

ВПЛИВ ТЕПЛОВИДІЛЕННЯ В ЖИЛІ КАБЕЛЮ НА ПРОБИВНУ НАПРУГУ ЙОГО ІЗОЛЯЦІЇ ПРИ ТЕПЛОВИМУ ПРОБОЇ

Вожаков Р. В., асистент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра відновлюваних джерел енергії

Вступ. Пробивна напруга при тепловому пробої за сучасними уявленнями - це результат порушення теплової рівноваги між діелектричними втратами в ізоляції і відведенням виділеної теплоти в навколишнє середовище [1]. Однак, дуже часто електрична ізоляція додатково підігривається сторонніми джерелами теплоти (втрати в струмоведучих частинах, магнітопроводах, тощо), під дією яких відбувається додаткове нагрівання діелектрика, що буде сприяти порушенню теплової рівноваги і електротепловому пробою [2].

Мета роботи: Провести аналіз впливу величини потужності, що виділяється в жилі високовольтного кабелю на напругу, що приводить до теплового пробою його ізоляції.

Матеріали і результати досліджень. Модель кабелю для розрахунків пробивної напруги при тепловому пробої згідно з [2] представлена на рис. 1. Омичні втрати внаслідок протікання струму по жилі кабелю створюють потік тепла через ізоляцію P_s . З врахуванням високої теплопровідності металу, в порівнянні з діелектриком, можна прийняти, що температура жили однакова по всьому її об'єму. Тепловіддачею крізь торцеву поверхню можна знехтувати і вважати, що весь тепловий потік спрямований тільки радіально. Тобто омичні втрати поступають у вигляді стороннього теплового потоку в ізоляцію крізь поверхню з радіусом r_1 . В ізоляції виділяються діелектричні втрати P_d , спричинені електричним полем. Для спрощення розрахунків можна прийняти, що охолоджуюче навколишнє середовище починається одразу за шаром основної ізоляції і вся теплота віддається в навколишнє середовище з поверхні ізоляції з радіусом r_2 .

В такому наближенні пробивна напруга може бути розрахована за формулою [2]:

$$U_{np} = \sqrt{\frac{\alpha_t S_n}{ea\omega C \operatorname{tg} \delta_{nc}} \exp\left(-\frac{aP_s}{\alpha_t S_n}\right)},$$

де α_t – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні діелектрика; S_n – площа зовнішньої поверхні ізоляції кабелю, з якої відбувається відведення теплової енергії в навколишнє середовище; $\operatorname{tg} \delta_{nc}$ – тангенс кута діелектричних втрат ізоляції кабелю при температурі навколишнього середовища; a – температурний коефіцієнт $\operatorname{tg} \delta$; $\omega = 2\pi f = 314$ 1/с; $C = 2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon / \ln \frac{r_2}{r_1}$ – ємність ізоляції кабелю

на одиницю довжини; P_s – теплові втрати від протікання струму в жилі, які для ізоляції є сторонніми джерелами теплоти.

За основу взято кабелі з мідною і алюмінієвою жилами (табл. 1) з ізоляцією зі зшитого поліетилену (ЗПЕ) та полівінілхлоридного пластикату (ПВХ) на напругу 10 кВ, прокладені в кабельному лотку, з перерізом струмопровідної жили 240 мм^2 ($r_1=8,7 \text{ мм}$).

Таблиця 1 – Параметри жили кабелю перерізом 240 мм^2 і теплові втрати в ній

Матеріал жили	Ізоляція	r_0 , Ом/км [3]	Допустимий струм навантаження (кабель в повітрі, трикутник), А [4]	Допустимий струм односекундного КЗ, кА [4]	Теплові втрати від протікання допустимого струму навантаження, Вт/м	Теплові втрати від протікання допустимого струму КЗ, кВт/м
Мідь	ЗПЕ	0,0754	641	33,32	30,98	83,71
Алюміній		0,125	501	21,7	31,38	58,86
Мідь	ПВХ	0,0754	512	26,8	19,77	54,16
Алюміній		0,125	401	17,54	20,1	38,46

Товщина ізоляції жил кабелів 10 кВ зі ЗПЕ та ПВХ 4 мм [5]. Для температури навколишнього середовища 20°C для ЗПЕ: $\text{tg} \delta_{nc}=0,001$, $\varepsilon=2,4$ [6]; для ПВХ: $\text{tg} \delta_{nc}=0,1$, $\varepsilon=4$ [7]. З матеріалів, наведених в [8] прийнято для ЗПЕ $a=0,006$, а з матеріалів [7] для ПВХ визначено $a=0,008$. Коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище (повітря) $\alpha_i=10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Результати розрахунку для 1 м кабелю наведено на рис. 2 та таблиці 2.

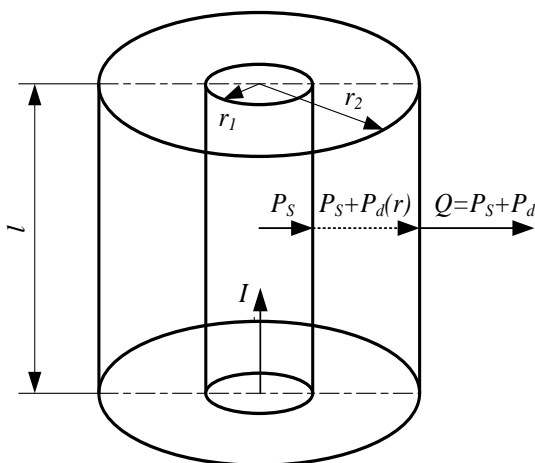


Рисунок 1 – Спрощена модель кабелю

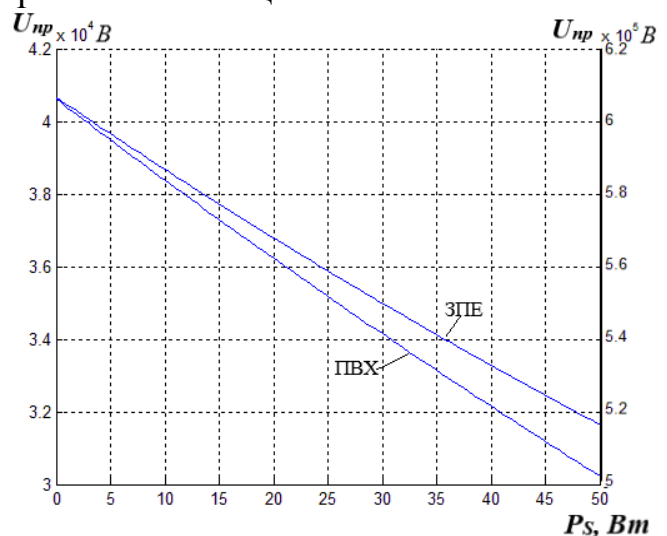


Рисунок 2 – Залежність U_{op} при тепловому пробі кабелю 10 кВ з ізоляцією із ЗПЕ і ПВХ від тепловідлення в жилі кабелю

Таблиця 2 – Порівняння впливу струму жили на пробивну напругу

	Без врахування підігріву ізоляції від омичних втрат в жилі.	Підігрів ізоляції тривало допустимим струмом	З врахуванням підігріву ізоляції струмом КЗ в мідній жилі	Підігрів ізоляції струмом КЗ в алюмінієвій жилі
U_{np} , кВ (ЗПЕ)	606,11	541,46 (30 Вт)	$1,27 \cdot 10^{-134}$	$4,77 \cdot 10^{-94}$
U_{np} , кВ (ПВХ)	40,66	36,78 (20 Вт)	$5,04 \cdot 10^{-117}$	$7,6 \cdot 10^{-83}$

При тривало допустимому струмі за рахунок втрат в жилах пробивна напруга знижується на 10,7% для кабелю з ізоляцією із ЗПЕ і на 9,6% для кабелю з ізоляцією з ПВХ. Врахування стаціонарного нагрівання струмами КЗ приводить до $U_{np} \approx 0$, що свідчить про можливий суттєвий вплив зовнішніх джерел теплоти на пробивну напругу ізоляції. Звідси також випливає, що розглядати вплив струму КЗ на тепловий пробій, враховуючи його короткочасну дію, слід в іншій, динамічній постановці.

Висновки. Підігрівання ізоляції теплотою, що виділяється в жилі кабелю при протіканні максимально допустимого струму, приводить до зменшення пробивної напруги на 10,7% і 9,6% для кабелів з ізоляцією із ЗПЕ і ПВХ відповідно, що необхідно враховувати при виборі їх режимів експлуатації.

Перелік посилань

1. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник/ В. О. Бржезицький, А. В. Ісакова, В. В. Рудаков та ін. // За ред. Бржезицького В. О. та В.М. Михайлова. – Харків, НТУ "ХП" – Торнадо, 2005. – 930 с.
2. Вожаков Р.В. Характер дії сторонніх джерел теплоти на теплову рівновагу і пробивну напругу діелектрика / Міжнародний науково-техн. журнал "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики". Київ, 2019 р.–с.182-185.
3. Силові кабелі. Збірник нормативних документів і методичні вказівки до їх використання при самостійному вивченні курсу «Кабельні та повітряні лінії електропередачі» / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: Є. Д. Дьяков. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 55 с. http://eprints.kname.edu.ua/21677/1/Силові_кабелі_Збірник_норм._документів
4. <https://tomskcable.ru/production/advice/>
5. <https://worldofmaterials.ru/spravochnik/primeneniye/28-silovye-kabeli/64-kabeli-s-izolyatsiej-iz-sshitogo-polietilena>
6. <http://prokabel.pro/public/Kabeli%20silovye%20s%20izolyaciei%20iz%20SPE%20na%20napryajenie%206-35%20kV.pdf>
7. ГОСТ 24183-80. Кабели силовые для стационарной прокладки. Общие технические условия. <http://docs.cntd.ru/document/gost-24183-80>
8. Елюбаев Е.А., Таткеева Г.Г. Влияние изменения температуры на изоляцию в кабеле высокого напряжения // Современные научные исследования и разработки 2018 №12(29), с. 319-326.