

УДК 621.311.1

PECULIARITIES OF DISTORTION SOURCES MATHEMATICAL MODELING IN THE ANALYSIS OF ELECTRICAL NETWORKS NON-SINUSOIDAL MODES

ОСОБЛИВОСТІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЖЕРЕЛ СПОТВОРЕНЬ ПРИ АНАЛІЗІ НЕСИНУСОЇДНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Nesterovych V.V. / Нестерович В.В.

с.т.с., as. prof. / 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. В роботі розглядаються основні вимоги до математичних моделей джерел спотворень, способи оцінки їх адекватності, обмеження в галузі застосування, намічаються напрями подальших досліджень.

Ключові слова: електрична мережа, математична модель, джерело спотворень, частотна область, джерело струму, параметри електричної мережі, параметри режиму

Abstract. The work considers the main requirements for mathematical models of sources of distortions, methods of assessing their adequacy, limitations in the field of application, and directions for further research.

Keywords: electrical network, mathematical model, distortion source, frequency domain, current source, electrical network parameters, mode parameters

Вступ.

Прогнозування величин спотворень форм кривих напруг і струмів передбачає попередню побудову відповідних математичних моделей, що описують досліджуваний об'єкт. Вимоги до цих моделей та методів розрахунку (моделювання) впливають, із цілей прогнозування. Це насамперед вимоги до точності моделей елементів схеми, що визначають які з властивостей об'єкта мають бути враховані в моделі, а якими можна знехтувати. Крім цього, у деяких випадках велике значення має обсяг обчислювальних операцій, який позначається на швидкодії систем управління в режимі реального часу.

Метою цієї роботи є аналіз вимог, що пред'являються до моделей джерел спотворень, та оцінка ступеня відповідності різних видів моделей даним вимогам.

Основний текст.

У більшості випадків для прогнозування величин спотворень кривих

напруг та струмів використовують один з двох методів розрахунку (моделювання): у часовій або у частотній області.

Моделювання у часовій області найчастіше застосовується при виконанні наукових досліджень або під час аналізу режимів відносно невеликих електричних мереж. Аналіз несинусоїдних режимів у мережах з великою кількістю вузлів та джерел спотворень потребує застосування методів, що оптимізовані відносно витрат обчислювальних ресурсів при задовільній точності розрахунків [1]. Це в першу чергу методи моделювання та розрахунків у частотній області, які потребують побудови в частотній області адекватних математичних моделей елементів електричної мережі (трансформаторів, ліній електропередачі та ін.), а також джерел спотворень [2].

Існують чотири основні способи оцінки точності моделей елементів електричних мереж у частотній області: порівняння з результатами лабораторних досліджень, порівняння з результатами моделювання у часовій області, порівняння з результатами досліджень у промислових умовах та визначення очікуваної похибки на основі аналітичної оцінки неврахованих факторів.

Лабораторні дослідження дають можливість оцінити поведінку об'єкта в контрольованих умовах і є найбільш продуктивним і достовірним способом перевірки моделі в частотній області [1]. До недоліків цього способу можна віднести необхідність наявності відповідного лабораторного обладнання, вартість якого (особливо у разі дослідження джерел великої потужності) може бути значною і відносно багато часу, що необхідний для проведення повного циклу досліджень.

Перевірка моделей, розроблених у частотній області, шляхом моделювання у часовій області вимагає набагато менших витрат ресурсів (включаючи час), але при цьому виникає питання адекватності та похибок еталонної моделі в часовій області [3].

Дослідження у промислових умовах найчастіше можуть бути проведені лише в окремих режимах та вимагають використання дорогого вимірювального

обладнання. У той же час такі дослідження іноді бувають необхідними для остаточної перевірки використовуваних моделей.

Аналітичні методи бувають дуже корисними для визначення області застосування моделі та оцінки її точності, проте часто залишається відкритим питання про невраховані фактори та повноту аналітичної моделі.

Особливою проблемою є те, що в реальних умовах джерело спотворень підключається до мережі, в якій форма кривої напруги вже спотворена, що має бути враховано у використовуваній моделі джерела. Другими словами спостерігається взаємний вплив джерел спотворень. На параметри моделі також сильно впливає рівень завантаження обладнання. У загальному випадку параметри моделі (а іноді і її структура) можуть залежати від величини спотворень напруги живлення та режиму роботи обладнання (наприклад, завантаження).

Найчастіше використовуються три різновиди моделей джерел спотворень у частотній області [3,4]. Перша з них (рис. 1а) - це представлення джерела спотворень на частоті кожної з гармонік як джерело струму \dot{I}_h , де h - номер гармоніки, з фіксованими амплітудою I_h і фазовим кутом Φ_h . При цьому передбачається, що параметри I_h та Φ_h залежать від режиму джерела спотворень, але не залежать від спотворень, які створені іншими джерелами [3,5]. Недоліком цієї моделі є те, що вона не враховує взаємного впливу різних джерел спотворень.

Взаємний вплив джерел можна спробувати врахувати, застосувавши уточнену модель (рис. 1б), яка поряд з джерелом струму має паралельно включену провідність Y_h . Наявність провідності дозволяє враховувати взаємовплив різних джерел на частоті кожної з гармонік окремо, але не дозволяє врахувати взаємний вплив різних гармонік струмів і напруг [3,6].

Третя модель (рис. 1в) додатково включає ще одне паралельно включене джерело струму вищої гармоніки, струм якого \dot{I}'_h залежить від напруги інших гармонік [3,7,8]. За рахунок цього можна врахувати взаємний вплив гармонік

різних порядків. Використання цієї моделі передбачає лінеаризацію характеристик нелінійного навантаження в околицях робочої точки.

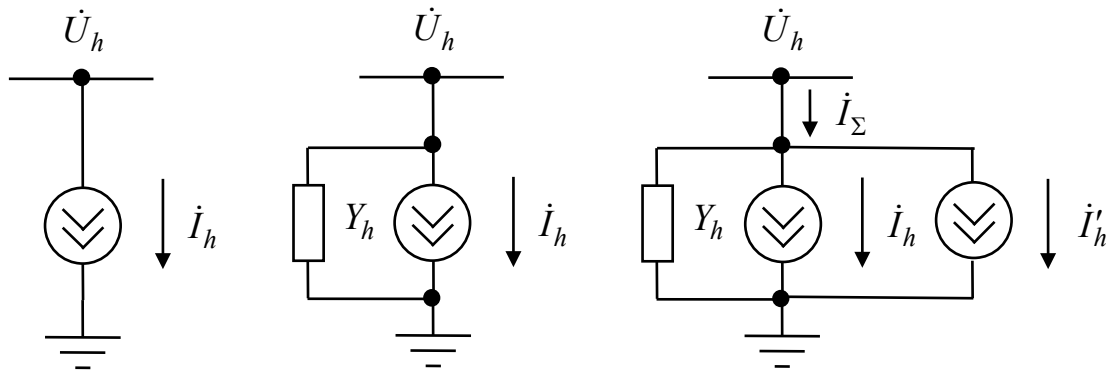


Рисунок 1 - Моделі джерел спотворень у частотній області:

а - джерело струму; **б** - джерело струму з паралельно підключеною провідністю; **в** - модель з додатковим джерелом струму

Джерела: [3,4,7,8].

До складу третьої моделі в неявному вигляді входить матриця зв'язку частот нелінійного навантаження, яка пов'язує струм кожної з гармонік з напругами всіх інших гармонік.

У цьому випадку струми вищих гармонік, що генеруються в мережу джерелом спотворень, можуть бути знайдені з виразу [3,7,8]

$$[I_{\Sigma}] = [Y] \cdot [U] + [I] + [I'], \quad (1)$$

де $[I_{\Sigma}]$ - матриця-стовпець гармонік струму, що протікає через джерело спотворень; $[Y]$ - діагональна матриця провідностей джерела спотворень на частотах вищих гармонік; $[U]$ - матриця-стовпець напруг гармонік \dot{U}_h в мережі живлення; $[I]$ - матриця-стовпець струмів гармонік джерела струмів, елементами якої є струми \dot{I}_h ; $[I']$ - матриця-стовпець струмів гармонік джерела струмів, елементами якої є струми \dot{I}'_h .

У свою чергу

$$[I'] = [Y_{ЗВ}] \cdot [U], \quad (2)$$

де $[Y_{ЗВ}]$ - матриця зв'язку частот нелінійного навантаження.

Значення елементів матриці $[Y_{зв}]$ будуть залежати від робочої точки джерела спотворень. Іншими словами при зміні режиму роботи джерела спотворень (наприклад, зміні струму сонячної батареї), напруги мережі та величин вищих гармонік напруги мережі значення елементів матриці будуть змінюватися. Ці значення можуть бути знайдені за умови лінеаризації характеристик джерела спотворень.

Перелічені моделі відрізняються тим, які фактори вони враховують (таблиця 1).

Таблиця 1 - Фактори, які зазвичай враховуються в частотних моделях джерел спотворень

Модель джерела	Параметри моделі	Фактор, що враховується
Джерело струму	струм гармоніки з номером h	режим джерела
Джерело струму з паралельно підключеною провідністю	струм гармоніки з номером h	режим джерела
	провідність	напруга мережі на частоті гармоніки з номером h
Модель с додатковим джерелом струму	струм гармоніки з номером h	режим джерела
	провідність	напруга мережі на частоті гармоніки з номером h
	додатковий струм	напруги мережі на частотах гармонік з номерами $k \neq h$

Авторська розробка

У кожній з розглянутих моделей можливі варіанти, що відрізняються врахуванням або неврахуванням фазових кутів струмів та провідностей.

Зазвичай неврахування фазових кутів призводить до суттєвого зниження точності розрахунку чи моделювання.

У більшості публікацій з цього питання відсутня повна інформація про межі допустимих областей застосування тих чи інших моделей та очікуваних похибках моделей. Зокрема низкою дослідників іноді наводяться діапазони зміни параметрів моделей при відповідній зміні режимів роботи джерела, що досліджується, і зміні ступеня спотворення форми кривої напруги. Проте

діапазони зміни рівнів вищих гармонік напруги, що розглядаються, зазвичай задаються довільно, без аналізу реально можливих величин, відсутній аналіз взаємного впливу декількох гармонік напруги одночасно, тобто, по суті, робиться припущення про справедливість принципу накладання, що не є обґрунтованим. Відсутній також аналіз впливу несиметрії мережі на допустимість застосування розглянутих моделей.

Висновки.

Проаналізовано схеми заміщення джерел спотворень, які можна використовувати при виконанні розрахунків та моделюванні у частотній області. Показано, що необхідне уточнення областей їх застосування, оцінка можливої похибки з урахуванням одночасного впливу кількох гармонік напруги на параметри моделі.

Література:

1. Impact of Reference Conditions on the Frequency Coupling Matrix of a Plug-in Electric Vehicle Charger / J. E. Caicedo та ін. // 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (Ljubljana, Slovenia, 13-16 May 2018). IEEE, 2018. P. 1-6.
2. Harmonic Analysis in Frequency and Time Domain / A. Medina та ін. // IEEE Transactions on Power Delivery. 2013. Vol. 28, No. 3. P. 1813-1821.
3. Tavukcu E., Müller S., Meyer J. Assessment of the Performance of Frequency Domain Models Based on Different Reference Points for Linearization // Renewable Energy and Power Quality Journal. 2019. Vol. 17. P. 435-440.
4. Caicedo J. E., Romero A. A., Zini H. C. Assessment of the harmonic distortion in residential distribution networks: literature review // Ingeniería e Investigación. 2017. Vol. 37, No. 3. P. 72-84.
5. Aljanad A., Mohamed F. Harmonic Impact of Plug-In Hybrid Electric Vehicle on Electric Distribution System // Modelling and Simulation in Engineering/ 2016. Vol. 2016. P. 1-7.
6. Nassif A. B., Yong J., Xu W. Measurement-based approach for constructing

harmonic models of electronic home appliances // IET Generation, Transmission and Distribution. 2010. Vol. 4, No. 3. P. 363-375.

7. Yong, J., Chen L., Chen S. Modelling of home appliances for power distribution system harmonic analysis // IEEE Transactions on Power Delivery. 2010. Vol. 25, No.4. P/ 3147 - 3155.

8. On the Use of Fourier Descriptors for the Assessment of Frequency Coupling Matrices of Power Electronic Devices / Langella R. та ін. // 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (Ljubljana, Slovenia, 13-16 May 2018). IEEE, 2018. P. 1-6.

9. Harmonic Modeling of Electric Vehicle Chargers in Frequency Domain / Müller S. та ін. // Renewable Energy and Power Quality Journal. 2015. Vol. 13. P. 396-401

Статтю відправлено: 20.09.2024 г.

© Нестерович В.В.