5. Gholami Z., et al. Bidirectional wide range and high voltage gain buck–boost converter. — IET Power Electronics, 2024.

6. Divya R., Kannan P. High Gain Non-Isolated Bidirectional Converter for Renewable Integration. — Renewable Energy Journal, 2022.

7. IEC 62109:2016. Safety of power converters for use in photovoltaic power systems.

8. Дудик А. М., Гуменюк О. В. Магнітопроводи трансформаторів зі стрічкової сталі: технологічні особливості та ефективність. — Електротехніка і електромеханіка, № 4, 2021. — С. 22–27.

9. Comparison of Active Power Losses of Single-Phase Electromagnetic Static Devices by Radial Electromagnetic System / O. Sadovoy et al. 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 20–23 October 2022. 2022. URL: https://doi.org/10.1109/mees58014.2022.10005760

Abstract. *This paper examines the design principles and control algorithms of a hybrid inverter capable of operating stably under significant fluctuations in grid voltage. The influence of extending the input voltage range on energy conversion efficiency and system reliability was analyzed. An adaptive control scheme is proposed that enables automatic switching between power supply modes and optimizes energy consumption depending on grid parameters. The obtained results can be applied in the design of autonomous and hybrid energy systems to improve their stability and energy efficiency.*

Keywords: *Hybrid inverters, voltage fluctuations, power grid.*

Науковий керівник:
Костенко І.О.
канд., техн. наук, доцент кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків.

УДК 621.315.2.016.2:621.315.616.9

ПРОГНОСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ЗШИТОГО ПОЛІЕТИЛЕНУ

Дякону В`ячеслав
здобувач вищої освіти спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніки та електромеханіка
Миколаївський національний аграрний університет
м. Миколаїв, Україна

Анотація: *У роботі розглянуто питання підвищення надійності кабельних ліній електропередачі середньої напруги шляхом прогнозування залишкового*

ресурсу ізоляції кабелів із зшитого поліетилену (СПЕ, XLPE). На основі аналітичного огляду сучасних конструкцій силових кабелів, матеріалів та фізичних процесів їх старіння запропоновано підхід до математичного моделювання деградації ізоляційного шару, який дозволяє визначати строк безвідмовної роботи кабельної лінії в умовах тривалої експлуатації. Запропонована методика базується на використанні законів термоактиваційних процесів (Арреніуса) та статистичних залежностей імовірності руйнування матеріалу (Вейбулла), що дозволяє кількісно оцінити швидкість старіння ізоляції під впливом електричного поля, температури та часткових розрядів.

Ключові слова: *силовий кабель, зшитий поліетилен, старіння ізоляції, часткові розряди, математичне моделювання, залишковий ресурс, Smart Grid.*

Сучасні енергосистеми характеризуються підвищеними вимогами до надійності, довговічності та ресурсоощадності електричних мереж. Переважна частина відмов у кабельних лініях пов'язана зі старінням ізоляції, що призводить до коротких замикань, втрат енергії та значних фінансових витрат на аварійні ремонти. З огляду на це, надзвичайно актуальним є створення дієвих моделей, здатних прогнозувати залишковий ресурс ізоляції без необхідності її руйнування.

Вибір кабелів із зшитим поліетиленом (СПЕ) обґрунтовано їх високими електричними, механічними та термостійкими властивостями, які суттєво перевищують параметри кабелів з паперово-просоченою ізоляцією. Порівняльний аналіз показує, що СПЕ-кабелі мають у 1,4-1,5 раза більшу допустиму токову навантажувальну здатність, у 4-5 разів меншу пошкоджуваність і триваліший експлуатаційний ресурс (до 40 років). Водночас навіть такий матеріал зазнає деградації під впливом теплових, електричних і механічних навантажень [1].

Процес старіння ізоляції зумовлений взаємодією кількох факторів - підвищеної температури провідника, електричного поля високої напруги, вологи, механічних деформацій і радіаційного впливу. На мікрорівні це проявляється у виникненні часткових розрядів (ЧР) у порах і дефектах полімеру. Такі розряди поступово формують мікротріщини, дендрити та канали пробою, які з часом призводять до втрати діелектричної міцності.

Закон Арреніуса описує швидкість хімічних реакцій деструкції матеріалу залежно від температури:

$$K_t = K_0 e^{-\frac{Wa}{kT}}$$

де Wa - енергія активації, k - стала Больцмана, T - температура (K). Цей підхід дозволяє кількісно визначати швидкість старіння матеріалу та оцінювати його залишковий ресурс при змінних теплових навантаженнях.

Додатково використано розподіл Вейбулла для статистичної оцінки ймовірності пробою ізоляції:

$$f(x) = \frac{k}{\lambda}\left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}$$

де k - коефіцієнт форми, λ - масштабний параметр.

На основі моделювання визначено, що при руйнуванні близько 35 % матеріалу ймовірність пробою становить менше 1 %, однак після перевищення 70–75 % деградації вона зростає експоненціально. Це дозволяє формувати прогнозований інтервал безпечної експлуатації кабелю [2].

На основі аналізу та математичного опису процесів старіння створено модель оцінювання залишкового ресурсу, що враховує сумарний вплив електричних і теплових факторів. Модель дозволяє визначити кількість неушкоджених молекулярних зв'язків у полімерній структурі з урахуванням зміни напруженості поля та температури в часі [3]. Розрахунки показали, що: при робочій температурі до 90 °С деградація ізоляції є повільною і рівномірною; при перевищенні 110 °С швидкість старіння зростає в 2–3 рази; часткові розряди, навіть незначної інтенсивності, прискорюють руйнування в геометричній прогресії. Запропонована методика дозволяє проводити екстраполяцію поточного стану ізоляції на прогнозований період експлуатації, що є основою для запровадження системи превентивного технічного обслуговування.

Розроблена модель може бути адаптована для створення пристроїв моніторингу технічного стану кабельних мереж. Вона може інтегруватися в автоматизовані системи диспетчерського управління (SCADA) та платформи Smart Grid, забезпечуючи контроль за фактичним станом ізоляції в режимі реального часу [4].

Отримані результати мають практичне значення для енергетичних підприємств і виробників кабельної продукції. Реалізація моделі дозволить: зменшити кількість аварійних відключень та економічні втрати; оптимізувати графіки технічного обслуговування; продовжити термін служби кабельних мереж без зниження надійності. Особливо перспективним є використання моделі у системах енергопостачання агропромислових підприємств, де стабільність електроживлення визначає ефективність виробничих процесів.

Список використаних джерел

1. A review of aging models for electrical insulation in power cables / M. Choudhary et al. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 9. P. 3408.

2. Estimation of remaining insulation lifetime of aged XLPE cables with step-stress method based on physical-driven model / Y. Shang et al. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 12. P. 3179.

3. Improving the main indicators of transformers with twisted one-piece magnetic cores by changing the technology of circular winding turns formation / O. A. Avdieieva et al. *Electrical engineering & electromechanics*. 2022. No. 3. P. 3–7.

4. Thermal aging properties of 500 kv AC and DC XLPE cable insulation materials / L. Zhang et al. *Polymers*. 2022. Vol. 14, no. 24. P. 5400.

Abstract: *The paper considers the issue of improving the reliability of medium-voltage cable power lines by predicting the remaining service life of cross-linked polyethylene (XLPE) cable insulation. Based on an analytical review of modern power cable designs, materials, and physical processes of their aging, an approach to mathematical modeling of insulation layer degradation is proposed, which allows determining the failure-free operation period of a cable line under long-term operation*

conditions. The proposed methodology is based on the use of the laws of thermoactivation processes (Arrhenius) and statistical dependencies of the probability of material destruction (Weibull), which allows for a quantitative assessment of the rate of insulation aging under the influence of an electric field, temperature, and partial discharges.

Keywords: *power cable, cross-linked polyethylene, insulation aging, partial discharges, mathematical modeling, residual life, Smart Grid.*

Науковий керівник:
Мардзявко В.А.
асистент
кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Миколаївський національний аграрний університет