

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КОМПЕНСАЦІЇ ВИЩИХ ГАРМОНІК В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджено математичне моделювання процесів компенсації вищих гармонік у трифазних системах електропостачання за допомогою активних фільтрів гармонік. Побудовано математичну модель керування на основі p - q теорії та перетворення Кларка, отримано залежності для формування компенсуючих струмів. Показано, що застосування запропонованого підходу забезпечує ефективне зниження гармонічних спотворень і покращення якості електроенергії.

Ключові слова: активний фільтр гармонік, p - q теорія, компенсуючий струм, нелінійне навантаження, якість електроенергії, THD

Abstract

The paper investigates mathematical modeling of higher harmonic compensation processes in three-phase power supply systems using active harmonic filters. A mathematical control model based on p - q theory and Clark transform is constructed, and dependencies for the formation of compensating currents are obtained. It is shown that the application of the proposed approach provides an effective reduction of harmonic distortions and improvement of power quality.

Keywords: active harmonic filter, p - q theory, compensating current, non-linear load, power quality, THD.

Вступ

Сучасні системи електропостачання дедалі ширше використовують силові напівпровідникові перетворювачі, частотно-регульовані приводи, випрямлячі та інше нелінійне обладнання. Експлуатація таких пристроїв супроводжується появою вищих гармонік струму і напруги, які погіршують якість електроенергії, спричиняють додаткові втрати потужності, перегрів трансформаторів і кабельних ліній, а також знижують надійність роботи електротехнічного обладнання.

Традиційним засобом боротьби з гармонічними спотвореннями є пасивні LC-фільтри. Проте їх ефективність обмежується фіксованими параметрами налаштування, можливістю виникнення резонансних режимів та недостатньою адаптивністю до змін характеру навантаження. У зв'язку з цим значного поширення набули активні фільтри гармонік, здатні в режимі реального часу компенсувати небажані гармонічні складові струму [1-2].

Ефективність роботи активних фільтрів значною мірою визначається математичними алгоритмами обробки сигналів та формування компенсуючих струмів. Одним із найбільш поширених підходів є теорія миттєвої активної та реактивної потужності (p - q теорія), яка забезпечує оперативне виділення гармонічних складових і формування керуючих сигналів для силового інвертора.

Результати дослідження

Найбільш поширеним підходом для побудови систем керування паралельними АФГ є теорія миттєвої активної та реактивної потужності (p - q) теорія Гірофумі Акагі. Математичний опис процесів починається з перетворення координат трифазної системи струмів навантаження $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ та напруг $v_a(t)$, $v_b(t)$, $v_c(t)$ у двофазну нерухому систему α - β за допомогою ортогонального перетворення Кларка:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}.$$

Аналогічно трансформуються миттєві значення фазних напруг. Згідно з p - q теорією, миттєва активна (p) та миттєва реактивна (q) потужності трифазної системи розраховуються як:

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix}.$$

У системах із нелінійним навантаженням обчислені потужності p та q містять постійні складові (\vec{p} , \vec{q}), які відповідають першій (основній) гармоніці, та змінні складові (\vec{p}' , \vec{q}'), що зумовлені вищими гармонічними складовими:

$$p = \vec{p} + \vec{p}' \quad q = \vec{q} + \vec{q}'.$$

Для компенсації вищих гармонік і викривлень струму АФГ повинен згенерувати струми, які сформують лише змінні складові потужностей. Математична модель виділення сигналів завдання для компенсуючих струмів у координатах α - β має вигляд:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha c}^* \\ i_{\beta c}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{p}' \\ \vec{q}' \end{bmatrix}$$

Виконавши зворотнє перетворення Кларк, отримуємо трифазні еталонні сигнали струмів активного фільтра $i_{ac}^*(t)$, $i_{cb}^*(t)$, $i_{cc}^*(t)$. Інвертор напруги, який виступає виконавчим органом АФГ, відпрацьовує ці сигнали, мінімізуючи спотворення в мережі.

Застосування такої моделі дозволяє знизити сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги до значень:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n v_k^2}}{v_1} * 100\% < 5\%.$$

Це повністю задовольняє жорсткі вимоги міжнародного стандарту IEEE519 та чинного в Україні нормативу ДСТУ EN 50160:2023 [3].

Висновок

У роботі розглянуто проблему погіршення якості електроенергії, спричинену наявністю вищих гармонік у системах електропостачання з нелінійними навантаженнями. Показано, що гармонічні спотворення призводять до додаткових втрат енергії, перегріву електрообладнання та зниження надійності функціонування електричних мереж.

Побудовано математичну модель керування активним фільтром гармонік на основі теорії миттєвої активної та реактивної потужності та перетворення Кларка. Запропонований підхід дає змогу виконувати виділення гармонічних складових струму навантаження та формувати компенсуючі сигнали для їх ефективного пригнічення в режимі реального часу.

Проведений аналіз показав, що використання активних фільтрів гармонік забезпечує суттєве зменшення рівня гармонічних спотворень напруги та струму, що сприяє підвищенню якості електроенергії й забезпеченню відповідності сучасним нормативним вимогам. Отримані результати підтверджують ефективність застосування математичного моделювання при розробці систем керування активними фільтрами та можуть бути використані для вдосконалення засобів компенсації вищих гармонік у промислових системах електропостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Жежеленко І. В., Саєнко Ю. Л. Показники якості електроенергії та їх контроль на промислових підприємствах. Маріуполь: ПДТУ, 2012. 188 с.
2. Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. John Wiley & Sons, 2017. 432 p.
3. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності.

Яровенко Ганна Віталіївна, студентка першого курсу, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, yarovenkoanna0912@gmail.com

Сачанюк-Кавецька Наталія Василівна, к. т. н., доцент, Вінницький національний технічний університет, кафедра вищої математики, skn1901@gmail.com

Науковий керівник: Сачанюк-Кавецька Наталія Василівна - к. т. н., доцент, Вінницький національний технічний університет, кафедра вищої математики, skn1901@gmail.com

Yarovenko Hanna V., first-year student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia,

Sachaniuk-Kavets`ka Natalia V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Higher Mathematics, Vinnytsia National Technical University, skn1901@gmail.com

Supervisor: Sachaniuk-Kavets`ka Natalia V. - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Higher Mathematics, Vinnytsia National Technical University, skn1901@gmail.com