

**МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
НА БАЗІ МАШИНИ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ З ФУНКЦІЯМИ АКТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ
ТА КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ**

В.М. Михальський*, чл.-кор. НАН України, **В.М. Соболев****, канд.техн.наук, **В.В. Чопик*****, канд.техн.наук, **І.А. Шаповал******, канд.техн.наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна. **E-mail: mikhalsky@ied.org.ua**

Розглянуто нові підходи щодо компенсації реактивної потужності та одночасної активної фільтрації в системі генерування електроенергії на основі машини подвійного живлення (МПЖ). Запропоновані алгоритми керування застосовуються до МПЖ зі статором, безпосередньо підключеним до мережі, і ротором, підключеним до мережі через перетворювач з двонаправленим потоком енергії. Базовий алгоритм керування МПЖ спрямовано першочергово на отримання максимальної потужності вітрогенератора за змінної швидкості вітру. Шляхом компенсації реактивної потужності та гармонік струму мережі реалізується можливість поліпшення якості електроенергії в межах потужності перетворювача. Керування роторним інвертором спрямоване на генерування максимальної активної потужності та поліпшення якості електроенергії. Керування активним випрямлячем має за мету забезпечити плавне регулювання напруги в ланці постійного струму та синусоїдальний струм у мережі. Результати моделювання показують, що поліпшення якості електроенергії відбувається у разі роботи системи генерування у своїй оптимальній точці для широкого діапазону швидкостей вітру. Бібл. 8, рис. 4, табл. 1.

Ключові слова: векторне керування, машина подвійного живлення, активна фільтрація, реактивна потужність.

Вступ. Останнім часом вітрогенератори зі змінною швидкістю використовуються все частіше, вони є більш привабливими, ніж системи з фіксованою швидкістю завдяки ефективному генеруванню, підвищенню якості електроенергії та більшій динамічності під час збоїв у мережі. Системи генерування у вітроенергетиці здебільшого обладнано машиною подвійного живлення (МПЖ) [1–5]. Донедавна вітрогенератори забезпечували лише можливість генерування активної потужності в електричну мережу, а коефіцієнт потужності водночас був близьким до одиниці. Вони були відділені від мережі, щоб уникнути пошкоджень, які могли виникнути після збоїв мережі, оскільки встановлена потужність була незначною, порівнюючи з енергосистемою. Компенсація реактивної потужності здійснювалася традиційними засобами, а активна фільтрація гармонічних струмів досягалася локально за допомогою активних фільтрів, розташованих поблизу нелінійних навантажень [6]. Зі збільшенням встановлених вітрових електростанцій виробництво електроенергії збільшується, але водночас вітрогенератори можуть сприяти підвищенню якості енергії. Використання вітрогенераторів з МПЖ для поліпшення якості електроенергії шляхом одночасної компенсації реактивної потужності та фільтрації гармонічного струму в літературі досліджувалося мало. У роботі [1] були розглянуті компенсація реактивної потужності мережі та активна фільтрація гармонік нелінійних навантажень за допомогою керування роторним перетворювачем. У [1] для виділення компонентів гармонічного струму використовується селективний смуговий фільтр із використанням високого підсилювального ефекту перетворювача для зменшення гармонічного складу струмів мережі. У [2] запропоновано стратегію керування для досягнення можливості фільтрування за допомогою роторного перетворювача, яка використовується для керування пріоритетами функцій вітрогенератора, між генеруванням максимальної активної потужності та підвищенням якості енергії.

Основною метою даної роботи є встановлення взаємозв'язків між новими підходами щодо компенсації реактивної потужності в системі генерування електроенергії на базі машини подвійного живлення та одночасною активною фільтрацією в цій системі.

Алгоритм керування активною й реактивною потужностями МПЖ. У запропонованій системі керування МПЖ ротор живиться від перетворювача, а статор підключено до мережі. Основний алгоритм керування МПЖ першочергово спрямовано на отримання максимальної потужності за змінної швидкості вітру. Для керування використовується метод орієнтації за потоком [7, 8], який дає змогу регулювати активну й реактивну потужності МПЖ незалежно. У блоці керування є два контури регулювання, у яких зовнішній контур призначено для регулювання активної й реактивної потужностей статора, а внутрішній – для регулювання струмів ротора. Вихід регуляторів потужності визначає бажані струми ротора, а вихід регуляторів струму визначає напруги ротора.

Рівняння потокозчеплення статора МПЖ у синхронній системі координат $(d-q)$ можна представити так [7]:

$$\psi_{1d} = i_{1d}L_1 + i_{2d}L_m, \quad \psi_{1q} = i_{1q}L_1 + i_{2q}L_m, \quad (1)$$

де $i_{1d}, i_{1q}, i_{2d}, i_{2q}$ – струми статора і ротора в системі координат $(d-q)$, L_1 – індуктивність статора, L_m – індуктивність намагнічування, індекс 1 стосується величин статора, а індекс 2 – величин ротора.

Побудова алгоритмів векторного керування базується на орієнтації обертової системи координат вздовж одного з векторів стану електричної машини. У даній роботі приймаємо, що вісь q обертової системи координат $(d-q)$ збігається з напрямком вектора магнітного потоку статора ψ_1 , тобто

$$\psi_{1d} \equiv 0, \quad \psi_{1q} = |\psi_1|. \quad (2)$$

За умови орієнтації за потокозчепленням статора зв'язок між струмами та потокозчепленнями може бути записано так:

$$i_{1d}L_1 + i_{2d}L_m = 0, \quad i_{1q}L_1 + i_{2q}L_m = |\psi_1|. \quad (3)$$

Використовуючи наведені вище рівняння, отримуємо зв'язок між струмами ротора і статора

$$i_{1d} = -\frac{L_m}{L_1}i_{2d}, \quad i_{1q} = \frac{|\psi_1|}{L_1} - \frac{L_m}{L_1}i_{2q}. \quad (4)$$

З іншого боку, рівняння напруги статора виглядають так:

$$u_{1d} = R_1 i_{1d} - \omega_1 \psi_{1q} + \frac{d}{dt} \psi_{1d}, \quad u_{1q} = R_1 i_{1q} + \omega_1 \psi_{1d} + \frac{d}{dt} \psi_{1q}, \quad (5)$$

де R_1 – опір статора, ω_1 – кутова швидкість системи координат $(d-q)$ відносно стаціонарної системи координат $(a-b)$.

У сталому стані потокозчеплення статора пропорційне напрузі статора U_1 . Нехтуючи невеликою змінною опором статора, отримаємо

$$u_{1d} = U_1 \approx \omega_1 |\psi_1|, \quad u_{1q} = 0. \quad (6)$$

Отже, за умови орієнтування осі q за потокозчепленням статора напруга лежатиме вздовж осі d . Тоді активна й реактивна потужності статора можуть бути записані як

$$P_1 = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \{ \mathbf{u}_1 \mathbf{i}_1^* \} = \frac{3}{2} (u_{1d} i_{1d} + u_{1q} i_{1q}), \quad Q_1 = \frac{3}{2} \operatorname{Im} \{ \mathbf{u}_1 \mathbf{i}_1^* \} = \frac{3}{2} (u_{1d} i_{1q} - u_{1q} i_{1d}). \quad (7)$$

Підставляючи вирази (4) і (6) у (7), потужність статора, виражена через напругу статора та струм ротора буде мати вигляд [7]

$$P_1 = -\frac{3}{2} U_1 \frac{L_m}{L_1} i_{2d}, \quad Q_1 = \frac{3}{2} U_1 \frac{|\psi_1|}{L_1} - \frac{3}{2} U_1 \frac{L_m}{L_1} i_{2q} = \frac{3}{2} \frac{U_1^2}{\omega_1 L_1} - \frac{3}{2} U_1 \frac{L_m}{L_1} i_{2q}. \quad (8)$$

Рівняння (8) показують, що за умови орієнтації за потокозчепленням статора активні та реактивні потужності відокремлюються і можуть керуватися через струми ротора. За допомогою струму i_{2d} можна контролювати активну потужність, тоді як реактивною потужністю можна керувати за допомогою струму i_{2q} . Використовуючи рівняння (8), задані струми ротора можуть бути обчислені з огляду на задану потужність [7].

Алгоритм компенсації реактивної потужності нелінійного навантаження за допомогою МПЖ.

Величина завдання реактивної потужності для її компенсації в точці загального підключення (ТЗП) розраховується із застосуванням миттєвих значень напруг та струмів, що вимірюються в реальному часі. Миттєва реактивна потужність розраховується як векторний добуток векторів напруги та струму

$$Q = \vec{u} \times \vec{i} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ u_a & u_b & u_c \\ i_a & i_b & i_c \end{vmatrix} = \vec{i} \begin{vmatrix} u_b & u_c \\ i_b & i_c \end{vmatrix} + \vec{j} \begin{vmatrix} u_a & u_c \\ i_a & i_c \end{vmatrix} + \vec{k} \begin{vmatrix} u_a & u_b \\ i_a & i_b \end{vmatrix},$$

де $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – одиничні вектори, $u_{a,b,c}, i_{a,b,c}$ – миттєві фазні напруги та струми. У трифазній трипровідній мережі визначення миттєвої реактивної потужності раціонально записати так:

$$Q_{NLL} = -Q = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_a u_{ab} + i_b u_{cb} + i_c u_{ab}). \quad (9)$$

Активна фільтрація. Розглянемо побудову алгоритму керування МПЖ, який забезпечує поліпшення гармонічного складу струму мережі у разі підключення нелінійного навантаження до ТЗП.

У цьому випадку задані струми ротора i_{2d} та i_{2q} будуть складатися із суми двох частин: i_{2d1}, i_{2q1} – компоненти на основній частоті ($h = 1$), які формуються ПІ-регуляторами активної та реактивної потужностей; i_{2dh}, i_{2qh} містять гармонічні компоненти ($h \neq 1$)

$$i_{2d}^* = i_{2d1} + i_{2dh}, \quad i_{2q}^* = i_{2q1} + i_{2qh}. \quad (10)$$

Активна фільтрація за допомогою роторного перетворювача означає, що в статорі формуються трифазні гармонічні струми, які рівні за величиною та перебувають у протифазі щодо струму гармоніки нелінійного навантаження

$$i_{1dh} = -i_{dh}, \quad i_{1qh} = -i_{qh}. \quad (11)$$

Гармонічні компоненти струмів ротора i_{2dh} та i_{2qh} , що відповідають i_{1dh} та i_{1qh} , визначаються використанням (4), записаним для гармонічного компонента h [4]

$$i_{2dh} = -\frac{L_1}{L_m} i_{1dh} = \frac{L_1}{L_m} i_{dh}, \quad i_{2qh} = \frac{1}{L_m} (|\psi_1| - L_1 i_{1qh}) = \frac{1}{L_m} (|\psi_1| + L_1 i_{qh}). \quad (12)$$

Функціональну схему запропонованої системи керування МПЖ показано на рис. 1.

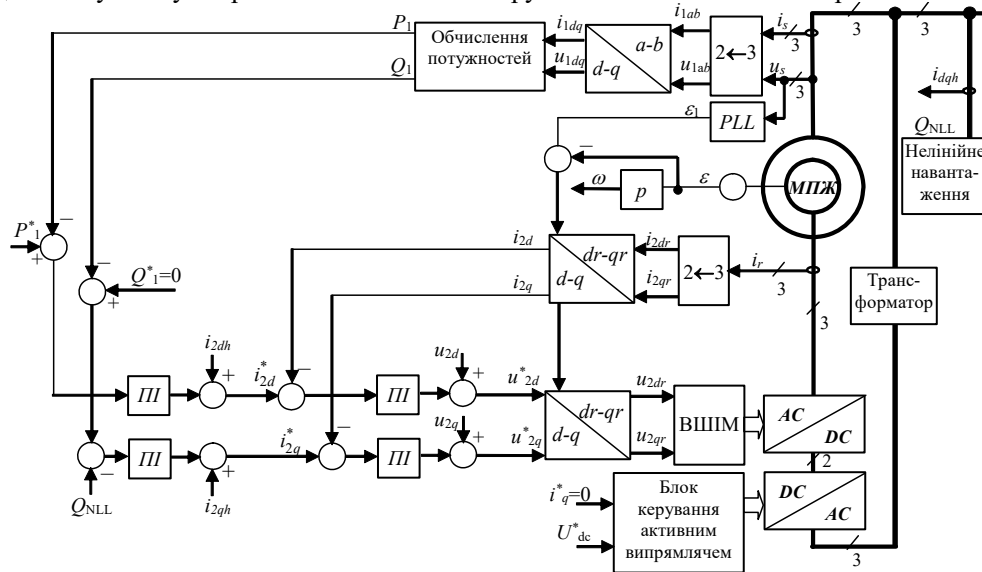


Рис. 1

Результати моделювання. У пакеті прикладних програм Matlab\Simulink з підключеним середовищем Pscs побудовано математичну модель системи генерування електроенергії на основі МПЖ. Під час моделювання було використано МПЖ із такими параметрами: потужність $P=2$ МВт, число пар полюсів $p_n=2$, $J=75$ кгм², $L_1=0,00012$ Гн, $L_2=0,00005$ Гн, $L_m=0,0029$ Гн, $R_1=0,022$ Ом, $R_2=0,0018$ Ом. Статор МПЖ підключається безпосередньо до мережі 690 В, а роторний перетворювач живиться напругою 480 В через трансформатор. У точці загального підключення до мережі також підключаються по чергово діодний випрямляч і тиристорний перетворювач, які складають нелінійне навантаження на рис. 1. Навантаження діодного випрямляча споживає 200 кВт активної потужності, а навантаження тиристорного перетворювача – 100 кВт активної потужності і 180 кВАр реактивної потужності.

До початку роботи запропонованих алгоритмів компенсації відбувається розгін МПЖ до синхронної швидкості обертання ротора (157 рад/с), збудження й підключення статора МПЖ до мережі живлення. Дослідження роботи алгоритму компенсації реактивної потужності та активної фільтрації під час моделювання має таку послідовність дій системи генерування електроенергії, зображеної на рис. 1:

- 1) на інтервалі часу 0-1 с відпрацьовується завдання активної й реактивної потужностей $P_1^*=1,9$ МВт (0,95 в.о.), $Q_1^*=0$;
- 2) на інтервалі часу 1-3 с діодний випрямляч підключено до ТЗП;
- 3) на інтервалі часу 2-3 с діє алгоритм активної фільтрації, спрямований на зменшення 5, 7 та 11-ї гармонік;
- 4) на інтервалі часу 3-4 с діодний випрямляч і активна фільтрація відключені, а підключається тиристорний перетворювач до ТЗП;
- 5) на інтервалі часу 4-5 с діє алгоритм компенсації реактивної потужності;
- 6) на інтервалі часу 5-6 с компенсація реактивної потужності не діє і підключається діодний випрямляч, тобто з моменту часу $t=5$ с працюють і діодний випрямляч, і тиристорний перетворювач;
- 7) на інтервалі часу 6-7 с діють алгоритми активної фільтрації і компенсації реактивної потужності.

На рис. 2 показано результат відпрацювання алгоритму активної фільтрації у разі підключення діодного випрямляча до ТЗП. На рис. 2, а, б показано криві струму і напруги фази А МПЖ і мережі до та після компенсації гармонік на момент часу $t=2$ с. Гармонічний склад струму мережі до і після компенсації гармонік показано на рис. 2, в і г відповідно.

На рис. 3 показано результат відпрацювання алгоритму компенсації реактивної потужності за умови підключення тиристорного перетворювача до ТЗП. На рис. 3, а, б показано криві струму і напруги фази А МПЖ і мережі до та після компенсації реактивної потужності на момент часу $t=4$ с. Активна й реактивна потужності мережі на всьому інтервалі часу 1–7 с представлені на рис. 3, в і г відповідно.

На рис. 4 показано результат одночасного відпрацювання алгоритмів активної фільтрації і компенсації реактивної потужності за умови підключення до ТЗП діодного випрямляча та тиристорного перетворювача одночасно. На рис. 4, а, б показано криві струму і напруги фази А МПЖ і мережі до та після компенсації гармонік і реактивної потужності на момент часу $t=6$ с. Гармонічний склад струму мережі до (рис. 4, в) та після (рис. 4, г)

компенсації чітко демонструють ефективність запропонованої системи для компенсації як реактивної потужності, так і спотворення струму. Струм та напруга МПЖ перебувають у протифазі (режим генератора), причому напруга та її гармонічні складові компенсуються засобами керування МПЖ. У таблиці зведено коефіцієнти гармонічних спотворень струмів навантаження, МПЖ і мережі, а також THD напруг у ТЗП.

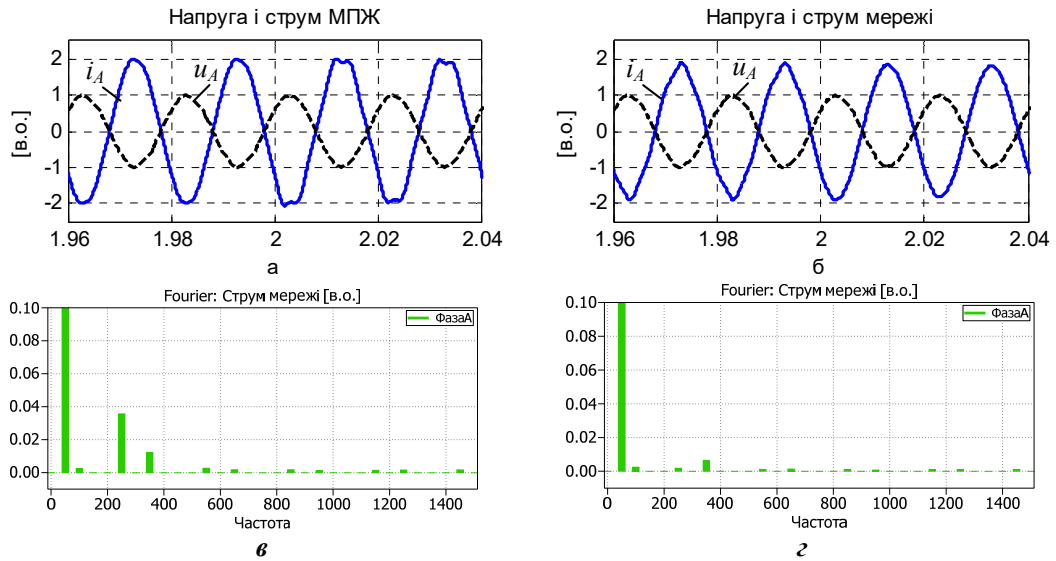


Рис. 2

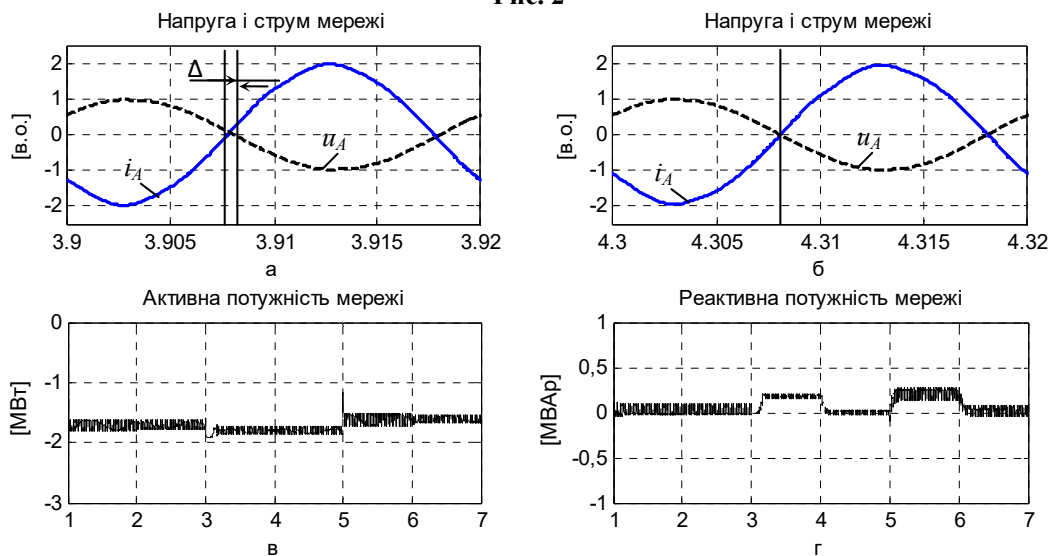


Рис. 3

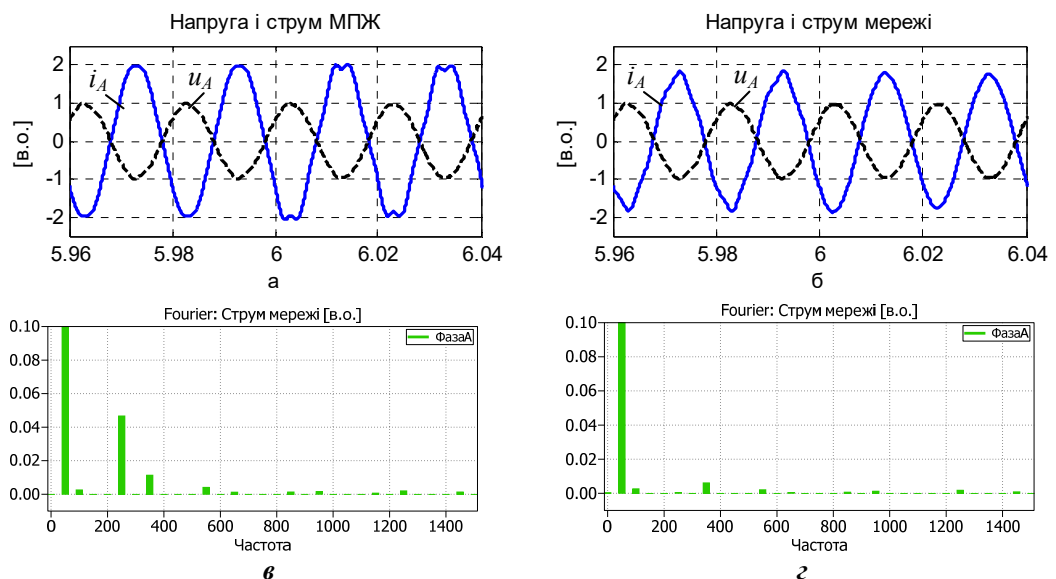


Рис. 4

Навантаження	Період часу, с	THD струму			THD напруги
		Нелінійного навантаження	МПЖ	Мережі	
Діодний випрямляч	1-2	0,473	0,013	0,038	0,018
	2-3	0,544	0,054	0,0076	0,007
Тиристорний перетворювач	3-4	0,2	0,006	0,015	0,008
	4-5	0,2	0,006	0,015	0,008
Діодний випрямляч + тиристорний перетворювач	5-6	0,332	0,016	0,048	0,02
	6-7	0,39	0,068	0,0074	0,006

Висновки. На основі розробленої математичної моделі системи генерування електроенергії з МПЖ виконано математичне моделювання роботи алгоритмів компенсації гармонік і реактивної потужності за умови підключення до ТЗП діодного випрямляча та тиристорного перетворювача при забезпеченні інвертором генерування максимальної активної потужності і гармонічних складових у струмі статора, а активним випрямлячем – плавного регулювання напруги в ланці постійного струму і споживання синусоїдального вхідного струму. Результати моделювання показують ефективність запропонованого підходу. Вибірковий фільтр може бути використаний для компенсації п'ятої, сьомої та одинадцятої (найбільш домінуючих) гармонік.

1. Gaillard A., Poure P., Saadate S., Machmoum M. Variable speed DFIG wind energy system for power generation and harmonic mitigation. *Renewable Energy*. 2009. No 34. Pp. 1545–1553. DOI: <https://www.doi.org/10.1016/j.renene.2008.11.002>
2. Boutoubat M., Mokrani L., Machmoum M. Control of a wind energy conversion system equipped by a DFIG for active power generation and power quality improvement. *Renewable Energy*. 2013. No 50. Pp. 378–386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.058>
3. Pena R., Clare J.C., Asher G.M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation. *IEE Proceedings of Electric Power Applications*. May 1996. Vol. 143. No 3. Pp. 231–241. DOI: <https://www.doi.org/10.1049/ip-epa:19960288>
4. Todeschini G., Emanuel A. Transient response of a wind energy conversion system used as active filter. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2011. Vol. 26. No 2. Pp. 522–531. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2010.2086460>
5. Shapoval I., Clare J., Chekhet E. Experimental study of a matrix converter excited doubly-fed induction machine in generation and motoring. Proc. of 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008). Poznan (Poland), 1–3 Sept. 2008. Pp. 307–312. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2008.4635283>
6. Artemenko M.Yu., Batrak L.M., Polishchuk S.Y., Mykhalskiy V.M., Shapoval I.A. Minimization of Cable Losses in Three-Phase Four-Wire Systems by Means of Instantaneous Compensation with Shunt Active Filters. Proceedings of IEEE XXXIII International Scientific Conference *Electronics and Nanotechnology* (ELNANO 2013). 2013. Pp. 359–362. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2013.6552031>
7. Abad, G., Lopez, J., Rodriguez, M., Marroyo L., Iwanski G. Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation. New Jersey: Wiley, Hoboken, 2011. 625 p. DOI: <https://www.doi.org/10.1002/9781118104965>
8. Peresada S., Tilli A., Tonielli A. Power control of doubly fed induction machine via output feedback. *Control Engineering Practice*. Jan. 2004. Vol. 12. No 1. Pp. 41–57. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(02\)00285-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00285-X)

УДК 621.313

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА БАЗЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ С ФУНКЦИЕЙ АКТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В.М. Михальский, чл.-корр. НАН Украины, **В.Н. Соболев**, канд.техн.наук, **В.В. Чопик**, канд.техн.наук, **И.А. Шаповал**, канд.техн.наук
Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: mikhalsky@ied.org.ua

Рассмотрены новые подходы к компенсации реактивной мощности и одновременной активной фильтрации в системе генерирования электроэнергии на основе машины двойного питания (МДП). Предложенные алгоритмы управления применяются к МДП со статором, непосредственно подключенным к сети, и ротором, подключенным к сети через преобразователь с двунаправленным потоком энергии. Путем компенсации реактивной мощности и гармоник тока сети в пределах мощности преобразователя существует возможность улучшения качества электроэнергии. Управление роторным инвертором направлено на генерирование максимальной активной мощности и улучшение качества энергии. Управление активным выпрямителем предназначено для обеспечения плавного регулирования напряжения в звене постоянного тока и обеспечения синусоидального тока в сети. Результаты моделирования показывают, что система генерирования может работать в своей оптимальной точке, а качество энергии может быть улучшено. Библиограф. 8, рис. 4, табл. 1.

Ключевые слова: векторное управление, машина двойного питания, активная фильтрация, реактивная мощность.

SIMULATION OF THE ELECTRIC POWER GENERATION SYSTEM ON THE BASIS OF DFIG WITH ACTIVE FILTERING CAPABILITIES AND REACTIVE POWER COMPENSATION

V.M. Mykhalskiy, V.M. Sobolev, V.V. Chopyk, I.A. Shapoval
Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: mikhalsky@ied.org.ua

New approaches to reactive power compensation and simultaneous active filtration in the doubly-fed induction machine (DFIM) are considered. The proposed control algorithms are applied to the DFIM with a stator directly connected to the network, and the rotor connected to the network through a converter with a bi-directional energy flow. The main algorithm for controlling the DFIM is primarily aimed at obtaining maximum power at a variable wind speed. Depending on the power of the converter, the power quality can be improved by compensating the reactive power and harmonics of the current of the network. The control of the rotor inverter is aimed at solving the problems of producing the maximum active power captured by the wind and improving the quality of energy. The control of the line side inverter has the goal of ensuring a smooth control of the voltage in the DC link and providing sinusoidal current in the network. The simulation results indicate that the generation system can operate at its optimal point, and energy quality can be improved. References 8, figures 4, table 1.

Key words: vector control, doubly-fed induction machine, active filtration, reactive power.

Надійшла 02.03.2018
Остаточний варіант 19.03.2018