

УДК 621.316

В.А. ЛИСЕНКО
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
Victorl@ukr.net

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУГИ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ В ЧАСТОТНІЙ ОБЛАСТІ

Обґрунтовано параметри дослідної установки для дослідження напруги нульової послідовності в частотній області. Наведено результати експериментальних досліджень напруги нульової послідовності в розподільних електричних мережах. Досліджено вплив частотних складових на роботу автоматики систем компенсації ємнісного струму однофазного замикання на землю. Запропоновано заходи щодо зменшення негативного впливу частотних складових і математичну модель напруги нульової послідовності в частотній області.

Ключові слова: регулювання системи компенсації ємнісного струму замикань на землю, нульова послідовність, частотна характеристика, незаземлена нейтраль.

Постановка проблеми. Завдання енергоефективності постійно перебуває в полі зору як господарюючих суб'єктів, так і відповідних державних органів управління. Важливим чинником енергоефективності є надійне і безперебійне електропостачання. З метою підвищення надійності електропостачання і покращення умов експлуатації мереж напругою 6-35 кВ застосовується автоматично керована компенсація ємнісного струму однофазного замикання на землю (ОЗЗ), яка дозволяє знизити струм ОЗЗ. Система автоматики компенсації ємнісного струму зазвичай використовує напругу нульової послідовності (ННП) як джерело інформації про поточний стан електричної мережі. Також ННП часто використовується селективними системами захисту від ОЗЗ.

Аналіз останніх досягнень. Для забезпечення відповідного настроювання системи компенсації ємнісних струмів однофазних замикань на землю існує ряд принципів, які було систематизовано в [1, с.176-215]. Зокрема, автори звертають увагу на такі принципи настроювання: за реактивними провідностями мережі, за фазовими характеристиками, за екстремальними характеристиками, за частотними параметрами, за сталій часу відновлення напруги пошкодженій фазі, за співвідношенням величин параметрів нульової послідовності (НП) мережі. Реалізація будь-якого з цих принципів стикається з труднощами при отриманні достовірної інформації про стан мережі. Джерелом інформації про стан мережі є напруга ННП. Але в існуючих дослідженнях не приділяється необхідної уваги завадам, які ускладнюють визначення параметрів ННП.

Мета роботи – планування та аналіз результатів експериментальних досліджень завод в складі ННП, аналіз впливу завод на роботу системи автоматичного регулювання дугогасильного реактора (ДР) при використанні принципу визначення частотних параметрів контуру нульової послідовності мережі.

Виклад основного матеріалу. Оскільки ми плануємо проводити дослідження в частотній, а не часовій області, в першу чергу необхідно визначитись з частотним діапазоном, який нас цікавить. Для цього скористаємось паспортними даними ДР. Звичайно в них наводиться не індуктивність, а номінальний індуктивний струм. Межі регулювання струму ДР співвідносяться як 1:5 (наприклад, в ДР типу РЗДПОМ). Струм ДР обернено пропорційний його індуктивності. Будемо розглядати випадки, коли правильне настроювання ДР в принципі можливе, тобто частоту вільних коливань можна шляхом регулювання довести до 50 Гц. За таких припущень частота вільних коливань в контурі НП (КНП) може відхилятися від 50 Гц пропорційно кореню квадратному відхилення струму, тобто в $\sqrt{5} = 2,24$ раз і відповідно буде лежати в межах як мінімум 22,4 – 111 Гц. Цей діапазон доцільно розширити до 17 – 150 Гц.

Будь-які завади, частота яких знаходиться в цих межах, можуть бути помилково ідентифіковані як вільні коливання в КНП, що може призвести до неправильної роботи системи автоматичного керування компенсацією ємнісного струму з відповідними негативними наслідками, тому розглянемо їх більш детально.

Як правило, найбільш потужною складовою в напрузі НП є напруга основної частоти (ОЧ) мережі 50 Гц.

В [2] було показано, що амплітуда і фаза напруги частотою 50 Гц, особливо за наявності в мережі повітряних ліній, може зазнавати суттєвих змін у результаті різноманітних чинників, що ускладнює роботу фазових і екстремальних регуляторів настройки ДР. Такі результати досліджень і змусили нас перенести увагу з ОЧ на більш широкий частотний діапазон.

Наступною (в напрямку зменшення потужності) складовою може бути третя гармоніка основної частоти. Для того, щоб частота вільних коливань в КНП наблизилася до третьої гармоніки (150 Гц.) потрібно, щоб струм ДР в 9 разів перевищував ємнісний струм мережі. Незважаючи на таке суттєве зниження ємнісного струму, на практиці такий режим цілком можливий, наприклад, у випадку аварійного відключення значної частини мережі. Перерахуємо можливі джерела сигналу третьої гармоніки, беручи до уваги, що третя гармоніка зазвичай належить до нульової послідовності:

1. Вимірвальний трансформатор нульової послідовності внаслідок нелінійної кривої намагнічування сталі,

оскільки первинна обмотка має нульовий провід, що створює шлях для струму нульової послідовності.

2. Приєднувальний трансформатор, за допомогою якого ДР приєднано до мережі з тієї ж самої причини може бути джерелом третьої гармоніки.

3. Фазні напруги мережі можуть містити складові з частотою третьої гармоніки і при цьому ці складові не обов'язково мають належати до нульової послідовності.

Джерелом другої гармоніки (100 Гц) можуть бути напівпровідникові перетворювачі, та ін.

Після розгляду гармонік основної частоти звернемо увагу на субгармоніки, тобто на складові, частота яких дорівнює ОЧ, розділеній на ціле число. В роботі [3, р.138-140] проаналізовано напівпровідниковий силовий перетворювач, який названо «Integral Cycle Control», що породжує субгармоніку, в конкретному прикладі 10 Гц, а також гармоніки цієї частоти, тобто 20 Гц, 30 Гц, 40 Гц і т.д. В залежності від параметрів алгоритму керування такий перетворювач може породжувати будь-які субгармоніки і їх гармоніки відповідно.

Джерелом завад можуть бути також обертальні асинхронні електричні машини, вони згадуються в [3, р.73-74].

Існує великий обсяг досліджень, в яких розглядаються дефекти електричних машин, переважно асинхронних. Показано, що механічна вібрація та інші механічні процеси можуть викликати відповідні зміни струму електричних машин. Наводяться результати про вплив несиметрії повітряного зазору на генерацію складових, частота яких пов'язана з ковзанням [4, 5].

Результати ґрунтовних досліджень складових напруги електричних мереж, частоти яких відрізняються від ОЧ наведені в роботах, що стосуються якості електричної енергії [3, 6]. В назвах і текстах цих робіт автори вживають слова «гармоніки» та «інтергармоніки», але в дійсності аналіз проводиться для будь-яких частот, в т.ч. і ніяк не пов'язаних з частотою мережі. Також допускається наявність сигналів (напруг) зі спектром, який є характерним для неперіодичних сигналів. Джерелом сигналів з безперервним спектром є будь-які неперіодичні перехідні процеси в мережі, як виключно електричні, так і електромеханічні. Найбільш розповсюдженою неперіодичною подією в електричних мережах, яка впливає на напругу мережі і відповідно створює сигнали з безперервним спектром, є пуск потужних асинхронних двигунів.

З урахуванням отриманих результатів, були сплановані і проведені експериментальні дослідження спектрального складу напруги нульової послідовності. Ця напруга реєструвалась у реальній розподільній мережі номінальною напругою 6 кВ, яка складалась з повітряних і кабельних ліній і живила підприємства і місто. Реєстрація здійснювалась за допомогою звукової карти «Realtek High Definition Audio» і комп'ютера «ACER Aspire 5315», вхід звукової карти якого був підключений через резистивний розподільник напруги до обмотки розімкнутого трикутника вимірювального трансформатора «НТМІ-6», який, в свою чергу був приєднаний до мережі. Дані записувались засобами звукозапису операційної системи Windows в 16-розрядний «.wav» файл з частотою дискретизації 44100 Гц. Записи файлів проводились в червні 2011 року. Відхилення частоти мережі від номінальної під час проведення записів не перевищувало 0,05 Гц. Частота контролювалась візуально за індикатором реле частоти УРЧ-3М виробництва ВАТ «Релсіс», яке було встановлене в даній розподільній мережі.

Аналіз отриманих даних проводився відповідно до [7] за допомогою пакетів PyLab, MATLAB і ін. Також використовувались сегменти даних різної довжини, застосовувались різні види «вікна» даних, попередньої фільтрації, тощо з метою виявлення характерних особливостей сигналу, які будуть присутні в більшості випадків, незалежно від можливих помилок і випадкових чинників. Отримані типові результати наведені на рис.1.

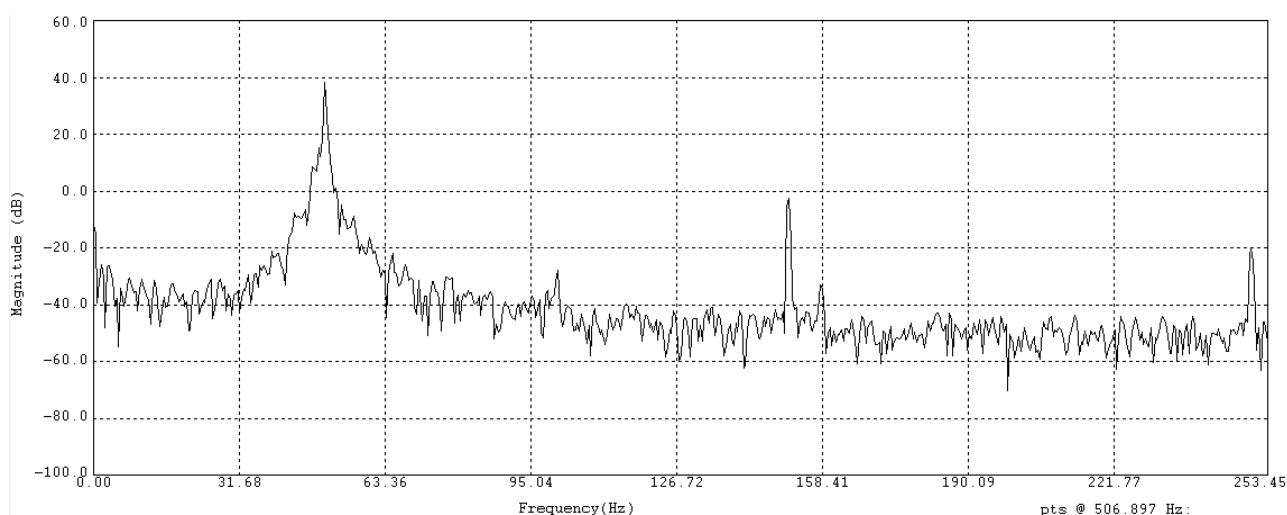


Рисунок1 – Типова спектрограма напруги нульової послідовності.

На рис.1 добре видно ОЧ і непарні 3-ю, 5-у гармоніки. Далі, в напрямку зменшення потужності знаходиться 2 гармоніка (100 Гц). Добре помітне симетричне підвищення потужності поблизу ОЧ. Субгармоніки і 4 гармоніка на графіку рис.1 майже непомітні.

Також ми бачимо, що в ННП наявний «білий» шум, потужність якого рівномірно розподілена в досліджуваному діапазоні, який може породжуватися випадковими процесами в електричній системі.

Зростання спектральної густини потужності в околі частоти 50 Гц, на наш погляд, викликається наступними чинниками: флікер-шумом, або рожевим (pink) шумом, потужність якого пропорційна $1/f^2$, і на рис.1 ми бачимо результат модуляції синусоїди 50 Гц флікер-шумом. Згадана особливість не знаходила свого відображення в більш ранніх дослідженнях спектру шуму ННП [8]. Також певний вклад в дане явище можуть вносити системи автоматичного регулювання частоти (потужності) енергосистеми і асинхронні машини, які звичайно не є ідеальними, і в тій чи іншій мірі при роботі створюють «одноосний» ефект.

Завади в напрузі ННП доцільно представити у вигляді суми основних складових: «білого» шуму, синусоїдної складової на частоті 50 Гц, гармонік і субгармонік основної частоти, згортки флікер-шуму з синусоїдою частотою 50 Гц.

Таку модель завад може бути використано для побудови системи автоматичного регулювання компенсації ємнісного струму замикання на землю, зокрема, такої, яка спирається на визначення частоти вільних коливань в контурі нульової послідовності [9].

Висновки: 1. Амплітудні і фазові параметри напруги нульової послідовності на частоті мережі (50 Гц), як мінімум в деяких випадках, є ненадійними характеристиками стану настройки компенсації ємнісних струмів замикання на землю.

2. Експериментальне дослідження частотних характеристик завад в контурі нульової послідовності електричної мережі дозволяє запропонувати модель завад, яка передбачає, що останні складаються з: а) синусоїди частоти мережі 50 Гц; б) результату модуляції синусоїди основної частоти мережі «рожевим» (pink) флікер-шумом; в) білого шуму; г) гармонік і субгармонік частоти мережі.

3. Результати досліджень можуть бути використані, зокрема, для побудови системи автоматичного регулювання компенсації ємнісних струмів замикання на землю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сирота И.М. Режимы нейтрали электрических сетей / Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М.- К.: Наукова думка, 1985.-264с.
2. Лисенко В.А. Вплив опорів ізоляції фаз на амплітудні та фазові характеристики компенсованої мережі // Взрывозащищенное электрооборудование. – 2012. – С. 148-153.
3. Arrillaga J., Watson N.R.. Power System Harmonics, Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd. 2003. p.389.
4. Luis Garcés. Operation of Induction Machines with Electromagnetic Irregularities /Luis Garcés, Russel J. Kedcman, Timothy M. Rowan, Dave Schlegel, Brian J. Seibel, Kevin Stachowiak.-IEEE Industry Applications Society Annual Meeting New Orleans, Louisiana, October 5-9,1997
5. Rogozin G. G. Research of the Induction Motor Eccentricity Phenomenon Criteria / G. G. Rogozin, D. Y. Osipov - Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електротехніка і енергетика», випуск 8 (140). – Донецьк: 2008 – С. 118-122.
6. Interharmonics: Theory and Modeling. IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. IEEE transactions on power delivery, vol. 22, no. 4, october 2007. p. 2335-2348.
7. Марпл.-мл.С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. 584 с..
8. Лисенко В.А. Модель завад в контурі нульової послідовності розподільної мережі з незаземленою нейтраллю // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 2. – pp. 44 – 45.
9. Лисенко В.А. Ідентифікація параметрів вільних коливань в контурі нульової послідовності компенсованої мережі. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2011. – вип. 11 (186). – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – С. 259–262.

REFERENCES

1. Sirota I.M., Kislenco S.N., Mikhailov A.M. *Rezhimy neutrali elektricheskikh setey* [Electrical networks neutral modes]. Kyiv: Naukova dumka, 1985.-264p. (Rus.)
2. Lysenko V.A. Insulation resistance influence on compensated network amplitude and phase characteristics. *Vzryvozashishenoe elektrooborudovanie*, 2012. p. 148-153.
3. Arrillaga J., Watson N.R.. Power System Harmonics, Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd. 2003. p.389.
4. Luis Garcés. Operation of Induction Machines with Electromagnetic Irregularities /Luis Garcés, Russel J. Kedcman, Timothy M. Rowan, Dave Schlegel, Brian J. Seibel, Kevin Stachowiak.-IEEE Industry Applications Society Annual Meeting New Orleans, Louisiana, October 5-9,1997
5. Rogozin G. G. Research of the Induction Motor Eccentricity Phenomenon Criteria /G. G. Rogozin, D. Y. Osipov // *Naukovy pratsi Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universytetu. Seriiia «Elektrotekhnika i energetyka» vypusk 8 (140) Donetsk: 2008 – p.118-122*
6. Interharmonics: Theory and Modeling. IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. IEEE transactions on power delivery, vol. 22, no. 4, october 2007. p. 2335-2348.
7. Marple, S. Lawrence Jr. Digital spectral analysis with applications. – Prentice-Hall, New York, 1987. p.492.
8. Lysenko V.A. Model of zero sequence noise in small current grounding system. *Tekhnichna elektrodynamika* № 2, 2012. p. 44 – 45.

9. Lysenko V.A. Identification of Parameters of Free Oscillations in the Network Zero-Sequence Circuit with Arcsuppression Coil. *Naukovy pratsi Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universytetu. Seriya «Elektrotekhnika i energetyka»* vypusk 11 (186) Donetsk: 2011. – p. 259–262.

Надійшла до редколегії 12.03.2013

Рецензент: В.Ф. Сивокобиленко

В.А.ЛЫСЕНКО

Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»

Экспериментальное исследование напряжения нулевой последовательности распределительной сети в частотной области Обоснованы параметры опытной установки для исследования напряжения нулевой последовательности в частотной области. Представлены результаты экспериментальных исследований напряжения нулевой последовательности в распределительных электрических сетях. Исследовано влияние частотных составляющих на работу автоматики систем компенсации емкостного тока однофазного замыкания на землю. Предложены мероприятия по уменьшению негативного влияния частотных составляющих и модель напряжения нулевой последовательности в частотной области.

Ключевые слова: *регулирование системы компенсации емкостного тока замыканий на землю, нулевая последовательность, частотная характеристика, незаземленная нейтраль.*

V.A. LYSENKO

State Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University»

Experimental Research of Zero Sequence Voltage of the Distribution Network in Frequency Domain. In resonance earthed medium voltage network, the tuning of the Petersen coil is a critical issue for system performance. For resonance grounded network it is necessary to continuously match the coil with the network capacitance to earth. This paper is based on testing results of real network. This paper investigates zero sequence voltage interference affecting the Petersen coil automatic tuning device. We cover devices that implement the “frequency” principle of Petersen coil control. Appropriate limits for the study of zero-sequence voltage in the frequency domain are defined. The causes of noise appearing in zero-sequence voltage electric network with ungrounded neutral are analyzed. Time harmonics are produced by induction motors as a result of the harmonic content of the m.m.f. distribution. Harmonics can also occur as a result of electrical asymmetry. Consider an electrically unbalanced rotor winding, the stator winding being balanced such that the supply voltage produces a pure rotating field. Slip frequency e.m.f. is induced in the rotor, but since the rotor winding is unbalanced, both positive and negative phase sequence currents will flow, giving fields in the forward and reverse directions. Integral Cycle Control thyristors regulator, also called ‘burst-firing’ regulator is based on the switching of entire voltage half-cycles. That integral cycle control produces no harmonic frequencies. It does, however, produce inter-harmonic and subharmonic frequencies. Zero sequence voltage data are acquired in July, 2011. The analysis is carried out using the software PyLab, MATLAB. The analysis is based on Discrete Fourier transform (DFT) algorithm. The Zero sequence voltage was sampled at 44.1-kHz sampling rate and interfaced to a PC using sound card «Realtek High Definition Audio». Typically, voltage power spectra are based on a 4096-points FFT. The results of experiment in the real distributing electrical networks are presented. The acquired data are used to generate a model. Zero-sequence voltage noise consists of the main generated (or fundamental) sine signal, third and higher odd harmonics of the fundamental sine, white noise, pink flicker noise. Referred noise model can be used in the construction of Petersen coil automatic tuning device that implements the “frequency” principle.

Key words: *Petersen coil tuning, zero sequence voltage, frequency domain, compensated network.*