

СЕЛЕКТИВНА КОМПЕНСАЦІЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК СТРУМУ ТРИФАЗНОЇ МЕРЕЖІ

С.М. Пересада*, докт.техн.наук, С.М. Ковбаса**, канд.техн.наук, Ю.М. Зайченко***, В.С. Решетник****
 Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
 пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна. E-mail: sergei.peresada@gmail.com

Синтезовано новий нелінійний алгоритм регулювання струмів паралельного активного фільтра, який забезпечує їхнє асимптотичне відпрацювання та, на відміну від існуючих рішень, не вимагає «великих» коефіцієнтів підсилення, що дає змогу спростити практичну реалізацію та підвищити завадозахищеність системи. Представлено результати математичного моделювання, які підтверджують теоретичні висновки, а також демонструють ефективність запропонованого рішення для паралельних активних фільтрів із селективною компенсацією гармонік струму. Бібл. 7, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: силовий активний фільтр, вищі гармоніки, спостерігач.

Вступ. Значна частина електроенергії, що надходить до споживачів із мережі живлення, перетворюється в інші види енергії за допомогою напівпровідникових перетворювачів, які є нелінійним навантаженням. Такі пристрої споживають із мережі струм, форма якого значно відрізняється від синусоїдної [1]. Вищі гармонічні складові струму мережі призводять до виникнення ряду проблем, таких як втрати потужності, хибне спрацювання захисних пристроїв, вихід із ладу електронного обладнання.

Для компенсації вищих гармонік струму застосовуються паралельні активні фільтри (ПАФ), принцип дії яких полягає у генерації в мережу компенсуючого струму, рівного струму гармонічних спотворень та протилежного за знаком. Для керування ПАФ використовують теорію миттєвої потужності [4], різні підходи в часовій області, методи швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [5] та інші. Рішення на основі методів теорії миттєвої потужності забезпечують лише повну компенсацію гармонічних спотворень. У той же час досить часто на практиці необхідно компенсувати лише декілька гармонік, що з практичної точки зору дає змогу зменшити вимоги до обчислювальної потужності пристрою керування та параметрів силової частини ПАФ. Системи на основі ШПФ дозволяють оцінити гармонічний склад струму, проте мають обмежене застосування внаслідок низької швидкодії.

Метод оцінювання миттєвих значень вищих гармонік струму навантаження на основі спеціальної форми спостерігача Люенбергера [2] забезпечує селективне оцінювання гармонік для їх вибіркової компенсації. На основі оцінених миттєвих значень вищих гармонік формуються завдання для контурів регулювання вихідних струмів ПАФ. Оскільки гармонічні спотворення формуються струмами високої частоти (2500 Гц для компенсації 50-ї гармоніки), то контури регулювання струмів ПАФ повинні мати значну швидкодію, яка досягається за рахунок використання регуляторів струму з «великим» підсиленням, що негативно впливає на їхню завадостійкість. Питання швидкодії контурів регулювання струму недостатньо висвітлені в роботах, присвячених регулюванню струмів на основі інформації від спостерігача вищих гармонік.

Метою даної роботи є синтез нелінійного алгоритму відпрацювання струмів ПАФ, який не вимагає використання «великих» значень коефіцієнтів регуляторів струму і тому забезпечує підвищену завадостійкість контурів регулювання.

Спостерігач гармонік. У [2, 7] показано, що згідно з методом гармонічних складових Фортеск'є [6], струм навантаження $\mathbf{i}_L = (i_{Ld}, i_{Lq})^T$, який має N гармонік у системі координат $(d-q)$, орієнтований за вектором напруги мережі, може бути записаний у вигляді

$$\mathbf{i}_{Ld} = \sum_{i=1}^N (x_{dpi} + x_{dni}), \quad \mathbf{i}_{Lq} = \sum_{i=1}^N (x_{qpi} + x_{qni}), \quad (1)$$

де $\mathbf{x}_i = (x_{dpi}, x_{qpi}, x_{dni}, x_{qni})^T$ – вектор проєкцій прямої (позначено індексом p) та зворотної (позначено індексом n) послідовностей i -ї гармоніки струму навантаження. Для оцінювання гармонічних складових у виразах для струмів (1) запропоновано спостерігач вищих гармонік, загальна форма якого має вигляд

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}_h \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_h [\mathbf{i}_L - \mathbf{C}_h \hat{\mathbf{x}}], \quad (2)$$

де $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{\mathbf{x}}_1^T, \dots, \hat{\mathbf{x}}_N^T)^T$, $\hat{\mathbf{x}}_1 = (\hat{x}_{dp1}, \hat{x}_{qp1}, \hat{x}_{dn1}, \hat{x}_{qn1})^T$, $\hat{\mathbf{x}}_N = (\hat{x}_{dpN}, \hat{x}_{qpN}, \hat{x}_{dnN}, \hat{x}_{qnN})^T$, $\mathbf{A}_h = \text{blockdiag}[\mathbf{A}_{h1}, \dots, \mathbf{A}_{hN}]$,

$$\mathbf{C}_h [2, 4N] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & \dots & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_h = [\mathbf{K}_{h1}, \dots, \mathbf{K}_{hN}]^T,$$

$$\mathbf{K}_{h1} = \begin{pmatrix} -k_{11} & 0 \\ 0 & -k_{11} \\ -k_{11} & 0 \\ 0 & -k_{11} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{K}_{hN} = \begin{pmatrix} -k_{1N} & 0 \\ 0 & -k_{1N} \\ -k_{1N} & 0 \\ 0 & -k_{1N} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}_{h1} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_1 & 0 & 0 \\ \omega_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_1 \\ 0 & 0 & -\omega_1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}_{hN} = \begin{pmatrix} 0 & -N\omega_1 & 0 & 0 \\ N\omega_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N\omega_1 \\ 0 & 0 & -N\omega_1 & 0 \end{pmatrix},$$

© Пересада С.М., Ковбаса С.М., Зайченко Ю.М., Решетник В.С., 2018

ORCID ID: *<http://orcid.org/0000-0001-8948-722X>; ** <http://orcid.org/0000-0002-2954-455X>;

<http://orcid.org/0000-0002-2933-7737>; * <https://orcid.org/0000-0002-8428-0446>

де ω_1 – кутова частота першої гармоніки, $k_{11} \dots k_{1N}$ – коефіцієнти зворотних зв'язків спостерігача.

Спостерігач (2) забезпечує асимптотичне оцінювання всіх N гармонік або будь-яку наперед визначену їхню кількість з властивостями селективності, що досягається відповідним налаштуванням матриці коефіцієнтів зворотних зв'язків \mathbf{K}_h [2, 7].

Основна гармоніка у струмі навантаження в системі координат (d-q) представляється у вигляді двох сигналів постійного струму: x_{d0} – сигналу активної складової струму по осі d та x_{q0} – сигналу реактивної складової струму по осі q. Таким чином, струми навантаження (1) з урахуванням основної гармоніки можна представити у вигляді

$$i_{Ld} = x_{d0} + \sum_{i=1}^N (x_{dpi} + x_{dni}), \quad i_{Lq} = x_{q0} + \sum_{i=1}^N (x_{qpi} + x_{qni}). \quad (3)$$

Синтез контурів регулювання струмів. Відповідно до принципу функціонування ПАФ, баланс струмів у фазах в системі координат (d-q) записується у вигляді $\mathbf{i}_m = \mathbf{i}_L + \mathbf{i}$, де $\mathbf{i}_m = (i_{md}, i_{mq})^T$ – струм мережі, $\mathbf{i} = (i_d, i_q)^T$ – струм фільтра. ПАФ має здійснювати компенсацію гармонічних спотворень та реактивної потужності так, щоб забезпечити наявність у струмі мережі \mathbf{i}_m лише активної компоненти струму x_{d0} . Для досягнення такої компенсації струм фільтра \mathbf{i} повинен формуватися як сума гармонічних спотворень та реактивної компоненти струму навантаження з протилежним знаком. Таким чином, цілі керування можуть бути записані у вигляді

$$\lim_{t \rightarrow \infty} i_d = i_{Ld} - x_{d0} = \sum_{i=1}^N (x_{dpi} + x_{dni}), \quad \lim_{t \rightarrow \infty} i_q = i_{Lq} = x_{q0} + \sum_{i=1}^N (x_{qpi} + x_{qni}). \quad (4)$$

За умови, що напруга ланки постійного струму активного фільтра V_{DC} підтримується на достатньому для компенсації рівні, динаміка струмів ПАФ задається рівняннями [3]

$$\dot{\mathbf{i}} = \begin{bmatrix} -R/L & \omega_1 \\ -\omega_1 & -R/L \end{bmatrix} \mathbf{i} - \frac{V_{DC}}{L} \mathbf{u}^* + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} U_m \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де U_m – амплітуда напруги мережі; R, L – активний опір та індуктивність згладжуючого дроселя, \mathbf{u}^* – керуючий вектор напруги фільтра.

Для досягнення цілей керування (4) сконструюємо лінеаризуючий зворотним зв'язком регулятор у вигляді

$$\mathbf{u}^* = \frac{1}{V_{DC}} \left\{ \begin{bmatrix} 0 & \omega_1 L \\ -\omega_1 L & 0 \end{bmatrix} \mathbf{i} + \begin{pmatrix} U_m \\ 0 \end{pmatrix} - \mathbf{v} \right\}, \quad V_{DC} > 0, \quad (6)$$

де $\mathbf{v} = (v_d, v_q)^T$ – додаткові керуючі дії, які будуть синтезовані далі.

Після підстановки (6) у (5) отримаємо

$$\dot{i}_d = -(R/L)i_d + L^{-1}v_d, \quad \dot{i}_q = -(R/L)i_q + L^{-1}v_q. \quad (7)$$

Оцінки струмів (3) запишуться як $\hat{i}_{Ld} = \hat{x}_{d0} + \sum_{i=1}^N (\hat{x}_{dpi} + \hat{x}_{dni})$, $\hat{i}_{Lq} = \hat{x}_{q0} + \sum_{i=1}^N (\hat{x}_{qpi} + \hat{x}_{qni})$, а їхні похибки оцінювання – $\tilde{i}_{Ld} = i_{Ld} - \hat{i}_{Ld} = \tilde{x}_{d0} + \sum_{i=1}^N (\tilde{x}_{dpi} + \tilde{x}_{dni})$, $\tilde{i}_{Lq} = i_{Lq} - \hat{i}_{Lq} = \tilde{x}_{q0} + \sum_{i=1}^N (\tilde{x}_{qpi} + \tilde{x}_{qni})$, $\tilde{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_1 - \hat{\mathbf{x}}_1$.

Оскільки спостерігач гармонік (2) не забезпечує оцінювання складових постійного струму x_{d0}, x_{q0} , то ці компоненти можна оцінити за допомогою фільтра низьких частот у вигляді

$$\dot{\hat{x}}_{d0} = -\tau_f^{-1} \hat{x}_{d0} + \tau_f^{-1} i_{Ld}, \quad \dot{\hat{x}}_{q0} = -\tau_f^{-1} \hat{x}_{q0} + \tau_f^{-1} i_{Lq}, \quad (8)$$

в якому стала часу τ_f така, що складові вищих гармонік після фільтрації можна вважати нехтувано малими. Таким чином, виходячи з мети керування (4), завдання для струмів фільтра запишуться як $\dot{i}_d^* = \sum_{i=1}^N (\dot{\hat{x}}_{dpi} + \dot{\hat{x}}_{dni})$, $\dot{i}_q^* = \dot{\hat{x}}_{q0} + \sum_{i=1}^N (\dot{\hat{x}}_{qpi} + \dot{\hat{x}}_{qni})$, де сигнали $\sum_{i=1}^N (\dot{\hat{x}}_{dpi} + \dot{\hat{x}}_{dni})$, $\sum_{i=1}^N (\dot{\hat{x}}_{qpi} + \dot{\hat{x}}_{qni})$ задаються спостерігачем (2), а $\dot{\hat{x}}_{q0}$ є виходом фільтра (8).

Для синтезу алгоритму керування струмами запишемо рівняння (7) у формі похибок відпрацювання

$$\dot{\tilde{i}}_d = -(R/L)\tilde{i}_d - (R/L)\tilde{i}_d^* + L^{-1}v_d - \dot{i}_d^*, \quad \dot{\tilde{i}}_q = -(R/L)\tilde{i}_q - (R/L)\tilde{i}_q^* + L^{-1}v_q - \dot{i}_q^*, \quad (9)$$

де $\tilde{i}_d = i_d - \dot{i}_d^*$, $\tilde{i}_q = i_q - \dot{i}_q^*$ – похибки регулювання струмів фільтра, $\dot{i}_d^* = \sum_{i=1}^N (\dot{\hat{x}}_{dpi} + \dot{\hat{x}}_{dni})$, $\dot{i}_q^* = \dot{\hat{x}}_{q0} + \sum_{i=1}^N (\dot{\hat{x}}_{qpi} + \dot{\hat{x}}_{qni})$ –

відомі функції. Сформуємо керуючі дії v_d, v_q у (9) як

№ гармоніки	Частота, Гц	Амплітуда, А	Зсув фази, рад
1	50	10	$\pi/6$
5	250	5	$\pi/5$
7	350	3	$\pi/7$
11	550	1	$\pi/11$
13	650	1	$\pi/13$
17	850	1	$\pi/17$
19	950	1	$\pi/19$
23	1150	1	$\pi/23$

$$\begin{aligned} v_d &= L[(R/L)i_d^* + \dot{i}_d^* - k_{ii}\tilde{i}_d + z_d], & \dot{z}_d &= -k_{ii}\tilde{i}_d, \\ v_q &= L[(R/L)i_q^* + \dot{i}_q^* - k_{ii}\tilde{i}_q + z_q], & \dot{z}_q &= -k_{ii}\tilde{i}_q, \end{aligned} \quad (10)$$

де z_d, z_q – інтегральні складові регуляторів струму, k_{ii}, k_{ii} – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму.

Після підстановки алгоритму (10) у (9) отримуємо рівняння динаміки струмів

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{i}}_d &= -k_{ii}\tilde{i}_d, & \dot{\tilde{i}}_q &= -k_{ii}\tilde{i}_q, \\ \dot{\tilde{y}}_d &= -k_{ii}\tilde{i}_d + z_d, & \dot{\tilde{y}}_q &= -k_{ii}\tilde{i}_q + z_q, \end{aligned} \quad (11)$$

де $k_i = (R/L) + k_{ii}$.

Лінійні системи другого порядку (11), що описують динаміку контурів регулювання струмів, асимптотично стійкі для всіх $k_i, k_{ii} > 0$, тому маємо $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{i}_d = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{i}_q = 0$, а оскільки спостерігач (2) і фільтр (8) гарантують асимптотичність оцінювання так, що $\lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N (\tilde{x}_{dpi} + \tilde{x}_{dni}) = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{i}_{Lq} = 0$, то струми мережі будуть

$\lim_{t \rightarrow \infty} i_{md} = \lim_{t \rightarrow \infty} (i_{Ld} - i_d) = x_{d0}$, $\lim_{t \rightarrow \infty} i_{mq} = \lim_{t \rightarrow \infty} (i_{Lq} - i_q) = 0$, тобто цілі керування компенсацією вищих гармонік та реактивної потужності досягаються.

Результати математичного моделювання. Результати дослідження системи керування струмами паралельного активного фільтра на основі інформації про гармонічний склад мережі, отриманої від спостерігача, показано на рис. 1. Гармонічний склад струму мережі, що використовувався в рамках тестування, представлено в таблиці. Параметри фільтра $R = 0.12 \hat{\Omega}$, $L = 3 \hat{\Omega}$, коефіцієнти регулятора струму $k_{ii} = 70$, $k_{ii} = 200$, стала часу фільтра (8) $\tau_f = 0.05$ с. Коефіцієнти спостерігача (2) розраховані згідно з [7]: $k_{iN} = \delta \omega_{nN}$, $\omega_{nN} = (1 - 2\delta^2)^{-1} N \omega_1$, $\delta = 0.001$.

Як видно з графіків перехідних процесів, розроблені контури регулювання струмів забезпечують асимптотичне відпрацювання струму та компенсацію гармонічних спотворень. З порівняння FFT аналізу струмів навантаження та мережі встановлюємо повну компенсацію гармонічного складу. Форма кривих напруги та струму мережі підтверджує компенсацію реактивної складової. Також відзначаємо асимптотичне оцінювання активної та реактивної компонент струму основної гармоніки. Тривалість оцінювання та компенсації становить приблизно 0.2 с.

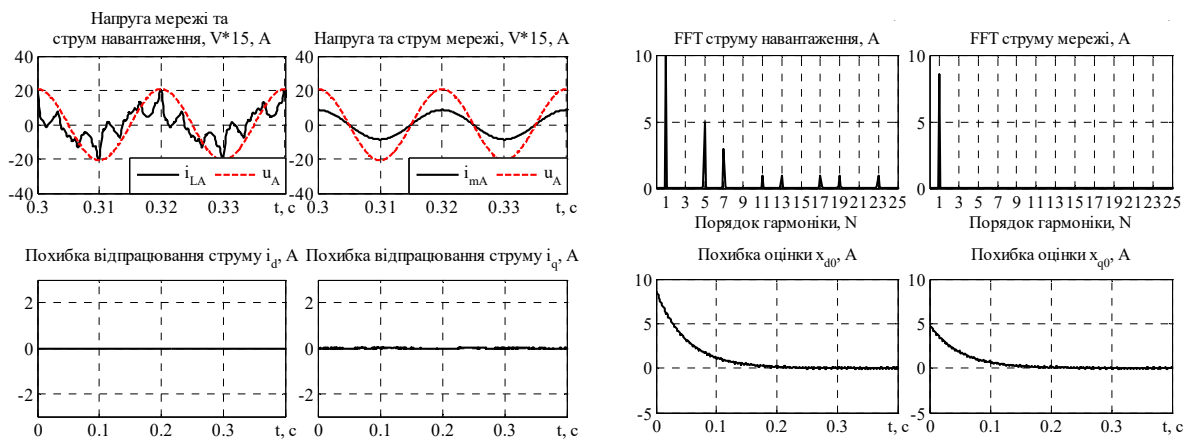


Рис. 1

Для перевірки властивостей селективної компенсації гармонічний склад мережі утворено із суми основної гармоніки з амплітудою 10 А і зсувом фази $\pi/6$ рад та вищих гармонік з порядком до 22-го, які мають амплітуди 7, 5 і 3 А для гармонік $N = 5$, $N = 7$, $N = 11$ відповідно, і амплітуду 1 А для всіх інших гармонік. Зсув фаз вищих гармонік встановлено рівним π/N рад. За умовами тесту необхідно компенсувати гармоніки $N = 5$, $N = 7$ і $N = 11$. Результати математичного моделювання представлено на рис. 2, де показано форму напруги мережі, струму навантаження, струму мережі, похибки відпрацювання струму контурами регулювання, FFT струмів навантаження мережі та фільтра, а також амплітудно-частотну характеристику похибки компенсації струму, розраховану у вигляді $\tilde{i}_c = \sqrt{\tilde{i}_{mA}^2 - \tilde{i}_A^2}$. З графіків перехідних процесів, показаних на рис. 2, видно, що розроблений алгоритм керування забезпечує асимптотичне відпрацювання струмів, тоді як результати FFT аналізу струмів мережі, навантаження та фільтра підтверджують властивості селективної компенсації гармонік. З графіка амплітудно-частотної характеристики похибки компенсації видно, що для кожної компенсованої гармоніки у системі забезпечується вузька полоса пропускання, тобто оцінювання кожної гармоніки здійснюється незалежно від інших.

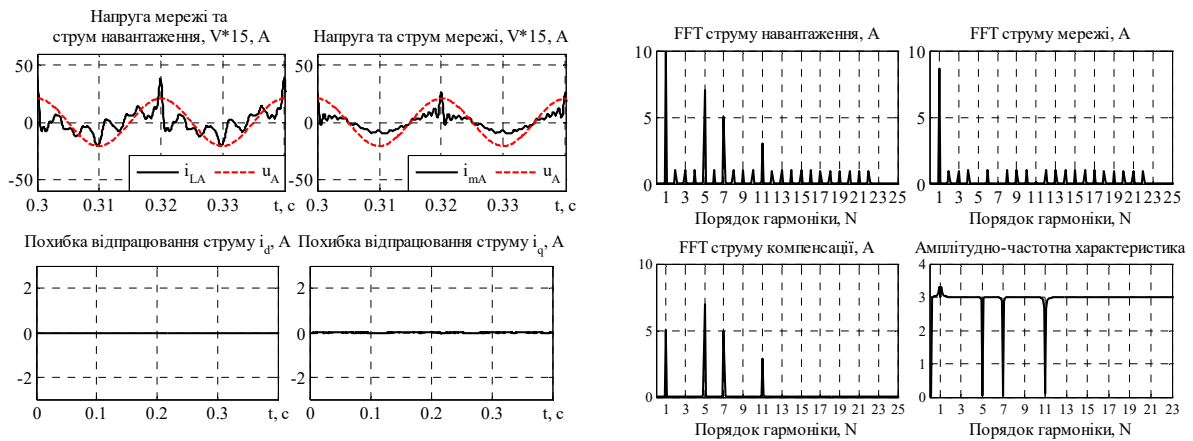


Рис. 2

Висновки. Розроблено новий нелінійний алгоритм керування струмами паралельного активного фільтра, який гарантує їхнє асимптотичне відпрацювання та не вимагає «великих» коефіцієнтів підсилення. Методом математичного моделювання показано, що запропоноване рішення забезпечує асимптотичне регулювання струмів фільтра та в поєднанні з селективним спостерігачем гармонік дає змогу досягти вибіркової компенсації гармонік струму. Представлений алгоритм керування струмами паралельного активного фільтра є більш простим з точки зору практичної реалізації та забезпечує більш високу заводозахищеність.

1. Schwanz D., Bagheri A., Bollen M. and Larsson A. Active harmonic filters: Control techniques review, 2016. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, 2016. Pp. 36-41.
2. Ronchi F. and Tilli A. Three-phase positive and negative sequences estimator to generate current reference for selective active filters. IEEE Mediterranean conference on control and automation. MED2002, Lisbon, 2002.
3. Ronchi F., Tilli A. Design methodology for shunt active filters. Proc. 10th EPE-PEMC 2002, Cavtat & Dubrovnik, Croatia, September 2002.
4. Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, Wiley-IEEE Press, 2017. 472 p.
5. Liu H., Hu H., Chen H., Zhang L., and Xing Y. Fast and Flexible Selective Harmonic Extraction Methods Based on the Generalized Discrete Fourier Transform. IEEE Trans. Power Electron. 2017. Vol. PP. No 99. Pp. 1-1.
6. Fortescue L. Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1918. Vol. XXXVII. No 2. Pp. 1027-1140.
7. Peresada S., Mykhalskyi V., Zaichenko Y., Kovbasa S. Selective and adaptive harmonics estimation for three-phase shunt active power filters. Tekhnichna Elektrodynamika. 2018. No 2. Pp. 29-38. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2018.02.029>

УДК 621.314.5

СЕЛЕКТИВНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ

С.М. Пересада, докт.техн.наук, С.М. Ковбаса, канд.техн.наук, Ю.М. Зайченко, В.С. Решетник

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина. E-mail: sergei.peresada@gmail.com

Синтезирован новый нелинейный алгоритм регулирования токов параллельного активного фильтра, который обеспечивает их асимптотическую отработку и, в отличие от существующих решений, не требует «больших» коэффициентов усиления, что позволяет существенно упростить практическую реализацию и повысить помехоустойчивость системы. Представлены результаты математического моделирования, которые подтверждают теоретические выводы, а также демонстрируют эффективность предложенного решения для параллельных активных фильтров с селективной компенсацией гармоник. Библ. 7, табл. 1, рис. 2.

Ключевые слова: силовой активный фильтр, высшие гармоники, наблюдатель.

SELECTIVE COMPENSATION OF THREE-PHASE CURRENT HARMONICS

S. Peresada, S. Kovbasa, Y. Zaichenko, V. Reshetnyk

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: sergei.peresada@gmail.com

A new nonlinear algorithm for shunt active power filter current control is designed. Proposed solution provides asymptotic current tracking and, unlike existing solutions, does not require "high-gain" control. Such approach simplifies the practical implementation and increases the system noise immunity. Simulation results confirms theoretical findings and demonstrate the effectiveness of the proposed solution for shunt active power filters with selective harmonics compensation. References 7, table 1, figures 2.

Key word: active power filter, higher-order harmonics, observer.

Надійшла 02.03.2018
Остаточний варіант 13.03.2018