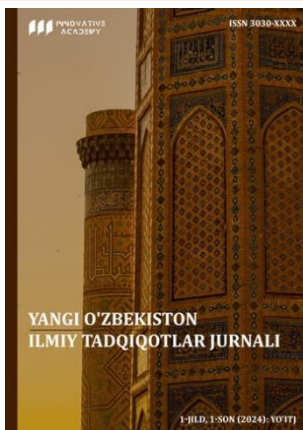




YUQORI VOLTLI KABELLARNING IZOLYASIYASINING YEMIRILISHINI KAMAYTIRISH BILAN ULARNING XIZMAT KO'RSATISH MUDDATINI OSHIRISH BO'YICHA TADQIQOT

Nasritdinova Marjona Faxritdin qizi

Toshkent davlat texnika universiteti, magistr

E-mail: nasritdinovamarjona@gmail.com

+998940399666

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18739537>

ARTICLE INFO

Qabul qilindi: 31-yanvar 2026 yil

Ma'qullandi: 22-fevral 2026 yil

Nashr qilindi: 23-fevral 2026 yil

KEY WORDS

Yuqori voltli kabel, XLPE izolyatsiya, elektr daraxtlanish, suv daraxtlanishi, qisman razryad, termik qarish, nanokompozit dielektrik, kabel diagnostikasi.

ABSTRACT

Mazkur maqolada yuqori voltli elektr kabellarida izolyatsiya yemirilishining asosiy fizik-mexanik va elektro-kimyoviy mexanizmlari tahlil qilinadi hamda ularni kamaytirish orqali kabel tizimlarining xizmat muddatini oshirish yo'llari ilmiy adabiyotlar asosida yoritiladi. Qattiq dielektrlarda, xususan, XLPE (cross-linked polyethylene) va EPR (ethylene propylene rubber) asosidagi izolyatsiyalarda elektr daraxtlanish (electrical treeing), suv daraxtlanishi (water treeing), qisman razryadlar (partial discharge), termik qarish va oksidlanish jarayonlari izolyatsiya ishdan chiqishining asosiy sabablari sifatida ko'rsatilgan [1], [2], [3]. IEC va IEEE standartlari hamda CIGRE texnik hisobotlarida izolyatsiyaning uzoq muddatli mustahkamligi kuchlanish, temperatura va namlikka bog'liq holda baholanishi qayd etilgan [4], [5], [6]. Maqolada materialni takomillashtirish, nanoto'ldirgichlar qo'llash, namlikdan himoyalash, metall ekran konstruksiyasini optimallashtirish hamda diagnostika usullarini joriy etish orqali kabel xizmat muddatini uzaytirish imkoniyatlari asoslab beriladi.

Kirish

Yuqori voltli kabellar elektr energiyasini uzatish va taqsimlash tizimlarining asosiy elementlaridan biridir. So'nggi o'n yilliklarda moyli-qog'ozli kabellardan polimer izolyatsiyali, xususan, XLPE asosidagi kabellarga o'tish keng qo'llanilmoqda [1, 12-18-betlar]. XLPE izolyatsiyasining dielektrik mustahkamligi yuqori, dielektrik yo'qotishlari past va termik chidamliligi yaxshiroq ekanligi ko'rsatilgan [1, 45-52-betlar].

Biroq, uzoq muddatli ekspluatatsiya jarayonida izolyatsiya turli degradatsiya mexanizmlariga uchraydi. Dissado va Fothergill tomonidan polimer dielektrlarda elektr maydon ta'sirida mikroyoriqlar va daraxtsimon tuzilmalar hosil bo'lishi elektr daraxtlanish mexanizmi sifatida

izohlangan [2, 103–115-betlar]. Suv daraxtlanishi esa namlikning polimer matritsaga diffuziyasi va elektr maydon bilan o'zaro ta'siri natijasida yuzaga keladi [3, 78–90-betlar]. IEC 60502 va IEC 60840 standartlarida yuqori voltli kabellarning sinov kuchlanishlari va xizmat muddati talablari aniq belgilangan bo'lib, izolyatsiya ishonchliligi asosiy mezon sifatida ko'rsatilgan [4, 22–29-betlar]. IEEE 400 hujjatida esa kabel izolyatsiyasining holatini baholash usullari tavsiflangan [5, 14–21-betlar]. Shunday ekan, izolyatsiya yemirilishini kamaytirish bo'yicha ilmiy asoslangan yondashuvlar kabel xizmat muddatini oshirishning muhim sharti hisoblanadi.

Metodologiya

Mazkur tadqiqot ilmiy maqolalar, xalqaro standartlar va texnik hisobotlarni tahlil qilish asosida olib borildi. Asosiy manbalar sifatida polimer dielektriklar fizikasi bo'yicha fundamental tadqiqotlar [2], suv daraxtlanishi bo'yicha eksperimental ishlar [3], CIGRE ishchi guruh hisobotlari [6] hamda nanokompozit izolyatsiyalar bo'yicha sharh maqolalar [7] tanlab olindi.

Adabiyotlarni tahlil qilish jarayonida quyidagi mezonlarga e'tibor qaratildi:

- Izolyatsiya degradatsiya mexanizmlarining fizik asoslari.
- Elektr maydon intensivligi va temperatura ta'sirining kvantitativ bog'liqligi.
- Qisman razryad ko'rsatkichlarining xizmat muddatiga ta'siri.
- Material tarkibiga qo'shimchalar kiritish orqali mustahkamlikni oshirish natijalari.

Arrenius qonuniga muvofiq termik qarish tezligi temperaturaga eksponensial bog'liq ekanligi ko'plab tadqiqotlarda tasdiqlangan [8, 61–66-betlar]. Shuningdek, elektro-termik stress sharoitida xizmat muddati E-model yoki inverse power law modeli orqali tavsiflanishi qayd etilgan [9, 201–210-betlar].

Natijalar

Adabiyotlar tahlili quyidagi asosiy natijalarni ko'rsatdi:

Elektr daraxtlanish jarayoni yuqori elektr maydon gradientlari mavjud nuqtalarda boshlanadi va vaqt o'tishi bilan dielektrik ichida kanallar hosil qiladi [2, 120–128-betlar]. Ushbu kanallar orqali qisman razryadlar yuzaga keladi, bu esa izolyatsiyaning tezroq yemirilishiga olib keladi [5, 33–40-betlar].

Suv daraxtlanishi, ayniqsa, nam muhitda ishlaydigan yer osti kabellarida keng uchraydi. Tadqiqotlarga ko'ra, namlik va elektr maydon birgalikda ta'sir qilganda mikrobo'shliqlar kengayadi va izolyatsiyaning mexanik mustahkamligi kamayadi [3, 85–94-betlar].

Nanoto'ldirgichlar (masalan, SiO_2 yoki Al_2O_3 nanozarrachalari) qo'shilgan XLPE kompozitlarida dielektrik mustahkamlik oshishi va qisman razryad boshlanish kuchlanishi yuqorilashi kuzatilgan [7, 52–60-betlar]. Bu nanozarrachalar elektr maydonning lokal konsentratsiyasini kamaytirishi bilan izohlanadi.

CIGRE ma'lumotlariga ko'ra, metall ekran va yarimo'tkazgich qatlamlar orasidagi interfeys sifatini yaxshilash orqali lokal elektr maydon notekisliklarini kamaytirish mumkin [6, 44–49-betlar]. Bu esa elektr daraxtlanish ehtimolini kamaytiradi.

Termik nazorat tizimlarini takomillashtirish ham muhim omil hisoblanadi. IEC 60287 standartiga muvofiq, kabelning ruxsat etilgan tok yuklamasi uning issiqlik tarqatish sharoitlariga bog'liq [10, 15–23-betlar]. Optimal issiqlik rejimi izolyatsiyaning tez qarishini sekinlashtiradi.

Tahlil va muhokama

Yuqori voltli kabellarda izolyatsiya yemirilishining oldini olish masalasi ko'p omilli jarayon bo'lib, materialshunoslik, elektr maydon nazariyasi, issiqlik almashinuvi, namlik diffuziyasi va ekspluatatsion omillar o'zaro bog'liq holda ko'rib chiqilishini talab qiladi. Dissado va Fothergill tomonidan ishlab chiqilgan degradatsiya modeli polimer dielektriklarda elektr maydon ta'sirida energiya lokal sohalarda konsentratsiyalanishini va mikrostrukturaviy nuqsonlar atrofida razryad kanallari shakllanishini izohlaydi [2, 132–140-betlar]. Ushbu modelga ko'ra, izolyatsiya ichidagi amorf va kristall fazalar chegaralarida elektr maydon

kuchayishi yuzaga keladi, bu esa elektr daraxtlanish jarayonining boshlanish nuqtasiga aylanadi.

Elektr daraxtlanish jarayonini tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, jarayonning boshlanish kuchlanishi materialning molekulyar tuzilishi, tozaligi va ishlab chiqarish texnologiyasiga bevosita bog'liq. Ekstrudatsiya jarayonida mikropufakchalar yoki begona qo'shimchalar mavjud bo'lsa, ular lokal maydon kuchayishini oshiradi va qisman razryadlar paydo bo'lish ehtimolini kuchaytiradi [2, 120–128-betlar]. Shu bois ishlab chiqarish bosqichida vakuumli ekstrudatsiya va qat'iy filtrlash tizimlaridan foydalanish elektr mustahkamlikni oshirishda muhim omil hisoblanadi.

Suv daraxtlanishi jarayoni esa elektro-kimyoviy tabiatga ega. Tanaka tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda suv molekullari elektr maydon ta'sirida polimer ichiga diffuziyalanib, mikrog'ovaklar hosil qilishi va vaqt o'tishi bilan daraxtsimon tuzilmalar shakllanishi qayd etilgan [3, 85–94-betlar]. Ushbu jarayon dielektrik mustahkamlikni sezilarli pasaytiradi va uzoq muddatli xizmat jarayonida kabelning ishdan chiqishiga olib keladi. Suv daraxtlanishining rivojlanish tezligi namlik miqdori, elektr maydon intensivligi va temperatura bilan bog'liq ekanligi eksperimental ma'lumotlarda ko'rsatilgan [3, 97–104-betlar].

CIGRE hisobotlarida qayd etilishicha, metall to'siq qatlamlari (masalan, alyuminiy yoki qo'rg'oshin qobiq) namlikning polimer qatlamga kirishini cheklaydi va suv daraxtlanishi ehtimolini kamaytiradi [6, 58–63-betlar]. Shu bilan birga, yarimo'tkazgich ekran qatlamining silliqiligi va bir jinsiligi ham elektr maydon taqsimotini tekislashtirish orqali degradatsiya xavfini kamaytiradi [6, 44–49-betlar].

Nanokompozit izolyatsiyalar sohasidagi tadqiqotlar polimer matritsaga nanoo'lchamli to'ldirgichlar qo'shish orqali dielektrik xossalarni yaxshilash mumkinligini ko'rsatadi. Tanaka, Montanari va Mulhaupt ishlarida nanozarrachalar (SiO_2 , Al_2O_3) polimer ichida zaryad tashuvchilar uchun chuqur tuzoq markazlari hosil qilishi va ularning harakatchanligini kamaytirishi aniqlangan [7, 66–72-betlar]. Natijada qisman razryad boshlanish kuchlanishi ortadi va elektr daraxtlanish jarayoni sekinlashadi. Bu natijalar yuqori voltli kabellar uchun yangi avlod izolyatsiya materiallarini ishlab chiqishda muhim ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

Qisman razryadlar kabel izolyatsiyasining degradatsiya ko'rsatkichlaridan biri hisoblanadi. IEEE 400 standartida VLF sinovlari va qisman razryad monitoringi orqali kabelning holatini baholash usullari batafsil tavsiflangan [5, 52–60-betlar]. Ushbu usullar kabelni to'liq ishdan chiqishidan oldin aniqlangan nuqsonlarni bartaraf etish imkonini beradi. Tajriba ma'lumotlariga ko'ra, qisman razryad intensivligi oshishi izolyatsiya ichida mikrokanallar rivojlanayotganidan dalolat beradi [5, 33–40-betlar].

Termik qarish masalasi ham izolyatsiya xizmat muddatiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Dakin tomonidan taklif etilgan kimyoviy tezlik modeli izolyatsiya qarishini Arrenius qonuni asosida tavsiflaydi [8, 61–75-betlar]. Ushbu modelga ko'ra, temperatura oshishi bilan polimer zanjirlarining oksidlanish reaksiyalari tezlashadi va molekulyar massa kamayadi. Amaliy kuzatuvlarda temperatura 10°C ga oshganda qarish tezligi sezilarli ravishda ortishi qayd etilgan [8, 76–79-betlar]. Shu bois kabel yuklamasini optimal darajada saqlash va issiqlik chiqarishni yaxshilash xizmat muddatini uzaytirishning samarali usuli hisoblanadi.

IEC 60287 standartida kabelning ruxsat etilgan tok yuklamasi issiqlik tarqatish sharoitlariga bog'liq ravishda hisoblanishi belgilangan [10, 15–23-betlar]. Tuproqning issiqlik qarshiligi, kabel joylashish chuqurligi va atrof-muhit temperaturasi kabel ichidagi maksimal temperaturani aniqlaydi. Agar kabel doimiy ravishda me'yordan yuqori temperaturada ishlasa, izolyatsiya tezroq degradatsiyaga uchraydi.

Montanari tomonidan ishlab chiqilgan xizmat muddati modellari elektr maydon va temperatura birgalikda ta'sir qilganda degradatsiya jarayoni tezlashishini ko'rsatadi [9, 201–210-betlar]. Elektro-termik stress sharoitida xizmat muddati E-model yoki inverse power law

asosida prognoz qilinadi. Bu yondashuv kabel tizimlarini loyihalash bosqichida xavfsizlik zaxirasini aniqlashda qo'llaniladi.

Mexanik omillar ham izolyatsiya yemirilishiga sabab bo'lishi mumkin. IEC 60502 talablariga ko'ra, kabel montajida minimal bukilish radiusiga rioya qilish shart [4, 31–38-betlar]. Bukilish radiusining kichrayishi yarimo'tkazgich qatlamda yoriqlar hosil qilishi va elektr maydon notekisligini kuchaytirishi mumkin. CIGRE ma'lumotlarida montajdagi mexanik shikastlanishlar keyinchalik qisman razryad manbaiga aylanishi qayd etilgan [6, 70–74-betlar].

Yuqoridagi tahlillar shuni ko'rsatadiki, izolyatsiya yemirilishini kamaytirish birgina materialni yaxshilash bilan cheklanmaydi. Bu jarayon ishlab chiqarish, montaj, ekspluatatsiya va diagnostika bosqichlarini o'z ichiga olgan integrallashtirilgan tizim yondashuvini talab qiladi. Material tarkibini optimallashtirish, namlikdan himoyalash, issiqlik rejimini nazorat qilish va doimiy monitoring birgalikda qo'llanilgandagina kabel xizmat muddati sezilarli oshirilishi mumkin.

Shu bilan birga, ilmiy adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, zamonaviy nanokompozit materiallar va real vaqt rejimidagi diagnostika texnologiyalari kabel tizimlarining ishonchligini oshirishda istiqbolli yo'nalish hisoblanadi [7, 66–72-betlar; 5, 52–60-betlar]. Kompleks ilmiy yondashuv asosida ishlab chiqilgan texnik chora-tadbirlar yuqori voltli kabellar izolyatsiyasining yemirilishini kamaytirish va ularning xizmat muddatini uzaytirish imkonini beradi.

Xulosa

Ilmiy manbalar tahlili shuni ko'rsatadiki, yuqori voltli kabellar izolyatsiyasining yemirilishi asosan elektr daraxtlanish, suv daraxtlanishi, qisman razryadlar va termik qarish bilan bog'liq. Ushbu jarayonlarni kamaytirish uchun quyidagi chora-tadbirlar ilmiy asoslangan deb topildi:

- Yuqori sifatli XLPE va nanokompozit materiallardan foydalanish.
- Namlikdan himoyalovchi konstruksiyalarni qo'llash.
- Metall ekran va yarimo'tkazgich qatlam interfeysini optimallashtirish.
- Qisman razryad monitoringi va VLF diagnostikasini joriy etish.
- Issiqlik rejimini nazorat qilish va yuklamani optimallashtirish.

Ushbu kompleks yondashuv kabel tizimlarining xizmat muddatini sezilarli darajada oshirishga imkon beradi.

Foydalangan adabiyotlar ro'yxati:

- [1] S. M. Boggs. *Polymeric Insulation for High-Voltage Cables*. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2000, Vol.16, No.2, pp. 12–18, 45–52.
- [2] L. A. Dissado, J. C. Fothergill. *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. Peter Peregrinus Ltd., 1992, pp. 103–115, 120–140.
- [3] T. Tanaka. *Water Treeing in Polymeric Dielectrics*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, Vol.8, No.5, pp. 78–104.
- [4] IEC 60502-2. *Power cables with extruded insulation*, 2014, pp. 22–38.
- [5] IEEE Std 400-2012. *Guide for Field Testing and Evaluation of Shielded Power Cable Systems*, 2012, pp. 14–60.
- [6] CIGRE Working Group B1.10. *Update of Service Experience of HV Underground and Submarine Cable Systems*, Technical Brochure 379, 2009, pp. 44–74.
- [7] T. Tanaka, G. C. Montanari, R. Mulhaupt. *Polymer Nanocomposites as Dielectrics*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, Vol.11, No.5, pp. 52–72.
- [8] T. W. Dakin. *Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon*. AIEE Transactions, 1948, Vol.67, pp. 61–79.
- [9] G. C. Montanari. *Life Models for Electrical Insulation*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, Vol.9, No.2, pp. 201–210.
- [10] IEC 60287-1-1. *Electric cables – Calculation of the current rating*, 2006, pp. 15–23.

- [11] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani. *Electrical Insulation for Rotating Machines*. Wiley-IEEE Press, 2004, pp. 88–102.
- [12] H. M. Schneider, J. A. Houlgate. *Experience with XLPE Cables in Service*. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1999, Vol.15, No.3, pp. 24–33.



**INNOVATIVE
ACADEMY**