

О. В. ОМЕЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, доц. ДВНЗ «Криворізький національний університет»
В. С. КОЗЛОВ, аспірант ДВНЗ «Криворізький національний університет»

СИЛОВИЙ АКТИВНИЙ ФІЛЬТР ІЗ СИСТЕМОЮ ЕКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

Постановка проблеми. Сучасні силові активні фільтри (САФ) є ефективним рішенням для вирішення низки задач, пов'язаних із показниками якості електричної енергії (ПЯЕ): компенсацією реактивної потужності, симетруванням фазних струмів (напруг), видаленням вищих гармонік тощо [1, 2, 3, 4]. З іншої сторони, активні фільтри можна застосовувати для компенсації втрат потужності в мережі живлення. Таким чином, САФ являють собою невід'ємну технічну складову сучасної концепції енергозбереження.

Незважаючи на переваги САФ по відношенню до класичних технічних заходів корекції ПЯЕ застосування активних компенсаторів обмежується відносно високою вартістю останніх [2]. Інший недолік пов'язано із коректністю роботи САФ в умовах напруги живлення із значно погіршеними ПЯЕ (несиметрія напруги, несинусоїдність тощо)[5] та обмеженістю стратегій компенсації (робота лише в режимі видалення вибіркового вищих гармонік, балансування навантаження тощо).

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Вирішення проблеми вартості САФ полягає у заміні компонентів пристрою на більш дешеві за рахунок оптимізації силової частини. Щодо оптимізації силової частини САФ для зменшення ціни установки розроблено низку гібридних топологій САФ[2].

Очевидно, що розробка нових способів керування САФ для вирішення вищезазначених проблем є більш привабливою, оскільки не вимагає фізичної перебудови структури пристрою. Дослідниками ведеться робота у напрямку розробки нових теорій декомпозиції складових потужності [6], застосування штучного інтелекту (нейромереж, нечіткої логіки тощо)[7], синтезу складних регуляторів для покращення роботи САФ (фільтр Калмана, інші складні фільтри)[8], синтезу систем, що використовують методи екстремального регулювання (ЕР)[4].

Останній напрямок дослідження є достатньо перспективним виходячи із суті застосування методів ЕР: оптимальне налаштування параметрів електротехнічного комплексу для досягнення найкращого результату корекції ПЯЕ, компенсації втрат потужності в електричній мережі тощо. Національними дослідниками розроблено декілька способів оптимального керування САФ, до недоліків яких можна віднести необхідність додаткової інформації про мережу живлення (опір провідника)[4] тощо.

Формулювання мети. Метою роботи є розробка математичного апарату САФ із застосування ЕР та подальше підтвердження працездатності останнього на основі фізичного моделювання. При цьому необхідно забезпечити мінімум вхідних величин для цифрової системи керування (ЦСК).

Матеріали досліджень. Інтелектуальну частину САФ можна розділити на дві основні складові: до першої складової належать алгоритми виміру, аналізу та обчислення сигналу корекції, який необхідно генерувати до мережі; до другої складової належать алгоритми керування силовою частиною пристрою, яка є відповідальною за формування силовою частиною раніше обробленого сигналу. В роботі основну увагу надано першій названій вище складовій.

Основною складовою інтелектуальної частини САФ є математичний апарат визначення сигналу корекції, який пристрій повинен генерувати до мережі. Серед існуючих способів визначення сигналу корекції більш доцільним є використання способів, що оперують із реальними фізичними величинами, наприклад СРС («Теорія фізичних складових струму») метод [6], на відміну від методів, що оперують із «фіктивними» величинами (IRP P-q theory [5]). Вищенаведений факт обґрунтовано можливістю подальшого використання САФ для технічного контролю електричних параметрів мережі живлення.

Спираючись на вищесказане, за базовий метод керування САФ обрано IcosFi метод [9], який засновано на понятті трикутника потужностей. У разі застосування САФ, що впливає на струм мережі, метод можна описати наступним виразом:

$$\begin{cases} i_{cA} = [I_A^{(1)} \cdot \cos(\varphi_{UA}^{(1)} - \varphi_{IA}^{(1)})] \cdot \sin(\varphi_{UA}^{(1)}) \\ i_{cB} = [I_B^{(1)} \cdot \cos(\varphi_{UB}^{(1)} - \varphi_{IB}^{(1)})] \cdot \sin(\varphi_{UB}^{(1)}) , \\ i_{cC} = [I_C^{(1)} \cdot \cos(\varphi_{UC}^{(1)} - \varphi_{IC}^{(1)})] \cdot \sin(\varphi_{UC}^{(1)}) \end{cases} \quad (1)$$

де i_{cA} , i_{cB} , i_{cC} - миттєві значення струму корекції; $I_A^{(1)}$, $I_B^{(1)}$, $I_C^{(1)}$ - вектори першої гармоніки фаз мережі; $\varphi_{UA}^{(1)}$, $\varphi_{IA}^{(1)}$, $\varphi_{UB}^{(1)}$, $\varphi_{IB}^{(1)}$, $\varphi_{UC}^{(1)}$, $\varphi_{IC}^{(1)}$, - фази векторів напруг та струмів першої гармоніки.

У роботі запропоновано замінити вектори струму та напруги окремих фаз на вектор струму та напруги першої гармоніки прямої послідовності для можливості компенсації струмів несиметрії (балансирування навантаження). Тоді формула ((1) прийме вигляд:

© О.В. Омельченко, В.С. Козлов, 2015

$$\begin{cases} i_{cA} = [I_{Net}^{(1)} \cdot \cos(\varphi_{UNet}^{(1)} - \varphi_{INet}^{(1)})] \cdot \sin(\varphi_{UNet}^{(1)}) \\ i_{cB} = [I_{Net}^{(1)} \cdot \cos(\varphi_{UNet}^{(1)} - \varphi_{INet}^{(1)})] \cdot \sin(\varphi_{UNet}^{(1)} + \frac{2\pi}{3}), \\ i_{cC} = [I_{Net}^{(1)} \cdot \cos(\varphi_{UNet}^{(1)} - \varphi_{INet}^{(1)})] \cdot \sin(\varphi_{UNet}^{(1)} + \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (2)$$

де $I_{Net}^{(1)}$ - амплітуда вектора першої гармоніки прямої послідовності струму мережі; $\varphi_{UNet}^{(1)}$, $\varphi_{INet}^{(1)}$ - фази векторів напруги та струму першої гармоніки прямої послідовності.

Далі позначимо складову формули (2):

$$I_{Net}^{(1)} \cdot \cos(\varphi_{UNet}^{(1)} - \varphi_{INet}^{(1)}) = \Delta Id, \quad (3)$$

де ΔId - амплітудне значення активного струму навантаження.

Математичний вираз (3) можна застосовувати для видалення всіх складових повної потужності, окрім активної складової. Зазначений метод має наступне обмеження: за наявності несиметрії напруги, винуватцем якої є енергогенеруюча кампанія, не враховується активна потужність вищих гармонік струму та напруги:

$$\begin{cases} P_{hA} = \sum_{n=2}^{\infty} U_A^{(n)} \cdot I_A^{(n)} \cdot \cos(\varphi_{UA}^{(n)} - \varphi_{IA}^{(n)}) \\ P_{hB} = \sum_{n=2}^{\infty} U_B^{(n)} \cdot I_B^{(n)} \cdot \cos(\varphi_{UB}^{(n)} - \varphi_{IB}^{(n)}), \\ P_{hC} = \sum_{n=2}^{\infty} U_C^{(n)} \cdot I_C^{(n)} \cdot \cos(\varphi_{UC}^{(n)} - \varphi_{IC}^{(n)}) \end{cases} \quad (4)$$

де P_{hA} , P_{hB} , P_{hC} - потужність вищих гармонік фаз А, В, С; n - порядковий номер гармоніки; $U_A^{(n)}$, $U_B^{(n)}$, $U_C^{(n)}$, $I_A^{(n)}$, $I_B^{(n)}$, $I_C^{(n)}$ - діючі значення гармонік напруг та струмів фаз А, В, С; $\varphi_{UA}^{(n)}$, $\varphi_{UB}^{(n)}$, $\varphi_{UC}^{(n)}$, $\varphi_{IA}^{(n)}$, $\varphi_{IB}^{(n)}$, $\varphi_{IC}^{(n)}$ - кути зсуву фаз сигналів напруг та струмів фаз А, В, С.

Цей недолік є суттєвим при доволі великому значенні несиметрії напруги, винуватцем якої є енергогенеруюча кампанія. Таке явище на практиці зустрічається досить нечасто (як свідчить ГОСТ 13109-97), та **в подальшому виключається** новою, запропонованою в роботі, системою керування.

Перевагою ІcosFі методу є відсутність необхідності у визначенні рівня напруги живлення. Зазначена перевага дозволяє використовувати більш дешеві датчики напруги.

Передумовами для синтезу ЦСК з ЕР стали наведені нижче факти:

1. У ході практичних експериментів було виявлено, при збільшенні напруги на ємності в ланці постійного струму інвертора вище рівня $2,34 \cdot U_{\text{фазу}}$ коефіцієнт гармонік покращується, але при досягненні деякої точки (екстремуму), процес корекції сигналу мережі знову погіршується. Тобто існує деяка точка екстремуму або (на практиці) «зона бажаної роботи» (термін автора).
2. При зменшенні напруги на ємності струм (напруга) мережі наближується до струму навантаження. При збільшенні напруги на ємності у формі струму мережі збільшується рівень високочастотних компонент.
3. Рівнем напруги на ємності можна керувати без додаткових схемотехнічних заходів, використовуючи лише основний алгоритм визначення струму корекції (спосіб описано нижче). При цьому, на практиці напругу на ємності можна регулювати в досить широких межах.
4. Для багатьох відомих алгоритмів основним значенням для розрахунку є рівень активної потужності мережі або еквівалентні енергетичні показники (активний струм, еквівалентна активна провідність), впливом на які і регулюють рівень напруги на ємності.

Таким чином, *основна ідея реалізації ЕР* полягає у наступному: існує деякий оптимальний рівень напруги на ємності, який можна регулювати зміною величини розрахункової активної потужності мережі в ЦСК САФ. Робота САФ у зазначеному режимі є оптимальною за обраною стратегією (компенсація вищих гармонік, балансування навантаження тощо).

Структурна схема САФ з ЕР представлена на рис. 1.

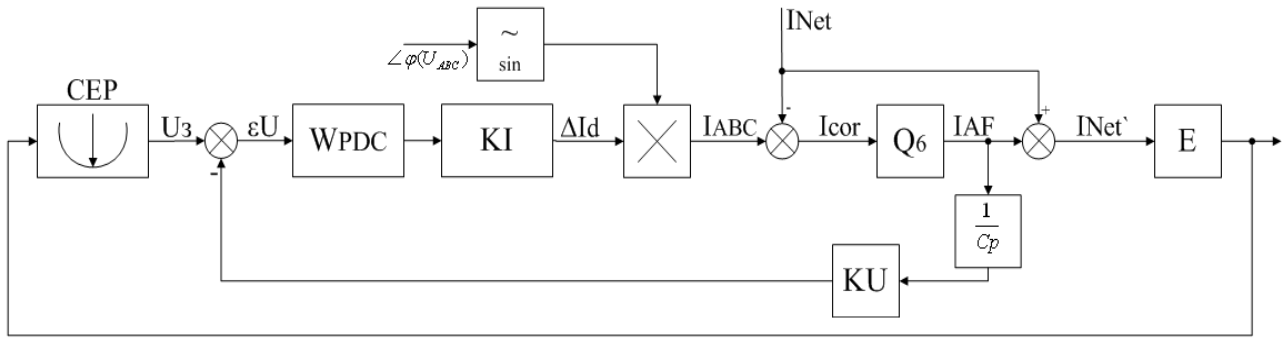


Рис. 1 Структурна схема САФ з ЕР

Таблиця - Можливі критерії якості компенсації для активного фільтру струму

№	Критерій	Пояснення
1	$\begin{cases} \sqrt{\sum_{n=3,5,7,9,11,31,33,35,37,39} I_{(n)}^2} \rightarrow 0 \\ I_{(1)} \\ \arg(\overline{U_{(1)}}) - \arg(\overline{I_{(1)}}) \rightarrow 0 \end{cases}$	Критерій мінімізує сумарний коефіцієнт гармонік порядків першого та третього десятків із умовою генерації струму першої гармоніки у фазі із напругою першої гармоніки мережі.
2	$\begin{cases} \frac{(dI)^2}{d^2t} \rightarrow \min \\ \arg(\overline{U_{(1)}}) - \arg(\overline{I_{(1)}}) \rightarrow 0 \end{cases}$	Критерій мінімізує другу похідну струму, яка набуває мінімуму за умови синусоїдності форми.
3	$\begin{cases} \sqrt{\frac{T}{\int I^2}} \rightarrow \min \\ \arg(\overline{U_{(1)}}) - \arg(\overline{I_{(1)}}) \rightarrow 0 \end{cases}$	Критерій мінімізує діюче значення струму мережі, яке є мінімальним за умови синусоїдності струму, який співпадає за фазою із фазою напруги мережі.

На рис. 1: CEP – блок екстремального регулятора, U_z – напруга завдання в ланці постійного струму; εU – сигнал похибки вищезазначеної напруги; $\angle \varphi(U_{ABC})$ – кут вектора напруги мережі живлення першої гармоніки прямої послідовності; W_{PDC} – регулятор напруги; KI – коефіцієнт узгодження напруги в ланці постійного струму та активного струму мережі; ΔId – амплітудне значення активного струму навантаження; I_{ABC} – вектор струму завдання першої гармоніки прямої послідовності (синусоїда); I_{cor} – вектор завдання струму корекції САФ; Q_6 – силовий інвертор; IAF – струм корекції САФ; $INet$ та $INet'$ – струм мережі до та після корекції; C – значення ємності конденсаторної батареї; E – блок обчислення критерію якості (цільова функція для ЕР); kU – коефіцієнт напруги для зворотного зв'язку за напругою.

Контур регулювання напруги є внутрішнім по відношенню до контуру системи екстремального регулювання (CEP). Необхідно зазначити, що ЕР може впливати на амплітудне розрахункове значення активної потужності (активного струму мережі) ΔId , обходячи контур регулювання напруги.

Наступним важливим кроком синтезу ЕР для САФ є вибір функціоналу якості, мінімізуючи (або максимізуючи) який досягається введення пристрою до оптимального режиму роботи. В табл. наведено декілька варіантів нових розроблених цільових функцій. Для практичних досліджень обрань перший варіант.

Достовірність запропонованого математичного апарату було підтверджено на основі фізичного моделювання комплексу «Мережа-САФ-Навантаження». Нижче наведено структурну схему моделі енергетичного об'єкту (рис. 3) та цифрові осцилограми (рис. 2) результатів досліду компенсації вищих гармонік, несиметрії та реактивної потужності. На схемі (рис. 3) $R1 \neq R2 \neq R3$ та кути керованого випрямляча для кожного плеча $\alpha_A \neq \alpha_B \neq \alpha_C$. Параметри експериментальної установки: напруга живлення = 12 В, струм навантаження $\approx (0,5 \div 1)$ А, активна потужність ≈ 16 Вт.

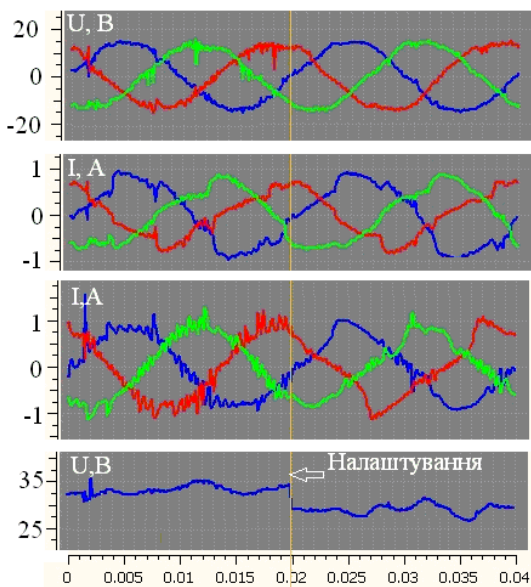


Рис. 2 Осцилограми цифрового осцилографа а) напруга мережі, б) струм навантаження, в) струм мережі, г) напруга в ланці постійного струму

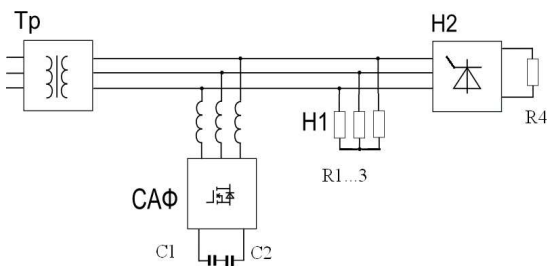


Рис. 3 Структурна схема тестової мережі

Для початку роботи (або перестройки на новий оптимальний рівень при зміні навантаження мережі) САФ вимагає часової затримки, що дорівнює одному періоду напруги живлення. Наступним кроком починається компенсація ПЯЕ мережі із налаштуванням на оптимальний рівень. Практично в ході зазначеного експерименту ЦСК настроює САФ на оптимальний рівень за час 30÷40 періодів напруги живлення. Підкреслимо, що корекція мережі під час налаштування на оптимальний рівень відбувається із якістю, близької до такої, що забезпечує класичний варіант САФ без ЕР.

На рис. 2 представлено установлений режим роботи САФ (оптимальний рівень) та початковий період перед налаштуванням. В результаті корекції коефіцієнт гармонік струму зменшено з $\approx 20\%$ до $\approx 11\%$, реактивну потужність першої гармоніки зменшено на $\approx 61\%$, коефіцієнт несиметрії струму за зворотною послідовністю зменшено з $\approx 11\%$ до $\approx 2\%$, коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю зменшено з $\approx 4\%$ до $\approx 3\%$.

Необхідно зазначити іншу перевагу запропонованого способу керування САФ, а саме: відсутність датчиків струму навантаження САФ та необхідність отримувати лише поточні значення струму та напруги мережі живлення. Для виміру останньої величини можна використовувати спрощений датчик визначення фази напруги.

Висновки. В роботі запропоновано новий підхід побудови системи керування САФ на основі екстремального регулювання. Основна ідея реалізації зазначеного регулятора полягає у наступному: існує деякий оптимальний рівень напруги на ємності в ланці постійного струму, який можна регулювати зміною величини розрахованої активної потужності мережі в системі керування. Робота САФ у зазначеному режимі є оптимальною за обраною стратегією (компенсація вищих гармонік, балансування навантаження тощо). Для визначення оптимального режиму роботи САФ запропоновано декілька цільових функцій.

Достовірність запропонованого методу керування перевірено за допомогою фізичного моделювання: до тестової мережі напругою 12 В підключено несиметричне активне навантаження та керований випрямляч. В результаті корекції коефіцієнт гармонік струму зменшено з $\approx 20\%$ до $\approx 11\%$, реактивну потужність першої гармоніки зменшено $\approx 61\%$, коефіцієнт несиметрії струму за зворотною послідовністю зменшено з $\approx 11\%$ до $\approx 2\%$, коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю зменшено з $\approx 4\%$ до $\approx 3\%$.

Пристрій, побудований за вищенаведеною методикою має наступні переваги: відсутність датчиків струму навантаження, спрощений датчик напруги мережі, відсутність необхідності в отриманні інформації про тип силових кабелів мережі, її індуктивність, значення індуктивності реакторів або ємності конденсаторів САФ тощо. Також перевагою запропонованої системи керування САФ з ЕР є виправлення недоліку обраного IcosFi методу керування, пов'язаного із визначенням активної потужності при роботі в умовах напруги, насиченої вищими гармоніками.

Список літератури: 1. *И.Е. Тонкаль, А.В. Новосельцев, С.П. Денисюк и др.* Баланс энергий в электрических цепях. – К.: Наукова думка, 1992. – 312 с. 2. *Akagi H.* Modern Active Filters and Traditional Passive Filters // Bulletin of the Polish Academy of science. Technical sciences. – 2006. – Iss. 54. – PP. 255–269. 3. *Волков В.А.* Методика оценки энергоэффективности использования силового активного фильтра / *В.А. Волков* // Электромеханичні і енергозберігаючі системи, 2012. – Вип. 3. (19) – С.213-215. 4. Стратегія керування паралельним активним фільтром з частковим послабленням складової нульової послідовності напруг трифазної чотирипровідної мережі / *С.Й. Поліщук, М.Ю. Артеменко, В.М. Михальський [та ін.]* // Технічна електродинаміка. — 2013. — № 3. — С. 12–19. 5. *Czarnecki L. S.* On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory / *L. S. Czarnecki* // IEEE Trans. On Power Electronics Vol. 19. – 2004. – No. 3, pp. 828-836. 6. *Czarnecki L.S.* Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental of Power Theory / *L.S. Czarnecki* // Przegląd elektrotechniczny, R84. – 2008. – No. 6. – P. 28-37. 7. *Janpong S.* A Literature Survey of Neural Network Applications for Shunt Active Power Filters / *S. Janpong, K-L. Areerak, K-N. Areerak* // World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 60. – 2011. – № 5(12). – P. 273 - 279. 8. *Rosendo J.A.* Application of Self-Tuned Kalman Filters to Control of Active Power Filters / *J.A. Rosendo, A. Bachiller, A. Gomez* // Power Tech, IEEE Lausanne. – 1-5 July, 2007. – P. 1262-1265 9. *Charles S.* Comparison of Three Phase Shunt Active Power Filter Algorithms / *S. Charles, G. Bhuvaneshwari* // International Journal of Computer and Electrical Engineering. – 2010. – Vol. 2, no. 1. – P.175-180.

Bibliography (translated): 1. Tonkal, I.E., Novosel'tsev A.V. and Denisyuk S.P. *Balans energii v elektricheskikh tsepakh*. Kyiv: Naukova dumka, 1992. Print. 2. H, Akagi. "Modern active filters and traditional passive filters." *Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*. 54.3 (2006): 255-269. Print 3. V., Volkov. "Metodika otsenki energoeffektivnosti ispol'zovaniya silovogo aktivnogo fil'tra." *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*. Vol. 3.19 (2012): 213-215. Print. 4. S, Polishchuk, Artemenko M, Mikhal'skiy V, Batrak L and Shapoval I. "Strategiya keruvannya paralelnim aktivnim fil'trom z chastkovim poslablenniam skladovoi nul'ovoi poslidovnosti naprug trifaznoi chotiriprovodnoi merezhi." *Tekhnichna elektrodinamika*. 3 (2013): 12–19. Print. 5. L., Czarnecki. "On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory ." *IEEE Trans. On Power Electronics* . 19.3 (2004): 828-836. Print. 6. L, Czarnecki. "Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental of Power Theory." *Przegląd elektrotechniczny*. R84.6 (2008): 28-37. Print. 7. S, Janpong, Areerak K-L and Areerak K-N. "A Literature Survey of Neural Network Applications for Shunt Active Power Filters ." *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index* 60. 5.12 (2011): 273 - 279. Print. 8. J.A., Rosendo. "Application of Self-Tuned Kalman Filters to Control of Active Power Filters ." *Power Tech, IEEE Lausanne*. 1-5 July.(2005): 1262-1265. Print. 9. S., Charles and Bhuvaneshwari G. "Comparison of Three Phase Shunt Active Power Filter Algorithms." 2.1 (2010): 175-180. Print.

Надійшла (received) 07.08.2015