

УДК 621.314+ 621.3.026.5

А.П. СІНОЛИЦІЙ¹, д-р техн. наук, проф., В.А. КОЛЬСУН, канд. техн. наук, доц.,
В.С. КОЗЛОВ, аспірант, Криворізький національний університет

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ АКТИВНОГО ФІЛЬТРУ СТРУМУ З ТОЧКИ ЗОРУ КЛАСИЧНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГООБЛІКУ

У статті проведено оцінку ефективності використання силового активного фільтра струму при його застосуванні на промислових об'єктах з класичною системою комерційного енергетичного обліку. Метою роботи є доведення наступної думки: у деяких випадках найпростіший силовий активний фільтр струму, що видаляє лише вищі гармоніки мережі, є досить ефективним рішенням щодо компенсації реактивної потужності. Зменшення показань лічильників реактивної енергії при видаленні вищих гармонік струму відбувається за рахунок невідповідності визначення самого терміну «реактивна потужність» виробниками лічильників.

Наведено математичні викладки для обрахунку реактивної потужності, які покладено в основу сучасних лічильників електричної енергії. У ході аналізу названих математичних викладок показано, що деякі з них враховують рівень викривлення кривої струму (рівень потужності спотворення). Також наведено приклад роботи активного фільтра струму в мережі з нелінійним навантаженням, яке додатково є джерелом реактивної енергії.

Ключові слова: активний фільтр струму, енергозбереження, реактивна потужність, вищі гармоніки.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. На вітчизняних підприємствах основними ланками системи енергетичного обліку є лічильники активної та реактивної енергії. Через відсутність чіткого визначення термінів «реактивна потужність» та «реактивна енергія» [1,17,18,20] математичний апарат для розрахунку вищезазначених величин може бути відмінним в залежності від виробника [1]. Така відмінність не є проблемою для комерційного обліку тільки у випадку роботи пристрою в системі з симетричною напругою та синусоїдним симетричним навантаженням. У разі несиметричного нелінійного навантаження різниця показників лічильників реактивної енергії одного й того ж високого класу точності але різних виробників може сягати десятків відсотків за рік [1].

Ефективним рішенням для корекції енергетичного потоку є силовий активний фільтр (САФ) [7,10,11,12,14]. Наведений термін включає до себе низку типів пристроїв, що розрізняють за топологією та величинами, на які пристрій може впливати [20]. В даній роботі для аналізу обрано найпростіший тип САФ - шунтовий активний фільтр струму, що впливає на форму струму мережі та видаляє тільки вищі гармоніки [16,19].

Аналіз досліджень та публікацій. Аналіз математичного апарату різних типів лічильників подано у роботі [1]. Тими ж дослідниками подано варіант модифікації математичних викладок для обчислення реактивної потужності.

Математичний апарат САФ теж є досить різноманітним [2,6,7,8,9,15]. Основна відмінність розрахункової частини САФ - використання для корекції енергопотуку миттєвих значень потужностей, струмів або напруг у той час, як комерційні лічильники оперують з інтегральними величинами. Ця відмінність викликана вимогами, що висувають до лічильників та до САФ. Перші призначені до обліку кількісних величин (активної та реактивної енергії), другі - для корекції миттєвих поточних величин.

Інтелектуальна частина САФ, що відповідає за генерацію сигналу корекції, може бути заснована на «потужнісних» теоріях ($p-q$ теорія миттєвої потужності [3,20] та її похідні, СРС (Current's Physical Components) теорія [4] і т.д.) або на математичних апаратах, що працюють виключно з однією величиною: струмом або напругою, в залежності від типу САФ ($d-q$ метод, використання рядів Фур'є і т.ін. [2,14]). Перелічені способи генерації сигналу корекції відрізняються за ефективністю та коректністю в залежності від умов роботи (несинусоїдність та несиметрія напруги, невірноваженість навантаження та інше).

Постановка завдання. За точку відліку прийнято значення активної на реактивної потужностей, що обчислені за різними математичними викладками, які використовують індукційні та сучасні цифрові лічильники. Метою роботи є розкриття наступної думки: найпростіший САФ струму є достатньо ефективним рішенням для компенсації як активних втрат в мережі, так і реактивної потужності (через неузгодженість поняття «реактивна потужність» перш за все в системах комерційного обліку електричної енергії).

Викладення матеріалу та результати. Шунтові САФ є найбільш розповсюдженим типом

активних фільтрів [5]. Активний фільтр складається з AC/DC перетворювача, накопичуючого елемента та системи керування. Система керування у свою чергу складається з двох частин. Перша частина виконує задачу вимірювання сигналів мережі, їх обрахунків та визначення сигналу, що має генерувати у мережу САФ. Друга частина виконує задачу керування силовими ключами САФ.

Силова частина може бути виконана, як інвертор напруги або інвертор струму (рис. 1). Більшість авторів [5] надають перевагу інверторам напруги з ШІМ через більшу ефективність, меншу ціну та менші масогабаритні показники. Слід зазначити, що інвертор струму вимагає застосування деяких додаткових схемотехнічних заходів.

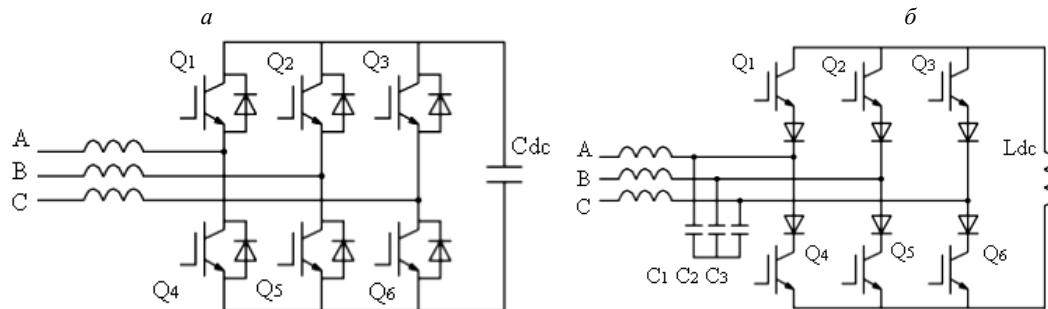


Рис. 1. типові структури САФ на основі інвертора напруги *a* та інвертор струму *б*

Типові активні фільтри [5] можуть генерувати струм з частотою до 1 кГц при частоті переключення силових ключів 10 кГц, що дозволяє компенсувати гармоніки мережі до 25-го порядку. Для виключення генерації до мережі додаткових вищих гармонік, пов'язаних з роботою силових ключів САФ, необхідно застосовувати додатковий фільтр пасивний невеликої потужності.

Зазначимо, що САФ можуть працювати за різними стратегіями компенсації залежно від потреби. Для обраного варіанту САФ струму, що вимірює тільки струм мережі це:

обмеження максимального струму мережі, яке забезпечує захист електротехнічного обладнання системи від перевищення струмом заданого рівня;
симетрування фазних струмів;
видалення вищих гармонік у фазних струмах.

Працюючи за останньою переліченою стратегією компенсації САФ струму генерує до мережі струм корекції таким, що виконується рівність

$$i_{S(A,B,C)} = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_{(A,B,C)}) = i_{L(A,B,C)} + i_{F(A,B,C)}$$

де $i_{S(A,B,C)}$, $i_{L(A,B,C)}$ - миттєві значення струмів фаз А,В,С мережі, навантаження та САФ відповідно; $\varphi_{(A,B,C)}$ - кут зсуву фази між першими гармоніками напруги та струму відповідно, для фаз мережі А,В,С.

Потужність САФ можна оцінити за формулою, запропонованою в [5]

$$P_{HF} = \sqrt{3} \cdot (U_{DC} / \sqrt{2}) \cdot (I_{Fmax} / \sqrt{2}),$$

де P_{AF} - потужність САФ; U_{DC} - напруга конденсаторної батареї; I_{Fmax} - максимальне значення струму фільтру.

Для обрахунку ефективності роботи активного фільтру будемо використовувати математичні викладки, наведені в роботі [1], за якими працюють лічильники активної та реактивної енергії.

Активну потужність будемо обчислювати за виразом

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (u_A \cdot i_A + u_B \cdot i_B + u_C \cdot i_C) dt, \quad (1)$$

де P - значення активної потужності трифазної мережі; u_A, u_B, u_C , i_A, i_B, i_C - миттєві значення напруг та струмів фаз А,В,С відповідно; T, t - період мережі живлення та час відповідно.

Реактивна потужність обчислюється за формулами, поданими в табл. 1.

У табл. 1 Q - значення реактивної потужності, що обраховано відповідним типом лічильника; U_A, U_B, U_C , I_A, I_B, I_C - діючі значення напруг та струмів фаз А,В,С відповідно; $U_{BC}^{(1)}, U_{CA}^{(1)}, U_{AB}^{(1)}$ - вектори першої гармоніки лінійних напруг фаз А,В,С відповідно; $I_A^{(1)}, I_B^{(1)}, I_C^{(1)}$ - значення векторів першої гармоніки фазних струмів у фазах А,В,С відповідно; S, P_A, P_B, P_C - значення повної потужності трифазної системи та значення активних потужностей у фазах А,В,С відповідно.

Обчислення реактивної потужності різними типами лічильників[1]

Метод	Де застосовується
$Q = U_A \cdot I_A \cdot \sin(\varphi_A) + U_B \cdot I_B \cdot \sin(\varphi_B) + U_C \cdot I_C \cdot \sin(\varphi_C)$	класичний метод обчислення (трикутник потужностей)
$Q = (U_{BC}^{(1)} \cdot I_A^{(1)} + U_{CA}^{(1)} \cdot I_B^{(1)} + U_{AB}^{(1)} \cdot I_C^{(1)}) / \sqrt{3}$	індукційні лічильники
$S = U_A \cdot I_A + U_B \cdot I_B + U_C \cdot I_C$; $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$	цифрові лічильники
$Q = \sqrt{U_A^2 \cdot I_A^2 - P_A^2} + \sqrt{U_B^2 \cdot I_B^2 - P_B^2} + \sqrt{U_C^2 \cdot I_C^2 - P_C^2}$;	цифрові лічильники
$Q = \frac{1}{T} \int_0^T u_A(t) \cdot i_A \left(t - \frac{T}{4} \right) dt + \frac{1}{T} \int_0^T u_B(t) \cdot i_B \left(t - \frac{T}{4} \right) dt + \frac{1}{T} \int_0^T u_C(t) \cdot i_C \left(t - \frac{T}{4} \right) dt$	цифрові лічильники

До табл. 1 зробимо два зауваження, попередньо припустивши, що система напруг мережі симетрична синусоїдна, система струмів - симетрична та несинусоїдна, та перша гармоніка струму має зсув відносно до напруги (детальний опис тестової системи приведено в прикладі).

Перше зауваження: метод № 1 використовує діюче значення струму, до складу якого входять вищі гармоніки

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}, \quad (2)$$

де i та I - миттєве та діюче значення струму довільної фази відповідно.

Формула (2) переписана через діючі значення гармонік має вигляд

$$I = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_{(n)}^2},$$

де $I_{(n)}$ та n - діюче значення гармоніки та порядковий номер гармоніки відповідно.

Нагадаємо, що обраний варіант найпростішого САФ струму буде компенсувати вищі гармоніки.

У методі № 2 враховуємо, що напруга мережі синусоїдна і крутний момент індукційного лічильника утворюється однойменними гармоніками струму та напруги.

Друге зауваження: методи №3 та №4 можна умовно назвати методами визначення нев'язки активної та повної потужностей.

Використовуючи концепцію, запропоновану Budeanu [13], маємо для окремої фази

$$U_A^2 \cdot I_A^2 - P_A^2 = D^2 + Q^2, \quad (3)$$

де D - потужність спотворення за Budeanu, що обумовлена впливом вищих гармонік струму при синусоїдній напрузі живлення.

Реактивна потужність за Budeanu[13], визначається як

$$Q = \sum_{n=1}^N U_{(n)} \cdot I_{(n)} \cdot \sin(\varphi_{(n)}), \quad (4)$$

де $U_{(n)}$ та $\varphi_{(n)}$ - діюче значення відповідної гармоніки напруги довільної фази та кут зсуву між однойменними гармоніками напруги та струму в одній фазі; N - кількість гармонік.

У разі синусоїдної симетричної напруги, виходячи з формули (4), маємо реактивну потужність першої гармоніки, яку найпростіший обраний САФ струму не може компенсувати

$$Q = U \cdot I_1 \cdot \sin(\varphi_1) \quad (5)$$

Звертаючись до формули (3), САФ струму буде компенсувати потужність викривлення D , пов'язану з вищими гармоніками струму. У разі симетричної синусоїдної напруги потужність викривлення для однієї фази обчислюється, як

$$D = U \cdot \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{(n)}^2}$$

Додатково зазначимо, що обраний САФ струму буде компенсувати активні втрати в трифазній мережі, що пов'язані з впливом вищих гармонік

$$\Delta P_H = 3 \cdot \sum_2^{\infty} I_{(n)}^2 \cdot R, \quad (6)$$

де ΔP_N - втрати в мережі живлення, пов'язані з впливом вищих гармонік; R - значення опору однієї фази трифазної трипровідної мережі без урахування скін-ефекту.

Наведемо приклад. Маємо трифазний керований випрямляч з активним навантаженням, який підключено до мережі з синусоїдною симетричною напругою 0,4 кВ.

До тієї ж мережі підключено САФ струму та лічильники активної та реактивної енергій.

Кут керування випрямляча дорівнює 20° , струм фази до корекції сягає 5,22А, випрямляч підключено до джерела алюмінієвим провідником довжиною 100 м та площею перетину 0,75 мм².

Структурна схема тестової системи приведена на рис. 2.

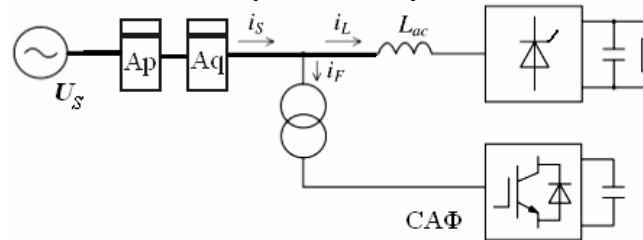


Рис. 2. Структурна схема тестового електротехнічного комплексу

Результати обчислень зведено у табл. 2.

Таблиця 2

Показники лічильників до та після компенсації

Вид потужності	Значення до компенсації (ВАР/Вт)	Значення після компенсації (ВАР/Вт)	Відсоток, на який зменшились показники
Реактивна (№1 у табл. 1)	1066	1013	5%
Реактивна (№2 у табл. 1)	1013	1013	0%
Реактивна (№3 у табл. 1)	1474	1013	24%
Реактивна (№4 у табл. 1)	1474	1013	24%
Реактивна (№5 у табл. 1)	1013	1013	0%
Активна потужність (вираз 1)	3112	3083	1%
Активні втрати в мережі (вираз 6)	300	271	10%

Аналізуючи дані табл. 2 бачимо, що активні втрати в мережі знизились на 10%, в той час, як споживання загальної активної потужності зменшилось приблизно на 1%, що не є суттєвою перевагою.

Однак різниця показань реактивних потужностей індукційного та цифрових лічильників (№3 та №4 у табл. 1) сягає 24% відповідно.

Також необхідно зазначити, що тип цифрового лічильника, що зсуває сигнал струму (напруги) на чверть періоду (№5 у табл. 1), має показники, що не відрізняються від лічильників індукційного типу.

Спираючись на формулу (3) та (5) можна зробити висновок про те, що САФ струму може звести показання деяких типів цифрових лічильників реактивної енергії до 0, якщо зсув між першою гармонікою струму та синусоїдною напругою відсутній, та струм має у своєму складі вищі гармоніки.

У такому разі вираз (3) запишеться у вигляді

$$U_A^2 \cdot I_A^2 - P_A^2 = D^2$$

Додамо, що складову потужність спотворення неможливо компенсувати такими заходами, як батареї конденсаторів. Більш того, вищі гармоніки струму можуть негативно позначитись за ємності косинусного конденсатора.

Висновки: показання деяких типів цифрових лічильників реактивної енергії формуються не тільки класичною реактивною складовою потужності (за визначенням Budeanu), але й складовою, що викликана викривленням форми струмів мережі за умови синусоїдної напруги.

Виходячи з викладеного, впровадження найпростішого варіанту САФ струму дозволяє досягти зменшення показників відповідних типів лічильників як активної, так і реактивної енергії.

Також показано, що у разі використання деяких типів сучасних цифрових лічильників реактивної енергії може існувати випадок, при якому зменшення показань лічильника неможливо досягти шляхом використанням косинусного конденсатора.

Список літератури

1. Давыдов А.С. Особенности измерения полной и реактивной мощности и энергии в электрических сетях / А.С. Давыдов, А.Н. Попенка, В.В. Аникин // Український метрологічний журнал, 2009. - №2. - С. 11–15.
2. L. Asiminoaei, F. Blaabjerg, and S. Hansen, Evaluation of harmonic detection methods for active power filters application, *APEC*, Vol. 1, pp. 635-41, 2005.
3. Akagi H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning / H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes. – New York: Wiley, 2007. – 379 p.
4. Czarnecki L.S. Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental of Power Theory / L.S. Czarnecki // *Przeegląd elektrotechniczny*, R84. – 2008. – No. 6. – P. 28-37.
5. Akagi H. Modern Active Filters and Traditional Passive Filters / H. Akagi // *Bulletin of the Polish Academy of science, Technical sciences*. – 2006. – vol. 54. – P. 255-269.
6. 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. – P. 828-836.
7. Depenbrock M. The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations / M. Depenbrock // *IEEE Transactions on Power Systems* – 1993. – Volume: 8, Issue: 2. – P. 381-387.
8. Баланс энергий в электрических цепях / И.Е. Тонкаль, А.В. Новосельцев, С.П. Денисюк [и др.]; – К.: Наукова Думка, 1992. – 312 с.
9. Fryze S. Wink-, Blind-, and Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit Nichtsinusoidalem Verlauf von Strom und Spannung / S. Fryze // *Elekt. Zeitschrift* – 1932. – Vol. 53. – № 25. – P. 596-599.
10. Tolbert, L.M. Comparison of Time Based Nonactive Power Definitions for Active Filtering / L.M. Tolbert, T.G. Halbetler // *Power Electronics Congress CIEP 2000.– 2000.– October 2000.– P. 73-79.*
11. M. Kale Harmonics and reactive power compensation with shunt active power filter under non-ideal mains voltage / M. Kale, E. Ozdemir // *Electric Power Syst.* – 2005. – Res 77. – pp. 363-370.
12. Колб А.А. Системы группового питания приводов с емкостными накопителями и параллельными активными фильтрами / А. А. Колб // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 2011. – Вип. 03(79). – С. 404-407.
13. The New IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms / [chair Gediminas P. Kurpis]. – IEEE: New York, 1993. – 1619 p.
14. Бурлака В.В. Обзор методов управления активными фильтрами / В.В. Бурлака, С.К. Поднебенна, М.Д. Дяченко // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 1/2011 (13). – С. 51-54.
15. K Syed Moinuddin, Dr. BV Sanker Ram Instantaneous power theory based active power filter: a matlab/ simulink approach / Moinuddin K Syed, Dr. BV Sanker Ram // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2008. – Vol. 4 No. 6. – pp. 536-541.
16. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Активная фильтрация напряжений и токов сети в установках с высоковольтными тиристорными преобразователями // Сб. «Горное оборудование и электромеханика». – 2005. – № 5. – С. 41–45.
17. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке / Р. Дрехслер ; Пер. с чешск. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
18. Шейкіна О.Г., Костін М.О. Неоднозначність визначення поняття «реактивна потужність» в колах несинусоїдних електричних величин // *Гірнична електромеханіка та автоматика.–Дніпропетровськ*, 2002.– 69. – С.3–7.
19. Супрунович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок / Г. Супрунович. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
20. Akagi H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning / H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes. – New York: Wiley, 2007. – 379 p.

Рукопис подано до редакції 02.10.13

УДК 622.625.28

В.В. ПРОЦІВ, І.А. ТАРАН, доктора техн. наук, доц.,
А.В. НОВИЦКИЙ, канд. техн. наук, Национальный горный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЫКОВЫХ НЕРОВНОСТЕЙ НА ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТОРЕЛЬСОВЫХ СИСТЕМ ШАХТНЫХ ЛОКОМОТИВОВ

Предложена методика определения коэффициента использования силы магнитного притяжения на основе результатов вычислительного эксперимента в программе трехмерного моделирования КОМПАС. Получена зависимость критической высоты неровности рельсового пути от угла наклона тяг системы подвешивания.