

## ВИЗНАЧЕННЯ НАЯВНОСТІ УМОВ ВИНИКНЕННЯ ФЕРОРЕЗОНАНСНОГО ПРОЦЕСУ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

І.Ю. Тугай, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна

*Розглянуто питання перевірки існування умов виникнення ферорезонансу в електричних мережах високої напруги за допомогою методу Гальоркіна. Показано, що в електричних мережах існують необхідні та достатні умови розвитку ферорезонансних процесів. Для визначення наявності умов виникнення ферорезонансу проведено відповідне моделювання у просторі частот та одержано рівняння, які дають змогу проводити аналіз ферорезонансної схеми. Надано відповідні рекомендації щодо розрахунку ферорезонансних процесів та їх запобігання. Бібл. 4, рисунок.*

**Ключові слова:** ферорезонанс, електричні мережі високої напруги, перенапруги, надструми.

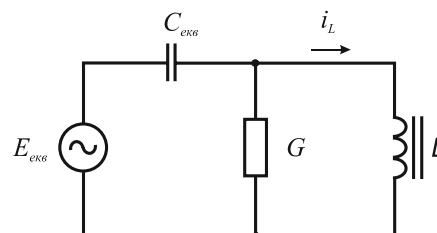
Ферорезонанс – це складні нелінійні коливання, які можуть виникати в електричних колах з послідовним або паралельним з'єднанням нелінійної індуктивності та ємності і супроводжуються перенапругами та надструмами. Загалом з практики експлуатації електричних мереж високої напруги з ефективним заземленням нейтралі відомі певні особливості побудови та поведінки фрагментів мережі, де найбільш вірогідною є поява ферорезонансних процесів. Можна очікувати наявності ферорезонансу, якщо в електричній мережі спостерігаються такі характерні ознаки: існування перенапруг як між фазами, так і між фазою та землею; поява надструмів; спотворення форми напруги та струму; зміщення точки нейтралі; нагрівання трансформатора (в режимі холостого ходу); безперервний надто гучний шум від трансформатора та реакторів; вихід з ладу електричного обладнання, наприклад трансформаторів напруги (ТН), через термічний ефект чи пошкодження ізоляції (характерним симптомом пошкодження ТН від ферорезонансу є руйнування первинної обмотки при неушкодженій вторинній) [3]; відмова засобів релейного захисту та автоматики. У таких випадках необхідно перевірити наявність необхідних та достатніх умов виникнення ферорезонансних процесів.

Необхідними умовами є такі: наявність у схемі електричної мережі порівняно великої ємності (кабельні лінії електропередачі (ЛЕП), повітряні ЛЕП великої довжини, ємнісні дільники напруги у вимикачах, ємнісні ТН та інше); наявність індуктивного елемента з феромагнітним осердям (силові трансформатори, електромагнітні ТН, реактори та інше). Достатніми умовами вважається поява відповідних збурень режиму в енергосистемі: перехідні процеси; атмосферні перенапруги; підключення чи відключення трансформаторів або навантажень; виникнення та ліквідація коротких замикань; ремонт під напругою та інше.

Для проведення аналізу умов виникнення ферорезонансних явищ розглянемо еквівалентну ферорезонансну схему (рис. 1), яка отримана шляхом елементарних еквівалентних перетворень, спираючись на теорему Тевеніна, і в загальному випадку складається: з еквівалентного джерела живлення  $E_{\text{екв}}$ ; еквівалентної ємності дільників напруги вимикача, ємностей шин і приєднаного до шин обладнання  $C_{\text{екв}}$ ; провідності  $G$ , яка враховує втрати в магнітопроводі ТН підстанції; нелінійної індуктивності трансформатора  $L$ .

Перевірка наявності умов для початку ферорезонансного процесу в нелінійному колі (рисунок), що створене ємностями дільника напруг елегазового чи повітряного вимикача високої напруги, ємностями шин і приєднаного до шин обладнання, а також електромагнітним ТН, засновується на використанні метода Гальоркіна і забезпечує перехід від простору часу до простору частот.

Запишемо диференціальне рівняння для еквівалентної ферорезонансної схеми (рисунок):



$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + \frac{G}{C_{\text{екв}}} \frac{d\psi}{dt} + \frac{1}{C_{\text{екв}}} i_L = E_{\text{екв}} \omega \cos(\omega t + \delta), \quad (1)$$

де  $\psi$  – потокозчеплення обмотки ТН;  $\omega$  – кругова частота системи;  $\delta$  – початкова фаза.

Потокозчеплення  $\psi$  запишемо у вигляді

$$\psi = \Psi \cos \omega t, \quad (2)$$

де  $\Psi$  – амплітуда потокозчеплення.

З урахуванням виразу (2) диференціальне рівняння (1) набуде вигляду

$$-\omega^2 \Psi \cos(\omega t) - \frac{G}{C_{\text{екв}}} \Psi \omega \sin(\omega t) + \frac{1}{C_{\text{екв}}} i_L = E_{\text{екв}} \omega \cos(\omega t) \cos(\delta) + E_{\text{екв}} \omega \sin(\omega t) \sin(\delta). \quad (3)$$

Струм  $i_L$  є періодичною функцією від часу, тому може бути розкладено в ряд Фур'є:

$$i_L = A_0 + A \sin(\omega t) + B \cos(\omega t) \quad (4)$$

Струм  $i_L$  також є парною функцією від часу та не містить постійної складової [2], тому коефіцієнти  $A_0$  та  $A$  рівняння (4) будуть дорівнювати нулю. Таким чином, вираз для струму  $i_L$  набуде виду

$$i_L = B \cos(\omega t), \quad (5)$$

де коефіцієнт  $B$  розраховується за формулою:

$$B = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} i_L \cos(\omega t) d(\omega t). \quad (6)$$

Вираз для  $i_L$  визначається за допомогою апроксимації характеристики намагнічування. Для цього на характеристиці намагнічування знаходяться дві точки зі значеннями потокозчеплення  $\psi_1$  та  $\psi_2$  та розраховується струм  $i_L$  для відповідних проміжків часу.

Для проміжку від 0 до  $\omega t_1$  вираз для  $i_L$  має вигляд

$$i_L = \frac{\psi_1}{L_1} + \frac{\psi_2 - \psi_1}{L_2} + \frac{\Psi \cos(\omega t) - \psi_2}{L_3} = \frac{\psi_1(L_2 - L_1)}{L_1 L_2} + \frac{\psi_2(L_3 - L_2)}{L_2 L_3} + \frac{\Psi \cos(\omega t)}{L_3}; \quad (7)$$

для проміжку від  $\omega t_1$  до  $\omega t_2$  –

$$i_L = \frac{\psi_1}{L_1} + \frac{\Psi \cos(\omega t) - \psi_1}{L_2} = \frac{\psi_1(L_2 - L_1)}{L_1 L_2} + \frac{\Psi \cos(\omega t)}{L_2}; \quad (8)$$

для проміжку від  $\omega t_2$  до  $\pi - \omega t_2$  –

$$i_L = \frac{\Psi \cos(\omega t)}{L_1}; \quad (9)$$

для проміжку від  $\pi - \omega t_2$  до  $\pi - \omega t_1$  –

$$i_L = -\frac{\psi_1(L_2 - L_1)}{L_1 L_2} + \frac{\Psi \cos(\omega t)}{L_2}; \quad (10)$$

для проміжку від  $\pi - \omega t_1$  до  $\pi$  –

$$i_L = -\frac{\psi_1(L_2 - L_1)}{L_1 L_2} - \frac{\psi_2(L_3 - L_2)}{L_2 L_3} + \frac{\Psi \cos(\omega t)}{L_3}. \quad (11)$$

Враховуючи вирази (7)...(11), рівняння (6) можна записати як

$$B = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} i_L \cos(\omega t) d(\omega t) = \frac{2}{\pi} \left[ \int_0^{\omega t_1} \left( \frac{\psi_1(L_2 - L_1)}{L_1 L_2} + \frac{\psi_2(L_3 - L_2)}{L_2 L_3} + \frac{\Psi \cos(\omega t)}{L_3} \right) \cos(\omega t) d(\omega t) + \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} \left( \frac{\psi_1(L_2 - L_1)}{L_1 L_2} + \frac{\Psi \cos(\omega t)}{L_2} \right) \cos(\omega t) d(\omega t) + \int_{\omega t_2}^{\pi - \omega t_2} \frac{\Psi \cos(\omega t)}{L_1} \cos(\omega t) d(\omega t) + \int_{\pi - \omega t_2}^{\pi - \omega t_1} \left( -\frac{\psi_1(L_2 - L_1)}{L_1 L_2} + \frac{\Psi \cos(\omega t)}{L_2} \right) \cos(\omega t) d(\omega t) + \int_{\pi - \omega t_1}^{\pi} \left( -\frac{\psi_1(L_2 - L_1)}{L_1 L_2} - \frac{\psi_2(L_3 - L_2)}{L_2 L_3} + \frac{\Psi \cos(\omega t)}{L_3} \right) \cos(\omega t) d(\omega t) \right]$$

$$\begin{aligned}
& + \int_{\pi - \omega t_2}^{\pi - \omega t_1} \left( -\frac{\Psi_1(L_2 - L_1)}{L_1 L_2} + \frac{\Psi \cos(\omega t)}{L_2} \right) \cos(\omega t) d(\omega t) + \\
& + \int_{\pi - \omega t_1}^{\pi} \left( -\frac{\Psi_1(L_2 - L_1)}{L_1 L_2} - \frac{\Psi_2(L_3 - L_2)}{L_2 L_3} + \frac{\Psi \cos(\omega t)}{L_3} \right) \cos(\omega t) d(\omega t) \Big]. \quad (12)
\end{aligned}$$

Після розрахунку інтегралів та з урахуванням, що  $\omega t_1 = \arccos\left(\frac{\Psi_2}{\Psi}\right)$ ,  $\omega t_2 = \arccos\left(\frac{\Psi_1}{\Psi}\right)$ ,

рівняння (12) набуде вигляду

$$\begin{aligned}
B = & \frac{2}{\pi} \left[ \frac{\Psi}{L_3} \left( \arccos\left(\frac{\Psi_2}{\Psi}\right) + \frac{1}{2} \sin\left(2 \arccos\left(\frac{\Psi_2}{\Psi}\right)\right) \right) + \frac{\Psi}{L_2} \left( \arccos\left(\frac{\Psi_1}{\Psi}\right) - \arccos\left(\frac{\Psi_2}{\Psi}\right) + \right. \right. \\
& + \frac{1}{2} \sin\left(2 \arccos\left(\frac{\Psi_1}{\Psi}\right)\right) - \frac{1}{2} \sin\left(2 \arccos\left(\frac{\Psi_2}{\Psi}\right)\right) \Big] + \frac{\Psi}{L_1} \left( \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{\Psi_1}{\Psi}\right) - \right. \\
& - \frac{1}{2} \sin\left(2 \arccos\left(\frac{\Psi_1}{\Psi}\right)\right) \Big] + 2 \left( \frac{\Psi_1(L_2 - L_1)}{L_1 L_2} + \frac{\Psi_2(L_3 - L_2)}{L_2 L_3} - \frac{\Psi_1(L_2 - L_1)}{L_1 L_2} \right) \sin\left(\arccos\left(\frac{\Psi_2}{\Psi}\right)\right) + \\
& + 2 \frac{\Psi_1(L_2 - L_1)}{L_1 L_2} \sin\left(\arccos\left(\frac{\Psi_1}{\Psi}\right)\right) \Big]. \quad (13)
\end{aligned}$$

Підставляючи вираз (5) в (3), диференціальне рівняння (3) можна записати у вигляді

$$-\omega^2 \Psi \cos(\omega t) - \frac{G}{C_{\text{екв}}} \Psi \omega \sin(\omega t) + \frac{1}{C_{\text{екв}}} B \cos(\omega t) = E_{\text{екв}} \omega \cos(\omega t) \cos(\delta) + E_{\text{екв}} \omega \sin(\omega t) \sin(\delta). \quad (14)$$

Далі прирівнюються коефіцієнти при синусних і косинусних членах диференціального рівняння (14):

$$-\omega^2 \Psi + \frac{1}{C_{\text{екв}}} B = E_{\text{екв}} \omega \cos(\delta); \quad (15)$$

$$-\frac{G}{C_{\text{екв}}} \Psi \omega = E_{\text{екв}} \omega \sin(\delta). \quad (16)$$

Рішення рівнянь (15), (16) знаходяться за допомогою ітерацій, які виконуються за методом січних. Такий розрахунок дає можливість знайти струм  $i_L$ .

Слід зазначити, що перевірка наявності умов виникнення ферорезонансу виконується методом Гальоркіна в просторі частот, а для визначення конкретних характеристик ферорезонансного процесу необхідно виконувати його моделювання в просторі часу, причому слід враховувати загальну схильність досліджуваної системи до хаотичної поведінки [1]. Проте на практиці більш важливим є підтвердження наявності необхідних та можливості появи достатніх умов при ферорезонансних режимах у кожному конкретному випадку.

Для вирішення задачі запобігання ферорезонансу досить задати керуючі параметри кола (рисунок) таким чином, щоб запобігти появі в ньому необхідних умов початку коливань. З найбільшою ефективністю запобігати появі умов виникнення ферорезонансних процесів в умовах експлуатації можна змінюючи еквівалентну ємність шин за допомогою додаткових ємностей [4]. Цей засіб не впливає на роботу ТН і гарантує відсутність появи ферорезонансу в широкому діапазоні зміни інших параметрів схеми та режиму. Заслужують на увагу також пристрої гасіння ферорезонансу за допомогою зміни параметрів режиму ферорезонансної схеми. Такий пристрій фіксації та гасіння ферорезонансу у розподільних пристроях електричних мереж високої напруги з ефективним заземленням нейтралі розроблено в Інституті електродинаміки НАН України, який на відміну від традиційних реалізує принцип введення компенсаційної ЕРС до обмотки ТН. Гасіння ферорезонансу здійснюється за один-два періоди (замість п'яти-шести), відсутні пожежонебезпечні баластні опори, використано

простий алгоритм повернення пристрою у вихідний стан. Наразі після випробувань в діючих електричних мережах цей пристрій використовується в енергосистемах України.

1. Кузнецов В.Г., Тугай І.Ю. Аналіз феррорезонансних процесів в розподільчому пристрої підстанції високої напруги за допомогою методів нелінійної динаміки // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – 2012. – Ч. 3. – С. 33–34.
2. Milicevic K., Flegar I., Pelin D. Flux reflection model of the ferroresonant circuit // Mathematical Problems in Engineering. – 2009. – Vol. 2009. – P. 1–14.
3. Valverde V., Mazon A.J., Buigues G. Ferroresonance in voltage transformers: Analysis and simulations // Proceedings of International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ). – Sevilla, Spain, March, 2007. – P. 317–323.
4. Wisniewski J., Anderson E., Karolak J. Search for network parameters preventing ferroresonance occurrence // Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU): Proceedings of 9th International Conference. – Barcelona, Spain, October, 2007. – P. 253–257.

УДК 621.311.4

**І.Ю. Тугай**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

#### **Определение наличия условий возникновения феррорезонансного процесса в электрических сетях высокого напряжения**

*Показано, что для возникновения феррорезонансных явлений в электрических сетях необходимо выполнение достаточных и необходимых условий. Достаточные условия – это появление соответствующих возмущений режима в энергосистеме, а необходимыми условиями являются наличие в схеме электрической сети сравнительно больших емкостей и индуктивных элементов с ферромагнитным сердечником. Феррорезонансные колебания могут появляться при вариациях параметров элементов в широком диапазоне и иметь разный характер, что усложняет их прогноз и выбор средств противодействия. Таким образом, существует необходимость в проведении анализа поведения феррорезонансной цепи в зависимости от параметров схемы и режима. Для определения наличия условий появления феррорезонансных процессов было выполнено моделирование в пространстве частот методом Галеркина. Отмечено, что феррорезонансные цепи, как нелинейные диссипативные системы, чрезвычайно чувствительные к наименьшим отклонениям в начальных условиях и к погрешностям при моделировании, поэтому хаотическая природа феррорезонанса на практике может привести к развитию процесса по разным сценариям. Подтверждение наличия необходимых и возможности появления достаточных условий при феррорезонансных режимах в каждом конкретном случае является на практике наиболее важным. Основной целью исследования феррорезонансных процессов во время эксплуатации магистральных электрических сетей являются предотвращение повреждений основного оборудования и связанных с ними отключений, обеспечение правильности действия устройств релейной защиты и автоматики, а также безопасности работы персонала. Приведены способы предотвращения феррорезонанса, в том числе устройство фиксации и подавления феррорезонансных колебаний. Библ. 4, рисунок.*

**Ключевые слова:** феррорезонанс, электрические сети высокого напряжения, перенапряжения, сверхтоки.

**I.Yu. Tugai**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv, 03680, Ukraine

#### **The determination of ferroresonance processes conditions presence in high voltage electrical networks**

*An effective method of ferroresonance conditions determination is presented. It is shown that for the occurrence of ferroresonance phenomena in electrical networks the necessary and sufficient conditions have to be fulfilled. The sufficient conditions are the emergence of relevant perturbation mode in the power system. The necessary conditions are relatively large capacitance and nonlinear inductance in the electrical networks. Ferroresonant oscillation may occur with a wide range of parameters variations and have a different character, which complicates their prognosis and the choice of countermeasures. Depending on the circuit parameters and modes the analysis of the ferroresonance circuit behavior is necessary. To determine the conditions of the ferroresonance processes occurrence the modelling was performed with the use of Galerkin method. It is noted that ferroresonant circuit are extremely sensitive to the smallest deviations in the initial conditions and to the errors in the simulation as nonlinear dissipative systems, so in practice the chaotic nature of ferroresonance can lead to the process development under different scenarios. The existence of the necessary and sufficient conditions of ferroresonance modes in each scenario case is the most important in practice. During of high-voltage electrical networks operation the main purpose of the ferroresonance processes study is the prevention of electrical equipment damage, the correct operation of relay protection and automation, as well as security personnel work. The ways to prevent ferroresonance are presented, including the device of ferroresonance oscillations fixing and suppression. References 4, figure.*

**Key words:** ferroresonance, high-voltage electrical networks, overvoltage, overcurrent.

Надійшла 12.02.2014

Received 12.02.2014