

Электротепловая неустойчивость в средах с анизотропной электро- и теплопроводностью // Пр. Институту електродинаміки НАН України. Електродинаміка. – 2000. – С. 8–13. 7. Ашуева Т.Г., Кирнос Л.А., Резцов В.Ф. и др. Неустойчивость нелинейной системы уравнений Максвелла и особенности формирования неоднородных электротепловых структур // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – 2000. – № 2. – С. 11–15. 8. Бинько И.Ф., Нивеницин Э.Л., Резцов В.Ф., Хаджинов А.Л. Дипольные моменты и статическое взаимодействие эллипсоидальных частиц в однородном поле // Техническая электродинамика. – 1992. – № 1. – С. 3–7. 9. Котко П.Г., Резцов В.Ф. Электромагнитные объемные силы в гетерогенных проводящих средах с эффектом Холла // Магнитная гидродинамика. – 1981. – № 3. – С. 61–66. 10. Назарова Л.Л., Маликов П.Д., Резцов В.Ф. О переходных процессах при электрическом разряде в жидкости, содержащей ферромагнитные включения, во внешнем продольно магнитном поле. В кн.: “Физические основы электрического взрыва”. – К., 1983. – С. 60–64.

УДК 621.311:621.317.613:621.316.935:621.316.923.5

В.П. Розен, В.А. Побігало

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”

ЗАСІБ СТРУМООБМЕЖЕННЯ ЯК ОДИН З СПОСОБІВ ЕФЕКТИВНОГО ЕНЕРГОВИКОРИСТАННЯ

© Розен В.П., Побігало В.А., 2001

Розроблено математичну модель роботи струмообмежуючих приладів за схемою реактор-запобіжник, що дозволяє обмежувати струм короткого замикання і зменшувати споживання активної потужності.

The mathematical model of work limitation of current of devices under the circuit reactor – fuse, allowing is developed to limit a current of short circuit and to reduce consumption of active capacity.

Вступ. Зростання рівнів струмів короткого замикання (КЗ) висуває підвищені вимоги до електродинамічної і термічної стійкості елементів електротехнічних пристроїв енергетичних і виробничих систем, а також до комутаційної здатності електричних апаратів. В останні роки набули актуальності питання впливу струмів КЗ не тільки на тверді шини, кабелі та електричні апарати, але й на генератори, силові трансформатори і гнучкі провідники розподільних пристроїв.

З метою зменшення впливу струмів КЗ на електроустаткування використовуються різні методи і засоби їх обмеження. З урахуванням специфіки розвитку об'єднаних енергосистем, необхідності забезпечення стійкості та надійності їх роботи, а також техніко-економічних характеристик розробляються і досліджуються принципово нові засоби, які дозволяють обмежувати не тільки значення струму КЗ, але і його тривалість. Розв'язання зазначеної задачі можливе шляхом:

- підвищення швидкодії традиційної комутаційної апаратури;
- створення і використання нових швидкодіючих комутаційних апаратів, здатних безінерційно, тобто протягом першого напівперіоду, обмежити і відімкнути струм КЗ;
- використання безінерційних та інерційних струмообмежувальних пристроїв.

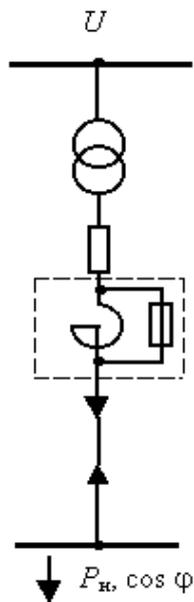


Рис. 1. Розрахункова схема реактор – запобіжник

Формулювання задачі. Можливі різні схеми вмикання обмежувачів ударного струму, які відрізняються різними способами вмикання одинарних і здвоєних реакторів, що дозволяє ліквідувати втрати потужності і напруги в реакторах під час робочих режимів (рис. 1). Для зменшення споживання електричної енергії пропонується шунтування реакторів запобіжником.

Розглянемо один з можливих варіантів застосування струмообмежувальних пристроїв – схему комбінованого вмикання реактор–запобіжник. У робочому режимі реактор знаходиться в режимі очікування. В момент протікання струму КЗ плавка вставка перегоріє і реактор обмежує струм КЗ. Такий варіант використання обмежувачів струму КЗ має значну перевагу – зниження реактивної складової в мережі.

Математична модель. Моделювання роботи плавкої вставки, яка шунтує реактор, здійснюється за такою розрахунковою схемою (рис. 1).

Для розрахунку вибираємо однофазну схему, вважаючи струм КЗ симетричним трифазним.

Миттєве значення напруги визначається за формулою

$$u = U\sqrt{2} \cdot \sin\omega t. \quad (1)$$

Опори елементів розрахункової схеми визначаємо за такими залежностями:

опір трансформатора дорівнює

$$r_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{міді}} U_{\text{н}}^2}{S_{\text{тр}}^2}, \quad (2)$$

$$x_{\text{тр}} = \frac{u_{\text{к}} U_{\text{н}}^2}{100 S_{\text{тр}} 10^{-3}}, \quad (3)$$

де $u_{\text{к}}$ – напруга КЗ трансформатора; $U_{\text{н}}$ – номінальна напруга вторинної обмотки трансформатора; $S_{\text{тр}}$ – номінальна потужність трансформатора; $\Delta P_{\text{міді}}$ – втрати при короткому замиканні в трансформаторі.

Опір кабелю (розрахунок виконується для кабелів з алюмінієвими жилами) обчислюється за наближеними залежностями

$$r_{\text{к}} = \frac{j}{S} l; \quad (4)$$

$$x_{\text{к}} = \text{беремо з довідника}, \quad (5)$$

де l – довжина кабелю; S – площа перерізу кабелю;

$$r_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{н}}^2 \cos\phi}{P_{\text{н}} 10^{-3}}, \quad (6)$$

$$x_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{н}}^2 \cos \varphi \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{P_{\text{н}} 10^{-3}}, \quad (7)$$

де $P_{\text{н}}$ – активна потужність навантаження; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності.

Після визначення всіх опорів можна скласти схему заміщення 1 (рис. 2):

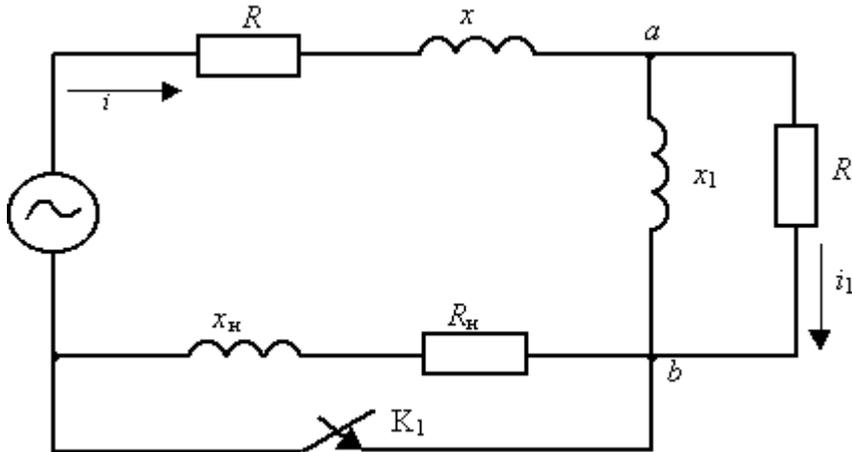


Рис. 2. Схема заміщення 1:

x_1 – опір реактора; R_1 – опір плавкої вставки; R і x – еквівалентний опір відповідно кабельної лінії і трансформатора; $R_{\text{н}}$ і $x_{\text{н}}$ – опір навантаження відповідно кабельної лінії і трансформатора

Замикання ключа K_1 відповідає трифазному КЗ навантаження.

Розрахуємо значення струмів і напруг до комутації. Найзручніше зробити це, використовуючи комплексний метод розрахунку.

Діюче значення струму розраховується за формулою

$$I = \frac{i}{(R + R_{\text{н}}) + j(x + x_{\text{н}}) + \frac{R_1 j x_1}{R_1 + j x_1}}. \quad (8)$$

Миттєве значення струму визначаємо за формулою

$$i = |I| \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi), \quad (9)$$

де

$$\varphi = \arctg \left(- \frac{x R_1^2 + x x_1^2 + R_1^2 x_1}{(R_1^2 + x_1^2)(R + R_{\text{н}}) + R_1 x_1^2} \right). \quad (10)$$

За формулою “чужого” опору

$$I_1 = I \frac{j x_1}{R_1 + j x_1}. \quad (11)$$

Миттєве значення струму дорівнює

$$i_1 = |I_1| \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi + \varphi_1), \quad (12)$$

де

$$\varphi_1 = \arctg \frac{R_1}{x_1}. \quad (13)$$

Аналогічно визначаємо струм через реактор

$$\dot{I}_2 = \dot{I} \frac{jR_1}{R_1 + jx_1}. \quad (14)$$

Миттєве значення струму

$$i_2 = |\dot{I}_2| \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi + \varphi_2), \quad (15)$$

де

$$\varphi_2 = \arctg\left(-\frac{x_1}{R_1}\right). \quad (16)$$

Напругу на плавкій вставці визначаємо за формулою

$$\dot{U}_{ab} = R_1 \dot{I}_1, \quad (17)$$

або переходячи до миттєвого значення напруги

$$u_{ab} = R_1 |\dot{I}_1| \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi + \varphi_1). \quad (18)$$

Припустимо, що ключ K_1 замикається. Тоді, відповідно до законів комутації

$$i(t_0) = i(t_0 - 0); \quad (19)$$

$$i_2(t_0) = i_2(t_0 - 0), \quad (20)$$

де t_0 – момент комутації, що задається під час розрахункового експерименту.

Розрахована схема описується системою диференціальних рівнянь, отриманих на основі законів Кірхгофа

$$\begin{cases} i = i_1 + i_2 \\ iR + \frac{x}{\omega} \frac{di}{dt} + i_1 R_1 = U \sqrt{2} \cdot \sin \omega t \\ \frac{x_1}{\omega} \frac{di_2}{dt} = R_1 i_1. \end{cases} \quad (21)$$

Виразивши $i_2 = i - i_1$, одержимо

$$\begin{cases} \frac{x}{\omega} \frac{di}{dt} = -iR - i_1 R_1 + U \sqrt{2} \cdot \sin \omega t \\ \frac{x_1}{\omega} \left(\frac{di}{dt} - \frac{di_1}{dt} \right) = R_1 i_1. \end{cases} \quad (22)$$

Привівши систему до нормальної формули, отримаємо

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = -i \frac{R\omega}{x} - i_1 \frac{R_1 \omega}{x} + \frac{U \sqrt{2} \omega}{x} \cdot \sin \omega t \\ \frac{di_1}{dt} = -i \frac{R\omega}{x} - i_1 R_1 \omega \left(\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x} \right) + \frac{U \sqrt{2} \cdot \omega}{x} \sin \omega t, \end{cases} \quad (23)$$

Струм i_2 визначаємо як $i_2 = i - i_1$, а $u_{ab} = R_1 i_1$.

Оскільки опір плавкої вставки R_1 залежить від струму i_1 , що протікає через неї і дорівнює

$$R_1(i_1) = R_{10}(1 + a|i_1|), \quad (24)$$

де R_{10} і a – сталі, то одержимо нелінійну систему диференціальних рівнянь другого порядку.

Для числового розв'язання системи використаємо метод Рунге – Кутта четвертого порядку.

Подамо розрахункові формули для системи $\dot{x} = f(x, t)$ у векторному записі

$$x_{n+1} = x_n + hF(x_n, t_n, h), \quad (25)$$

$$\text{де } \begin{cases} F(x_n, t_n, h) = \frac{1}{6}[k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4] \\ k_1 = f(x_n, t_n) \\ k_2 = f(x_n + \frac{h}{2}k_1, t_n + \frac{h}{2}) \\ k_3 = f(x_n + \frac{h}{2}k_2, t_n + \frac{h}{2}) \\ k_4 = f(x_n + hk_2, t_n + h); \end{cases} \quad (26)$$

h – крок інтегрування; k – розрахункові коефіцієнти.

Спочатку обчислюється коефіцієнт k_1 для x_n . Використовуючи це значення, просуваємося на півкроку $\frac{h}{2}$ вперед і одержуємо для цього моменту новий коефіцієнт k_2 . Використовуючи коефіцієнт k_2 , знову просуваємося на півкроку вперед від тієї ж точки (x_n, t_n) і обчислюємо коефіцієнт k_3 . Потім робимо повний крок уперед від (x_n, t_n) і обчислюємо коефіцієнт k_4 . Отримані коефіцієнти розташовуємо за важливістю.

Подібним чином обчислення проводяться до того моменту, коли вставка розплавиться. Щоб визначити момент плавлення вставки, розглянемо для неї баланс тепла. До

моменту часу t вставка одержує $\int_0^t i_1^2 R_1(i_1) d\tau$ джоулева тепла; частина тепла йде на

нагрівання вставки та її плавлення, а частина розсіюється в навколишнє середовище. Отже, момент плавлення вставки t визначається зі співвідношення

$$\int_0^{t_{пл}} i_1^2 R_1(i_1) d\tau = Q\xi, \quad (27)$$

де Q – кількість теплоти, необхідна для того, щоб вставка розплавилася; ξ – коефіцієнт, що враховує теплообмін вставки з навколишнім середовищем, при розрахунку приймаємо $\xi = 1,2$.

Кількість теплоти Q визначається за формулою

$$Q = C_p m (T_{пл} - T_0) + \lambda m, \quad (28)$$

де C_p – питома теплоємність вставки; m – маса вставки; λ – питома теплота плавлення вставки; $T_{пл}$, T_0 – відповідно температура плавлення і початкова температура вставки.

Для обчислення інтеграла (27) використовується метод трапеції. Елементарний крок обчислення виглядає так:

$$\int_{t_{i-1}}^{t_i} i_1^2(\tau) R_1(i_1) d\tau = \frac{h}{2} [i_1^2(t_i) R_1(i_1(t_i)) + i_1^2(t_{i-1}) R_1(i_1(t_{i-1}))]. \quad (29)$$

Зауважимо, що внаслідок практично рівномірного виділення тепла по всьому об'єму вставки виключається можливість виникнення дуги під час плавлення.

Діючі значення струмів і напруг розраховували за формулами

$$I_g = \sqrt{\frac{1}{T} \int_i^{t+T} i(\tau) d\tau}; \quad (30)$$

$$U_g = \sqrt{\frac{1}{T} \int_i^{t+T} U(\tau) d\tau}, \quad (31)$$

де i , u – миттєві значення напруги і відповідного струму; $T = \frac{2\pi}{\omega}$ – період коливання джерела живлення.

Інтегрування здійснювалося також за формулою трапеції.

Розглянемо післякомутаційний режим, який починається в момент, коли плавка вставка розплавилась. Цей момент відповідає розмиканню ключа K_2 на схемі заміщення 2 (рис. 3).

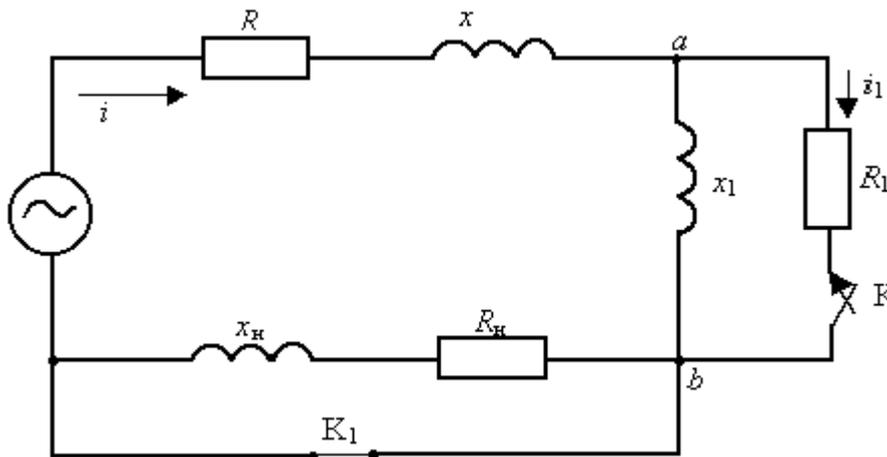


Рис. 3. Схема заміщення 2

Якщо розмикання ключа відбувається в момент часу $t_1 = t_{пл}$, то відповідно до законів комутації матимемо такі початкові умови:

$$i(t_1) = i(t_1 - 0); \quad (32)$$

$$i_2(t_1) = i_2(t_1 - 0); \quad (33)$$

$$i = i_2. \quad (34)$$

Отже, ми маємо контур першого порядку, описуваний диференціальним рівнянням

$$\frac{x + x}{\omega} \frac{di}{dt} + i_1 R_1 = U \sqrt{2} \sin \omega t. \quad (35)$$

Позначимо $L = \frac{x}{\omega}$. Загальний розв'язок відповідного однорідного рівняння має такий

вигляд:

$$i_{o.o.} = C_1 e^{-\frac{R}{L}t}, \quad (36)$$

де C_1 – довільна константа.

Знайдемо частинний розв'язок неоднорідного рівняння

$$i_{ч.н.} = A \sin \omega t + B \cos \omega t. \quad (37)$$

Підставляючи (37) у початкове диференціальне рівняння, одержимо

$$LA\omega \cos \omega t - LB\omega \sin \omega t + RA \sin \omega t + RB \cos \omega t = U \sqrt{2} \cdot \sin \omega t. \quad (38)$$

Прирівнюючи коефіцієнти при косинусах і синусах, одержимо систему для визначення невизначених коефіцієнтів

$$\begin{cases} LA\omega + RB = 0 \\ RA - LB\omega = U_H \sqrt{2} \end{cases}, \quad (39)$$

звідки

$$\begin{cases} A = \frac{RU_H \sqrt{2}}{R^2 + (x + x_1)^2} \\ B = -\frac{U_H (x + x_1) \sqrt{2}}{R^2 + (x + x_1)^2} \end{cases}. \quad (40)$$

Тоді

$$\begin{aligned} i &= c_1 e^{-\frac{R}{L}t} + U_H \sqrt{2} \left(\frac{R}{R^2 + (x + x_1)^2} \sin \omega t - \frac{x}{R^2 + (x + x_1)^2} \cos \omega t \right) = \\ &= c_1 e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{U_H \sqrt{2}}{\sqrt{R^2 + (x + x_1)^2}} \sin(\omega t - \varphi_3), \end{aligned} \quad (41)$$

де

$$\varphi_3 = \arctg \frac{x}{R}. \quad (42)$$

Визначимо значення константи C_1 , зважаючи на початкові умови:

$$C_1 = (i(t_1 - 0) - \frac{U_H \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{R^2 + (x + x_1)^2}} \sin(\omega t_1 - \varphi_3)) / e^{-\frac{R}{L}t_1}. \quad (43)$$

Остаточно маємо

$$i = [(i(t_1 - 0) - \frac{U_H \sqrt{2}}{\sqrt{R^2 + (x + x_1)^2}} \sin(\omega t_1 - \varphi_3)) e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{U_H \sqrt{2}}{\sqrt{R^2 + (x + x_1)^2}} \sin(\omega t_1 - \varphi_3)]. \quad (44)$$

Висновки. На сьогодні багато способів обмеження струмів КЗ знаходяться в стадії розроблення і потребують глибокого аналізу і фізико-математичного обґрунтування. Один з таких випадків – шунтування реакторів (комбінований спосіб обмеження струмів КЗ) у нормальних робочих режимах з метою зменшення втрат напруги і потужності. У цьому

випадку вагомими є також такі фактори, як зручність експлуатації, підвищення надійності і безперебійності електропостачання.

Шунтування реакторів є практично найбільш прийнятним виходом у прагненні проєктувальників знайти економічно вигідну границю між зниженням струмів КЗ і доступними значеннями рівня різних видів перенапруги.

2. Анализ подходов к решению проблемы ограничения токов короткого замыкания в производственных и энергетических системах / В.П.Розен, В.И.Тарадай, Л.И.Несен и др. – К., 1999. – 18 с. – Деп. в ГНТБ Украины. 2. Обзор математических моделей электрической дуги / В.П.Розен, В.И.Тарадай, В.А.Побигайл. – К., 1999. – 8 с. – Деп. в ГНТБ Украины.

УДК 621.313

Р. Селепина, М. Лябук

Луцький державний технічний університет

ПРИНЦИП ЕКСПОНЕНЦІАЛЬНОГО ЗГЛАДЖУВАННЯ, ЯК ЗАСІБ МІНІМІЗАЦІЇ ПРИ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ЗАХОДАХ

© Селепина Р., Лябук М., 2001

Розглянуто застосування принципу експоненціального згладжування для математичного моделювання процесів в електротехнічних пристроях і системах. Запропонований метод, що дає можливість зменшити витрати при експлуатації за допомогою регулювання за статистичним критерієм, який враховує середньоквадратичне відхилення і математичне сподівання контрольованої величини та проводить прогноз зміни ситуації в регульованій системі. Метод рекомендується, як засіб енергозбереження.

It is Considered using the principle of exponential smoothing for mathematical modeling of processes in electrotechnical devices and systems. Offered method enables to reduce expenses at usages by regulation on statistical criterion, which takes into account the gnadratic mean deflection mean of controlled parameter of value. The method allows to forecast change to situations in controlled system and can be recommended as facility preserve energy.

При проведенні енергозаощаджувальних заходів в електротехнічних пристроях і системах, необхідних для прийняття оперативних дій при регулюванні напруги, графіків навантаження споживачів електричної енергії, включенні пристроїв компенсації реактивної енергії, потрібно застосовувати методи оцінки та прогнозування процесів, які відбуваються в цих пристроях та системах. Для якісної оцінки параметрів перехідних процесів, характер зміни яких в електротехнічних пристроях і системах є випадковим і підпорядковується законам статистичного розподілу, можна застосувати принцип експоненціального згладжування, запропонований Р. Брауном [1].

Принцип експоненціального згладжування дозволяє дати характеристику контрольованого процесу за параметрами, які мають статистичну оцінку, тобто можна регулювати ці