

РОЗРАХУНОК ДОДАТКОВОГО НАГРІВАННЯ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ СТРУМАМИ ВИЩИХ ГАРМОНІК

Останні десятиріччя характеризуються зростанням електроспоживання у великих містах завдяки висотній забудові нових мікрорайонів та широким впровадженням потужних електроприладів. Також спостерігається тренд до зростання нелінійного навантаження багато в чому через перехід на енергозберігаючі джерела світла – LED лампи. У зв'язку з цим кабельні мережі працюють на межі своєї пропускної здатності, що передбачає роботу з максимально допустимою температурою жил. Визначення температури ізоляції кабельних ліній стає одною з актуальних проблем електроенергетики. Одним із напрямків досліджень є розробка методів визначення залишкового ресурсу ізоляції кабелів, розрахувати який можна на основі даних про температури ізоляції та інших факторів, що істотно впливають на термін служби ізоляційного матеріалу. У статті проведено аналіз можливих способів моніторингу температури ізоляції кабельних ліній електропередачі. Запропоновано математичні співвідношення для розрахунку температури кабельних ліній з використанням технології розподілених вимірювань.

Ключові слова: моніторинг температури кабелю, залишковий ресурс ізоляції кабелю, прогнозує захист, рівняння теплового балансу, старіння ізоляції, розподілені вимірювання.

Вступ. Вихід з ладу кабельних ліній, спричинений пробоем ізоляції, є актуальною проблемою електроенергетики. Короткі замикання, що виникають на кабельних лініях, викликають не тільки переривання електропостачання споживача, але також призводять до виникнення перехідних процесів, що може призвести до виходу з ладу електрообладнання споживачів і енергопостачальних організацій.

Пробій ізоляції кабельної лінії може статися з таких причин:

- перенапруга в мережі;
- перевищення допустимого температурного режиму кабелю;
- природне руйнування ізоляції під впливом різних зовнішніх та внутрішніх чинників.

Вибір силових кабельних ліній проводиться за максимально допустимим струмом, який визначає максимально допустиму температуру нагрівання струмопровідного обладнання. При розрахунку вважається, що струм, що протікає по кабельній лінії, має синусоїдальну форму [1]. Це викликає додатковий нагрівання кабелів та скорочення терміну служби їхньої ізоляції. Отже, контроль стану ізоляції необхідний забезпечення надійності електропостачання і скорочення кількості коротких замикань, які викликають суттєві економічні втрати.

Найчастіше для контролю стану ізоляції кабелів цілком достатньо враховувати вплив електричного поля і температури ізоляції. Однак, вплив електричного поля на термін служби ізоляції ще недостатньо і є сферою активних досліджень.

Мета та завдання дослідження. Метою даної публікації є дослідження можливості моніторингу додаткового нагрівання кабельних ліній під впливом вищих гармонік струму без використання датчиків (непрямий моніторинг).

Аналіз літературних джерел. Для контролю стану ізоляції кабелю можуть бути застосовані такі заходи:

- випробування методом відгуку напруги [2];
- випробування кабелю підвищеною напругою наднизької частоти або частоти вище за номінальну [3];
- контроль шляхом аналізу параметрів часткових розрядів [4, 5];
- визначення тангенса кута діелектричних втрат в ізоляції, вимірювання та аналіз зворотної напруги [6];
- методи онлайн моніторингу стану ізоляції кабелів, що дозволяють спрогнозувати пробій в ізоляції [7–10].

Перелічені методи призначені для періодичної перевірки стану ізоляції кабелів, деякі з них мають на увазі відключення кабельної лінії від мережі. Недоліком методів онлайн-моніторингу є необхідність аналізу контрольованих параметрів кваліфікованим персоналом.

У зв'язку з цим на даний час розробляються та впроваджуються автоматичні системи моніторингу стану ізоляції [11, 12]. Запропонований прогнозує захист має на увазі контроль великої кількості впливів, що надаються на ізоляцію, включаючи контроль електричного поля, температури, вологості, ультрафіолетового випромінювання, радіаційного випромінювання, механічних, хімічних впливів. У більшості випадків для контролю стану ізоляції кабелів достатньо враховувати вплив електричного поля та температури ізоляції.

Розроблювані та впроваджувані системи передбачають контроль температури кабелю за допомогою контактних (термопара) та безконтактних (пірометр) датчиків. Це вимагає доступу до кабельної лінії, що не завжди можливо.

Матеріал і результати досліджень. Будь-яке підвищення температури ізоляції призводить до прискорення старіння і, як наслідок, її руйнування. Швидкість старіння ізоляції визначається формулою Арреніуса [13]. Тому моніторинг температури ізоляції кабелів дозволить розраховувати їхній залишковий ресурс.

Рівняння теплового балансу для кабельної лінії (КЛ) у загальному випадку виглядає так:

$$P_{\text{ж}} \cdot S = T_{\text{ж}} - T_{\text{с}}$$

де S – тепловий опір шару ізоляції кабелю, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$; $P_{\text{ж}}$ – потужність, що розсіюється струмопровідною жилою кабелю, Вт ; $T_{\text{с}}$ – температура оточуючого середовища, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{ж}}$ – температура струмопровідної жили, $^{\circ}\text{C}$.

Тепловий розрахунок кабелю ведеться для лінійного навантаження. Тобто в розрахунку враховується нагрівання, яке створюється струмом першої гармоніки. За наявності гармонійних складових струму перепишемо рівняння теплового балансу наступним чином:

$$(P_{\text{ж1}} + P_{\text{жh}}) \cdot S = T_{\text{ж1}} + \Delta T_{\text{жh}} - T_{\text{с}}$$

де $P_{\text{жh}}$ – потужність, що створюється струмами вищих гармонік і розсіюється струмопровідною жилою кабелю, Вт ; $P_{\text{ж1}}$ – потужність, що створюється струмом першої гармоніки і розсіюється струмопровідною жилою кабелю, Вт ; $\Delta T_{\text{жh}}$ – збільшення температури струмопровідної жили кабелю, що створюється струмами вищих гармонік, $^{\circ}\text{C}$.

Приймаючи до уваги, що

$$P_{\text{ж1}} \cdot S = T_{\text{ж1}} - T_{\text{с}}$$

рівняння теплового балансу кабельної лінії для теплового потоку від струмів вищих гармонік виглядає наступним чином:

$$P_{\text{жh}} \cdot S = \Delta T_{\text{жh}} \quad (1)$$

Після увімкнення навантаження температура струмопровідної жили зростає через тривалий час. При змінному навантаженні кабель охолоджується і максимальна температура нагрівання досягається при більшому піковому навантаженні. Зміна значення температури провідника визначається наступною формулою:

$$\theta = \theta_{\text{ст}} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\beta}})$$

де θ – перепад температури жили відносно температури навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$; $\theta_{\text{ст}}$ – стале значення перепаду температури струмопровідної жили і оточуючого середовища ($t = \infty$), $^{\circ}\text{C}$; t – час роботи кабелю під навантаженням, с ; β – постійна часу нагрівання.

Значення θ і $\theta_{\text{ст}}$ можна записати наступним чином:

$$\theta = T_{\text{ж}} - T_{\text{с}}$$

$$\theta_{\text{ст}} = T_{\text{жст}} - T_{\text{с}}$$

При протіканні струмів вищих гармонік значення перепадів температур виглядають так:

$$\theta = T_{\text{ж1}} + \Delta T_{\text{жh}} - T_{\text{с}}$$

$$\theta_{\text{ст}} = T_{\text{жст1}} + \Delta T_{\text{жст h}} - T_{\text{с}}$$

де $T_{\text{жст1}}$ – стала температура струмопровідної жили від втрат потужності від струму першої гармоніки при $t = \infty$, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta T_{\text{жст h}}$ – сталий приріст температури струмопровідної жили від втрат потужності від струмів вищих гармонік, при $t = \infty$, $^{\circ}\text{C}$.

Поточний перепад температури жили, що створюється втратами від струмів вищих гармонік, $^{\circ}\text{C}$:

$$\theta_{\text{h}} = \Delta T_{\text{жh}} - (T_{\text{ж1}} + T_{\text{с}})$$

Сталий перепад температури струмопровідної жили, що створено втратами від струмів вищих гармонік, при $t = \infty$, °C:

$$\theta_{ст h} = \Delta T_{жст h} - (T_{жст1} + T_0)$$

При постійному максимальному розрахунковому навантаженні температура кабелю становить, °C:

$$T_{ж1} = T_{жст1}$$

Тоді попередні вирази для перепадів температур струмопровідної жили від втрат потужності від струмів вищих гармонік, будуть мати такий вигляд, °C:

$$\theta_h = \Delta T_{ж h} - (T_{жст1} + T_0)$$

та

$$\theta_{ст h} = \Delta T_{жст h} - (T_{жст1} + T_0)$$

Складово цих рівнянь $(T_{жст1} + T_0)$ – це початкова температура жили. Для спрощення приймаємо її рівною нулю:

$$T_{жст1} + T_0 = 0$$

Таким чином додаткове збільшення температури струмопровідної жили від втрат потужності від протікання струмів вищих гармонік, °C:

$$\Delta T_{ж h} = \Delta T_{жст h} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_h}{\beta}}\right) \quad (2)$$

де t_h – час протікання по кабелю струмів вищих гармонік, с.

Оскільки в рівнянні теплового балансу (1) змінна часу не приймає участі, то запишемо:

$$\Delta T_{жст h} = P_{ж h} \cdot S$$

Тоді (2) можна записати наступним чином:

$$\Delta T_{ж h} = P_{ж h} \cdot S \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_h}{\beta}}\right) \quad (3)$$

Енергія гармонійних складових, що споживає кабельна лінія за час t_h :

$$W_{ж h} = t_h \cdot P_{ж h}$$

Тоді (3) приймає наступний вигляд:

$$\Delta T_{ж h} = W_{ж h} \cdot S \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_h}{\beta}}\right) \cdot \frac{1}{t_h} \quad (4)$$

Таким чином збільшення температури кабельної лінії від впливу гармонійних складових струму залежить від спожитої електроенергії гармонійних складових та часу протікання по ній струмів гармонійних складових:

$$\Delta T_{ж h} = f(W_{ж h}, t_h)$$

При здійсненні вимірювань на реальних об'єктах в якості величини t_h приймається тривалість звітного періоду і, відповідно, спожита за цей період енергія вищих гармонік W_h . Тривалість звітного періоду – це сталі значення. Тому з (4) слідує, що збільшення температури кабельної лінії прямо пропорційне спожитій енергії гармонійних складових:

$$\Delta T_{ж h} = f(W_{ж h}).$$

Висновки:

- приріст температури кабельної лінії прямо пропорційний енергії гармонійних складових, що споживає кабельна лінія за звітний період;
- використання розподілених вимірювань дозволяє контролювати додатковий нагрів кабельної лінії та, коригувати термін служби кабелю та планувати роботи для його заміни.

D. Filyanin¹, Cand. Sc. (Eng.), assistant, ORCID 0000-0003-3576-3633

A. Voloshko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0009-0004-2113-3600

V. Kalinchyk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4028-0185

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

CALCULATION OF ADDITIONAL HEATING OF CABLES BY HIGH HARMONICS CURRENTS

Recent decades have been characterized by an increase in electricity consumption in large cities due to the high-rise construction of new residential areas and the widespread introduction of powerful electrical appliances. There is also a trend towards an increase in nonlinear loads, largely due to the transition to energy-saving light sources - LED lamps. As a result, cable networks operate at their limits, which means operating at the maximum permissible conductor temperature. Determining the insulation temperature of cable lines is becoming a pressing issue in the electric power industry. One of the direct investigations is the development of methods for calculating the residual lifetime of cable insulation, which can be determined based on data on the insulation temperature and other factors that clearly influence the lifetime of insulating material. The article analyzes possible methods of monitoring the insulation temperature of power transmission cable lines. Mathematical equations are proposed for calculating the temperature of cable lines using distributed measurement technology.

Keywords: heat balance equation, insulation aging, cable temperature monitoring, lifetime of cable insulation, predictive protection, , distributed measurements.

References

- 1.V. Voloshko, D. V. Filyanin. "Detection and localization of power quality disturbances based on Fast Fourier Transform and Discrete Fourier Transform", *POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology*, № 3, pp. 87–94, 2017. doi: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2017.117380>
- 2.Performing Isolation Tests on High Voltage Power Supplies [Online]. Available: <https://www.advancedenergy.com/getmedia/5b0fc8ed-5526-497b-a34e-e418bfa98ca7/en-hv-performing-isolation-tests-high-voltage-power-supplies-application-note.pdf>
- 3.VLF AC Testing [Online]. Available: https://hvinc.com/wp-content/uploads/2021/02/VLF_TD_2016_Blue-Slides.02.23.21.pdf
- 4.S. Arumugam, M. Bogaczyk, S. Gorchakov, R. Kozakov and K. -D. Weltmann, "Dielectric and partial discharge investigations on aged medium voltage underground power cables," *2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Ann Arbor, MI, USA, 2015, pp. 306-310, doi: 10.1109/CEIDP.2015.7352119
- 5.P. Sreejaya, "Study of Solid Dielectric Degradation Using Partial Discharge Test," *2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Quebec, QC, Canada, 2008, pp. 408-412, doi: 10.1109/CEIDP.2008.4772853
- 6.P. A. Muntakim, J. Zhang, S. Zhang and B. T. Phung, "Dielectric Dissipation Factor Measurement of Power Equipment under Distorted Excitation Voltage," *2021 International Conference on Smart-Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS)*, Sanur, Bali, Indonesia, 2021, pp. 91-95, doi: 10.1109/ICSGTEIS53426.2021.9650374
- 7.Li, Hongbo & Shao, Huawei & Niu, Sen. "Online Monitoring Technology for Cable Insulation in Distribution Networks Based on Line Conduction Characteristics", *International Journal of Information Technologies and Systems Approach*, 17, 2024, pp. 1-17. doi: 10.4018/IJITSA.352598
- 8.Y. Wu, Y. Yang, Z. Wang and P. Zhang, "Online Monitoring for Underground Power Cable Insulation Based on Common-Mode Signal Injection," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 7, pp. 7360-7371, July 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3102410
- 9.L. A. Renforth, R. Giussani, M. T. Mendiola, and L. Dodd, "Online partial discharge insulation condition monitoring of complete high-voltage networks," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 1, 2019, pp. 1021–1029. doi: 10.1109/TIA.2018.2866983
- 10.S. Mousavi Gargari, P. A. A. F. Wouters, P. C. J. M. van der Wielen and E. F. Steennis, "Partial discharge parameters to evaluate the insulation condition of on-line located defects in medium voltage cable networks," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, no. 3, 2011, pp. 868-877. doi: 10.1109/TDEI.2011.5931076
- 11.Sang Bin Lee, K. Younsi and G. B. Kliman, "An online technique for monitoring the insulation condition of AC machine stator windings," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, 2005, pp. 737-745. doi: 10.1109/TEC.2005.853760
12. Insulation monitoring: The concept [Online]. Available: <https://www.bender.de/en/know-how/technology/it-system/insulation-monitoring-the-concept>
13. Arrhenius Equation [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/arrhenius-equation#:~:text=The%20Arrhenius%20equation%2C%20k%20=%20A,85%20C%20%5B38%5D.>

Надійшла: 30.10.2025

Received: 30.10.2025