УДК 621.314.001.24

ОЦІНКА ТЕРМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ КАБЕЛІВ ДО СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ПРИ ВИПАДКОВОМУ ЇХНЬОМУ ХАРАКТЕРІ

© Іншеков Є. Н., Голованьов М. Ю., 2002
НТУУ "Київський політехнічний інститут"

Пропонується уточнена більш адекватна модель вибору силових кабелів за умовами нагрівання струмами короткого замикання при їх випадковому характері і ймовірнісній вихідній інформації.

У зв'язку з впровадженням в інженерну практику ДСТУ 24183-80 і технічних умов на силові кабелі стає можливим оцінити термічну стійкість кабелів до струмів короткого замикання (СКЗ) на ймовірнісній основі.

Отримані при стохастичному моделюванні ймовірні значення характерних СКЗ $H_к$ [1] можуть використовуватися як характеристики режиму короткого замикання (к.з.) при виборі електроустановок (ЕУ) по термічній і динамічній стійкості до СКЗ.

Оскільки граничні значення характеристик динамічної стійкості ЕУ (припустимий ударний СКЗ $I_{Д.Доп}$) і відключаючої здатності комутаційних апаратів (припустимий струм відключення $I_{К.О.Доп}$) задаються заводами виробниками, то виникає необхідність термічну стійкість кабелів визначити через допустимий ефективний струм $I_{К.Э.Доп}$. Величина цього струму може бути визначена з допустимої температури нагрівання жили кабелю, отриманої для граничного аварійного режиму (односекундного трифазного короткого замикання).

Математичне формулювання вибору ЕУ за критеріями, що залежать від СКЗ, у ймовірнісній постановці задачі може бути представлена у такому вигляді:

$$\begin{aligned} i_{Д.\alpha} &= i_{Д.Доп}, \\ I_{К.Э.\alpha} &= I_{К.Э.Доп}, \\ I_{К.О.\alpha} &= I_{К.О.Доп}, \end{aligned} \qquad (1)$$

де $i_{Д.\alpha}$, $i_{Д.Доп}$ - відповідно квантіль і припустиме значення ударного СКЗ; $I_{К.Э.\alpha}$, $I_{К.Э.Доп}$ - відповідно квантіль і припустиме значення ефективного СКЗ; $I_{К.О.\alpha}$, $I_{К.О.Доп}$ - відповідно квантіль і припустиме значення струму відключення; α - значення ймовірності перевищення події.

Величина $I_{К.ЭДоп}$ заводами виробниками не нормується. Тому виникає необхідність визначити величину цього струму через інші нормовані показники. Через те, що ефективний струм характеризується тепловою дією СКЗ на ЕУ, то можливо визначити $I_{К.Э.Доп}$ через припустиму температуру нагрівання $\Theta_{Доп}$. Для кабелів такі величини визначені і їх значення залежать від виду кабелю і типу його ізоляції [2].

Розглянемо далі процес короткого замикання як стаціонарний випадковий процес з наступними параметрами: середнім СКЗ $\bar{I}$ і коефіцієнтом варіації $V[I]$. Позначимо квантиль цього струму через $I_\alpha(t)$ при ймовірності перевищення α, при цьому час короткого замикання $t_{К.З.}$ визначається наступною рівністю:

$$t_{К.З.} = t_{Сер.З.} + t_{Сер.Вик}, \qquad (2)$$

де $t_{Сер.З.}$ - час спрацьовування захисту, $t_{Сер.Вик}$ - час спрацьовування вимикача.

Тривалість $t_{Сер.З.}$ і $t_{Сер.Вик}$ обчислюється частками й одиницями секунд, що значно менше трьох постійних часу нагрівання кабелів T_o, які обчислюються одиницями і десятками хвилин, тобто

$$t_{К.З.} << 3 \cdot T_o. \qquad (3)$$

При цих умовах температура жил кабелю $\Theta(t)$ наприкінці $t_{К.З.}$ не досягне свого постійного значення.

Виходячи із стаціонарності процесу к.з., приймаємо, що $I_\alpha(t) = I_\alpha = const$, де $\alpha = 1 - F_I[I_\alpha(t)]$.

Нехай до моменту початку к.з. температура жил кабелю складає Θ_H, де буквою «*н*» будемо позначати нормальний режим. Величина Θ_H для нормального режиму може бути визначена будь-яким відомим способом.

Для опису процесу нагрівання кабелю в режимі к.з. скористаємося диференціальним рівнянням нагрівання провідника - рівнянням енергетичного балансу при спрощеній термічній моделі кабелю:

$$\begin{aligned} I^2(t) \cdot R_o(\Theta_o)[1 + \alpha_T\{\Theta(t) - \Theta_o\}] \cdot dt = \\ = m_o \cdot C \cdot dV(t) + K_{Tn} \cdot S_o\{\Theta(t) - \Theta_{O.C.}(t)\}dt, \end{aligned} \qquad (4)$$

де $I(t) = I_\alpha(t) = I_\alpha$ - ефективний струм короткого замикання; $R_0(\Theta_0)$ - погонний електричний опір провідника при температурі Θ_o; m_o - маса одиниці довжини провідника; C - питома теплопровідність провідника; K_{Tn} - коефіцієнт теплопередачі, що враховує сумарну віддачу тепла навколишньому середовищу за рахунок конвекції і теплопровідності; S_o - одиниця площі поверхні провідника; $\Theta_{O.C.}$ - температура навколишнього середовища; α_T - температурний коефіцієнт опору провідника; $V(t)$ - перегрів провідника ($V(t) = \Theta(t) - \Theta_{O.C.}(t)$).

Ця модель розглядає кабель як однорідне тіло з нульовим внутрішнім опором. При цьому приймаються наступні допущення:

а) тепло виділяється тільки в матеріалі провідника (жилі кабелю) і тільки шляхом джоулевих втрат;

б) теплопередача здійснюється тільки по засобах теплопровідності і (або) конвекції;

в) питома теплоємність провідника розглядається незалежно від його температури, а погонний електричний опір $R_o(\Theta)$ має лінійну залежність від температури провідника Θ, а саме:

$$R_o(\Theta(t)) = R_o(\Theta_o)[1 + \alpha_T(\Theta(t) - \Theta_o)], \tag{5}$$

де $R_o(\Theta_o)$ - погонний опір, заданий у довідковій літературі при температурі Θ_o.

За таких умов термічна схема заміщення кабелю представляється у виді зосередженого джерела тепла P, включеного паралельно зосередженому тепловому опору $R_{T/2}$ в поздовжніх гілках T-подібної схеми заміщення і зосередженої теплоємності C_T в поперечній гілці цієї схеми.

Для умов к.з. приймаємо, що температура навколишнього середовища є постійною, тобто

$$\Theta_{O.C.}(t) = \Theta_{O.C.} = const. \tag{6}$$

Тоді можна записати: $V(t) = \Theta(t) - \Theta_{O.C.}(t) = \Theta(t) - \Theta_{O.C.}$, $V(t)/dt = \Theta(t)/dt$.

З урахуванням прийнятих допущень рівняння (4) буде таким:

$$\begin{gathered} m_o \cdot C \cdot \frac{d\Theta(t)}{dt} = I_\alpha^2 \cdot R_o(\Theta_o) + I_\alpha^2 \cdot R_o(\Theta_o) \times \\ \times \alpha_T \cdot \Theta(t) - I_\alpha^2 \cdot R_o(\Theta_o) \cdot \alpha_T \cdot \Theta_o - \\ - K_{Tn} \cdot S_o \cdot \Theta(t) + K_{Tn} \cdot S_o \cdot \Theta_{O.C.}. \end{gathered} \tag{7}$$

Отримане рівняння (7), згрупувавши відповідні доданки, можна представити так:

$$\begin{gathered} \frac{d\Theta(t)}{dt} - \Theta(t) \frac{I_\alpha^2 \cdot R_o(\Theta_o) \cdot \alpha_T - K_{Tn} \cdot S_o}{m_o \cdot C} - \\ - \frac{I_\alpha^2 \cdot R_o(\Theta_o) \cdot (1 - \alpha_T \cdot \Theta_o) + K_{Tn} \cdot S_o \cdot \Theta_{o/c}}{m_o \cdot C} = 0. \end{gathered} \tag{8}$$

Введемо такі позначення:

$$A = -\frac{I_\alpha^2 \cdot R_o(\Theta_o) \cdot \alpha_T - K_{Tn} \cdot S_o}{m_o \cdot C}, \tag{9}$$

$$B = -\frac{I_\alpha^2 \cdot R_o(\Theta_o) \cdot (1 - \alpha_T \cdot \Theta_o) + K_{Tn} \cdot S_o \cdot \Theta_{o.c}}{m_o \cdot C}. \tag{10}$$

Тоді рівняння (8) можна записати в спрощеному виді так:

$$\frac{d\Theta(t)}{dt} + A \cdot \Theta(t) + B = 0. \tag{11}$$

Розв'яжемо отримане рівняння (11) відносно $\Theta(t)$. В результаті отримаємо, що:

$$\Theta(t) = \exp\{A \cdot t - C \cdot A\} - \frac{B}{A}, \tag{12}$$

де C - постійна інтегрування.

Визначимо C з початкових умов для моменту початку короткого замикання, тобто для $t_{K.З.} = 0$ і $\Theta(t) = \Theta_H$. Таким чином

$$C = \ln\left(\Theta_H + \frac{B}{A}\right) / A. \tag{13}$$

В результаті вираз (12) перетвориться до наступного виду:

$$\Theta(t) = \left(\exp\left\{-A \cdot t + \ln\left(\Theta_H + \frac{B}{A}\right)\right\}\right) - \frac{B}{A}. \tag{14}$$

При розробці термічних моделей для постійних режимів одним із допущень є умова сталості коефіцієнта теплопередачі K_{Tn}. Однак для динамічних процесів короткого замикання це допущення може привести до значних похибок. У роботі [3] були викладені методи визначення K_{Tn} і встановлено, що K_{Tn} змінюється з ростом струму навантаження, причому закон його зміни носить експоненціальний характер. Для досить малого проміжку часу (декілька секунд) при великих струмах можна прийняти, що коефіцієнт K_{Tn} змінюється лінійно.

Визначимо величину коефіцієнта теплопередачі K_{Tn} для нормального режиму за умови, що при завантаженні кабелю струмом $I^H_{Доп.}$, визначеним по ПУЕ для визначеного типу кабелю і способу його прокладки, температура нагрівання його жил не повинна перевищувати допустимої величини для нормального режиму $\Theta^н_{Доп.}$.

З рівняння (14) при $t \to \infty$ і $\Theta(t) \to \Theta^{H}_{Доп}\Big|_{I=I_{Доп}}$ отримаємо, що

$$\Theta_{Доп} = -\frac{B\big|_{I_{Доп}}}{A\big|_{I_{Доп}}} = -\frac{I^2_{Доп}\cdot R_{o}(\Theta_o)\cdot(1-\alpha_T\cdot\Theta_o)+K_{Tn}\cdot S_o\cdot\Theta_{oc}}{I^2_{Доп}\cdot R_o(\Theta_o)\cdot\alpha_T - K_{Tn}\cdot S_o},$$

звідки

$$K^H_{Tn} = \frac{I^2_{Доп}\cdot R_{o}(\Theta_o)\cdot(1+\alpha_T\cdot(\Theta_{Доп.}-\Theta_o))}{S_o\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_{O.C.})}. \quad (15)$$

Тоді значення величини K_{Tn} може бути визначеним з врахуванням струму к.з. I_α таким чином:

$$K_{Tn} = \frac{K^H_{Tn}}{I_{Доп}}\cdot I_\alpha. \quad (16)$$

Підставивши в отримане рівняння (16) у вираз (15), після відповідних перетворень отримаємо такі вирази для A і B рівняння (11):

$$A = -\frac{1}{m_0\cdot C}\cdot\big[I_\alpha\cdot R_0(\Theta_0)\cdot(I_\alpha\cdot\alpha_T\times \times(\Theta_{Доп}-\Theta_0)-I_{Доп}\cdot(1+\alpha_T\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_0)))\big], \quad (17)$$

$$B = -\frac{1}{m_o\cdot C}\cdot\big[I_\alpha\cdot R_o(\Theta_o)\cdot(I_\alpha\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_{O.C})- -I_\alpha\cdot\alpha_T\cdot\Theta_0\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_{O.C})+I_{Доп}\cdot\Theta_{O.C}+ +I_{Доп}\cdot\alpha_T\cdot\Theta_{O.C}\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_{O.C}))\big]. \quad (18)$$

За умови, що $\Theta_0 = \Theta_{O.C}$ вираз (19) можна записати у вигляді:

$$B = -\frac{1}{m_o\cdot C}\cdot\big[I_\alpha\cdot R_o(\Theta_o)\times \times[I_\alpha\cdot((\Theta_{Доп}-\Theta_{O.C})-\alpha_T\cdot\Theta_0\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_{O.C}))+ +I_{Доп}\cdot\Theta_0\cdot(1+\alpha_T(\Theta_{Доп}-\Theta_{O.C}))]\big]. \quad (19)$$

При цьому відношення B/A, що входить у рівняння (14), буде таким:

$$\frac{B}{A} = \frac{I_\alpha\cdot((\Theta_{Доп}-\Theta_0)-\alpha_T\cdot\Theta_0\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_0))+I_{Доп}\cdot\Theta_0\cdot(1+\alpha_T\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_0)))}{I_\alpha\cdot\alpha_T\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_0)-I_{Доп}\cdot(1+\alpha_T\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_0))}. \quad (20)$$

З урахуванням температури нормального режиму Θ_H температуру в будь-який момент к.з. можна визначити по такій кінцевій формулі:

$$\Theta^*(t) = \Theta_H + \Theta(t) = \Theta_H + \left(\left(\Theta_H + \frac{B}{A}\right)\cdot\exp\{-A\cdot t\}\right) - \frac{B}{A} =$$

$$= \Theta_H + \big(\Theta_H + \frac{I_\alpha\cdot((\Theta_{Доп}-\Theta_0)-\alpha_T\cdot\Theta_0\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_0))+I_{Доп}\cdot\Theta_0\cdot(1+\alpha_T\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_0))}{I_\alpha\cdot\alpha_T\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_0)-I_{Доп}\cdot(1+\alpha_T\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_0))}\big)\times$$

$$\times\exp\{-\frac{1}{m_0\cdot C}\cdot\big[I_\alpha\cdot R_0(\Theta_0)\cdot(I_\alpha\cdot\alpha_T\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_0)-I_{Доп}\cdot(1+\alpha_T\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_0)))\big]\}- \quad (21)$$

$$-\frac{I_\alpha\cdot((\Theta_{Доп}-\Theta_0)-\alpha_T\cdot\Theta_0\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_0))+I_{Доп}\cdot\Theta_0\cdot(1+\alpha_T\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_0))}{I_\alpha\cdot\alpha_T\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_0)-I_{Доп}\cdot(1+\alpha_T\cdot(\Theta_{Доп}-\Theta_0))}.$$

Отриманий вираз (21) дозволяє визначити температуру кабелю при к.з. $\Theta(t_{K.З.})$ і її квантіль $\Theta_\alpha(t_{K.З.})$ і замість критерію вибору по термічній стійкості до СКЗ $I_{K.Э.\alpha} = I_{K.Доп}$ (рівняння 1) використовувати критерій:

$$\Theta_\alpha(t_{K.З.}) \le \Theta_{Доп.K.З.} \quad (22)$$

Висновки:

1. Отримане рівняння температури нагрівання кабелю при короткому замиканні дозволяє робити їхній вибір по термічній стійкості до СКЗ шляхом безпосереднього порівняння цієї температури (при детермінованому підході) чи її квантіля (при імовірному підході) з нормованою припустимою температурою.

2. При оцінці температури кабелю при короткому замиканні варто враховувати не тільки зміну опору жили кабелю СКЗ, але і зміну коефіцієнта теплопередачі K_{Tn}, приймаючи його лінійно залежним від СКЗ.

3. Впровадження викладеного вище методу оцінки термічної стійкості кабелів щодо СКЗ при випадковому їхньому характері в інженерну практику дозволить оптимально розраховувати січення жил кабелів, тобто зменшити їх надмірні невикористовувані резерви.

1. Денисенко Н. А., Хоффманн И. Стохастичне моделювання процесів короткого замикання в електроенергетичних системах і установках // Техн. електродинаміка. – 1991. - № 2. - С. 92-97. 2. Манусов В. С., Мойсеев С. М. Імовірні характеристики струмів короткого замикання // Техн. електродинаміка. – 1985. - № 4. – С. 7-81. 3. СТ СЕВ 2726 - 80 Електричні установки. Визначення і поняття. Основи вибору за умовами механічної і термічної міцності. - Введ. 01.06.80.