

УДК 621.3

В. Ф. СИВОКОБИЛЕНКО (д-р техн. наук, проф.), **В. А. ЛИСЕНКО**
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
svf1934@gmail.com

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ ІЗ ЗАЗЕМЛЕНОЮ ЧЕРЕЗ КОТУШКУ ПЕТЕРСЕНА НЕЙТРАЛЛЮ

В роботі досліджуються питання підвищення надійності електричних мереж шляхом використання власного шуму енергосистеми для автоматичного налаштування індуктивності котушки Петерсена. Наведено експериментально отримані періодограми напруги небалансу і результат моделювання перехідного процесу однофазного замикання на землю.

Ключові слова: котушка Петерсена, замикання на землю, резонансна частота контуру нульової послідовності, спектральна густина потужності.

Стан питання та його актуальність. Довжина розподільних мереж України на сьогодні перевищує 90% загальної довжини мереж електричних систем. Більшість відновлюваних джерел енергії розподіленої генерації приєднуються саме до розподільних мереж, які мають напругу 6 – 35 кВ, і така тенденція має зберігатись у більшості країн до 2050 року. Так, у відповідності до «Дорожньої карти» розробки і впровадження «розумних» мереж» у розподільних мережах (Roadmap Development and Implementation Smart Grids in Distribution Networks), яка була розроблена Міжнародним енергетичним агентством (International Energy Agency) у травні 2015 року, розвиток саме розподільних мереж має сьогодні вирішальне значення. Також наголошується, що цей розвиток знаходиться в сфері інтересів урядів і індустрії (бізнесу) на всіх рівнях – національному, регіональному та муніципальному.

Найбільш розповсюдженим видом пошкоджень мереж напругою 6 – 35 кВ є однофазні замикання на землю. Існують статистичні дані [1], відповідно до яких, такі пошкодження складають від 65 до 95 % від всіх пошкоджень. Згідно з роботою [2] застосування котушки Петерсена є ефективним засобом підвищення надійності функціонування таких мереж, але в сучасних умовах динамічних змін конфігурації і режимів роботи розподільних мереж, обов'язковою умовою є використання автоматичного регулювання індуктивності котушки Петерсена в процесі експлуатації.

За умови точного налаштування котушки Петерсена забезпечується мінімальний струм однофазного замикання на землю в усталеному режимі, а також, у випадку нестійкого характеру замикання – оптимальна швидкість відновлення напруги пошкодженої фази відносно землі після розриву дуги замикання завдяки перехідному процесу, який виникає в контурі нульової послідовності мережі. Також правильно налаштована котушка Петерсена робить неможливими ферорезонансні процеси в контурі нульової послідовності мережі. Таким чином, проблема якісного управління котушкою Петерсена є актуальною.

Аналіз попередніх досліджень. В існуючих регуляторах індуктивності котушки Петерсена використовуються різні принципи [3], але їхня робота вкладається в загальну схему, відповідно до якої на контур нульової послідовності мережі: а) чиниться штучний вплив за допомогою певних стимулів; б) досліджується реакція мережі на ці стимули і визначається передавальна характеристика; в) на основі результатів досліджень робиться висновок про якість і повноту компенсації можливого ємнісного струму однофазного замикання на землю. Найбільш поширеним для регулювання індуктивності котушки Петерсена є створення штучної фазної ємнісної несиметрії шляхом підключення до однієї з фаз допоміжної ємності [2, 3]. Проте, такий підхід має ряд негативних наслідків, серед яких збільшення вірогідності замикань фаз на землю, прискорення зношення ізоляції кабелів та ін. Тому пошук найбільш інформативних параметрів для автоматичних регуляторів є актуальним.

Мета роботи: удосконалення методів налаштування котушки Петерсена на основі використання завад в контурі нульової послідовності.

Результати досліджень. Реакція мережі на стимули спостерігається як напруга нульової послідовності, оскільки ця координата є доступною для спостереження на практиці. Як стимули зазвичай використовуються синусоїдні струми різної частоти або імпульси. Ці штучні стимули мають бути достатньо потужними для того, щоб аналізувати реакцію мережі, оскільки окрім штучних стимулів на мережу впливають багато «природних» стимулів, пов'язаних з роботою як даної мережі, так і всієї електричної системи, і які в цьому випадку є завадами. Напругу нульової послідовності мережі з котушкою Петерсена в стаціонарному режимі, або, іншими словами, напругу небалансу зазвичай можна описати формулою:

$$\underline{U}_0 = \frac{E_A(g_A + j\omega C_A) + E_B(g_B + j\omega C_B) + E_C(g_C + j\omega C_C)}{g_A + g_B + g_C + g_L + j\omega(C_A + C_B + C_C) - \frac{j}{\omega L}} ; \quad (1)$$

де U_0 – комплексна напруга нульової послідовності мережі;

E_A, E_B, E_C – фазні комплексні ЕРС мережі;

g_A, g_B, g_C – активні провідності фазної ізоляції мережі відносно землі фаз А, В, С відповідно;

C_A, C_B, C_C – ємності фазних провідників мережі відносно землі фаз А, В, С відповідно;

g_L – активна провідність паралельної заступної схеми котушки Петерсена, що відображає втрати в котушці Петерсена;

L – індуктивність котушки Петерсена.

Формула (1) показує, що напруга небалансу визначається (за винятком усталеного режиму передачі електричної енергії на частоті 50 Гц) перехідними процесами, які мають місце в електричній системі. Оскільки електрична система зазвичай є досить великою, і перехідні процеси в системі не мають суттєвого взаємного зв'язку протягом часу 6,7 – 60 мс (такі періоди часу відповідають частотам 17 – 150 Гц), то отримуємо можливість висунути гіпотезу, що ці перехідні процеси можна розглядати як білий шум у контурі нульової послідовності мережі у згаданому діапазоні частот [4].

Подальше дослідження «природного» шуму електричної системи як стимулу контуру нульової послідовності показало, що його може бути використано для ідентифікації частоти максимуму передавальної частотної характеристики контуру нульової послідовності мережі, а ця частота, в свою чергу, несе інформацію про величину некомпенсованого струму можливого однофазного замикання на землю. Необхідна індуктивність для точного (резонансного) налаштування котушки Петерсена визначається за формулою:

$$L = L_n \left(\frac{f_m}{50} \right)^2 ; \quad (2)$$

де L – потрібна індуктивність котушки Петерсена;

L_n – поточна індуктивність котушки Петерсена;

f_m – частота максимуму спектральної густини потужності шуму напруги небалансу мережі.

Для визначення частоти максимуму спектральної густини потужності напруги небалансу розподільної мережі може бути використано методи і засоби DSP (Digital Signal Processing), зокрема, класичне дискретне перетворення Фур'є. На рис. 1 і 2 наведено отримані в діючій енергосистемі періодограми, які дозволяють виявити максимуми спектральної густини потужності напруги небалансу реальної розподільної мережі. Ці максимуми співпадають з максимумами модуля передавальної характеристики контуру нульової послідовності цієї мережі.

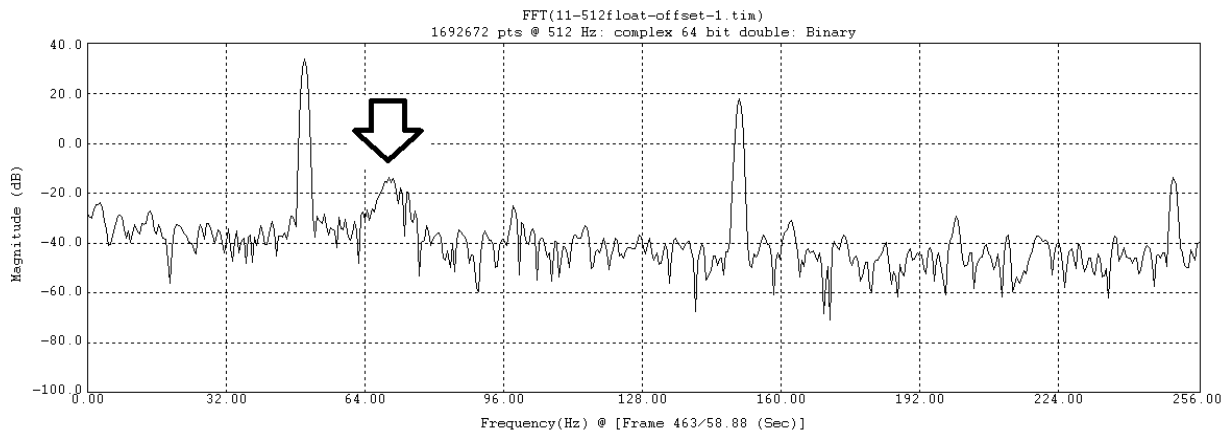


Рисунок 1 – Періодограма напруги нульової послідовності. Резонансна частота контуру нульової послідовності 71 Гц

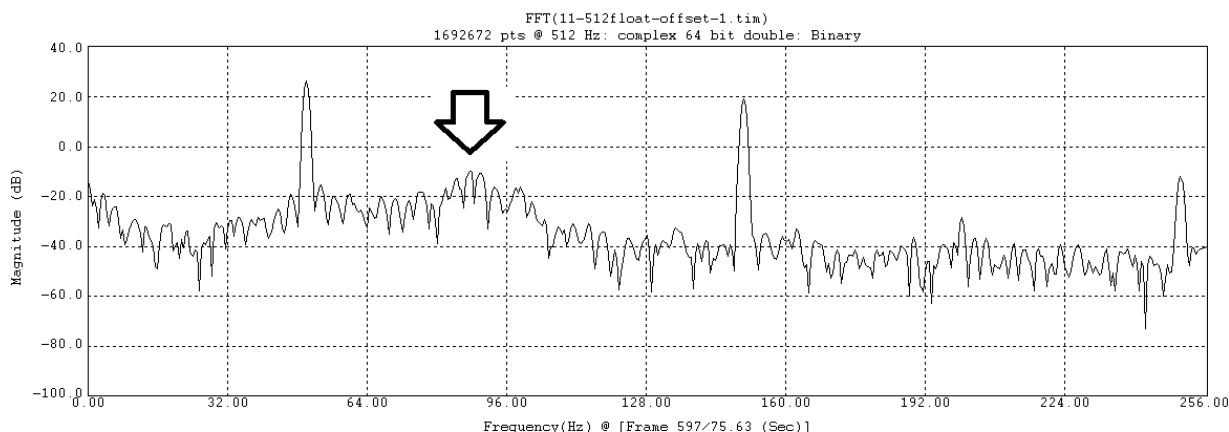


Рисунок 2 – Періодограма напруги нульової послідовності. Резонансна частота контуру нульової послідовності 86 Гц

Характер відновлюваної напруги після погасання дуги під час однофазного замикання на землю за умови резонансного налаштування запропонованим способом показано на рис. 3. Графік отримано шляхом математичного моделювання.

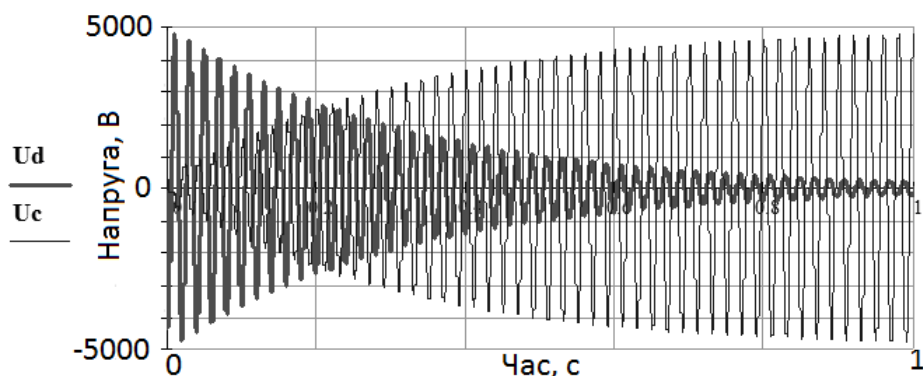


Рисунок 3 – Графік відновлення напруги пошкодженної фази (U_c) і зменшення напруги небалансу (U_d) в часі за умови точного налаштування компенсації. Коефіцієнт демпфування – 2%.

Процес відновлення напруги є близьким до оптимального, завдяки резонансному налаштуванню котушки Петерсена. Викладений підхід дозволяє в цілому підвищити надійність розподільчих електричних мереж.

Автоматичний регулятор налаштування котушки Петерсена, в якому реалізовано наведений вище алгоритм роботи, успішно експлуатується з 2012 року в розподільних електричних мережах напругою 6 кВ, які належать Кіровському підприємству електричних мереж.

Висновки: Існує і спостерігається функціональна залежність частоти максимуму спектральної густини небалансної напруги в контурі нульової послідовності електричної мережі від резонансної частоти контуру нульової послідовності.

Виявлену залежність може бути використано для побудови «пасивних» автоматичних регуляторів котушки Петерсена, які не збудують штучно контур нульової послідовності розподільної мережі. У практичній площині це дозволяє підвищити ступінь надійності електричних мереж.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф.А. Лихачев. – М. Энергия, 1971. – 152с.
2. Сирота И.М. Режимы нейтрали электрических сетей / И.М. Сирота, С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов. - Киев: Наукова думка. 1985. - 264 с.
3. Никифоров А. П. Поиск пригодных для унификации способов и устройств автоматического управления процессами компенсации емкостных токов в кабельных системах электроснабжения / А. П. Никифоров // Энергетика и электрификация - 1999.- No 5. С. 29-32.
4. Лисенко В. А. Модель завод в контурі нульової послідовності розподільної мережі з незаземленою нейтраллю / В. А. Лисенко // «Технічна електродинаміка». – 2012. -№ 2. - С. 44 – 45.

REFERENCES

1. Lihachev F.A. (1971) Zamykaniya na zemlyu v setyah s izolirovanoy neytralyu i s kompensatsiey emkostnyih tokov [Phase-to-earth fault of insulated neutral networks and capacitive current compensation]. – Energiya, Moscow, Russia.
2. Sirota I.M., Kislenko S.N. and Mihaylov A.M. (1985) Rezhimy neytrali elektricheskikh setey [Neutral-Grounding regime of electric network] Naukova dumka.. Kiev, Ukraine.
3. Nikiforov A.P., (1999) “Search of suitable methods for the unification and automatic control of processes of compensation of capacitive currents in the power cable systems”, Energetika I elektrifikatsiya, , No5, p. 29 - 32 Kiev, Ukraine.
4. Lisenko V. A. (2012) “Model of Zero Sequence Noise in Small Current Grounding System”, Tehnichna elektrodinamika, no. 2, pp. 44 – 45. Kiev, Ukraine.

Надійшла до редколегії 01.12.2015

Рецензент: Артюх С.Ф.

V. SIVOKOBYLENKO, V. LYSENKO

State Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University»

Increasing the reliability of distributed systems with Petersen coil. This work involves analyzing of increasing the reliability of power lines by using their own noise for automatic adjustment of Petersen coil inductance. Experimentally obtained periodograms of unbalance voltage and one-phase fault-to-earth transient response modeling results are provided.

In this article, actual theoretical and practical problem of increasing efficiency of the 6 - 35 kV electric networks by improvement adjustment methods of capacitive current compensation device (Petersen coil) was solved.

Artificial excitation of zero-phase sequence loop hastens the wearing of insulation and can lead to increased levels of overvoltage in the network, and thus leads to reduced durability and efficiency of electric network usage.

Zero-phase sequence loop with non-rounded midpoint wire is constantly excited by white noise of power systems, and reaction to this excitation can be observed on zero-phase sequence voltage in range at least 17-150 Hz.

Functional dependency of frequency of maximum level of spectral density of unbalanced zero-phase sequence voltage of electric network from resonance frequency of zero-phase sequence was discovered.

The efficiency of automatic adjustment device that is using new informational parameter - frequency of maximum level of spectral density of noise power in zero-phase sequence loop was confirmed by experiments and in practice by deployment on Kirov Electric Networks company.

Keywords: *phase-to-earth fault, zero sequence voltage, noise, Petersen coil.*