



УДК 621.311.1

ANALYSIS OF REQUIREMENTS FOR METHODS TO ESTIMATE THE ELECTRICAL NETWORK HARMONIC IMPEDANCE**АНАЛІЗ ВИМОГ ДО МЕТОДІВ ОЦІНКИ ОПОРУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ НА ЧАСТОТАХ ГАРМОНІК**

Nesterovych V.V. / Нестерович В.В.

с.т.с., ас.проф. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0002-0730-7932

Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Gogolya, 29, 49000

Приазовський державний технічний університет, Дніпро, Гоголя, 29, 49000

Анотація. Визначення опорів електричних мереж на частотах вищих гармонік необхідне для вирішення низки завдань, що пов'язані з забезпеченням необхідної якості електричної енергії. Метою роботи було сформулювати вимоги до методів експериментального визначення цих опорів та визначити, наскільки дані методи вимірювання їм відповідають. Для вирішення цього завдання попередньо було запропоновано класифікацію методів експериментального визначення опорів електричних мереж та проведено аналіз відповідності запропонованим вимогам кожної групи методів. На підставі проведеного аналізу було обрано групи методів, які є найбільш перспективними та сформульовані можливі напрямки подальших досліджень.

Ключові слова: вимірювання опору, якість електроенергії, визначення опору, гармонічний аналіз, електричний опір, вища гармоніка, електрична мережа, експериментальне визначення, класифікація методів

Вступ.

При проектуванні електричних мереж і систем електропостачання та управлінні їх режимами часто виникає необхідність вирішення ряду завдань, що пов'язані зі спотвореннями форм кривих струмів і напруг: оптимізація режимів, вибір коригувальних пристроїв, виявлення джерел спотворень та визначення сторони, яка винна у виникненні спотворень. При цьому, у більшості випадків, під час аналізу проводиться розкладання струмів та напруг, що змінюються за несинусоїдним законом, в ряди Фур'є і розглядаються режими електричних мереж на частотах окремих гармонійних складових. Це вимагає визначення опору електричної мережі частотах окремих гармонійних складових, тобто частотних характеристик опорів електричних мереж [1].

Визначення опорів електричних мереж на частотах гармонік можливе як розрахунковим шляхом, так і експериментально. Розрахунковий спосіб є єдиною можливим рішенням на стадії проектування, але у всіх інших випадках він має суттєві недоліки, викликані тим, що дані про параметри елементів електричної мережі та її режими досить часто недостатні для отримання достовірних результатів, особливо у випадку електричних мереж з великою кількістю елементів.

Багато з експериментальних методів дозволяють визначати опори електричної мережі в режимі її нормальної експлуатації, але мають ряд недоліків та суттєві обмеження області застосування [2]. Незважаючи на те, що експериментальні методи продовжують інтенсивно розвиватися і вдосконалюватися, залишається низка невирішених проблем, пов'язаних з їх



застосуванням. Це викликає необхідність провести класифікацію даних методів, сформулювати основні вимоги, яким вони повинні задовольняти, та на основі аналізу відповідності різних груп методів сформульованим вимогам накреслити напрямки подальших досліджень та вдосконалення методів експериментального визначення опорів електричних мереж.

У подальшому тексті даної роботи йтиметься про вимір опорів на частотах вищих гармонік струмів і напруг в діапазоні частот від 100 Гц до 2,5 кГц.

Основний текст.

Виходячи з розв'язуваних задач можна сформулювати ряд вимог, що висуваються до методів експериментального визначення опорів електричних мереж на частотах вищих гармонік.

По-перше, методи вимірювань повинні забезпечувати достатню точність за наявності фонових гармонік струмів та напруг, що виникають у нормальному експлуатаційному режимі (вимога В1 – позначення вимог будуть використані у подальшому аналізі). Оскільки в літературі відсутнє обґрунтування допустимої похибки результатів вимірювань, її величина має бути визначена в результаті додаткових досліджень.

Крім цього, бажано, щоб метод вимірювання не вимагав переведення мережі в режим, що відрізняється від нормального (вимога В2). Зміни режиму можуть бути пов'язані, наприклад, з комутацією тих чи інших навантажень, батарей конденсаторів, підключенням додаткових джерел спотворень. Такі зміни режиму можуть призвести до збільшення спотворень у мережі, що може зашкодити роботі іншого устаткування, а отримані результати вимірювань можуть не повною мірою відповідати нормальному робочому режиму.

Також є доцільним, щоб метод вимірювання не вимагав застосування дорогого спеціального обладнання, наприклад, потужних джерел спотворень (вимога В3).

У свою чергу, метод вимірювання повинен враховувати можливість зміни параметрів електричної мережі в процесі його реалізації, наприклад, за рахунок комутації елементів мережі, зміни її конфігурації, зміни потужності та режиму роботи підключених навантажень, та дозволяти оцінювати статистичні характеристики змінних у часі опорів (вимога В4). Необхідність використання стохастичного підходу для оцінки результатів вимірювань опорів електричних мереж потребує додаткового обґрунтування. Априорі можна припустити, що в міру віддалення від вузла, в якому виконуються вимірювання, зменшуватиметься вплив відповідних ділянок мережі на значення опорів і, відповідно, зміни їх конфігурації також менше впливатимуть на дані опори, але це вимагає додаткового обґрунтування та числової оцінки.

Крім того, бажано, щоб способи вимірювання дозволяли вимірювати як вхідні опори електричних мереж із боку вузлів, так і взаємні опори гілок та вузлів мережі (вимога В5). Виконання цієї вимоги дозволить полегшити оцінку впливу джерел спотворень на віддалені вузли мережі.

Оцінку відповідності відомих методів вимірювання наведеним вимогам буде дано нижче.



Методи експериментального визначення опорів електричних мереж можна розбити дві основні групи: методи активного експерименту і методи пасивного експерименту.

Методи активного експерименту пов'язані з активним впливом на режим роботи електричної мережі шляхом комутацій елементів мережі (насамперед батарей конденсаторів) та підключення до мережі додаткового джерела спотворень: нелінійного навантаження, генератора несинусоїдальних струмів (рисунок 1). (На рисунку 1 також наведено умовні позначення методів, які застосовуються у подальшому аналізі.)

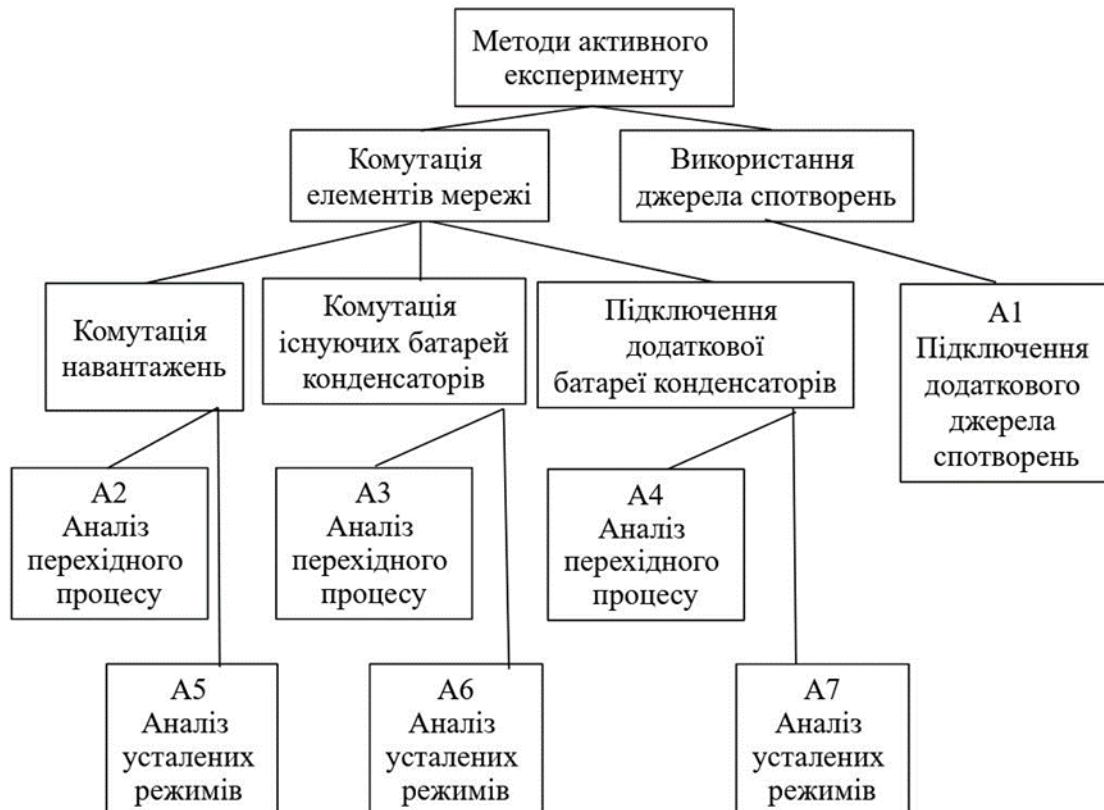


Рисунок 1 – Класифікація методів визначення опорів електричних мереж на частотах вищих гармонік за допомогою активного експерименту

Авторська розробка

Переважно ці методи дозволяють визначити значення опору для певного моменту часу шляхом аналізу даних, отриманих безпосередньо до, під час або після підключення джерела збурень або комутації елемента мережі [1].

У деяких випадках ці методи дозволяють встановити, як опір змінюється протягом якогось тимчасового проміжку (при послідовних багаторазових комутаціях або під час впливу джерела спотворень).

Недоліком методів цієї групи є те, що вони вимагають втручання в нормальний режим роботи мережі, що не завжди можливо, або може негативно впливати на роботу електричної мережі, або припускає використання спеціального потужного та дорогого обладнання [1,2].

Потужність і, відповідно, вартість обладнання, яке здатне викликати помітну реакцію електричної мережі, зростає зі зростанням номінальної напруги та



потужності короткого замикання мережі і стає особливо великою для мереж з номінальною напругою 6 кВ та вище [1-4].

У межах цієї групи методів можна виділити такі групи: 1) методи, що засновані на комутації вже існуючих в електричній мережі навантажень та батарей конденсаторів (А2, А3, А5, А6); 2) методи, що передбачають підключення додаткових батарей конденсаторів (А4 та А7) і джерел спотворень (А1) [1].

Методи, що використовують комутації навантажень або батарей конденсаторів, у свою чергу, можна розбити на підгрупи методів, заснованих на зіставленні параметрів режимів до і після комутації (А5, А6 та А7) [5], та методи, що передбачають дослідження перехідного процесу (А1, А2 та А3) [3].

Методи пасивного експерименту припускають використання природних флуктуацій режиму електричної мережі, що виникають при її нормальній роботі, для оцінки опорів на частотах вищих гармонік. Найчастіше для визначення опорів використовуються вимірювання гармонік струмів і напруг у точці розділу балансової належності споживача й енергопостачальної організації [6-11].

Методи пасивного експерименту засновані на аналізі взаємозв'язку змін величин вищих гармонік струму джерела спотворень та напруги. Ускладнюючим чинником є те, що у мережі постійно є фонові рівні гармонік напруги, зумовлені іншими джерелами [2]. Методи пасивного експерименту відрізняються тим, який математичний апарат використовується для зменшення впливу фонових рівнів вищих гармонік напруги на похибку (рисунок 2). (На рисунку 2 також наведено умовні позначення методів, які застосовуються у подальшому аналізі.)

Перша група методів не передбачає використання спеціальних заходів для зменшення впливу цих рівнів [6,8]. Наявність змінних фонових гармонік напруги призводить до збільшення похибки вимірів [2]. У цьому випадку для забезпечення необхідної точності потрібно використовувати джерело спотворень великої потужності, що суттєво обмежує сферу застосування цих методів.



Рисунок 2 – Класифікація методів визначення опорів електричних мереж на частотах вищих гармонік за допомогою пасивного експерименту

Авторська розробка



Методи другої групи побудовано на припущенні, що взаємна кореляція між фоновими рівнями гармонік напруги і гармоніками струму джерела спотворень відсутня [9]. Використання апарату кореляційного аналізу дозволяє виділити корисний сигнал на тлі значного за рівнем "шуму" та підвищити точність результату. Однак, у реальних умовах може виявлятися кореляційний взаємозв'язок між фоновими гармоніками напруги та гармоніками струму джерела спотворень, який обумовлений тим, що в струмі джерела може бути складова, викликана фоновими гармоніками напруги [2].

Інша група методів заснована на припущенні про незалежність джерел фонових гармонік та джерела гармонік, що використовується для тестування мережі [10,12]. У цьому випадку в струмі джерела збурень необхідно попередньо виділити складову, яка обумовлена зовнішніми джерелами спотворень, та складову, яка викликана роботою даного джерела. Для вирішення цього завдання пропонується використовувати апарат аналізу незалежних компонентів (Independent component analysis) [12]. Істотним обмеженням є те, що при цьому необхідно використовувати джерело спотворень значної потужності.

Для роботи з джерелами невеликої потужності були розроблені методи, що засновані на використанні кореляцію між результатами вимірювань для різних інтервалів часу [11]. Обмеженням цих методів є те, що вони побудовані на припущенні про незмінність опорів мережі під час вимірів [2].

Відповідно до сформульованих вище вимог було виконано аналіз основних методів експериментального визначення опорів електричних мереж на частотах вищих гармонік струму. Зведена інформація про результати аналізу наведена далі в таблиці 1.

Таблиця 1 - Відповідність методів експериментального визначення опорів електричних мереж на частотах вищих гармонік основним вимогам

Метод визначення	Вимоги до методів визначення				
	B1	B2	B3	B4	B5
A1	-	-	-	++	+
A2	-	++	++	-	-
A3	-	++	++	-	-
A4	-	-	-	-	-ε
A5	++	++	++	-	-
A6	++	++	++	-	-
A7	++	-	-	-	-
П1	-	++	++	+	+
П2	+	++	++	+	+
П3	++	++	++	+	+
П4	++	++	++	-	+

Примітки. 1. Позначення методів та вимог наведено вище у тексті.
2. У таблиці застосовані позначення: «++» - відповідає, «+» - відповідає частково, «-» - не відповідає.

Авторська розробка



Наведені результати аналізу показують, що найбільшою мірою основним вимогам відповідають методи пасивного експерименту. Всі розглянуті методи не передбачають вимірювання взаємних опорів гілок та вузлів, але деякі з них можуть бути адаптовані для цієї мети.

Висновки.

У роботі були сформульовані основні вимоги до методів експериментального визначення опорів електричних мереж на частотах вищих гармонік струмів і напруг, наведено класифікацію цих методів. Аналіз відповідності даних методів основним вимогам показав, що найбільш перспективними є методи пасивного експерименту, хоча ї вони потребують доопрацювання. Головними проблемами застосування цих методів є неврахування (чи не зовсім коректне врахування) фонових гармонік напруг та зміни опорів електричної мережі під час виконання вимірів. Додаткового дослідження потребує визначення величин та можливих джерел похибок експериментальних методів, підвищення достовірності результатів вимірювань за наявності великих значень фонових гармонік та зміни опору мережі під час вимірювань. Потрібно також доопрацювання відомих методів вимірювань з метою їх використання для визначення взаємних опорів гілок та вузлів електричних мереж.

Література:

1. Robert A. Guide for assessing the network harmonic impedance. 14th international conference and exhibition on electricity distribution (CIRED 1997 - distributing power for the millennium), Birmingham, UK. 1997. Vol.2. pp. 3/1-310. DOI:10.1049/cp:19970473.
2. A noninvasive method to estimate the variable utility harmonic impedance / C. Wang et al. IEEE transactions on power delivery. 2023. Vol. 38. No. 3, P. 1747-1754. DOI: 10.1109/tpwrd.2022.3223662.
3. Nagpal M., Xu W., Sawada J. Harmonic impedance measurement using three-phase transients. IEEE transactions on power delivery. 1998. Vol. 13, no. 1. P. 272–277. DOI:10.1109/61.660889.
4. Bettini P., De Lorenzi A. 400-kV-network harmonic impedance evaluation from harmonic distortion measurements at the RFX site. European transactions on electrical power. 2007. Vol. 8, no. 1. P. 31–38. DOI:10.1002/etep.4450080106.
5. Measurement of network harmonic impedances: practical implementation issues and their solutions / Wilsun Xu et al. IEEE transactions on power delivery. 2002. Vol. 17, no. 1. P. 210–216. DOI:10.1109/61.974209.
6. Harmonic impedance measurement using voltage and current increments from disturbing loads / Yao Xiao et al. 2000 international conference on harmonics and quality of power, Orlando, FL, USA. P. 220-225. DOI:10.1109/ichqp.2000.897028.
7. Mazin H. E., Xu W., Huang B. Determining the harmonic impacts of multiple harmonic-producing loads. IEEE transactions on power delivery. 2011. Vol. 26, no. 2. P. 1187–1195. DOI:10.1109/tpwrd.2010.2093544.
8. Utility harmonic impedance measurement based on data selection / J. Hui et al. IEEE transactions on power delivery. 2012. Vol. 27, no. 4. P. 2193–2202.



DOI:10.1109/tpwr.2012.2207969.

9. Assessing utility harmonic impedance based on the covariance characteristic of random vectors / J. Hui et al. IEEE transactions on power delivery. 2010. Vol. 25, no. 3. P. 1778–1786. DOI:10.1109/tpwr.2010.2046340.

10. Xi Zhao, Honggeng Yang. A new method to calculate the utility harmonic impedance based on FastICA. IEEE transactions on power delivery. 2016. Vol. 31, no. 1. P. 381–388. DOI:10.1109/tpwr.2015.2491644.

11. Estimate utility harmonic impedance via the correlation of harmonic measurements in different time intervals / Q. Shu et al. IEEE transactions on power delivery. 2020. Vol. 35, no. 4. P. 2060–2067. DOI:10.1109/tpwr.2019.2960415.

12. Karimzadeh F., Esmaili S., Hosseinian S. H. A novel method for noninvasive estimation of utility harmonic impedance based on complex independent component analysis. IEEE transactions on power delivery. 2015. Vol. 30, no. 4. P. 1843–1852. DOI:10.1109/tpwr.2015.2398820.

Abstract. *Electrical network harmonic impedance estimation is necessary for solving many tasks related to ensuring the necessary quality of electrical energy. The purpose of the work was to formulate the requirements for the harmonic impedance experimental estimation methods and to determine the extent to which these measurement methods correspond to them. To solve this problem, a classification of methods of experimental estimation of electrical network impedances was previously proposed. A description of each group of measurement methods was given. An analysis of compliance with the proposed requirements of each group of measurement methods was conducted. Based on the conducted analysis, the most promising groups of methods were selected. Possible directions for further research were also formulated.*

Keywords: *impedance measurement, harmonic impedance, power quality, impedance estimation, background harmonic, harmonic analysis, impedance, utility harmonic impedance, electric network, experimental estimation, methods classification.*

Статтю відправлено: 20.05.2024 г.

© Нестерович В.В.