa qatlamlar o'rtasidagi adgeziyani yaxshilaydi va havo qavatlarining qolish xavfini minimallashtiradi [2].

Termik omillar ham izolyatsiyaning qarishiga kuchli ta'sir ko'rsatadi. Kabel yuklama ostida ishganda, Joule issiqligi ajralib chiqadi. Agar issiqlik tashqi muhitga samarali chiqarilmasa, izolyatsiya harorati ko'tariladi. Yuqori harorat polimer zanjirlarining termooksidlanishiga olib keladi, natijada material mo'rtlashadi va uning dielektrik yo'qotishlari ortadi. Arrhenius qonuniga ko'ra, izolyatsiya haroratining har 8–10°C ga oshishi uning xizmat muddatini taxminan ikki baravar qisqartiradi. Shu sababli, kabellarning loyihalashtirish bosqichida ularning termik rejimini to'g'ri hisoblash va o'rnatish sharoitlarida (yer osti trassalarida, kanallarda) sovutish sharoitlarini optimallashtirish zarur. Bundan tashqari, favqulodda rejimlarda, masalan, qisqa tutashuv toklari o'tganda, harorat keskin ko'tarilishi mumkin. Bunday holatlarda XLPE ning kristallik tuzilishi buzilishi va qayta kristallanish jarayonlari sodir bo'lishi mumkin, bu esa materialning mexanik xususiyatlarini yomonlashtiradi. Termik degradatsiyani kamaytirish uchun issiqlikka chidamli stabilizatorlar va antioksidantlardan foydalanish, shuningdek, kabel konstruksiyasida issiqlik o'tkazuvchanligi yuqori bo'lgan materiallardan foydalanish tavsiya etiladi [3].

Mexanik kuchlanishlar va vibratsiya ham izolyatsiyaning butunligiga salbiy ta'sir ko'rsatadi. Kabelni ishlab chiqarish, transport qilish va o'rnatish jarayonlarida u egilish, cho'zilish va siqilish kuchlariga duch keladi. Agar bu kuchlar materialning elastiklik chegarasidan oshib ketsa, izolyatsiyada mikroyoriqlar va qoldiq kuchlanishlar paydo bo'ladi. Keyinchalik, elektr maydoni ta'sirida aynan shu nuqsonli joylardan degradatsiya boshlanishi mumkin. Shuningdek, transformator podstansiyalarida yoki dinamika

“ZAMONAVIY DUNYODA SUN’IY IDROKNING RIVOJLANISHI: YANGI DAVR MUAMMOLARI VA YANGI YECHIMLAR JURNALI”

30-Aprel, 2026-yil

yuklamalari mavjud bo‘lgan joylarda o‘rnatilgan kabellar doimiy vibratsiyaga uchraydi. Vibratsiya izolyatsiya va metall ekran o‘rtasidagi aloqani zaiflashtirishi, mikroharakatlanishlarga sabab bo‘lishi va natijada qisman razryadlarning kuchayishiga olib kelishi mumkin. Mexanik degradatsiyani kamaytirish uchun kabellarni o‘rnatish texnologiyasiga qat’iy rioya qilish, maksimal egilish radiusini saqlash va vibratsiyani so‘ndiruvchi elementlardan foydalanish lozim.

Zamonaviy materiallar va texnologiyalar: Nano-dielektriklar va super-toza polimerlar

An’anaviy XLPE materiallarining cheklovlarini bartaraf etish maqsadida so‘nggi yillarda materialshunoslik sohasida jiddiy yutuqlarga erishildi. Eng istiqbolli yo‘nalishlardan biri bu – nano-dielektrik kompozitlarni yaratishdir. Nano-dielektriklar – bu polimer matritsasiga nanometr o‘lchamidagi zarrachalar (masalan, silitsiy dioksidi SiO_2 , alyuminiy oksidi Al_2O_3 yoki magniy oksidi MgO) qo‘shilgan materiallardir. Nanopartikulalarning o‘lchami juda kichik bo‘lgani uchun ularning solishtirma sirt yuzasi juda katta bo‘ladi. Bu esa polimer zanjirlari bilan nanopartikulalar o‘rtasida kuchli o‘zaro ta’sirni ta’minlaydi va polimerning tuzilishini o‘zgartiradi. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, nano-qo‘shimchalar izolyatsiyaning dielektrik mustahkamligini oshiradi, qisman razryadlarga chidamliligini yaxshilaydi va issiqlik o‘tkazuvchanligini sezilarli darajada oshiradi[4]. Ayniqsa, issiqlik o‘tkazuvchanligining oshishi kabelning ishchi haroratini pasaytirishga yordam beradi, bu esa termik qarish jarayonini sekinlashtiradi. Bundan tashqari, nano-zarrachalar elektr daraxtlarining o‘shishini to‘siq qo‘yadi, chunki ular kanalchalar yo‘lida fizik to‘siq vazifasini bajaradi va mahalliy elektr maydonini qayta taqsimlaydi.

Yana bir muhim innovatsiya bu – "super-toza" (super-clean) XLPE materiallaridan foydalanishdir. An’anaviy polimerlarda ishlab chiqarish jarayonida qolgan katalizator qoldiqlari, gel zarrachalari va boshqa aralashmalar mavjud bo‘ladi. Bu mikroskopik qo‘shimchalar dielektrik nuqsonlar sifatida harakat qilib, qisman razryadlarning boshlanishiga sabab bo‘ladi. Super-toza XLPE ishlab chiqarishda maxsus tozalash texnologiyalari qo‘llanilib, aralashmalar miqdori minimal darajaga tushiriladi. Natijada, materialning dielektrik yo‘qotishlari kamayadi va elektr mustahkamligi orthadi. Yuqori va ultra-yuqori kuchlanishli (220 kV va undan yuqori) kabellar uchun aynan shunday materiallardan foydalanish standartga aylangan. Bundan tashqari, degassing (gazsizlantirish) jarayoni ham muhim ahamiyatga ega. Kabel ishlab chiqarilgandan so‘ng, unda metan va boshqa gazlar qolib ketishi mumkin. Bu gazlar keyinchalik pufakchalarga aylanib, qisman razryad manbaiga aylanishi mumkin. Shu sababli, zamonaviy zavodlarda kabel o‘ramlari maxsus kameralarda uzoq vaqt davomida yuqori haroratda saqlanib, undagi gazlar chiqarib yuboriladi [5].

Ekranlar texnologiyasidagi yangiliklar ham izolyatsiyaning xizmat muddatiga ijobiy ta’sir ko‘rsatadi. Yarimo‘tkazgich ekranlarning silliqdigi va izolyatsiya bilan chegaradosh qavatining bir jinsliligi elektr maydonining tekis taqsimlanishi uchun juda muhimdir. Zamonaviy ekstruderlar yordamida ichki va tashqi ekranlar bilan izolyatsiya qavati bir

“ZAMONAVIY DUNYODA SUN’IY IDROKNING RIVOJLANISHI: YANGI DAVR MUAMMOLARI VA YANGI YECHIMLAR JURNALI”

30-Aprel, 2026-yil

vaqtda (triple extrusion) qoplanadi. Bu usul qatlamlar o‘rtasida havo qavatlarining qolishini butunlay istisno qiladi va chegaraning ideal silliqiligini ta’minlaydi. Bundan tashqari, ekran materiallarining elektr o‘tkazuvchanligini barqarorlashtirish uchun maxsus modifikatorlar qo‘shiladi, bu esa harorat o‘zgarishlariga qaramay, ekran qarshiligining o‘zgarmasligini ta’minlaydi.

Diagnostika va monitoring tizimlari: Prognostik texnik xizmat ko‘rsatish

Izolyatsiyaning yemirilishini kamaytirish nafaqat sifatli materiallardan foydalanish, balki uning holatini doimiy monitoring qilish orqali ham amalga oshiriladi. An’anaviy rejalashtirilgan ta’mirlash usullari o‘rniga hozirda "holatga asoslangan texnik xizmat ko‘rsatish" (Condition-Based Maintenance - CBM) strategiyasi keng joriy etilmoqda. Bu yondashuv kabel tizimining real vaqt rejimidagi holatini baholash imkonini beradi va faqat zarurat tug‘ilgandagina ta’mirlash ishlarini olib borishga imkon yaratadi.

Qisman razryadlarni (Partial Discharge - PD) onlayn monitoring qilish eng samarali diagnostika usullaridan biridir. Qisman razryadlar izolyatsiyaning buzilishining eng dastlabki belgisidir. Maxsus sensorlar (kapacitiv, induktiv yoki akustik sensorlar) yordamida kabel liniyasida yuzaga kelayotgan qisman razryad signallari qayd etiladi. Signalning kattaligi, chastotasi va takrorlanish tezligi tahlil qilinib, nuqsonning joylashuvi va uning xavflilik darajasi aniqlanadi. Onlayn monitoring tizimlari nuqsonni dastlabki bosqichda aniqlash imkonini beradi, bu esa avariyaning oldini olish va rejalashtirilgan ta’mirlash ishlarini o‘tkazishga vaqt ajratish imkonini yaratadi [6]. Bundan tashqari, dielektrik spektroskopiya (Dielectric Spectroscopy) usuli ham keng qo‘llaniladi. Bu usul izolyatsiyaning dielektrik yo‘qotishlarini turli chastotalarda o‘lchash orqali uning namlik darajasi va qarish darajasini baholash imkonini beradi. Dielektrik yo‘qotishlarning ortishi izolyatsiyaning degradatsiyaga uchranganligidan dalolat beradi.

Termovizion nazorat ham kabel liniyalarining holatini baholashda muhim rol o‘ynaydi. Infraqizil kameralar yordamida kabel ulanish nuqtalari, muxtalari va yer usti qismlarining harorat taqsimoti kuzatiladi. Mahalliy qizib ketish joylari kontaktlarning zaiflashganligini yoki yuklamaning noto‘g‘ri taqsimlanganligini ko‘rsatishi mumkin. Shuningdek, Distributed Temperature Sensing (DTS) tizimlari optik tolali kabellar yordamida kabel trassasi bo‘ylab haroratni uzluksiz o‘lchash imkonini beradi. Bu tizimlar "issiq nuqtalarni" aniqlash va kabelning yuklama qobiliyatini dinamik ravishda boshqarish (Dynamic Cable Rating) imkonini beradi, bu esa kabelning ortiqcha qizib ketishining oldini oladi va uning xizmat muddatini uzaytiradi.

Diagnostika ma’lumotlarini tahlil qilishda sun’iy intellekt va mashinani o‘qitish algoritmlaridan foydalanish istiqbolli yo‘nalish hisoblanadi. Katta hajmdagi monitoring ma’lumotlarini qayta ishlash orqali ushbu algoritmlar degradatsiya tendensiyalarini bashorat qilishi va qoldiq xizmat muddatini (Remaining Useful Life - RUL) aniqroq baholashi mumkin. Bu esa energetika kompaniyalariga investitsiyalarni optimallashtirish va tarmoq ishonchligini oshirish imkonini beradi.

XULOSA

Yuqori voltli kabellar izolyatsiyasining yemirilishini kamaytirish va ularning xizmat ko‘rsatish muddatini oshirish kompleks yondashuvni talab qiladigan muhandislik vazifasidir. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, degradatsiyaning asosiy sabablari qisman razryadlar, elektr va suv daraxtlari, termik qarish hamda mexanik kuchlanishlardir.

Xulosa qilib aytganda, yuqori voltli kabellarning xizmat muddatini oshirish nafaqat iqtisodiy foyda keltiradi, balki energiya tizimining ishonchliligi va barqarorligini ta‘minlaydi. Kelajakda ushbu sohadagi tadqiqotlar sun‘iy intellektga asoslangan prognozlash modellari, yanada ilg‘or nano-materiallar va raqamli egizak (digital twin) texnologiyalarini joriy etishga qaratilishi kerak. Bu esa energetika infratuzilmasining raqamli transformatsiyasiga va barqaror rivojlanishiga hissa qo‘shadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

[1] Chen, G., & Davies, A. E. The influence of defects on the short-term breakdown characteristics and long-term DC performance of LDPE insulation // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2000. – Vol. 7, No. 3. – P. 406–412.

[2] Boggs, S. A., & Densley, J. Fundamental phenomena in high voltage polymeric cable insulation // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. – 2000. – Vol. 16, No. 3. – P. 15–25.

[3] Montanari, G. C. Bringing an insulation to failure: the role of space charges // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2011. – Vol. 18, No. 2. – P. 339–364.

[4] Nelson, J. K., & Fothergill, J. C. Internal charge behaviour of nanocomposites // *Nanotechnology*. – 2004. – Vol. 15, No. 5. – P. 586–595.

[5] IEC 62067:2011. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ($U_m = 170$ kV) up to 500 kV ($U_m = 550$ kV) – Test methods and requirements. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2011. – 182 p.

[6] Stone, G. C., Boulter, E. A., Culbert, I., & Dhirani, H. *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. – 2nd ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2014. – 512 p.