

и однозначность результатов достоверизации проверены большим количеством расчетов согласно данным суточных графиков электрической нагрузки энергоемких предприятий ПАТ «Днепроблэнерго» за годовой период времени. Библ. 5, рис. 6, таблица.

Ключевые слова: достоверизация, аномальные значения, критерий Чебышева, электрическая нагрузка, энергоемкие предприятия.

P. Chernenko, O. Martyniuk, A. Zaslavsky

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Statistical homogeneity assurance of the electrical load daily schedules of the energy-consuming enterprises for short-term load forecasting of electric power system

The efficiency of the Ukraine Interconnected Electrical Power System (IEPS) operating modes scheduling essentially depends on short-term electric load forecasting results. The increase in number of factors significantly influencing on electric load contribute to improve the accuracy and reliability results of forecasting. However their certainty is essential. The energy-consuming enterprises contribute a great share into the electricity consumption of IEPS of the Ukraine. Analysis of the daily schedules of their electrical load over a long time period showed the availability of anomalous data caused by the system of data gathering, transmission and the basic information processing failures. Also the anomalous data appearance is dependent on abrupt changes of the operating conditions enterprises due to the technological and economic factors. The paper presents a two-stage statistically correct algorithm of the anomalous measurements discarding and the energy-consuming power enterprises missing data replacement in the total electric load sample. Besides, the anomalous values are subdivided depending on their character and continuance. At the first stage of the verification the sample essential anomalous values identification and missing data replacement are performed using linear interpolation. At the second stage the unobvious anomalous values are excluded by means of the preliminary discarding of the sample trend component by piecewise polynomial approximation. Single anomalous values replacement is performed with the aid of the linear approximation, but the group ones are replaced taking into account their change character. At the both stages the determination of the statistical characteristics, the type of data distribution law (Gaussian, unimodal or arbitrary) and the discarding are performed by means of Chebyshev criterion.

The accuracy and unambiguous character of the verification results were controlled by a great number of calculations based on data of daily electric load schedules for annual period of time for "Dniprooblenergo" energy-consuming enterprises. References 5, figures 6, table.

Key words: abnormal values, Chebyshev criterion, electrical load, energy-intensive industries.

Надійшла 8.12.2014

Received 8.12.2014

УДК 621.311.4

ВПЛИВ ЯВИЩА ГІСТЕРЕЗИСУ НА ВИНИКНЕННЯ НЕТРАДИЦІЙНИХ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

В.Г. Кузнецов¹, чл.-кор. НАН України, **І.Ю. Тугай²**, канд. техн. наук, **В.А. Мельничук³**

1, 2 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна

3 – Київський енергетичний коледж,

вул. І. Сергієнка, 7, Київ, 02105, Україна

tugay@ied.org.ua

Показано, що на відміну від ферорезонансних процесів на основній частоті, розрахунок нетрадиційних ферорезонансів у електричних мережах високої напруги потребує більш точного моделювання. Використання моделі гістерезису дає змогу підвищити точність розрахунку нетрадиційних ферорезонансів. Моделювання гістерезису було виконано за допомогою моделі Джілса-Атертона, що дозволило більш точно розрахувати області небезпечних параметрів нетрадиційних ферорезонансів. Наведено найбільш поширені засоби попередження розвитку таких ферорезонансних процесів. Бібл. 7, рисунок.

Ключові слова: ферорезонанс, електрична мережа, перенапруга, надструм.

Ферорезонанс – це складні нелінійні коливання, які виникають в електричних мережах і викликають появу перенапруг та надструмів. Екстремальні значення параметрів режи-

му можуть значно перевищувати номінальні та бути тривалими. Вони призводять до пошкодження ізоляції, перегрівання та виходу з ладу устаткування електричної мережі, а також до розвитку системних аварій. Для появи ферорезонансних процесів у електричних мережах необхідно, щоб існувало джерело живлення (отримання енергії для підтримки коливань), нелінійна індуктивність (силовий трансформатор або трансформатор напруги) та ємність (ємнісні дільники вимикачів, кабелі, лінії електропередач).

Ферорезонансні коливання можна розділити на чотири групи [3]:

- періодичні ферорезонансні процеси на основній частоті. При такому ферорезонансі напруги та струми періодичні з періодом, що дорівнює періоду системи;
- субгармонічні ферорезонанси, напруги та струми яких є періодичними та кратними до періоду джерела живлення. Ці коливання мають, як правило, непарний порядок;
- квазіперіодичні ферорезонансні процеси. Такі процеси не є періодичними і мають дискретний спектр гармонічних складових, не кратних до періоду джерела живлення;
- хаотичні ферорезонанси. Ця група ферорезонансів також не є періодичною з безперервним спектром гармонічних складових.

Загалом до нетрадиційних ферорезонансних процесів прийнято відносити ферорезонанси не на основній частоті, тобто всіх груп крім першої. Причому необхідно зазначити, що початкові умови (наприклад, рівень насичення сердечника трансформатора) відіграють одну з вирішальних ролей у виникненні та розвитку нетрадиційного ферорезонансу. Тому для визначення ймовірності появи нетрадиційних видів ферорезонансу важливе значення має точність моделей трансформаторів.

Зрозуміло, що для моделювання ферорезонансних процесів необхідно використовувати нелінійну математичну модель трансформатора, характеристики якої зумовлені магнітними властивостями матеріалів осердя трансформаторів та описуються залежністю магнітної індукції B від напруженості поля H :

$$B = \mu_0(H + M), \quad (1)$$

де μ_0 – магнітна проникність; M – намагнічування осердя трансформатора.

Традиційно для аналізу ферорезонансних процесів у більшості випадків використовується крива намагнічування трансформатора [6], яка апроксимується поліноміальними рівняннями, тригонометричними або гіперболічними функціями. При цьому явище гістерезису не враховується. Однак нетрадиційні ферорезонансні процеси потребують більш точного моделювання, тому постає питання про моделювання гістерезису. Зазвичай для цього застосовується модель Прейзаха, яка є досить складною при чисельній реалізації і потребує використання значної кількості параметрів. У порівнянні з моделлю Прейзаха [2], модель Джіlsa-Атертона є більш простою при реалізації і має меншу кількість параметрів [4, 5]. Модель Джіlsa-Атертона записується у вигляді диференціального рівняння, де намагнічування сталюого осердя трансформатора є сумою постійного намагнічування M_{irr} та змінного намагнічування M_{rev} . Спочатку розглядається безгістерезисна поведінка, і крива намагнічування описується рівнянням

$$M_{an} = M_s \left(\operatorname{cth} \left(\frac{H_e}{a} \right) - \frac{a}{H_e} \right), \quad (2)$$

де M_{an} – безгістерезисне намагнічування; M_s – намагнічування насичення, параметр моделі Джіlsa-Атертона; $H_e = H + \alpha M$ – ефективне магнітне поле; a – параметр моделі Джіlsa-Атертона.

З фізичних міркувань процесу намагнічування зв'язок між цими видами намагнічування запишемо як

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}), \quad (3)$$

де c – параметр моделі Джіlsa-Атертона, який змінюється від нуля при повністю необоротному намагнічуванні до одиниці при повністю оборотному намагнічуванні.

Постійне намагнічування описується відношенням

$$\frac{dM_{irr}}{dH_e} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta}, \quad (4)$$

де k – параметр моделі Джілла-Атертона; δ – коефіцієнт перемагнічування.

Враховуючи рівняння (3), можна записати:

$$M = M_{irr} + c(M_{an} - M_{irr}) = (1-c)M_{irr} + cM_{an}. \quad (5)$$

Після диференціювання рівнянь (2) та (5) з урахуванням ефективною магнітної індукції $B_e = H + \alpha M$ запишемо

$$\frac{dM_{an}}{dB_e} = \frac{M_s}{a\mu_0} \left(1 - cth^2 \left(\frac{H_e}{a} \right) + \left(\frac{a}{H_e} \right)^2 \right); \quad (6)$$

$$\frac{dM}{dB_e} = (1-c) \frac{dM_{irr}}{dB_e} + c \frac{dM_{an}}{dB_e}. \quad (7)$$

Рівняння (4) можна переписати у такому вигляді:

$$\frac{dM_{irr}}{dB_e} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{\mu_0 k \delta}, \quad (8)$$

де $\delta = 1$ при $\frac{dB}{dt} > 0$ та $\delta = -1$ при $\frac{dB}{dt} < 0$.

Враховуючи рівняння (3), запишемо $M_{irr} = \frac{M - cM_{an}}{1-c}$.

Таким чином, отримуємо зворотне диференціальне рівняння моделі Джілла-Атертона, для якого, на відміну від оригінального рівняння Джілла-Атертона, де намагнічування отримується з напруженості магнітного поля, у цьому випадку сумарне намагнічування обчислюється з магнітної індукції:

$$\frac{dM}{dB} = \frac{(1-c) \frac{dM_{irr}}{dB_e} + c \frac{dM_{an}}{dB_e}}{1 + \mu_0(1-c)(1-\alpha) \frac{dM_{irr}}{dB_e} + \mu_0 c(1-\alpha) \frac{dM_{an}}{dB_e}}. \quad (9)$$

Для практичних розрахунків нетрадиційних ферорезонансів з урахуванням гістерезису доцільно виконати перехід від $B-H$ параметрів до $\phi-i$ параметрів. Як відомо, напруженість магнітного поля $H = \frac{n}{l}i$, де i – струм у котушці; n – кількість витків; l – довжина котушки. Магнітний потік $\phi = BS$, де S – площа перерізу сердечника котушки, з іншого боку, $\phi = \frac{1}{n} \int U dt$, де U – напруга; t – час. Після диференціювання рівняння (1) та рівняння для магнітного потоку із застосуванням ланцюгового правила можна записати:

$$\frac{dH}{dB} = \frac{1}{\mu_0} - \frac{dM}{dB}; \quad (10)$$

$$\frac{dM}{dB} = \frac{dM}{d\phi} \frac{d\phi}{dB} = S \frac{dM}{d\phi}. \quad (11)$$

Тоді

$$\frac{dH}{dB} = \left(\frac{n}{lS} \right) \frac{di}{d\phi}. \quad (12)$$

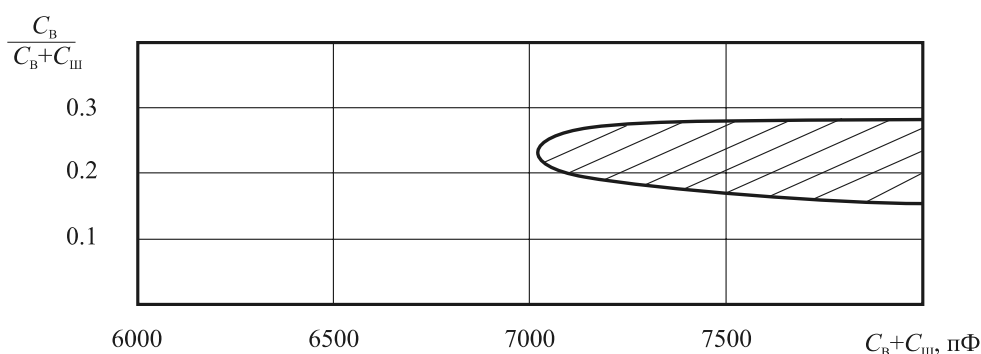
Враховуючи рівняння (11), підставляємо (12) у рівняння (10):

$$\frac{di}{d\phi} = \frac{lS}{n} \left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{dM}{dB} \right) = \frac{lS}{n} \left(\frac{1}{\mu_0} - S \frac{dM}{d\phi} \right). \quad (13)$$

Таким чином, для аналізу розвитку нетрадиційних ферорезонансних процесів отримана модель (13), яка дає змогу розраховувати петлю гістерезису за допомогою зворотної моделі Джілса-Атертона в $\phi-i$ координатах.

Щоб перевірити як впливає модель гістерезису на розрахунок можливості виникнення нетипових ферорезонансів, була використана типова ферорезонансна схема для розподільного пристрою підстанцій високої напруги з ефективним заземленням нейтралі [1]. Змінювались еквівалентна ємність дільників напруги вимикача C_B і еквівалентна ємність шин та приєднаного обладнання C_{III} . Для ідентифікації параметрів зворотної моделі Джілса-Атертона використано петлю гістерезису, що була отримана експериментально для трансформаторів напруги 220 кВ серії НКФ. Системи диференціальних рівнянь розв'язувались методом Рунге-Куты четвертого порядку.

Для аналізу була використана частина області параметрів ферорезонансу, яка показувала відсутність нетрадиційних ферорезонансних процесів згідно з розрахунком з апроксимацією кривої намагнічування трансформатора напруги НКФ 220 кВ поліномом 11-го порядку без врахування гістерезису. Однак після врахування гістерезису за допомогою зворотної моделі Джілса-Атертона в $\phi-i$ величинах було знайдено область небезпечних параметрів існування нетрадиційного ферорезонансного процесу (рисунок).



Моделювання процесів за допомогою програмного забезпечення *Matlab-Simulink* підтвердило можливість появи в цій області хаотичного ферорезонансу.

Отже, можна зробити висновок, що при традиційному підході, коли не враховується ефект гістерезису, залишаються поза увагою певні області, в яких існує ймовірність виникнення нетрадиційного ферорезонансного процесу. Таким чином, врахування цього ефекту дає можливість більш точно визначити області небезпечних параметрів нетрадиційних ферорезонансів.

Щоб уникнути виникнення та розвитку нетрадиційних ферорезонансних процесів досить поширеним засобом є підключення навантаження до трансформаторів напруги [7], проте це може погіршити вимірювальні властивості схеми. Більш ефективним засобом є використання спеціальних захисних пристроїв, які дають змогу запобігти розвитку ферорезонансів як на основній частоті, так і нетрадиційних ферорезонансних процесів.

1. Кузнецов В.Г., Тугай І.Ю. Дослідження динаміки ферорезонансного процесу в розподільному пристрої підстанції високої напруги // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2013. – Вип. 34. – С. 12–15.
2. Benabou A. Comparison of Preisach and Jiles-Atherton models to take into account hysteresis phenomenon for finite element analysis // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2003. – Vol. 261. – P. 139–160.
3. Ferracci P. Ferroresonance // Cahier technique. Schneider Electric. – Paris, 1998. – No. 190. – P. 1–28.
4. Jiles D.C., Thoeke J.B., Devine M.K. Numerical Determination of Hysteresis Parameters for Modeling of Magnetic Properties using The Theory of Ferromagnetic Hysteresis // IEEE Transactions on Magnetics. – January, 1992. – Vol. 28, No. 1. – P. 27–34.
5. Jiles D.C., Thoeke J.B. Theory of ferromagnetic hysteresis: determination of model parameters from experimental hysteresis loops // IEEE Transactions on Magnetics. – September 5, 1989. – Vol. 25. – P. 3928–3930.
6. Valverde V. Ferroresonance in voltage transformers: Analysis and simulations // Proceedings of International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICRE PQ). – Sevilla, Spain, March, 2007. – P. 317–323.

7. Wisniewski 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

В.Г. Кузнецов¹, чл.-корр. НАН України, **И.Ю. Тугай²**, канд. техн. наук, **В.А. Мельничук³**

1, 2 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна

3 – Київський енергетичний коледж,

ул. І. Сергієнко, 7, Київ, 02105, Україна

Влияние эффекта гистерезиса на возникновение нетрадиционных феррорезонансных процессов в электрических сетях

Показано, что в отличие от феррорезонансных процессов на основной частоте, анализ нетрадиционных феррорезонансов в электрических сетях высокого напряжения требует более точных математических моделей. Отмечено, что уровень насыщения сердечника трансформатора играет одну из решающих ролей в возникновении и развитии нетрадиционного феррорезонанса. Учет эффекта гистерезиса и повышение точности нелинейной математической модели трансформатора позволяет модель Джилса-Атертона. Показано, что по сравнению с другими моделями гистерезиса, она является более простой при реализации и имеет меньшее количество параметров. Для анализа нетрадиционных феррорезонансов разработана обратная модель Джилса-Атертона в величинах, которые используются на практике. Чтобы проверить, как модель гистерезиса влияет на определение возможности возникновения нетипичных феррорезонансных процессов, был проведен анализ феррорезонансной схемы для распределительного устройства подстанции высокого напряжения. Варьировались эквивалентная емкость делителей напряжения выключателя и эквивалентная емкость шин и присоединенного оборудования. Системы дифференциальных уравнений решались методом Рунге-Куты четвертого порядка. В отличие от расчета с аппроксимацией кривой намагничивания трансформатора полиномом одиннадцатого порядка, при учете гистерезиса с помощью обратной модели Джилса-Атертона была найдена область опасных параметров существования нетрадиционного феррорезонансного процесса. Моделирование с помощью программного обеспечения Matlab-Simulink подтвердило возможность появления в данной области хаотического феррорезонанса. Учет гистерезиса с помощью модели Джилса-Атертона дает возможность более точно очертить области, в которых существует вероятность возникновения нетрадиционного феррорезонансного процесса. Отмечены возможные средства предупреждения развития данных феррорезонансных процессов. Библ. 7, рисунок.

Ключевые слова: феррорезонанс, электрические сети, перенапряжение, сверхток.

V.G. Kuznetsov¹, **I.Yu. Tugai²**, **V.A. Melnychuk³**

1, 2 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv, 03680, Ukraine

3 – College of Energy,

Sergienka, 7, Kyiv, 02105, Ukraine

The impacts of hysteresis on the development of non-conventional ferroresonance processes in electrical networks

This article investigates the impacts of hysteresis on the calculations of non-conventional ferroresonance phenomena. It is shown that unlike fundamental frequency ferroresonance, non-conventional ferroresonance analysis in high voltage electrical networks require more accurate simulation. As one of the initial conditions the level of saturation of the transformer core plays a major role in the initiation and development of non-conventional ferroresonance. The Jiles-Atherton model allows to take into account the hysteresis effect and improve the accuracy of the transformer nonlinear mathematical model. It is indicated that this model easier in simulation and has few parameters in comparison with the other hysteresis models. For the analysis of non-conventional ferroresonance the inverse Jiles-Atherton model is applied and allows to model of nonlinear ferromagnetic core. To verify how the model of hysteresis affects the calculation of non-conventional ferroresonance the ferroresonant circuit of high-voltage substation switchgear is applied. Capacities of voltage dividers and the sum of the electric equipment capacities relative to the ground are varied. To solve the systems of differential equation the fourth-order Runge-Kutta method is used. Taking into account hysteresis with the inverse Jiles-Atherton model helps to more accurately delineate the areas in which the initiation of non-conventional ferroresonance is possible. The means of the prevention of non-conventional ferroresonance development are presented. References 7, figure.

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

Надійшла 10.02.2015

Received 10.02.2015