

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ТРИФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

А.М. Панченко
(Харківський університет Повітряних Сил)

Розглядаються процеси, обумовлені вмиканням навантаженого трифазного трансформатора, та наступне коротке замикання, що виникає в колі навантаження.

перехідні процеси, трифазний трансформатор, навантаження

Постановка проблеми. У теперішній час аналіз перехідних процесів, що відбуваються в трифазних трансформаторах, виконується, як правило, шляхом спрощення трифазної схеми до однофазної. В даній роботі пропонується спосіб отримання диференційних рівнянь, які описують в цілому роботу трифазного трансформатора, починаючи з його вмикання, перехід на усталений режим з послідуочим виникненням короткого замикання в навантаженні вторинного кола.

Аналіз літератури. В роботах [1 – 3] проводиться аналіз перехідних процесів у трифазному трансформаторі шляхом заміни його на однофазний з послідуочною заміною на відому схему заміщення яка описується диференційним рівнянням першого порядку. При цьому втрачаються важливі складові перехідних процесів, зокрема не враховуються понад перехідні струми. В той же час в роботі [3] вказується, що визначення перехідних режимів, як гармонічних, може стосуватися лише періодичних складових струмів. Тобто аналіз процесів що відбуваються одночасно в трьох фазах з врахуванням не періодичних складових потребує подальшого розгляду.

Мета статті. З'ясувати характер перехідних процесів в трифазному трансформаторі, з'єднаному зіркою, при одночасному вмиканні його фаз під напругу та при виникненні трифазного короткого замикання за трансформатором. Показати важливість одночасного спрацювання вимикача за кожною із фаз.

Основний матеріал. Робота однофазного трансформатора описується відомою системою диференційних рівнянь:

$$\begin{cases} U_0 \sin(\omega t + \psi_0) = L_1 i_1' + i_1 r_1 - M i_2'; \\ M i_1' = L_2 i_2' + i_2 r_2, \end{cases} \quad (1)$$

де i_1, i_2, i_1', i_2' – значення струмів первинної і вторинної обмоток та їх похідні; r_1 – активний опір первинної обмотки трансформатора; r_2 – значення активного опору вторинної обмотки; ω – кутова частота; ψ_0 – кут, що відповідає моменту вмикання; U_0 – амплітудне значення напруги живлення; L_1, L_2, M – відповідно індуктивності первинної, вторинної, та взаємноіндуктивність обмоток трансформатора.

Очевидно для випадку трифазної напруги і відповідного трансформатора відмінність миттєвого значення напруги буде полягати в тому, що вимушена складова кожної фази буде зміщена від попередньої на 120° , тоді рівняння для кожної із фаз приймуть вигляд:

$$\begin{aligned} \text{А} \quad & \begin{cases} U_0 \sin(\omega t + \psi_0) = L_1 i_1' + i_1 r_1 - M i_2'; \\ M i_1' = L_2 i_2' + i_2 r_2; \end{cases} \\ \text{Б} \quad & \begin{cases} U_0 \sin(\omega t + 120^\circ + \psi_0) = L_1 i_1' + i_1 r_1 - M i_2'; \\ M i_1' = L_2 i_2' + i_2 r_2; \end{cases} \\ \text{С} \quad & \begin{cases} U_0 \sin(\omega t + 240^\circ + \psi_0) = L_1 i_1' + i_1 r_1 - M i_2'; \\ M i_1' = L_2 i_2' + i_2 r_2. \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

В роботі [4] були отримані рішення системи рівнянь (1) відносно старшої похідної для первинного і вторинного струмів. Корегуючи ці рівняння для трифазної системи напруг та враховуючи відносний зсув фаз на 120° можемо записати:

$$\text{А} \quad \begin{cases} i_1''(M^2 - L_1 L_2) - i_1'(r_1 L_2 + r_2 L_1) - i_1 r_1 r_2 + \\ + U_0(L_2 \omega \cos(\omega t + \psi_K) + r_2 \sin(\omega t + \psi_K)) = 0; \\ i_2''(L_1 L_2 - M^2) + i_2'(r_1 L_2 + r_2 L_1) - i_2 r_1 r_2 - U_0 M \omega \cos(\omega t + \psi_K) = 0; \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Б} \quad \begin{cases} i_1''(M^2 - L_1 L_2) - i_1'(r_1 L_2 + r_2 L_1) - i_1 r_1 r_2 + \\ + U_0(L_2 \omega \cos(\omega t + 120^\circ + \psi_K) + r_2 \sin(\omega t + 120^\circ + \psi_K)) = 0; \\ i_2''(L_1 L_2 - M^2) + i_2'(r_1 L_2 + r_2 L_1) - i_2 r_1 r_2 - U_0 M \omega \cos(\omega t + 120^\circ + \psi_K) = 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{С} \quad \begin{cases} i_1''(M^2 - L_1 L_2) - i_1'(r_1 L_2 + r_2 L_1) - i_1 r_1 r_2 + \\ + U_0(L_2 \omega \cos(\omega t + 240^\circ + \psi_K) + r_2 \sin(\omega t + 240^\circ + \psi_K)) = 0; \\ i_2''(L_1 L_2 - M^2) + i_2'(r_1 L_2 + r_2 L_1) - i_2 r_1 r_2 - U_0 M \omega \cos(\omega t + 240^\circ + \psi_K) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Будемо розглядати процес вмикання типової схеми трансформатора зображеної на рис. 1 – зірка з виведеним нулем. Для такого випадку можна використати метод суперпозиції струмів кожної із фаз в нульовому проводі. Результуючий струм буде відповідати сумі струмів цих фаз.

Відомо, що у симетричній системі сума трьох струмів зсунутих на 120° дорівнює нулеві. Очевидно, оскільки маємо підведену напругу від джерела симетричну, то і в усталеному режимі струм в нульовому проводі, як первинної так і вторинної обмоток, буде дорівнювати нулю. Виникає питання, чому буде дорівнювати струм в нульовому проводі у перехідних режимах.

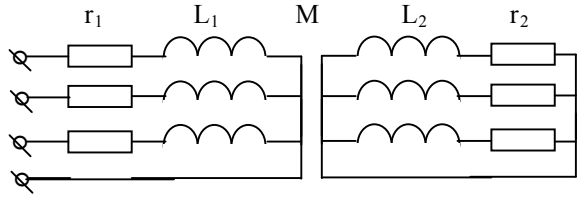


Рис. 1. Трифазний трансформатор

Рішення диференційного рівняння (3), що відповідає випадку, наприклад, для фази А отримано в роботі [4] має вигляд

$$i_1(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t), \quad (6)$$

де значення коефіцієнтів C_1 , C_2 , A і B відповідно дорівнюють:

$$A = U_0 \frac{[(\rho\omega^2 + \beta)L_2\omega - \eta\omega r_2] \cos \psi_0 + [(\rho\omega^2 + \beta)r_2 + \eta\omega^2 L_2] \sin \psi_0}{(\rho\omega^2 + \beta)^2 + \eta^2 \omega^2}; \quad (7)$$

$$B = U_0 \frac{[(\rho\omega^2 + \beta)r_2 + \eta L_2 \omega^2] \cos \psi_0 - [(\rho\omega^2 + \beta)L_2\omega - \eta\omega r_2] \sin \psi_0}{(\rho\omega^2 + \beta)^2 + \eta^2 \omega^2}; \quad (8)$$

$$C_1 = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(\frac{U_0 L_1 \sin(\psi)}{L_1 L_2 - M^2} + A \lambda_1 - B \omega \right); \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(\frac{U_0 L_2 \sin(\psi)}{L_1 L_2 - M^2} + A \lambda_1 - B \omega \right). \quad (10)$$

Як видно з виразів (7) і (8) форма струму перехідного процесу залежить від значеннями коефіцієнтів A і B , які в свою чергу залежать від кута ψ_0 , який визначає мить вмикання напруги живлення для трансформатора. Отже враховуючи той факт що синусоїди напруг інших фаз по відношенню до фази А будуть зсунуті на кути 120° та 240° при незмінному куті вмикання ψ_0 можемо записати значення коефіцієнтів A і B для фази Б:

$$A = U_0 \left[\frac{[(\rho\omega^2 + \beta)L_2\omega - \eta\omega r_2] \cos(\psi_0 + 120^\circ)}{(\rho\omega^2 + \beta)^2 + \eta^2 \omega^2} + \frac{[(\rho\omega^2 + \beta)r_2 + \eta\omega^2 L_2] \sin(\psi_0 + 120^\circ)}{(\rho\omega^2 + \beta)^2 + \eta^2 \omega^2} \right]; \quad (11)$$

$$B = U_0 \left[\frac{[(\rho\omega^2 + \beta)r_2 + \eta L_2 \omega^2] \cos(\psi_0 + 120^0)}{(\rho\omega^2 + \beta)^2 + \eta^2 \omega^2} - \frac{[(\rho\omega^2 + \beta)L_2 \omega - \eta \omega r_2] \sin(\psi_0 + 120^0)}{(\rho\omega^2 + \beta)^2 + \eta^2 \omega^2} \right] \quad (12)$$

та для фази С:

$$A = U_0 \left[\frac{[(\rho\omega^2 + \beta)L_2 \omega - \eta \omega r_2] \cos(\psi_0 + 240^0)}{(\rho\omega^2 + \beta)^2 + \eta^2 \omega^2} + \frac{[(\rho\omega^2 + \beta)r_2 + \eta \omega^2 L_2] \sin(\psi_0 + 240^0)}{(\rho\omega^2 + \beta)^2 + \eta^2 \omega^2} \right]; \quad (13)$$

$$B = U_0 \left[\frac{[(\rho\omega^2 + \beta)r_2 + \eta L_2 \omega^2] \cos(\psi_0 + 240^0)}{(\rho\omega^2 + \beta)^2 + \eta^2 \omega^2} - \frac{[(\rho\omega^2 + \beta)L_2 \omega - \eta \omega r_2] \sin(\psi_0 + 240^0)}{(\rho\omega^2 + \beta)^2 + \eta^2 \omega^2} \right]. \quad (14)$$

Маючи зазначені коефіцієнти А,В для кожної із фаз і враховуючи той факт, що згідно з виразом (9) і (10) значення коефіцієнтів C_1 і C_2 не залежать від фази, ми отримали вирази для перехідного струму кожної із фаз в формі (6). Графіки цих струмів приведені на рис. 2 в лівій колонці відповідно по фазам А,Б і С. Там же приведений графік струму в нульовому проводі, як сума попередніх. З нього видно, що фактично, незважаючи на негармонічний характер перехідного процесу сума усіх струмів в нульовому проводі дорівнює нулю (10^{-15} А).

Для випадку виникнення трифазного короткого замикання в навантаженому трансформаторі рівняння для струму в кожній із фаз буде аналогічне виразу (6) з тою лише різницею, що початковий струм та його похідна будуть відповідати миттєвому струму в кожній із фаз та її похідній на момент виникнення короткого замикання. Момент виникнення короткого замикання будемо задавати в усталеному режимі (через 4т після вмикання трансформатора), що в більшій мірі відповідає реальній ситуації.

На рис. 2 в правій колонці приведені графіки перехідних струмів у кожній із фаз після виникнення несподіваного симетричного короткого замикання в навантаженні. Різниця в тривалості перехідного періоду для процесу вмикання і короткого замикання обумовлена збільшенням τ (зменшенням активного опору при виникненні короткого замикання). В нульовому проводі ми знову спостерігаємо суму перехідних струмів яка дорівнює нулеві ($5 \cdot 10^{-14}$ А). Певні флуктації значень струму в нульовому

проводі можна віднести до похибки при обліку і звертаючи увагу на їх малі значення в подальшому враховувати не будемо.

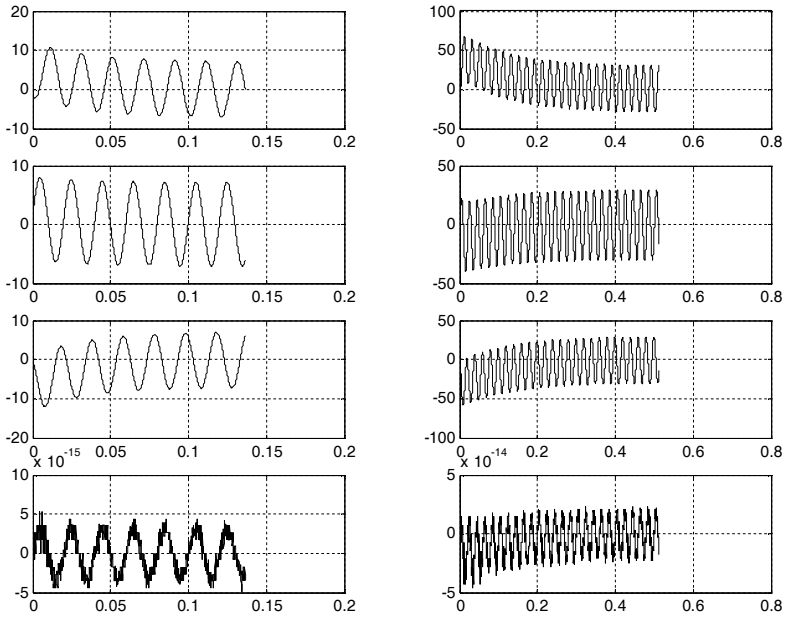


Рис. 2. Перехідні процеси в трифазному трансформаторі

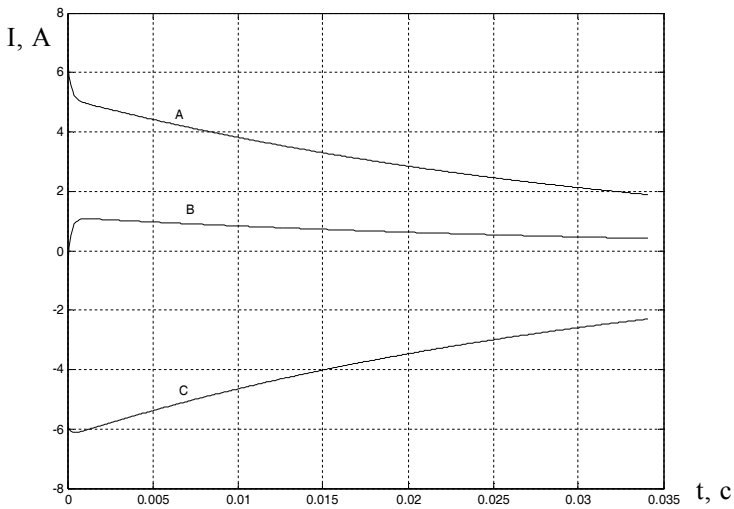


Рис. 3. Н періодичні складові фазних струмів

На рис. 2 наведені результати для випадку коли вмикання трансформатора відбувається при куті ψ_0 . Проведені дослідження показали, що зміна кута вмикання ψ_0 , а отже і кута виникнення короткого замикання, впливає на характер перехідних процесів для кожної фази зокрема, але для струму в нульовому проводі це значення не має, він завжди зберігається рівний нулеві. Це свідчить про те, що перехідні процеси обумовлені трифазною симетричною напругою, мають такі експоненти перехідних і понад перехідних струмів в кожній із фаз, що їх сума в нульовому проводі завжди зберігає нульове значення. На рис. 3 показаний випадок коли неперіодичні складові кожної із фаз А,Б і С при вмиканні дають нульове значення при їх складанні в нульовому проводі.

Висновок. Проведені дослідження показали, що при симетричній трифазній системі живлення проходження перехідних режимів відбувається таким чином, що незалежно від кута початку перехідного процесу вільні складові перехідного процесу в різних фазах в сумі завжди дають нуль. Тобто для кожної фази зокрема, момент початку перехідного процесу має істотне значення для величини амплітуди струму, а в цілому, з точки зору трифазного споживача, для струму в нульовому проводі кут вмикання значення не має. Слід додати, що така ситуація спостерігається лише в такому випадку коли трифазний вимикач ідеальний, тобто забезпечує одночасне вмикання усіх фаз, з точністю до долів періоду. Відомо, що механічні комутаційні апарати не відповідають зазначеним вимогам і в реальних схемах вмикання внаслідок неодночасного спрацювання полюсів вимикача вочевидь будуть спостерігатися кидки струму в нульовому проводі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Казовский Б.Я. *Переходные процессы*. – М.: АН СССР, 1962. – 624 с.
2. Круг К.А. *Переходные процессы в линейных электрических цепях*. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1948. – 343с.
3. Ульянов С.А. *Электромагнитные переходные процессы*. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 703 с.
4. Панченко А.М. *Спосіб вмикання навантаження в мережу без ініціювання перехідного процесу // Системи обробки інформації*. – Х.: ХВУ. – 2004. – Вип. 10 (37). – С. 135 – 142.

Надійшла 13.04.2005

Рецензент: доктор технічних наук, професор Б.Ф. Самойленко,
Харківський університет Повітряних Сил.