

УДК 537.311.33

В.Ф. Рєзцов, Н.Х. Еркенов, Т.В. Суржик, О.Л. Хаджинов
 Інститут електродинаміки НАН України

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВОЇ НЕСТІЙКОСТІ В ІЗОЛЯЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

© Рєзцов В.Ф., Еркенов Н.Х., Суржик Т.В., Хаджинов О.Л., 2001

Досліджено процес електротеплової нестійкості в ізоляції енергетичних трансформаторів в наближенні неідеальних діелектриків з анізотропними електричними і тепловими характеристиками.

It is investigated the process of electroheat instability in the energetic transformer insulation in the approach of nonideal dielectrics with anisotropic electrical and heat character.

У теперішній час енергетичне трансформаторобудування в Україні є однією з галузей, яка забезпечує стабільне виробництво енергетичних трансформаторів, зокрема їх постачання на експорт. У зв'язку з цим постійно зростають вимоги до надійності трансформаторів, які значною мірою залежать від якості ізоляції трансформаторів, котра здійснюється рідинами з високими діелектричними характеристиками.

Відомо, що електрофізичні характеристики трансформаторної ізоляції суттєво залежать від її температури, для зменшення якої застосовують системи охолодження, а також за допомогою теплових насосів. У деяких роботах запропоновано модель електричного пробоя ізоляції, як процесу перегрівної нестійкості в неідеальних діелектриках [1], який значно інтенсифікується [2, 3] за наявності неоднорідностей з концентрацією електричного поля та струму [4].

Дослідження умов і наслідку розвитку електротеплової нестійкості в суцільних середовищах, які були виконані в останні роки [5–7] в основному, за винятком [6], не враховували фактор анізотропії електрофізичних та теплових характеристик середовищ. З іншого боку, за рахунок електростатичної [8], або магнітної [9] взаємодії між неоднорідностями в рідині, умови ініціювання пробоя рідини можуть змінюватись, що було експериментально встановлено в роботі [10]. Оскільки, за наявності однаково орієнтованих за рахунок електромагнітної взаємодії між неоднорідностями середовище в цілому характеризується анізотропними електричними та тепловими характеристиками, то і виникає запитання про вплив цієї анізотропії на умови розвитку електротеплової нестійкості за наявності анізотропії.

Виходячи з робіт [1, 2, 4–7], узагальнені на випадок анізотропних електрофізичних та теплових характеристик рівняння електричного та теплового стану неідеальних діелектриків можна представити у вигляді

$$\nabla \cdot \vec{\delta} = 0; \quad \vec{\delta} = \hat{\sigma}(T)\vec{E} + \frac{\partial}{\partial t}[\hat{\epsilon}(T)\vec{E}]; \quad \nabla \times \vec{E} = 0; \quad (1)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = f; \quad \vec{q} = -\hat{\lambda} \nabla T; \quad f = \vec{\delta} \cdot \vec{E}. \quad (2)$$

Тут $\vec{\delta}, \vec{E}$ – вектори густини струму та напруженості електричного поля; T – температура; \vec{q} – густина теплового потоку; f – щільність омичного тепловиділення; $\hat{\sigma}, \hat{\epsilon}$ –

тензори електричної провідності і діелектричної проникності, компоненти яких залежать від температури; ρ, C_p – питома щільність та теплоємність; $\hat{\lambda}$ – тензор теплової провідності, компоненти якого залежать від температури.

Надалі будемо вважати, що тензори $\hat{\sigma}, \hat{\epsilon}, \hat{\lambda}$ мають діагональну структуру

$$\hat{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{11}(T) & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22}(T) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33}(T) \end{pmatrix};$$

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{11}(T) & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22}(T) & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}(T) \end{pmatrix};$$

$$\hat{\lambda} = \begin{pmatrix} \lambda_{11}(T) & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{22}(T) & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{33}(T) \end{pmatrix},$$
(3)

що існує при орієнтуванні частинок еліпсоїдальної або циліндричної форми у зовнішньому полі [8–10].

Згідно з роботами [4-7] для аналізу умов стійкості представимо змінні $\bar{\delta}, \bar{E}, T, \bar{q}$ у вигляді

$$\begin{aligned} \bar{\delta} &= \bar{\delta}_0 + \delta\bar{\delta}, \quad |\delta\bar{\delta}| \ll |\bar{\delta}_0|; \\ \bar{E} &= \bar{E}_0 + \delta\bar{E}, \quad |\delta\bar{E}| \ll |\bar{E}_0|; \\ T &= T_0 + \delta T, \quad \delta T \ll T_0. \end{aligned}$$
(4)

Тут $\bar{\delta}_0, \bar{E}_0, T_0$ – параметри стану, стійкість якого досліджується, а $\delta\bar{\delta}, \delta\bar{E}, \delta T$ – малі збурення.

Розкладаючи $\hat{\sigma}(T), \hat{\epsilon}(T), \hat{\lambda}(T)$ в ряд Тейлора навколо $T = T_0$

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}(T) &= \hat{\sigma}(T = T_0) + \left. \frac{\partial \hat{\sigma}}{\partial T} \right|_{T=T_0} \delta T; \\ \hat{\epsilon}(T) &= \hat{\epsilon}(T = T_0) + \left. \frac{\partial \hat{\epsilon}}{\partial T} \right|_{T=T_0} \delta T; \\ \hat{\lambda}(T) &= \hat{\lambda}(T = T_0) + \left. \frac{\partial \hat{\lambda}}{\partial T} \right|_{T=T_0} \delta T, \quad \delta T = T - T_0, \end{aligned}$$
(5)

і підставляючи (5) разом з (4) в (1), одержуємо таку систему рівнянь для збурень:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\delta\bar{\delta}) &= 0; \\ \delta\bar{\delta} &= \hat{\sigma}(T = T_0)\delta\bar{E} + \left(\left. \frac{\partial \hat{\sigma}}{\partial T} \right|_{T=T_0} \bar{E}_0 \right) \delta T + \frac{\partial}{\partial t} \left[\hat{\epsilon}(T = T_0)\delta\bar{E} + \left(\left. \frac{\partial \hat{\epsilon}}{\partial T} \right|_{T=T_0} \bar{E}_0 \right) \delta T \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \nabla \times \delta \vec{E} &= 0; \\ \rho C_p \frac{\partial(\delta T)}{\partial t} + \nabla \cdot \delta \vec{q} &= \delta f; \\ \delta \vec{q} &= -\hat{\lambda}(T = T_0) \nabla \delta T - \left(\frac{\partial \hat{\lambda}}{\partial T} \Big|_{T=T_0} \nabla T_0 \right) \delta T; \\ \delta f &= \vec{\delta}_0 \cdot \delta \vec{E} + \vec{E}_0 \cdot \delta \vec{\delta}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для одержання з (6) дисперсійного рівняння $\omega(\vec{k}) = 0$, де ω – частота збурень, а \vec{k} – хвильовий вектор, представимо збурення $\delta \vec{\delta}$, $\delta \vec{E}$, δT , $\delta \vec{q}$, δf у вигляді

$$\begin{aligned} \delta \vec{\delta} &= \delta \vec{\delta}_a \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t); \\ \delta \vec{E} &= \delta \vec{E}_a \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t); \\ \delta T &= \delta T_a \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t); \\ \delta \vec{q} &= \delta \vec{q}_a \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t); \\ \delta f &= \delta f_a \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t); \\ i^2 &= -1, \quad \vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}. \end{aligned} \quad (7)$$

Тут $\delta \vec{\delta}_a$, $\delta \vec{E}_a$, δT_a , $\delta \vec{q}_a$, δf_a – амплітудні значення збурень, \vec{r} – радіус-вектор, \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} – орти вздовж декартових осей x , y , z .

Техніка одержання дисперсійного рівняння $\omega(\vec{k})$ полягає в послідовному виключенні збурень з системи рівнянь (6) і достатньо повно викладена в роботі [7]. З (6) бачимо, що $\omega(\vec{k})$ має такий загальний вигляд:

$$\begin{aligned} A\omega^2 + B\omega + C; \\ A = A(\vec{E}_0, \nabla T_0, \vec{k}), \quad B = B(\vec{E}_0, \nabla T_0, \vec{k}), \quad C = C(\vec{E}_0, \nabla T_0, \vec{k}). \end{aligned} \quad (8)$$

Отже, умови стійкості і характер зміни збурень у часі для будь-яких малих збурень, просторова структура яких визначається вектором \vec{k} , залежить від взаємодії орієнтації векторів \vec{E}_0 і ∇T_0 . Важливо також відзначити, що другий порядок рівняння (8), корені якого і визначають особливості зміни збурень у часі, зумовленій представленням ізоляції трансформаторів як неідеального діелектрика.

1. Бурдак А.П., Резцов В.Ф., Хаджинов А.Л. Неустойчивости в неидеальных диэлектриках с нелинейными электрическими характеристиками при малых возмущениях // ДАН УССР. – 1989. – № 11. – С. 81–85. 2. Резцов В.Ф., Хаджинов А.Л. О влиянии теплопроводности на перегревную неустойчивость нелинейно проводящих сред с неоднородностями // Теплофизика высоких температур. – 1990. – Т. 28. – № 3. – С. 609–610. 3. Резцов В.Ф., Хаджинов А.Л. Перегревная неустойчивость микровыступов при электрических разрядах // Техническая электродинамика. – 1989. – № 5. – С. 13–15. 4. Бурдак А.П., Резцов В.Ф., Хаджинов А.Л. Локальные распределения полей и тепловыделения в неидеальных диэлектриках с неоднородностями // Техническая электродинамика. – 1990. – № 6. – С. 9–14. 5. Аишьева Т.Г., Киринос Л.А., Суржик Т.В. и др. Электротепловая неустойчивость в среде с неоднородным распределением электрического поля и температуры // Техническая электродинамика. – 2000. – № 2. – С. 8–11. 6. Суржик Т.В.

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 продольном 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.