

ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНА СПРОМОЖНІСТЬ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ В РЕАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

Виконано аналіз результатів розрахунку перевантажувальної спроможності традиційних силових кабелів на напругу 6 кВ. Робота направлена на створення системи розрахунку допустимого струму високовольтних силових кабелів із шийтою поліетиленою ізоляцією.

Выполнен анализ результатов расчетов перегрузочной способности силовых кабелей на напряжение 6 кВ. Работа направлена на создание системы расчета допустимого тока высоковольтных силовых кабелей со шийтой полиэтиленовой изоляцией.

Постановка проблеми. Спроможність силових кабелів до навантаження та перевантаження (в подальшому – пропускна спроможність) визначають за нормативних умов експлуатації [1, 2]. В реальних системах електроспоживання умови експлуатації можуть суттєво відрізнятися від нормативних і, що важливо, в першу чергу не в сенсі параметрів оточуючого середовища, а відповідно до режиму навантаження і можливих нестационарних режимів роботи конкретної системи. Інформація щодо спектру можливих нестационарних режимів використання силових кабелів в конкретних системах електроспоживання, яка сьогодні є вкрай обмеженою і стосовно традиційних конструкцій кабелів з паперовою імпрегнованою ізоляцією, і для інноваційних конструкцій, – відсутня. Саме встановлення спектру можливих нестационарних режимів використання силових кабелів в конкретних системах електроспоживання є необхідною складовою забезпечення безаварійної роботи систем споживання електричної енергії.

Методи визначення пропускної спроможності інноваційних конструкцій силових кабелів в режимах реальної експлуатації вимагають, щонайменше, перевірки і розрахунком, і експериментально. В першу чергу порівняно із традиційними кабелями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Пропускна спроможність силових кабелів визначається процесами тепло і масообміну в них за номінальних умов експлуатації [2]. Доцільно при визначенні перевантажувальної спроможності кабелів використовувати найбільш відомі розрахункові моделі, а саме експоненційну модель нагрівання кабелю та її похідні за різних початкових умов [3]:

$$\tau = \tau_{\max} \cdot [1 - \exp(-t/\beta)], \quad (1)$$

де за $t = 0$; $\tau = 0$ (включення в експлуатацію),

$$\tau = \tau_{\max} \cdot [1 - \exp(-t/\beta)] + \tau_1 \cdot \exp(-t/\beta), \quad (2)$$

де за $t = 0$; $\tau = \tau_1$ (експлуатація),

$$\tau = \tau_1 \cdot \exp(-t/\beta), \quad (3)$$

де за $t = 0$; $\tau = \tau_1$; (в режимі охолодження);

де β – постійна нагрівання, яка дорівнює добутку теплоємності кабелю на його тепловий опір $\beta = C \cdot S$ і яка є параметром, що відображає кінетику нагрівання кабелю. Ця модель є наближеною. Досвід її застосування свідчить про прийнятну для практичних задач точність за умови, що за їх допомогою порівнюють характеристики подібних конструкцій кабелів. В [4] співставлень застосування цих моделей з результатами застосування методу зосереджених теплоємностей у вигляді суми двох експонент:

$$\tau = P \cdot \left[S_g \cdot (1 - e^{-gt}) + S_f \cdot (1 - e^{-ft}) \right], \quad (4)$$

де g, f – постійні складові кінетики нагрівання кабелю.

В [4] показано, що високовольтних кабелів з пластмасовою ізоляцією відомі розрахункові моделі (1) – (4) дають практично однакові результати щодо визначення тривало допустимого струму, але для визначення перевантажувальної спроможності таких кабелів необхідна перевірка і розрахунком, і експериментально. В першу чергу порівняно із традиційними кабелями.

Ціль і задачі дослідження. Порівняти в різних нестационарних режимах експлуатації характеристики перевантажувальної спроможності традиційних конструкцій кабелів з паперовою імпрегнованою ізоляцією на напругу 6 кВ, що використані в конкретній типовій системі електроспоживання. На основі такого порівняння проаналізувати спектр можливих нестационарних режимів використання силових кабелів в цій системі з метою забезпечення її безаварійної роботи.

Основний матеріал дослідження. За типову систему електроспоживання вибрано компресорну станцію підприємства, яка живиться від двох розподільчих підстанцій системи електропостачання (див. рис. 1), які забезпечують лінійну напругу трьохфазної системи 6,3 кВ. В нормальному режимі експлуатації дві лінії живлення, що належать підприємству, є автономними. В разі потреби (наприклад, відмови постачання від однієї з підстанцій) вся компресорна станція підприємства живиться від однієї з двох ліній. Така система живлення забезпечує значно більшу надійність електропостачання компресорної станції.

Компресорна станція складається з чотирьох поршневих компресорів 2ВГ, які забезпечують тиск в системі від 0,63 МПа до 0,64 МПа. Компресори працюють безперервно, кожен від синхронного двигуна ДСК на напругу 6 кВ і повну потужність 740 кВА. Один двигун ДСК4 знаходиться в резерві. Довідковий добовий баланс втрат електроенергії компресорної станції [3] такий:

- втрати в кабельних лініях живлення 187 кВт-год;
- втрати в обмотках електродвигунів 810 кВт-год;
- втрати в магнітопроводах електродвигунів та механічні 980 кВт-год.

В сумі ці втрати становлять 4,72 % від усієї спожитої компресорною станцією електроенергії. Таким чином 95,28 % спожитої електроенергії використані безпосередньо за призначенням.

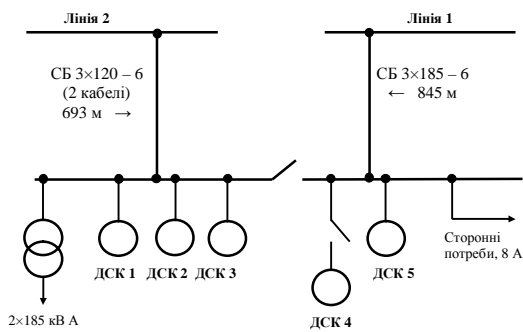


Рис. 1. Схема споживання електроенергії компресорної станції [3]

За нормального режиму роботи температура кабелю не перевищує оточуючу температуру більш як на 2,5 °С, оскільки відповідно до гранично допустимого номінального струму (400 А) кабель завантажено лише на 20 % (79 А / 400 А ≈ 0,2).

В разі відмови лінії 2 виникає аварійний режим із струмовим перевантаженням кабелю СБ 3x185 – 6 на 10 %. В такому режимі температура кабелю зростає (крива 2 на рис. 2) і якщо такий режим триває необмежено довго, то температура перевищить критичне для цього кабелю значення 80 °С. Тому допустимий час аварійного режиму обмежений орієнтовно двома годинами (див. рис. 2). Важливо те що перевантажувальна спроможність кабелю впродовж цих двох годин є, але вона різна для різних моментів впродовж цих годин.

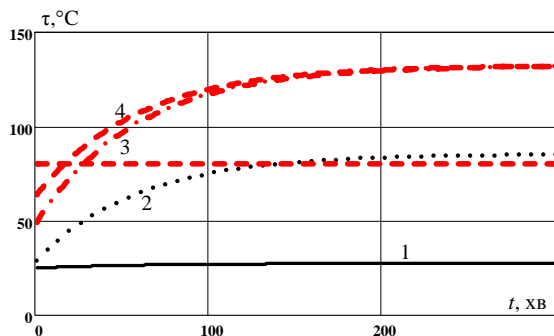


Рис. 2. Динаміка нагрівання кабелю СБ 3x185 – 6 за різних режимів навантаження: 1 – нормальний режим роботи (20 % допустимого струму); 2 – якщо відмовила лінія 2; 3 – якщо відмовила лінія 2 і через 20 хвилин виникло перевантаження на 10 %; 4 – якщо відмовила лінія 2 і через 1 годину виникло перевантаження на 10 %

Наприклад, якщо через 20 хвилин аварійного режиму виникло перевантаження на 10 %, то його тривалість не має перевищувати півгодини (див. криву 3 на рис. 2). Саме за такий час температура кабелю досягне критичного значення. Якщо ж через 40 хвилин аварійного режиму виникло перевантаження на 10 %, то його тривалість не має перевищувати 10 хвилин (див. криву 4 на рис. 2).

Відповідну інформацію зображують у вигляді кривих перевантажувальної спроможності – залежностей коефіцієнту перевантаження ($K_{пер} = I_{пер}/I_{ном}$) від допустимого часу перевантаження $t_{пер}$: $K_{пер} = f(t_{пер})$ [2].

Такі криві перевантажувальної спроможності для кабелю СБ 3x185 – 6 за різних режимів попереднього навантаження наведено на рис. 3. Цей рисунок ілюст-

рує, по-перше, значну залежність перевантажувальної спроможності кабелю від попереднього нагрівання. По-друге, недостатню чутливість такого способу подачі інформації до нагрівання кабелю, особливо при відносно великих значеннях $t_{пер}$, що зумовлене експоненційним наближенням коефіцієнту перевантаження до одиниці. А саме збільшення температури кабелю зумовлює і зростання втрат в ньому, і деградацію його ізоляції, і значне зменшення кисневого індексу пластмас із збільшенням температури (див. рис. 4).

Тому для аналізу перевантажувальної спроможності силових кабелів доцільне використання кривих нагрівання за різних режимів експлуатації в конкретних системах електроспоживання.

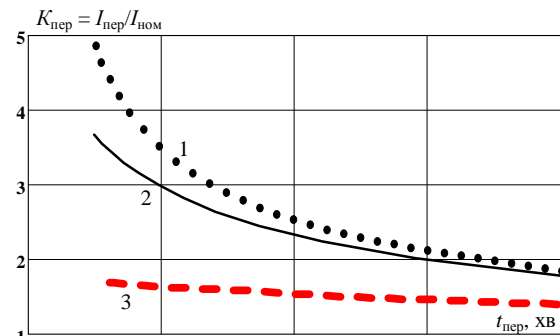


Рис. 3. Криві перевантажувальної спроможності, – залежності коефіцієнту перевантаження ($K_{пер} = I_{пер}/I_{ном}$) від допустимого часу перевантаження для кабелю СБ 3x185 – 6 за різних режимів попереднього навантаження: 1 – нормальний режим роботи (20 % допустимого струму); 2 – якщо відмовила лінія 2; 3 – якщо відмовила лінія 2 і через 20 хвилин виникло перевантаження на 10 %

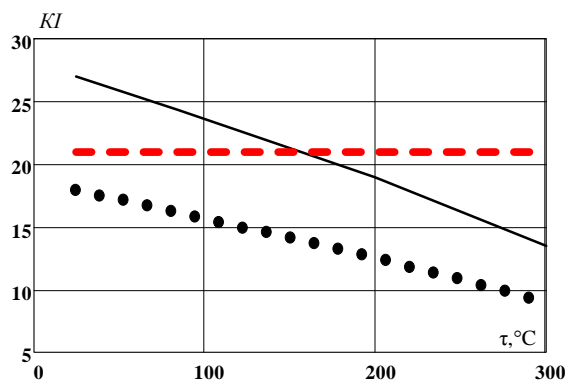


Рис. 4. Характерні криві зменшення кисневого індексу KI кабельних пластмас при підвищенні температури: суцільна крива – полівинилхлоридний пластикат; пунктир – поліетилен; штрихова пряма – вміст кисню у повітрі за нормальних умов

Оскільки традиційні криві перевантажувальної спроможності силових кабелів у вигляді залежностей коефіцієнту перевантаження $K_{пер} = f(t_{пер})$ [2], де $K_{пер} = I_{пер}/I_{ном}$, $t_{пер}$ – допустимий час перевантаження, значно відрізняються залежно від попереднього нагрівання (див. рис. 3), доцільно при їх визначенні враховувати таку залежність. Відповідна розрахункова модель, що базується на відомому співвідношенні (2), запропонована як універсальна модель для характеристики перевантажувальної спроможності силового кабелю в конкретній системі електроспоживання (див. рис. 5):

$$K_{\text{пер}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \exp\left(\frac{-t_{\text{пер}}}{\beta}\right)} \cdot \left[1 - \frac{\tau_{\text{max}} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-t_{\text{пер}}}{\beta}\right) \right] + \tau_{\text{max}} \cdot \exp\left(\frac{-t_{\text{пер}}}{\beta}\right)}{\tau_{\text{max}}} \right]} \quad (5)$$

де β – постійна нагрівання кабелю, $\beta = C \cdot S$; C – ефективна теплоємність кабелю [2]; S – сумарний опір тепловому потоку, який відводиться в оточуюче середовище в конкретних умовах експлуатації; τ_{max} – максимальний перегрів кабелю за необмежено тривалого режиму перевантаження; $\tau_{\text{maxл}}$ – максимальний перегрів кабелю за необмежено тривалого номінального режиму.

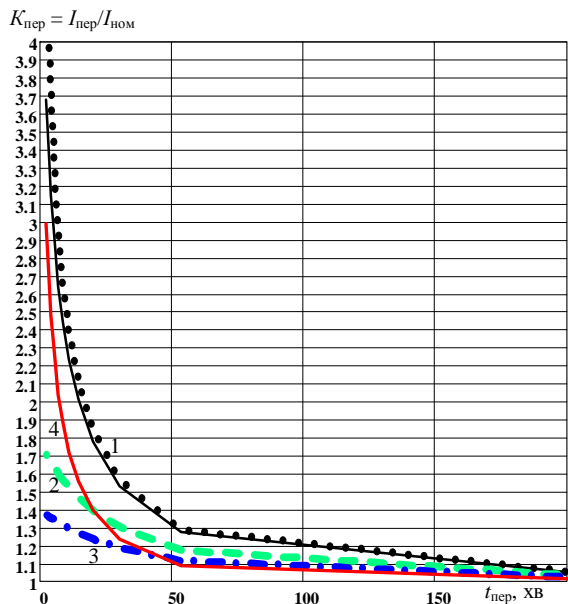


Рис. 5. Криві перевантажувальної спроможності кабелю СБ 3×185 – 6 (рис. 3): 1 – нормальний режим роботи (20 % допустимого струму); 2 – якщо відмовила лінія 2; 3 – якщо відмовила лінія 2 і через 20 хвилин виникло перевантаження на 10 %; 4 – крива, розрахована за (5)

Модель (5) дає інформацію про перевантажувальну спроможність силового кабелю СБ 3×185 – 6 для будь-якого моменту від початку аварійного режиму за якого відмовила лінія 2. Відповідна крива (крива 4 на рис. 5) складається з точок, які позначають гранично допустимий коефіцієнт перевантаження $K_{\text{пер}}$ впродовж гранично допустимого часу $t_{\text{пер}}$ після роботи впродовж $t_{\text{пер}}$ в даному аварійному режимі. Вона є геометричним місцем точок, що належать сімейству традиційних кривих перевантажувальної спроможності в цьому режимі (на рис. 5 криві 1-3).

Сімейство кривих, побудованих за допомогою моделі (5), може бути використане як практично застосовна номограма перевантажувальної спроможності даного силового кабелю в конкретній системі електроспоживання за характерного для цієї системи аварійного режиму експлуатації. Використання на практиці такої, побудованої заздалегідь, номограми є заходом, який може запобігти перевищенню заданої критичної температури кабелю, а отже виникненню пожеженобезпечної ситуації в характерному для цієї системи аварійного режиму експлуатації.

Важливо те, що критична температура може бути задана. Відповідно може бути проаналізовано економі-

чні втрати за рахунок підвищення температури кабелю. Так в розглянутому прикладі за нормального режиму роботи добові втрати в кабельних лініях живлення становлять 187 кВт·год, а в будь-якому аварійному режимі, обмеженому кривою 4 на рис. 5, добові втрати тільки в кабельній лінії 1 (критична температура 80 °С) становлять 1619 кВт·год, що перевищує всі втрати електроенергії в компресорній станції [3] і різко змінює електробаланс цього підрозділу підприємства.

Висновки.

1) Запропоновано модель визначення гранично допустимого коефіцієнту перевантаження $K_{\text{пер}}$ впродовж гранично допустимого часу $t_{\text{пер}}$ після роботи впродовж $t_{\text{пер}}$ в даному аварійному режимі силового кабелю, яка основана на обмеженні заданої критичної температури кабелю в конкретній системі електроспоживання.

2) Запропонована модель встановлює спектр можливих нестационарних режимів використання кабелю в конкретних системах електроспоживання і є необхідною складовою запобігання виникненню пожеженобезпечної ситуації в характерному для цієї системи аварійного режиму експлуатації.

3) Аналіз економічних втрат за рахунок підвищення температури кабелю до заданої критичної температури свідчить про те, що запропонована модель дає змогу оцінити зміну електробалансу відповідного підприємства в заданому аварійному режимі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ ІЕС60287-1-1:2012. Кабелі електричні. Обчислення номінальної сили струму. Частина 1-1. Співвідношення для обчислення номінальної сили струму (коефіцієнт навантаження 100 %) і обчислення втрат. Загальні положення.
2. Карпушенко В.П., Щебенюк Л.А., Антоненко Ю.О., Науменко О.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. Харків: Регіон-Інформ, 2000. – С. 3.
3. Справочник по електрооборудованню и электрооборудованию. М: Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.

Bibliography (transliterated): 1. DSTU IEC60287-1-1:2012. Kabeli elektrichni. Obchislennya nominal'noi sili strumu. Chastina 1-1. Spivvidnoshennya dlya obchislennya nominal'noi sili strumu (koefficient navantazhennya 100 %) i obchislennya vtrat. Zagal'ni polozhennya. 2. Karpushenko V.P., Schebenyuk L.A., Antonec' Yu.O., Naumenko O.A. Silovi kabeli niz'koї ta seredn'oi naprugi. Konstruyuvannya, tehnologiya, yakist'. Harkiv: Region-Inform, 2000. - С. 3. 3. Spravochnik po `elektrosnabzheniyu i `elektrooborudovaniyu. M: `Energoatomizdat, 1986. - 568 s.

Надійшла 22.05.2013

Л.А. Щебенюк, к.т.н., проф.

Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
кафедра "Электроизоляционной и кабельной техники"
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21
тел. (057) 7076663

Szhebenyuk L.A.

Overload capability of power cables in actual power consumption systems.

Results of overload capability calculations for 6-kV power cables are analyzed. The work is aimed at creating a computation system for the current rating of high-voltage cross-linked polyethylene power cables.

Key words – overload capability, power cables, cross-linked polyethylene insulation.