

## РОЗШИРЕННЯ ДІАПАЗОНУ РЕГУЛЮВАННЯ ВХІДНОГО РЕАКТИВНОГО СТРУМУ МАТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ SVD-ПЕРЕТВОРЕННЯ

**В.М.Михальський**, докт.техн.наук, **В.М.Соболев**, канд.техн.наук, **І.А.Шаповал**, канд.техн.наук,  
**С.Й.Поліщук**, канд.техн.наук, **В.В.Чопик**  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна. e-mail: [shapoval@ied.org.ua](mailto:shapoval@ied.org.ua)

*Досліджено методи керування матричними перетворювачами (МП), що засновані на просторово-векторному представленні керуючих функцій та використанні сингулярного розкладання матриць (SVD). Отримано співвідношення матричного представлення керуючих функцій, завдяки яким реалізуються максимально-досяжні можливості силової топології МП. Показано тотожність розглянутих методів керування, які спрямовані на розширення діапазону регулювання вхідного реактивного струму МП для забезпечення електромагнітної сумісності перетворювача з мережею живлення. Бібл. 4, рис. 3.*

**Ключові слова:** матричний перетворювач, реактивна потужність, діапазон регулювання.

В даний час увага багатьох дослідників прикута до методів керування МП, які мають можливість регулювати вхідний коефіцієнт потужності в максимально допустимих межах, обумовлених топологією перетворювача. Для цього використовуються різні математичні підходи та способи узагальненого представлення керуючих функцій МП [1-4], а також спеціальні гібридні алгоритми на базі існуючих (базових) способів керування. Розглядається також глибина регулювання, використання окремих складових (або повного) вихідного струму для формування вхідного реактивного струму. Керування МП, при якому використовується метод сингулярного розкладання матриць (SVD) [2], здійснюється з використанням лише скалярних величин в просторі дійсних чисел та їхніх матричних перетворень. Такий підхід є привабливим з точки зору реалізації його з використанням доступних обчислювальних систем та мікроконтролерів. В той же час, як було показано в [2], даний метод має неповний діапазон регулювання вхідного реактивного струму в порівнянні з іншими підходами. З другого боку, SVD-перетворення координат є математичним засобом чисельного дослідження існуючих алгоритмів керування МП. Шляхом перетворення матриці відносних тривалостей використання ключів МП в координаті  $\alpha\beta$  проводиться SVD-перетворення вкладеної матриці розмірністю  $2 \times 2$ . Завдяки цьому отримуються матриці поворотів у відповідності з кутовими положеннями вхідної та вихідної напруги, а також діагональна матриця коефіцієнтів передачі напруги з входу на вихід та струму з виходу на вхід. Розроблений на цій основі спосіб керування має неповний діапазон регулювання вхідного реактивного струму, оскільки в базовому варіанті досліджувалися алгоритми просторової векторної модуляції та алгоритми Venturini, які не дозволяють повною мірою реалізувати максимальні можливості МП.

Метою роботи є подальший розвиток методу керування МП з використанням сингулярного розкладання матриць шляхом приведення його можливостей керування вхідним реактивним струмом до максимально досяжних. Узагальнені співвідношення для керуючих функцій на основі просторово-векторних підходів [1] визначають способи керування МП з можливістю регулювання вхідного реактивного струму в максимальному діапазоні. Базою для цього є повне рішення передатних рівнянь відносно симетричних складових просторових векторів керуючих функцій  $(\bar{m}_d, \bar{m}_i)$  [3], які дозволяють регулювати реактивну складову вхідного струму,

$$\begin{cases} \bar{u}_{out} = 3(\bar{m}_d \bar{u}_{in}^* + \bar{m}_i \bar{u}_{in})/2, & \bar{m}_d = (q_d + j(b + \nu))e^{-j\varphi_{out}} e^{j(\alpha_{in} + \alpha_{out})}/3, & \bar{u}_{out} = \hat{u}_{in} q_d e^{j\alpha_{out}}, \\ \bar{i}_{in} = 3(\bar{m}_d \bar{i}_{out}^* + \bar{m}_i \bar{i}_{out})/2, & \bar{m}_i = (q_d + j(b - \nu))e^{j\varphi_{out}} e^{j(\alpha_{in} - \alpha_{out})}/3, & \bar{i}_{in} = \hat{i}_{out} e^{j\alpha_{in}} (q_d \cos \varphi_{out} - jb), \end{cases} \quad (1)$$

де символами « $\bar{\phantom{x}}$ » та « $\hat{\phantom{x}}$ » позначено вектори відповідних фізичних величин та їхні модулі,  $q_d$  – коефіцієнт передачі напруги МП,  $b$  – коефіцієнт передачі вихідного струму МП у реактивну складову вхідного струму,  $\nu$  – вільний член, який не відтворюється в виразі для вихідного струму і впливає лише на геометрію векторів симетричних складових на фазовій площині. Отримано співвідношення симетричних складових просторових векторів керуючих функцій, що відповідають методу керування на основі SVD-перетворення, підстановка якого в (1) пояснює принцип регулювання вхідного реактивного струму з реактивної складової вихідного струму

$$\begin{cases} \bar{m}_d = (q_d - q_q) e^{j(\alpha_{in} + \alpha_{out})}/3, & \bar{u}_{out} = \hat{u}_{in} q_d e^{j\alpha_{out}}, \\ \bar{m}_i = (q_d + q_q) e^{j(\alpha_{in} - \alpha_{out})}/3, & \bar{i}_{in} = \hat{i}_{out} e^{j\alpha_{in}} (q_d \cos \varphi_{out} - jq_q \sin \varphi_{out}), \end{cases} \quad (2)$$

де  $q_q$  – коефіцієнт передачі реактивної складової вихідного струму в реактивну складову вхідного струму МП.

Для здійснення поставленої мети проведено деякі аналітичні перетворення виразів (1). Для того, щоб зменшити об'єм обчислень і отримати аналітичні вирази, які залежать лише від коефіцієнта передачі  $b$ , розглядається уявна частина симетричних складових при  $\nu=0$

$$\text{Im}\{\bar{m}_d\} = b e^{-j\varphi_{out}} e^{j(\alpha_{in} + \alpha_{out})}/3, \quad \text{Im}\{\bar{m}_i\} = b e^{j\varphi_{out}} e^{j(\alpha_{in} - \alpha_{out})}/3. \quad (3)$$

Наступним кроком є отримання аналітичних виразів для усереднених відносних тривалостей використання ключів МП у відносних одиницях, які залежать лише від змінних в (3). До отриманих співвідношень застосовується перетворення координат для представлення у вигляді матриці в координатах  $\alpha\beta 0$

$$K \left\{ \left[ \begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{array} \right] \cdot \left[ \begin{array}{c} j \operatorname{Im}\{\bar{m}_d\} \\ j \operatorname{Im}\{\bar{m}_i\} \\ 0 \end{array} \right] \cdot \left[ \begin{array}{c} 1 \\ \bar{a} \end{array} \right]^T \right\}^{\Re} + \frac{1}{3} K^T = \begin{bmatrix} -b \cos(\varphi_{out} - \alpha_{out}) \sin \alpha_{in} & b \cos(\varphi_{out} - \alpha_{out}) \cos \alpha_{in} & 0 \\ b \sin(\varphi_{out} - \alpha_{out}) \sin \alpha_{in} & -b \sin(\varphi_{out} - \alpha_{out}) \cos \alpha_{in} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \bar{a} = e^{j \frac{2\pi}{3}}, \quad (4)$$

де  $K$  – Clarke-перетворення,  $\Re$  – символ дійсної частини для елементів матриці. З отриманого виразу виділимо вкладену матрицю  $M_{\alpha\beta}$ , усі елементи якої мають у своєму складі коефіцієнт передачі  $b$ ,

$$M_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} -b \cos(\varphi_{out} - \alpha_{out}) \sin \alpha_{in} & b \cos(\varphi_{out} - \alpha_{out}) \cos \alpha_{in} \\ b \sin(\varphi_{out} - \alpha_{out}) \sin \alpha_{in} & -b \sin(\varphi_{out} - \alpha_{out}) \cos \alpha_{in} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Сингулярне розкладання для виразу (5) запишеться наступним чином:

$$M_{\alpha\beta} = U_{out} \Sigma U_i^T = \begin{bmatrix} \sin(\varphi_{out} - \alpha_{out}) & -\cos(\varphi_{out} - \alpha_{out}) \\ \cos(\varphi_{out} - \alpha_{out}) & \sin(\varphi_{out} - \alpha_{out}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_{in} & -\sin \alpha_{in} \\ \sin \alpha_{in} & \cos \alpha_{in} \end{bmatrix}^T. \quad (6)$$

Унітарна матриця повороту з кутом  $\varphi_{out} - \alpha_{out}$  у виразі (6) утворює надлишкову математичну конструкцію, в якій необхідно підсумовувати кутове положення вихідного струму МП  $\varphi_{out}$  відносно вихідної напруги та розраховувати гармонічні функції  $\cos$  та  $\sin$  в той час, як базовий спосіб SVD може використовувати заздалегідь розраховані табличні значення цих функцій. Для запобігання надлишковості математичних перетворень вираз (6) можна переписати у вигляді, більш зручному для використання. Шляхом підстановки у діагональну матрицю (6) недиагональних компонентів з використанням аналогічних матриць повороту за кутовими положеннями, як в базовому способі SVD, отримуємо вираз, тотожний виразу (5)

$$M_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{out} & -\sin \alpha_{out} \\ \sin \alpha_{out} & \cos \alpha_{out} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & b \cos \varphi_{out} \\ 0 & -b \sin \varphi_{out} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_{in} & -\sin \alpha_{in} \\ \sin \alpha_{in} & \cos \alpha_{in} \end{bmatrix}^T. \quad (7)$$

Очевидно, що така підстановка не є сингулярним розкладанням виразу (5), оскільки матриця власних векторів отримала недиагональні елементи. З іншого боку, вираз (7) не суперечить виразам базового способу керування з використанням SVD, оскільки виконується співвідношення для коефіцієнта передачі реактивної складової вихідного струму у реактивну складову вхідного струму  $q_q = -b \sin \varphi_{out}$ . Порівняння виразів (1), (2) та (7) показує зв'язок між коефіцієнтами передачі складових вихідного струму при формуванні вхідного реактивного струму. Недиагональний елемент матриці власних векторів  $b \cos \varphi_{out}$  має чіткий фізичний зміст як коефіцієнт передачі активної складової вихідного струму МП у реактивну складову вхідного струму. Використавши (7), отримуємо співвідношення, які дозволяють розширити діапазон регулювання вхідного реактивного струму для методу керування, що використовує сингулярне розкладання

$$M_{abc} = K^T M_{\alpha\beta 0} K = K^T \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & 0 \\ g_{21} & g_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} K, \quad \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{out} & -\sin \alpha_{out} \\ \sin \alpha_{out} & \cos \alpha_{out} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_d & b \cos \varphi_{out} \\ 0 & -b \sin \varphi_{out} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_{in} & -\sin \alpha_{in} \\ \sin \alpha_{in} & \cos \alpha_{in} \end{bmatrix}^T. \quad (8)$$

Реалізація матриці відносних тривалостей використання ключів МП із заданими параметрами (стосовно реактивної складової вхідного струму) здійснюється шляхом примусового розташування елементів отриманої матриці в допустимих межах завдяки функції підмодуляції. Формування цієї функції здійснюється циклічно у відповідності до поточних секторів напруги мережі живлення та співвідношень, представлених наступним чином:

$$M = M_{abc} + \begin{bmatrix} \Delta m_1 & \Delta m_2 & \Delta m_3 \\ \Delta m_1 & \Delta m_2 & \Delta m_3 \\ \Delta m_1 & \Delta m_2 & \Delta m_3 \end{bmatrix}, \quad \begin{array}{l} \text{Sector I, IV} \\ \left\{ \begin{array}{l} \Delta m_1 = -m_{h1 \min} \\ \Delta m_2 = m_{h1 \min} + m_{h3 \min} \\ \Delta m_3 = -m_{h3 \min} \end{array} \right. \end{array}, \quad \begin{array}{l} \text{Sector II, V} \\ \left\{ \begin{array}{l} \Delta m_1 = m_{h2 \min} + m_{h3 \min} \\ \Delta m_2 = -m_{h2 \min} \\ \Delta m_3 = -m_{h3 \min} \end{array} \right. \end{array}, \quad \begin{array}{l} \text{Sector III, VI} \\ \left\{ \begin{array}{l} \Delta m_1 = -m_{h1 \min} \\ \Delta m_2 = -m_{h2 \min} \\ \Delta m_3 = m_{h1 \min} + m_{h2 \min} \end{array} \right. \end{array}, \quad (9)$$

де  $\Delta m_1, \Delta m_2, \Delta m_3$  – мінімальні (в алгебраїчному сенсі) значення елементів  $m_{hk}$  стовбців матриці  $M_{abc}$ .

Спосіб керування МП з використанням екстремальних положень векторів керуючих функцій [3] також засновано на розташуванні цих векторів на межах дозволених значень, але з використанням вільного члена  $v \neq 0$ . Математичне представлення цього способу може бути перетворено та записано у матричній формі, тобто вираз (7) набуде наступного вигляду:

$$M_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{out} & -\sin \alpha_{out} \\ \sin \alpha_{out} & \cos \alpha_{out} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_d & (v \sin \varphi_{out} + b \cos \varphi_{out}) \\ 0 & (v \cos \varphi_{out} - b \sin \varphi_{out}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_{in} & -\sin \alpha_{in} \\ \sin \alpha_{in} & \cos \alpha_{in} \end{bmatrix}^T, \quad (10)$$

де роль вільного члена  $v$  проявляється в додатковому переміщенні векторів керуючих функцій з метою їхнього розташування в екстремальних положеннях для оптимізації комутаційних процесів в силовій схемі МП за рахунок зменшення числа комутацій ключів.

Рисунки ілюструють отримання максимально можливого діапазону регулювання вхідної реактивної потужності МП у відносних одиницях окремо для різних способів її формування з використанням складових вихідної потужності: реактивної (базовий алгоритм SVD) – рис. 1, активної – рис. 2 та повної – рис. 3.

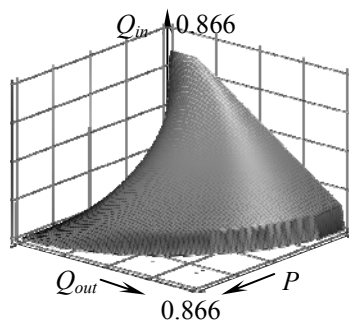


Рис. 1

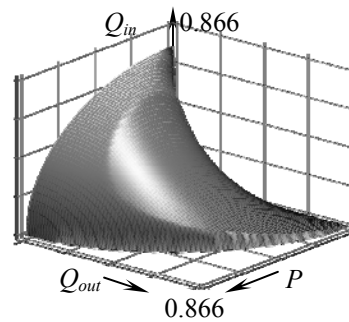


Рис. 2

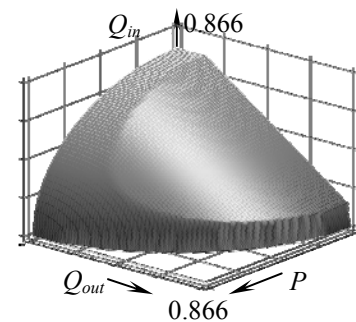


Рис. 3

Представлені в роботі аналітичні дослідження показують як математичну ідентичність, так і розбіжність різних підходів [2–4] до керування вхідним реактивним струмом МП. Ідентичність полягає у використанні єдиних коефіцієнтів передачі напруг та струмів, а розбіжність – у способі математичної інтерпретації. Винятком може бути базовий спосіб керування з використанням SVD, в якому неповною мірою реалізовано формування вхідного реактивного струму, але даний недолік компенсується введенням у виразах (7), (8) додаткових складових для керування цим струмом. Різні способи керування перетворювачем з розширеним діапазоном регулювання вхідного реактивного струму можуть бути математично перетворені один в інший, що дає змогу використовувати той чи інший математичний апарат з точки зору його ефективної реалізації в реальних умовах роботи.

УДК 621.314

#### РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ ВХОДНОГО РЕАКТИВНОГО ТОКА МАТРИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ SVD-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

**В.М.Михальський**, докт.техн.наук, **В.Н.Соболев**, канд.техн.наук, **И.А.Шаповал**, канд.техн.наук,  
**С.И.Полищук**, канд.техн.наук, **В.В.Чопик**  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина,  
e-mail: [shapoval@ied.org.ua](mailto:shapoval@ied.org.ua)

*Исследованы методы управления матричными преобразователями (МП), основанные на пространственно-векторном представлении управляющих функций и использовании сингулярного разложения матриц (SVD). Получены соотношения матричного представления управляющих функций, благодаря которым реализуются максимально-достижимые возможности силовой топологии МП. Показано тождество методов управления, направленных на расширение диапазона регулирования входного реактивного тока МП для обеспечения электромагнитной совместимости преобразователя с питающей сетью. Библ. 4, рис. 3.*

**Ключевые слова:** матричный преобразователь, реактивная мощность, диапазон регулирования.

#### EXTENSION OF THE ADJUSTMENT RANGE OF THE MATRIX CONVERTER INPUT REACTIVE CURRENT BASED ON SVD

**V.M.Mykhalskyi**, **V.M.Sobolev** **I.A.Shapoval**, **S.Y.Polishchuk**, **V.V.Chopyk**  
Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.  
e-mail: [shapoval@ied.org.ua](mailto:shapoval@ied.org.ua)

*The control methods of the conventional matrix converter (CMC) which are based on the space vector approach and singular value decomposition (SVD) are investigated. The matrix representation ratios of control functions obtained thanks to which the maximum achievable power capabilities of the MC topology are implemented. The identity of control methods is demonstrated which are aimed to extend the range of adjustment of the MC input reactive current for EMC of the converter with the mains. References 4, figures 3.*

**Keywords:** matrix converter, reactive power control range.

1. Casadei D., Serra G., Tani A. Matrix converter modulation strategies: a new general approach based on space-vector representation of the switch state // IEEE Trans. on Industrial Electronics. – 2002. – Vol. 49. – No. 2. – Pp. 370–381.
2. Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari, Liuchen Chang A. Generalized Technique of Modeling, Analysis, and Control of a Matrix Converter Using SVD // IEEE Trans. on Industrial Electronics. – 2011. – Vol. 58. – No. 3. – Pp. 949–959.
3. Igney J. and Braun M. A new matrix converter modulation strategy maximizing the control range // Proceeding of the 35th IEEE Power Electronics Conference. – Aachen (Germany). – Jun. 21–24, 2004. – Pp. 2875–2880.
4. Mykhalskyi V.M., Sobolev V.M., Shapoval I.A., Chopyk V.V. Extension of the input reactive power regulation range of a matrix converter by control means // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 2. – Pp. 51–53. (Ukr)

Надійшла 30.01.2014