

УДК 621.314

ФОРМУВАННЯ ВХІДНОГО СТРУМУ МАТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА В УМОВАХ СПОТВОРЕНЬ НАПРУГИ МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ

В.М. Михальський^{1*}, докт.техн.наук, В.М. Соболев¹, канд.техн.наук, В.В. Чопик¹, канд.техн.наук, І.А. Шаповал^{1**}, канд.техн.наук, М.Ю. Артеменко², докт.техн.наук

¹ – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,

E-mail: mikhalsky@ied.org.ua

² – Національний технічний університет України «КПІ»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

E-mail: artemenko_m_ju@ukr.net

Розроблено і досліджено способи керування матричним перетворювачем (МП) на основі алгоритму регулювання вхідної реактивної потужності МП, які спрямовані на поліпшення якості вхідних струмів МП в умовах несинусоїдальної системи напруг мережі живлення. З цією метою розглянуто варіанти завдання напрямку просторового вектора вхідного струму по відношенню до просторового вектора вхідної напруги за рахунок відповідного регулювання реактивної складової вхідного струму. Моделювання показало дієвість запропонованого підходу для підвищення якості вхідних струмів МП. Бібл. 7, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: матричний перетворювач, вхідний струм, реактивна потужність, несинусоїдальність.

Вступ. Зважаючи на відсутність у силовій схемі проміжних накопичувачів електроенергії, матричні перетворювачі (МП) чутливі до несинусоїдальності системи напруг мережі живлення, що проявляється у спотворенні форми споживаних з мережі струмів. Цей аспект розглянуто у численних публікаціях, наприклад, у відомих роботах [2]–[5], [7]. Пропозиції щодо поліпшення форми вхідних струмів МП наведено у тому числі в [6]. Загальним для цих пропозицій є процес регулювання реактивної потужності шляхом встановлення коефіцієнта передачі вихідного струму у реактивну складову вхідного струму. Цей коефіцієнт передачі входить до складу елементів матриці керуючих функцій силовими ключами МП [1], [6]. Модуляція реактивної складової вхідного струму на періоді частоти мережі живлення не впливає на забезпечення потрібної для навантаження активної потужності. Динамічна модуляція полягає у виборі напрямку опорного вектора, який збігається з напрямком просторового вектора вхідного струму, його прив'язки до деякого іншого вектора або векторів і визначенні особливостей розташування цього опорного вектора у процесі керування.

Метою статті є розробка і перевірка на математичній моделі способів керування МП на загальній базі алгоритму регулювання вхідної реактивної потужності МП [1], [6], які спрямовані на поліпшення якості вхідних струмів МП в умовах спотвореної системи напруг мережі живлення.

У випадку, коли просторовий вектор вихідного струму МП \vec{i}_o відомий, просторовий вектор вхідного струму дорівнює [1]

$$\vec{i}_i = (q \cos \varphi_o - jb) \hat{I}_o e^{j\theta_i} = q[1 - j \tan \varphi_i] \hat{I}_o \cos \varphi_o e^{j\theta_i}, \quad (1)$$

де q – коефіцієнт передачі напруги, φ_o та φ_i – поточні кути зсуву фаз між просторовими векторами напруги та струму на виході та на вході МП, θ_i – поточне значення куткового положення просторового вектора вхідної напруги, \hat{I}_o – модуль просторового вектора вихідного струму,

$$b = q \cos \varphi_o \tan \varphi_i \quad (2)$$

– коефіцієнт передачі вихідного струму в реактивну складову вхідного струму, який входить до складу елементів матриці керуючих функцій силовими ключами МП [1].

Динамічна модуляція параметра b здійснюється за рахунок зміни куткового співвідношення між вектором складової прямої послідовності (основної гармоніки) вхідної напруги МП $\vec{u}_{ip} = \hat{U}_{ip} e^{j(\omega t + \alpha_{ip})}$, модуляційним (опор-

ним) вектором $\vec{v} = \hat{U}_{ip} e^{j(\omega t + \alpha_{ip})} + \Delta \vec{v}$ і вектором спотворення $\Delta \vec{u}_i = \Delta \hat{U} e^{j\Delta \theta_i}$, як складовою зворотної послідовності або сумою вищих гармонічних складових (чи те й інше разом). У роботі [6] наведено загальні формули для розрахунку параметра b при виборі можливих співвідношень $\Delta \vec{v} = 0$ і $\Delta \vec{v} = \pm \Delta \vec{u}_i$, а також детально розглянуто приклад живлення перетворювача від несиметричної синусоїдальної мережі. В даній статті розглядається живлення від симетричної системи спотворених напруг за наявності у них вищих гармонічних складових.

Якщо $\Delta \vec{v} = \Delta \vec{u}_i$, то напрямок вектора вхідного струму збігається з напрямком вектора вхідної напруги

МП, тобто $\varphi_i=0=\text{const}$ і, таким чином, модуляція реактивної складової струму відсутня.

У випадку, коли $\Delta\bar{u} = -\Delta\bar{u}_i$ і $\Delta\bar{v} = 0$, коефіцієнт передачі вихідного струму в реактивну складову вхідного струму дорівнює [6]:

Таблиця

$N_{\text{гарм}}$	$U_i\%$	$\angle^\circ U_i$	$I_i\%$	$I_{\text{имод}}\%$
1	100	0	100	100
5	5.6	20	2.05	3.02
7	2.3	90	5.76	2.93
11	2.7	169	1.50	0.61
13	1.7	-179	2.55	0.78
17	1.6	-69	0.87	0.24
19	1	-70	1.35	0.40

$$b = \frac{2k_u \hat{U}_o \cos \varphi_o \sin \gamma}{\hat{U}_{ip} [1 - k_u^2] \sqrt{1 + k_u^2 + 2k_u \cos \gamma}} \quad (3)$$

або

$$b = \frac{k_u \hat{U}_o \cos \varphi_o \sin \gamma}{\hat{U}_{ip} (1 + k_u \cos \gamma) \sqrt{1 + k_u^2 + 2k_u \cos \gamma}} \quad (4)$$

відповідно, де γ – поточний кут між векторами \bar{u}_{ip} і $\Delta\bar{u}_i$, \hat{U}_o і \hat{U}_{ip} – амплітуди вихідної напруги та основної гармоніки вхідної напруги, $k_U = |\Delta u_i| / \hat{U}_{ip}$ – коефіцієнт спотворення вхідної напруги МП.

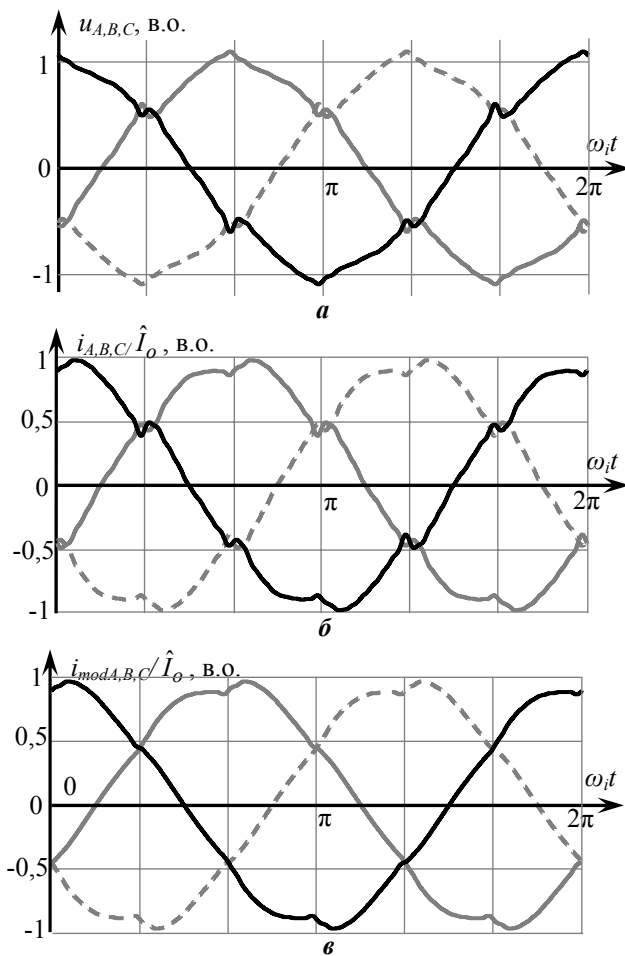


Рис. 1

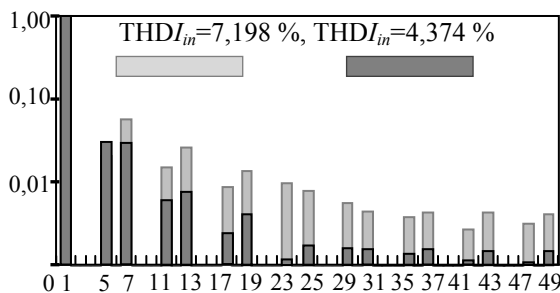


Рис. 2

Моделювання вхідних струмів МП показало перевагу способу модуляції параметра b за співвідношенням (4) при довільному наборі гармонічного складу напруг мережі живлення, тому наведені результати відповідають цьому способу. В процесі моделювання виявлено значну залежність форми вхідних струмів не тільки від наявних амплітуд гармонічних складових напруги, але й від початкових фаз цих складових, що не дозволило отримати узагальнену оцінку ступеня поліпшення якості вхідних струмів. З цієї причини для вихідних даних при моделюванні взято результати вимірювання гармонічного складу трифазної системи напруг реального промислового об'єкта. В таблицю зведено домінуючі складові вхідної напруги МП та вхідного струму (у відсотках до основної гармоніки) при «жорсткому» алгоритмі з постійним вхідним зсувом фаз та при алгоритмі з динамічною модуляцією цього зсуву. Параметри керування та навантаження МП $\hat{U}_o / \hat{U}_{ip} = 0,7$; $\cos \varphi_o = 0,8$.

На рис. 1, а показано криві напруг мережі живлення, б – криві спотвореного вхідного струму, в – криві вхідного струму з динамічною модуляцією. На рис. 2 у логарифмічному масштабі показано порівняльну діаграму гармонічного складу вхідного струму для «жорсткого» алгоритму та для алгоритму з динамічною модуляцією. Для кривих, зображених на рис. 1, б та в, розраховано сумарний коефіцієнт гармонік струму THDI.

Висновки.

Основою алгоритму підвищення якості вхідних струмів МП є вибір напрямку просторового вектора струму по відношенню до просторового вектора вхідної напруги. Оскільки всі складові вхідної напруги і їхні співвідношення між собою є функціями часу, то фазовий зсув між просторовими векторами напруги і струму повинен бути змінним на періоді частоти вхідної напруги. Зміна напрямку вектора струму здійснюється шляхом регулювання його реактивної складової. Таким чином, спосіб керування вхідною реактивною потужністю МП безпосередньо впливає на показники якості споживаних з мережі струмів. Показано зв'язок між способом модуляції напрямку просторового вектора вхідного струму і безпосереднім завданням та реалізацією його реактивної складової. Продемонстровано підвищення якості вхідного струму МП за допомогою наведеного способу в умовах спотворення напруг мережі живлення на прикладі реального промислового об'єкта.

1. Михальський В.М., Соболев В.М., Шаповал І.А., Чотик В.В. Максимізація діапазону керування матричними перетво-

ривачами // Технічна електродинаміка. – 2015. – №1. – С. 7–13.

2. *Blaabjerg F., Casadei D., Klumpner C., Matteini M.* Comparison of two current modulation strategies for matrix converters under unbalanced input voltage conditions // IEEE Trans. on Industrial Electronics. – April 2002. – Vol. 49. – No 2. – Pp. 289–295.

3. *Casadei D., Serra G., Tani A.* A general approach for the analysis of the input power quality in matrix converters // Proc. IEEE-PESC '96, Baveno, Italy. – June 23-27, 1996. – Vol. II. – Pp. 1128–1134.

4. *Casadei D., Serra G., Tani A.* Reduction of the input current harmonic content in matrix converters under input/output unbalance // Proc. of IEEE-IECON '95, Orlando, Florida. – 6-10 Nov. 1995. – Vol. I. – Pp. 457–462.

5. *Casadei D., Serra G., Tani A.* Reduction of the input current harmonic content in matrix converters under input/output unbalance // IEEE Trans. on Industrial Electronics. – June 1998. – Vol. 45. – No 3. – Pp. 401–411.

6. *Mykhalskyi V.M., Sobolev V.M., Chopyk V.V., Polishchuk S.Y., Shapoval I.A.* Matrix converter control strategy maximizing reactive power transfer // Proceeding of the International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – Kyiv (Ukraine). – June 02-06, 2014. – Pp. 26–31.

7. *Nielsen P., Casadei D., Serra G., Tani A.* Evaluation of the input current quality by three different modulation strategies for SVM controlled matrix converters with input voltage unbalance // Proc. of IEEE-PEDES '96, New Delhi, India, Jan. 8-11, 1996. – Vol. II. – Pp. 794–800.

УДК 621.314

ФОРМИРОВАНИЕ ВХОДНОГО ТОКА МАТРИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ИСКАЖЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

В.М. Михальский¹, докт.техн.наук, **В.Н. Соболев¹**, канд.техн.наук, **В.В. Чопик¹**, канд.техн.наук, **И.А. Шаповал¹**, канд.техн.наук, **М.Ю. Артеменко²**, докт.техн.наук

¹ – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

E-mail: mikhalsky@ied.org.ua

² – Национальный технический университет Украины «КПИ»,

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

E-mail: artemenko_m_ju@ukr.net

Разработаны и исследованы способы управления матричным преобразователем (МП) на основе алгоритма регулирования входной реактивной мощности МП, которые направлены на улучшение качества входных токов МП в условиях несинусоидальной системы напряжений питающей сети питания. С этой целью рассмотрены варианты задания направления пространственного вектора входного тока по отношению к пространственному вектору входного напряжения за счет соответствующего регулирования реактивной составляющей тока. Моделирование показало действенность предложенного подхода для повышения качества входных токов МП. Библи. 7, табл. 1, рис. 2.

Ключевые слова: матричный преобразователь, входной ток, реактивная мощность, несинусоидальность.

THE MATRIX CONVERTER INPUT CURRENT FORMATION IN THE CASE OF INPUT VOLTAGE DISTORTIONS

V.M. Mykhalskyi¹, V.M. Sobolev¹, V.V. Chopyk¹, I.A. Shapoval¹, M.Yu. Artemenko²

¹ – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy pr., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine,

E-mail: mikhalsky@ied.org.ua

² – National Technical University of Ukraine "KPI",

Peremohy pr., 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: artemenko_m_ju@ukr.net

The matrix converter (MC) control methods based on MC input reactive power control algorithm, which aims to improve the quality of the MC input currents under conditions of non-sinusoidal voltages of the power network have been developed and studied. With this purpose, variants of setting the direction of the input current space vector relative to the input voltage space vector by appropriate regulation of the reactive component of the current have been considered. The simulation showed the effectiveness of the proposed approach to improve the quality of the MC input currents. References 7, table 1, figures 2.

Key words: matrix converter, input current, reactive power, non-sinusoidal input voltage.

1. *Mykhalskyi V.M., Sobolev V.M., Shapoval I.A., Chopyk V.V.* Maximizing the control range of a matrix converter // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2015. – No 1. – Pp. 7–13. (Ukr)

2. *Blaabjerg F., Casadei D., Klumpner C., Matteini M.* Comparison of two current modulation strategies for matrix converters under unbalanced input voltage conditions // IEEE Trans. on Industrial Electronics. – April 2002. – Vol. 49. – No 2. – Pp. 289–295.

3. *Casadei D., Serra G., Tani A.* A general approach for the analysis of the input power quality in matrix converters // Proc. IEEE-PESC '96, Baveno, Italy. – June 23-27, 1996. – Vol. II. – Pp. 1128–1134.

4. *Casadei D., Serra G., Tani A.* Reduction of the input current harmonic content in matrix converters under input/output unbalance // Proc. of IEEE-IECON '95, Orlando, Florida. – 6-10 Nov. 1995. – Vol. I. – Pp. 457–462.

5. *Casadei D., Serra G., Tani A.* Reduction of the input current harmonic content in matrix converters under input/output unbalance // IEEE Trans. on Industrial Electronics. – June 1998. – Vol. 45. – No 3. – Pp. 401–411.

6. *Mykhalskyi V.M., Sobolev V.M., Chopyk V.V., Polishchuk S.Y., Shapoval I.A.* Matrix converter control strategy maximizing reactive power transfer // Proceeding of the International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – Kyiv (Ukraine). – June 02-06, 2014. – Pp. 26–31.

7. *Nielsen P., Casadei D., Serra G., Tani A.* Evaluation of the input current quality by three different modulation strategies for SVM controlled matrix converters with input voltage unbalance // Proc. of IEEE-PEDES '96, New Delhi, India. – Jan. 8-11, 1996. – Vol. II. – Pp. 794–800.

Надійшла 25.01.2016
Остаточний варіант 23.03.2016