

М. Й. Бурбело¹
О. М. Кравець¹
Д. Ю. Лебедь¹

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ НА КОНДЕНСАТОРІ АКТИВНОГО ФІЛЬТРА

¹Вінницький національний технічний університет

Розглянуто схему керування активним фільтром на основі dq-теорії з блоком автоматичної стабілізації напруги на конденсаторі, що містить систему адаптивного керування затримкою в часі та фільтр нижніх частот. Введення затримки можна реалізувати за допомогою мікроконтролера, який автоматично розраховуватиме необхідний коефіцієнт затримки та вихідний масштабний коефіцієнт. Фільтр нижніх частот налаштований на сьому гармоніку, що дозволяє регулювати затримку в діапазоні, який забезпечує мінімальне значення допустимої похибки відхилення напруги. Також проведено дослідження якості підтримання напруги на конденсаторі за допомогою комплексу заходів. Для покращення компенсаційної здатності активного фільтра виконано налаштування блока ковзного усереднення струму на шосту гармоніку у разі симетричного навантаження. Часова реакція блока автоматичної стабілізації напруги на конденсаторі постійного струму забезпечує стабільний процес заряду/розряду конденсатора і високий рівень компенсації вищих гармонік без значної додаткової генерації активної потужності в мережу. Показано, що підвищення точності регулювання напруги на конденсаторі силового активного фільтра дозволяє забезпечити досягнення мінімальних значень гармонічних спотворень та стабільної роботи системи. Перехідна реакція силового активного фільтра визначається контуром керування вихідним струмом фільтра. Тому його часовий відгук вибрано достатньо швидким, щоб відслідковувати за поточною формою синусоїдного струму. З іншого боку, швидкодія контуру регулювання напругою конденсатора не повинна бути дуже швидкою, та вона вибирається принаймні в 10 разів повільнішою ніж контуру регулювання поточного струму фільтра. Таким чином, ці дві системи керування можна розділити і спроектувати як дві незалежні системи та відрегулювати кожну за індивідуальними характеристиками.

Ключові слова: електрична мережа, фільтр нижніх частот, вищі гармоніки, реактивна потужність, активний фільтр, система керування.

Вступ

В сучасній промисловості набули широкого використання різні нелінійні електронні пристрої, такі як інвертори, випрямлячі та імпульсні джерела живлення [1]. Ці перетворювачі вводять гармонічні спотворення в розподільні електричні мережі і призводять до спотворення напруги живлення та зниження якості електроенергії [2]. Тому, навіть навантаження, що споживає тільки активну потужність, буде мати додаткову складову — потужність пульсацій, що зумовлена вищими гармоніками.

Силовий активний фільтр (САФ) застосовують для зменшення струмів гармонік, а у разі необхідності — ще й для симетрування навантажень та компенсації реактивної потужності. Удосконалення САФ може забезпечити розвиток методів керування [3].

У більшості випадків для керування напругою конденсатора використовують ПД регулятори. В основному це пояснюється їх простою структурою, універсальністю, швидкодією та надійністю. Слід зазначити, що ПД-регулятор стабілізує напругу конденсатора за декілька періодів [4], що є недостатньо швидким, щоб обмежити початкові зміни напруги у разі накиду або скиду навантаження. На продуктивність та стабільність системи керування може безпосередньо впливати затримка часу, розташована на вході або (та) на виході регулятора [5].

Метою роботи є покращення якості електроенергії за рахунок підвищення точності регулювання напруги на конденсаторі активного фільтра.

1. Інформаційна частина

В силових активних фільтрах використовують два контури керування, один — для регулювання поточного струму фільтра (САФ), другий — для регулювання напруги на конденсаторі інвертора. Загалом, процедура проектування контурів керування базується на відповідності вимог до перехідних характеристик обох контурів [6]. Оскільки перехідна реакція активного фільтра визначається контуром керування струмом фільтра, його часовий відгук повинен бути достатньо швидким. З іншого боку, часова реакція регулювання напруги постійного струму на конденсаторі не повинна бути дуже швидкою, і вона вибирається принаймні в 10 разів повільнішою, ніж контури регулювання поточного струму фільтра. Таким чином, ці дві системи керування можна розділити і спроектувати як дві незалежні системи.

Струм i_{dc} через конденсатор має складний характер, спричинений двома процесами: увімкненням транзисторів, що розряджають конденсатор, керування яких відбувається за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) [7]; увімкненням діодів, які забезпечують заряд конденсатора струмом, що визначається миттєвою напругою мережі [8].

Перехідні процеси створюють коливання напруги на конденсаторі постійного струму САФ. Амплітуду цих коливань потрібно ефективно регулювати для зменшення гармонічних спотворень САФ. Максимальну напругу на конденсаторі постійного струму можна розрахувати за формулою [9]

$$U_{dc_{max}} = \frac{1}{C} \int_{\theta_1/\omega}^{\theta_2/\omega} I_{dc}(t) dt + U_{dc}, \quad (1)$$

де C — ємність конденсатора; U_{dc} — стаціонарна напруга на конденсаторі; I_{dc} — струм заряду/розряду конденсатора; θ_1, θ_2 — кути відкриття та закриття діодів та транзисторів в режимі заряду/розряду конденсатора зі зміною, відповідно, знаку струму заряду/розряду.

Звідси коливання постійної напруги в межах ΔU_{dc} за цього значення ємності конденсатора C

$$\Delta U_{dc} = \frac{1}{C} \int_{\theta_2/\omega}^{\theta_1/\omega} I_{dc}(t) dt. \quad (2)$$

2. Дослідницька частина

Структурна схема системи керування САФ для компенсації вищих гармонік та реактивної потужності зображена на рис. 1. Система керування складається з таких блоків: блоків прямого та зворотного перетворення струмів та напруг з системи фазних координат в систему координат миттєвих симетричних складових $abc/\alpha\beta 0$ та $\alpha\beta/dq$, блока формування струму компенсації вищих гармонік та реактивної потужності, блока автоматичної стабілізації напруги на конденсаторі.

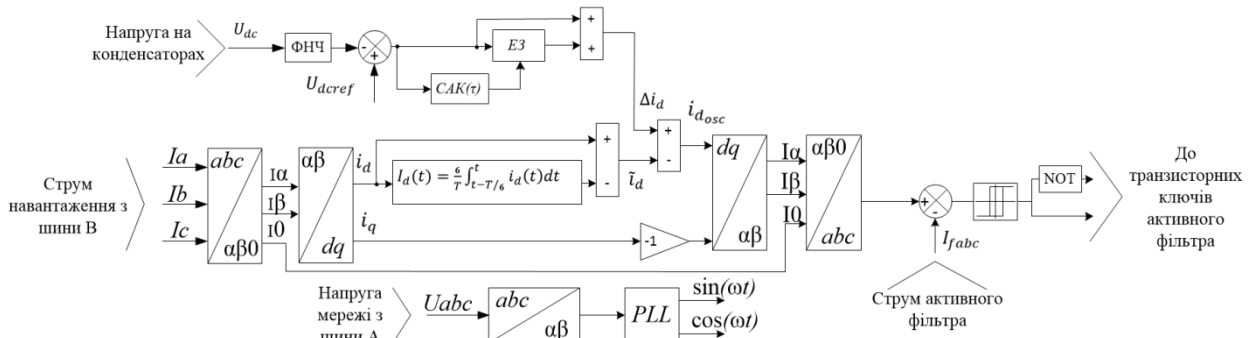


Рис. 1. Функціональна схема системи керування САФ

Для формування імпульсів керування транзисторами інвертора використовують метод релейного керування, яке забезпечує перемикання силових ключів, коли похибка перевищує фіксовану величину — зону гістерезису [4]. У цьому випадку частота перемикання не фіксована. Перевагою системи управління є її простота, недоліком — виникнення інтергармонік.

Для моделювання роботи САФ в режимі компенсації реактивної потужності в середовищі *Simulink* пакету прикладних програм *Matlab* використана модель з трифазним нелінійним наван-

таженням і додатковим трифазним навантаженням [10]. Характеристика елементів дослідної моделі: опір системи живлення $18,4 + j17,1$, мОм, опір на стороні постійного струму нелінійного навантаження (випрямляч, схема Ларіонова) — $12 + j1,256$ Ом, опір симетричного трифазного навантаження — $10 + j5$, Ом, опір трифазного накиду навантаження — $3 + j3$, Ом. Індуктивність, яка ввімкнена послідовно з фільтром $L = 2,2$ мГн. Накид трифазного навантаження відбувається в момент часу $0,06$ с, а скид — в момент часу $0,12$ с. Параметри обох конденсаторів: ємність $C = 6000$ мкФ, напруга $u_{dc} = 300$ В, $u_{dref} = 600$ В.

На вхід блока зворотного перетворення струмів (див. рис. 1) надходить сигнал

$$i_{d_{osc}}(t) = \Delta i_d(t) - \tilde{i}_d(t), \quad (3)$$

де $\Delta i_d(t)$ — значення приросту струму $i_d(t)$, зумовленого відхиленням напруги $U_{dc}(t)$ від заданого значення U_{dref} ; $\tilde{i}_d(t)$ — складник пульсацій струму $i_d(t)$.

Визначення складника пульсацій струму здійснюється за допомогою виразу

$$\tilde{i}_d(t) = i_d(t) - I_d(t), \quad (4)$$

де $I_d = \frac{6}{T} \int_{t-T/6}^t i_d(t) dt$ — усереднене значення струму $i_d(t)$.

На основі створеної схеми, керування відбувається за допомогою зміни постійної часу фільтра нижніх частот T та постійної часу блока ковзного усереднення струму, який відповідає за швидкодію всієї системи. Розглянуто три варіанти стратегії керування системою: оптимальна (*Optimal*), повільна (*Slow*) та швидка (*Fast*) з перерегулюванням напруги на конденсаторі за заданих параметрів.

Постійна затримка часу $T/6$ для усереднення струму в системі $d-q$ — координат дозволяє максимально збільшити швидкодію контуру без значних помилок та позбутися перепаду напруги на конденсаторі (рис. 2 $\tilde{i}_d^{Optimal}$). У випадку зменшення затримки часу до $T/2$, система починає працювати повільніше на $T/3$ та незначно зменшується компенсація вищих гармонік (рис. 2 \tilde{i}_d^{Slow}). Зі зростанням затримки часу до $T/12$, система працює надто швидко, щоб реагувати на найменші збурення, а також зменшується компенсація вищих гармонік в 2 рази (рис. 2 \tilde{i}_d^{Fast}).

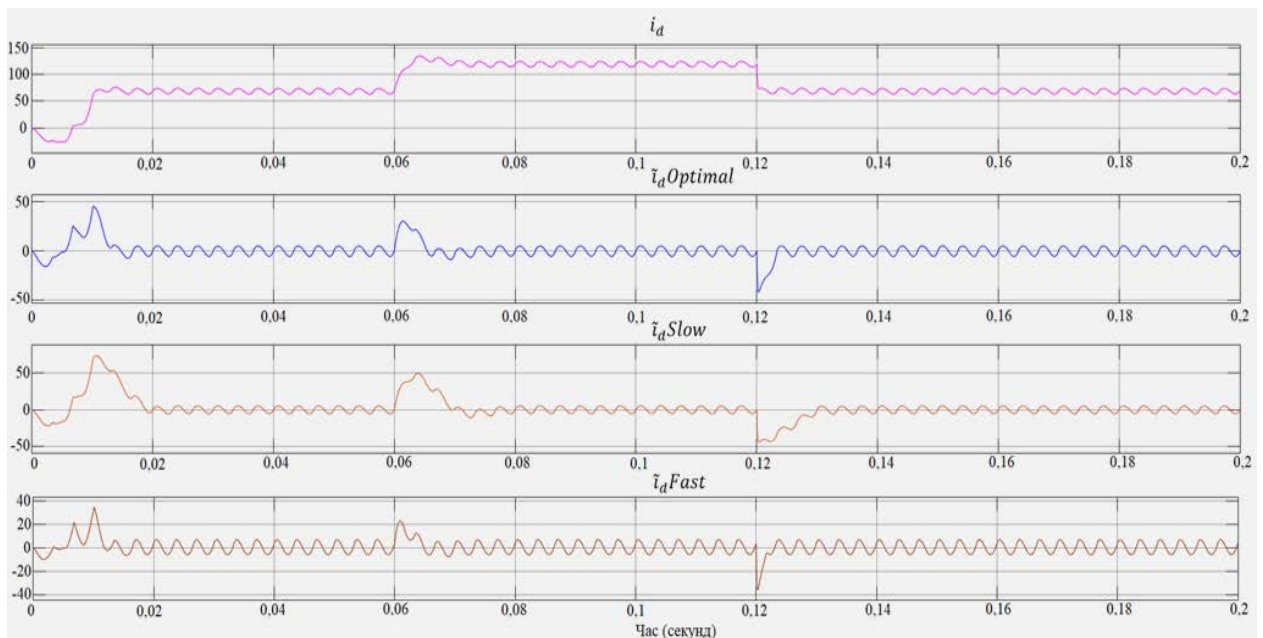


Рис. 2. Графік зміни сигналу струму \tilde{i}_d за різних стратегій керування

Структурна схема блока автоматичної стабілізації напруги на конденсаторі показана на рис. 3. Він складається з: фільтра нижніх частот (ФНЧ), елемента затримки, регулятора затримки, який містить блок випрямлення та масштабний перетворювач з коефіцієнтом передачі 10^{-3} .

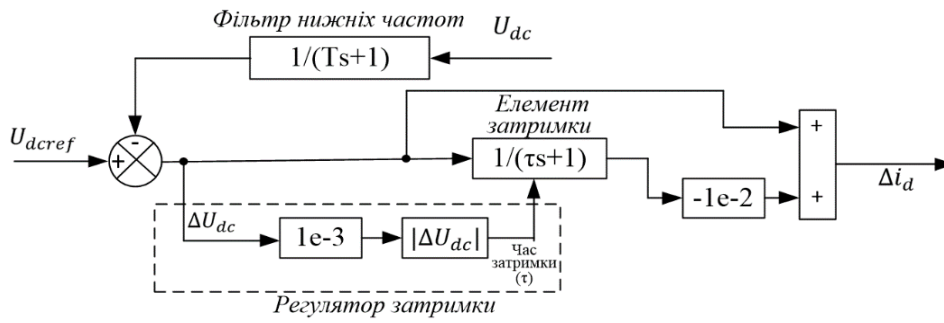


Рис. 3. Структурна схема блока автоматичної стабілізації напруги на конденсаторі

Керування напругою на конденсаторі відбувається за допомогою затримки, яка пропорційна модулю різниці напруг. Затримка, яка визначається регулятором затримки, має значення 0,001 с, за нульових початкових умов. Елемент затримки на виході містить масштабний перетворювач з коефіцієнтом передачі $-1 \cdot 10^{-2}$, що дозволяє покращити стабільність системи.

На вході блока автоматичної стабілізації напруги на конденсаторі встановлений фільтр нижніх частот з постійною часу $T = 1/600$ с. Передаточну функцію контуру керування напругою конденсатора U_{dc} можна подати у вигляді

$$\frac{\Delta i_d(s)}{\Delta U_{dc}(s)} = \frac{(s + 990)(s + 600)}{(s^2 + 2200s + 1,194 \cdot 10^6)} = \frac{(s + 990)(s + 600)}{(s + 1226,5)(s + 973,5)}. \quad (5)$$

Разом з цим, основу цієї схеми складає коло керування струмом i_d , яке містить блок ковзного усереднення струму з постійною часу $1/300$ с. Передаточна функція кола керування струмом i_d буде мати такий вигляд:

$$\frac{\tilde{i}_d(s)}{i_d(s)} = \frac{-(s + 1800)(s^2 + 17,87 \cdot 10^{-12})}{s(s^2 + 1800s + 1,08 \cdot 10^6)}. \quad (6)$$

З (5) можна зробити висновок, що час розряду/заряду конденсатора характеризується постійною часу ФНЧ та коефіцієнтом масштабного перетворювача. Швидкодія контуру керування струмом i_d з виразу (6) залежить лише від часу ковзного усереднення струму.

Параметри для повільної стратегії керування встановлені такі: постійна часу ФНЧ $T = 1/1200$ с та постійна часу блока ковзного усереднення струму $1/100$ с.

$$\frac{\Delta i_d(s)}{\Delta U_{dc}(s)} = \frac{(s + 990)(s + 1200)}{(s^2 + 3400s + 2,388 \cdot 10^6)} = \frac{(s + 990)(s + 1200)}{(s + 2408,5)(s + 991,5)}; \quad (7)$$

$$\frac{\tilde{i}_d(s)}{i_d(s)} = \frac{-(s + 600)(s^2 + 4,405 \cdot 10^{-12})}{s(s^2 + 600s + 1,2 \cdot 10^5)}. \quad (8)$$

Параметри для швидкої стратегії керування встановлені: постійна часу ФНЧ $T = 1/300$ с та постійна часу блока ковзного усереднення струму $1/600$ с.

$$\frac{\Delta i_d(s)}{\Delta U_{dc}(s)} = \frac{(s + 990)(s + 300)}{(s^2 + 1600s + 0,597 \cdot 10^6)} = \frac{(s + 990)(s + 300)}{(s + 1007,4)(s + 592,6)}; \quad (9)$$

$$\frac{\tilde{i}_d(s)}{i_d(s)} = \frac{-(s + 3600)(s^2 + 71,48 \cdot 10^{-12})}{s(s^2 + 3600 \cdot s + 4,32 \cdot 10^6)}. \quad (10)$$

Порівнюючи вирази (5), (7) та (9), можна зробити висновок, що в залежності від постійної часу ФНЧ змінюється розміщення домінантних коренів передаточної функції. Чим менше значення постійної часу ФНЧ, тим менша тривалість перехідного процесу. Це супроводжується наближенням домінантних коренів до початку координат.

У разі регулювання постійної часу елемента затримки розміщення коренів буде змінюватися

(рис. 4) і, відповідно, буде змінюватися динаміка сигналів струму \tilde{i}_d приросту струму Δi_d та керувального сигналу $i_{d_{osc}}$. Комплексно-спряжені пари полюсів $\sigma \pm j\omega$ відповідають загасаючій синусоїді $A \cdot e^{-\sigma t} \sin(\omega t + \varphi)$, швидкість загасання якої залежить від затримки. Коефіцієнт масштабного перетворювача $-1 \cdot 10^{-2}$ для всіх стратегій керування однаковий, він поліпшує стійкість системи керування та зміщує нуль ближче до початку координат, що незначно впливає на стабільність підтримання напруги на конденсаторі.

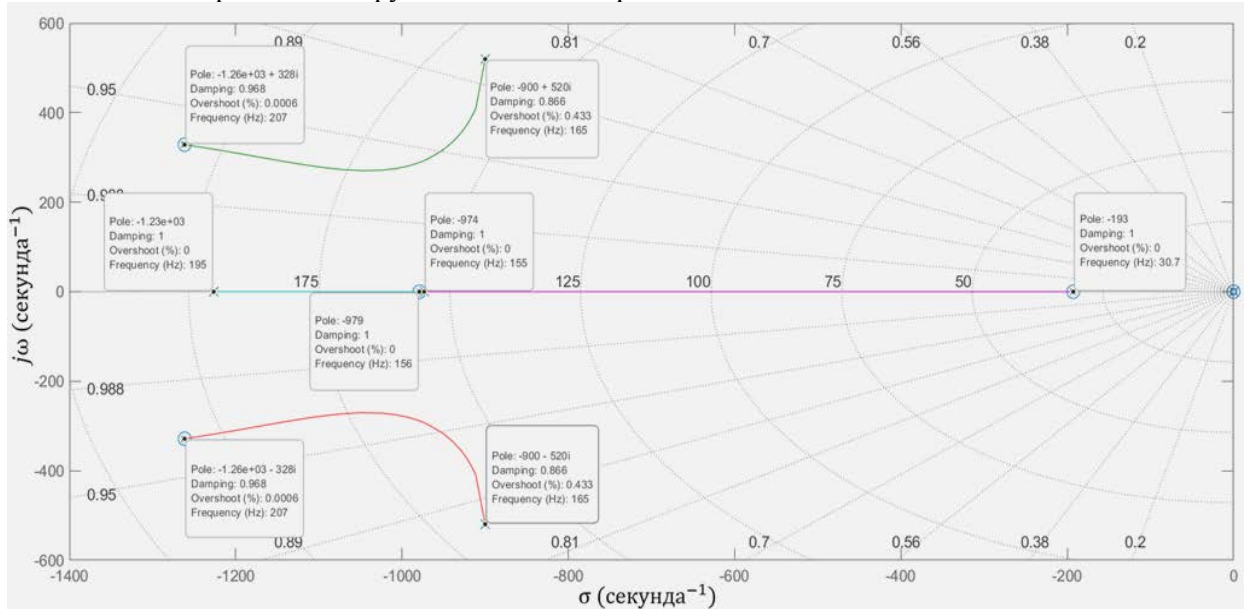


Рис. 4. Карта розміщення полюсів та нулів керувального сигналу $i_{d_{osc}}$ за методом кореневого годографа

Графік зміни напруги на конденсаторі в за різних стратегій керування показано на рис. 5, з якого можна зробити висновок про високу стабільність оптимальної стратегії керування та високу швидкодію пристрою. Розглядаючи інші випадки, виявляються значні перерегулювання та недорегулювання напруги конденсатора, це показує низьку швидкодію пристрою, що погано впливає на якість роботи системи.

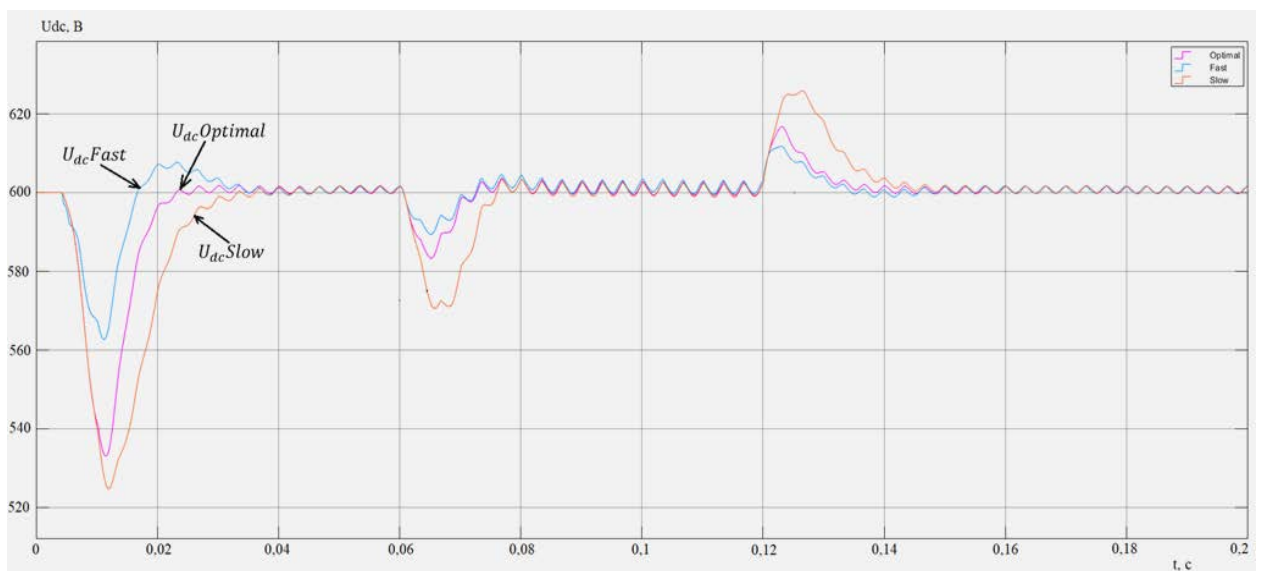


Рис. 5. Графік зміни напруги на конденсаторі з використанням затримки

Рис. 5 показує швидкість заряду/розряду конденсатора за різних режимів процесу керування. Перерегулювання на першому періоді швидкої стратегії керування можна усунути збільшенням ємності конденсатора, а недорегулювання за повільної стратегії можна усунути зменшенням ємності конденсатора.

Результати моделювання подано в таблиці. Значення сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень струму не перевищує 0,7 %.

Результати моделювання САФ з використанням затримки

Значення фізичних величин для несиметричного режиму	I_A	I_B	I_C
Амплітудні значення струмів мережі навантаження (А)	118	118	118
Коефіцієнт нелінійного спотворення струмів навантаження (%)	5,78	5,78	5,78
Амплітудні значення струмів мережі після компенсації (А)	97,58	97,5	97,5
Коефіцієнт нелінійного спотворення струмів мережі (%)	0,65	0,67	0,64

Висновки

Розглянуто схему керування САФ, яка містить систему адаптивного керування затримкою в часі. Затримку можна реалізувати за допомогою мікроконтролера, який автоматично розраховуватиме необхідний коефіцієнт затримки та вихідний масштабний коефіцієнт. Фільтр нижніх частот створює передумови для регулювання затримки в діапазоні, що забезпечує мінімальне значення допустимої похибки відхилення напруги. Для покращення компенсаційної здатності САФ виконано налаштування блока ковзного усереднення струму на шосту гармоніку у разі симетричного навантаження. Це забезпечує високий рівень компенсації вищих гармонік без значної додаткової генерації активної потужності в мережу. Показано, що підвищення точності регулювання напруги на конденсаторі САФ дозволяє забезпечити досягнення мінімальних значень гармонічних спотворень та стабільної роботи системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] J. Matas, L. Garcia de Vicuna, J. Miret, J. M. Guerrero, and M. Castilla, "Feedback linearization of a single-phase active power," *IEEE Trans. On Power Electron.*, vol. 23, no. 1, pp. 116-125, 2008.
- [2] T. Thomas, and A. Jaffart, "Design and performance of active power filter," *IEEE Industry Applications Magazine*, 1998.
- [3] О. М. Закладний, А. В. Праховник, і О. І. Соловей, «Енергозбереження засобами промислового електропривода,» навч. посіб. Київ, Україна: Кондор, 2005, 408 с.
- [4] Rajesh K. Patjoshi, Kamalakanta Mahapatra, and Venkata Ratnam Kolluru, *Real time Implementation of Sliding mode Based Direct and Indirect Current Control Techniques for Shunt Active Power Filter*. National Institute of Technology Rourkela, India, 2015.
- [5] O. J. M. Smith, "Closer Control of Loops with Dead-Time," *Chemical Engineering Progress*, no. 53, pp. 217, 1959.
- [6] D. Stanciu, M. Teodorescu, A. Florescu, and D. A. Stoichescu, "Single-phase active power filter with improved sliding mode control," in *17th IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR'10)*, May 2010, pp. 15-19.
- [7] *Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook*, Muhammad H. Rashid, Ed., 3rd ed. p. cm. ISBN 978-0-12-382036-5 .
- [8] R. K. Patjoshi, and K. K. Mahapatra, "Performance comparison of direct and indirect current control techniques applied to a sliding mode based shunt active power filter," in *India Conference (INDICON), 2013 Annual IEEE*, ІІТ Bombay, Dec. 2013, pp. 1-5.
- [9] К. І. Денисенко, І. С. Кутрань, В. О. Лесик, і Т. В. Мисак, «Збільшення швидкодії контуру слідкування за напругою накопичувального конденсатора трифазного паралельного активного фільтра,» *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, вип. 55, 2020. ISSN 1727-9895.
- [10] М. Й. Бурбело, Ю. В. Лобода, і Д. Ю. Лебедь, «Система прямого керування струмом активного фільтра,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 69-75, Квіт 2021. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-155-2-69-75> .

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 8.12.21

Бурбело Михайло Йосипович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: burbelomj@gmail.com ;

Кравець Олександр Миколайович — канд. техн. наук., доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: omkravets@gmail.com ;

Лебедь Денис Юрійович — аспірант кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: 4e15b.lebyd@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

M. Yo. Burbelo¹
O. M. Kravets¹
D. Yu. Lebed¹

Improving the Accuracy of Voltage Regulation on the Active Filter Capacitor

¹Vinnitsia National Technical University

The control scheme of the active filter on the basis of the dq-theory with the block of automatic stabilization of voltage on the condenser containing the system of adaptive control of a delay in time and the filter of low frequencies is considered. The introduction of the delay can be implemented using a microcontroller that will automatically calculate the required delay factor and the output scale factor. The low-pass filter is tuned to the seventh harmonic, which allows you to adjust the delay in the range that provides the minimum value of the allowable error of voltage deviation. A study of the quality of voltage maintenance on the capacitor was also carried out using a set of measures. To improve the compensating capacity of the active filter, the sliding current averaging unit was set to the sixth harmonic in the case of a symmetrical load. The time response of the automatic voltage stabilization unit on the DC capacitor provides a stable charge / discharge process of the capacitor and a high level of compensation of higher harmonics without significant additional generation of active power in the network. It is shown that increasing the accuracy of voltage regulation on the capacitor of the power active filter allows to ensure the achievement of the minimum values of harmonic distortion and stable operation of the system. The transient reaction of the power active filter is determined by the control circuit of the output current of the filter. Therefore, its time response is chosen fast enough to track the current shape of the sinusoidal current. On the other hand, the speed of the control circuit of the capacitor voltage should not be too fast, and it is selected at least 10 times slower than the control circuit of the current filter current. Thus, these two control systems can be divided and designed as two independent systems and adjust each to individual characteristics.

Keywords: electric network, low-pass filter, higher harmonics, reactive power, active filter, control system.

Burbelo Mykhailo Yo. — Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: burbelomj@gmail.com ;

Kravets Oleksandr M. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: omkravets@gmail.com ;

Lebed Denys Yu. — Post-Graduate Student of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: 4e15b.lebyd@gmail.com