

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-35-39>

УДК 621.314

ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ В СИСТЕМІ ГЕНЕРУВАННЯ ЕНЕРГІЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Бєлоха Г.С.

FREQUENCY CONVERTER IN THE SYSTEM ENERGY GENERATION WIND TURBINES

Bielokha H.S.

В останній час системи перетворення енергії вітру збільшують своє проникнення в електричні мережі в майже усі країни світу. Інтеграція енергії вітру в енергетичні системи спричиняє проблему з точки зору якості електроенергії. У статті розглянуто електричну систему у складі вітрогенераторних установок зі змінною швидкістю обертання ротора, щоб отримати максимальну потужність із вітру. Показано основні задачі керування вітрогенераторних установок то зони роботи вітряків. Приведено огляд перетворювачів частоти. Запропоновано перетворювач частоти (AC-DC-AC) з ланкою постійного струму. До його складу входять вхідний AC/DC перетворювач, система управління якого та регулятор швидкості генератора забезпечують оптимальну передачу енергії від вітрогенератора, і вихідний DC/AC перетворювача, виконаного на базі активного випрямляча. Між вхідним інвертором і активним випрямлячем знаходиться ланка постійної напруги (конденсатор). Система керування такого перетворювача релейна. Таке керування забезпечує з релейним керування, дозволяє забезпечити практично миттєву реакцію на відхилення від завдання. Точність відтворення (відстеження) сигналу завдання буде визначатися шириною петлі гістерезису релейних регуляторів. Таким чином забезпечується електромагнітна сумісність з мережею живлення. Представлено математичний опис електромагнітних процесів в активному випрямлячі та інверторі, які входять до складу перетворювача. За допомогою цифрового моделювання в програмі Matlab проведено дослідження режимів роботи (змінення напруги генератора, частоти струму генератора) та виконан аналіз струмів на вміст гармонік. Гармонійний аналіз показав, що запропонований перетворювач забезпечує хорошу якість споживаної енергії THD істотно менше 5% що задовольняє міжнародним стандартам на якість електроенергії.

Ключові слова: перетворювач частоти, активний випрямляч, вітроенергетична установка

Вступ. В останній час системи перетворення енергії вітру (вітроенергетичні установки (ВЕУ)) збільшують своє проникнення в електричні мережі

більшості країн, завдяки значному зменшенню затрат на виробництво енергії вітру, а також технологічних розробках у виробництві вітряків. Інтеграція енергії вітру в енергетичні системи спричиняє проблему з точки зору якості електроенергії та можливості усунення несправностей.

Щоб отримати максимальну потужність із вітру, швидкість ротора турбіни повинна бути змінена пропорційно швидкості вітру. Це вимагає роботи зі змінною швидкістю. Вітрові турбіни з регульованою швидкістю мають багато переваг у порівнянні з тими які працюють з фіксованою, такі як підвищене захоплення енергії, робота на максимальній потужності, підвищена ефективність і якість електроенергії. Застосування вітряних турбун з фіксованою швидкістю зазвичай не є кращим рішенням через їх низькі характеристики.

Електромеханічна система складається з вітроколеса (ротора), редуктора, що узгоджує частоту обертання вітроколеса і генератора, перетворювача, який забезпечує узгодження параметрів генерації генератором електроенергії до вимог електросистеми споживача.

Основні завдання управління ВЕУ:

- включення ВЕУ при швидкостях старту і відключення при граничних швидкостях;
- передача електричної енергії в мережу із заданою величиною потужності для широкого інтервалу швидкостей вітру;
- дотримання стандартів на якість електричної енергії (сучасні міжнародні стандарти на якість містять норми по гармонікам споживаного струму [1,2]).

Складність перетворювача залежить від типу застосовуваного генератора, потужності, рівня напруги і вимоги до електромагнітної сумісності з мережею живлення.

Перетворювачі застосовуються двох типів: перетворювачі частоти з ланкою постійного струму (складаються з вхідного випрямляча як керованого так і ні, й вихідного інвертора, частота на виході якого може бути будь-якою) та безпосередні перетворювачі частоти (ціклоконвертор, який перетворює енергію змінного струму в змінний з вихідною частотою менше вхідної; або матричний перетворювач, який може управляти середньоквадратичним значенням напруги навантаження і може видавати будь-яку вихідну частоту) [3-6].

Аналіз публікацій показує що найбільш переважними для невеликих потужностей є перетворювачі частоти з ланкою постійного струму, матричні для великої потужності

Мета статті. Розробка перетворювача частоти з ланкою постійної напруги для вітрогенераторних установок, та його дослідження.

Результати дослідження. Електрична підсистема складається з генератора, перетворювача потужності, фільтрів, і трансформатора. У генераторі механічна енергія перетворюється в електричну. Для вітроенергетики пропонується безліч типів генераторів, найбільш поширені індукційний генератор подвійного живлення (DFIG), синхронний генератор з постійними магнітами (PMSG) або індукційний генератор з короткозамкненим ротором (SCIG) [3,4].

Для вибору перетворювача необхідно визначити робочі режими установок.

Сучасні ВЕУ можуть мати два основних робочих режими це робота з постійною або змінною швидкістю обертання ротора вітроколеса, при цьому принципи управління ВЕУ залежать від того, в якій зоні вони працюють. Виділяють три основні зони роботи ВЕУ. Ці зони відзначені на енергетичній характеристиці (рисунок 1). [4].

ВЕУ працюють від швидкості відключення, як показано на рисунку. Уловлювання енергії збільшується в області змінної швидкості до тих пір, поки не буде досягнута робоча межа, потім кривизна згладжується під дією приводу кроку лопатей, і система працює з постійною швидкістю. Така система управління дозволяє виробляти максимально можливу потужність ВЕУ в режимі робочих вітрів і номінальну - в режимі обмежень, захищаючи генератор від перевантаження.

Найбільш часто використовуємим трифазним силовим перетворювачем в системах генерування електричної енергії для вітроенергетичних установок є дворівневий інвертор напруги з широтно-імпульсною модуляцією [7,8]. ШІМ-управління забезпечує постійну частоту перемикання вентилів, але має суттєвий недолік складність розрахунку та налаштування регуляторів.

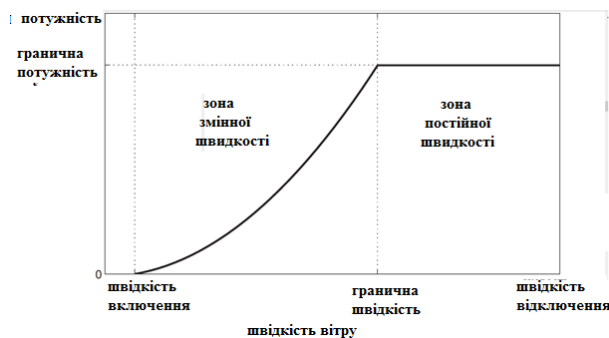


Рис. 1. Енергетична характеристика ВЕУ

У цьому дослідженні пропонується перетворювач частоти з релейним керуванням. Релейний принцип управління дозволяє забезпечити практично миттєву реакцію на відхилення від завдання. Точність відтворення (відстеження) сигналу завдання буде визначатися шириною петлі гістерезису релейних регуляторів. У цьому випадку досягається істотне спрощення системи управління в порівнянні з ШІМ-управлінням.

Структурна схема системи вітроенергетики з запропонованим перетворювачем частоти наведена на рисунку 2. Механічна енергія вітра через редуктор передається на генератор, генератор через перетворювач АС-DC-АС під'єднаний до мережі, якщо він генерує енергію в неї, або під'єднаний до підключеного навантаження. Система управління таким перетворювачем складна, для ефективно роботи, управління кожним контуром здійснюється окремо і залежить від завдань покладених на них.

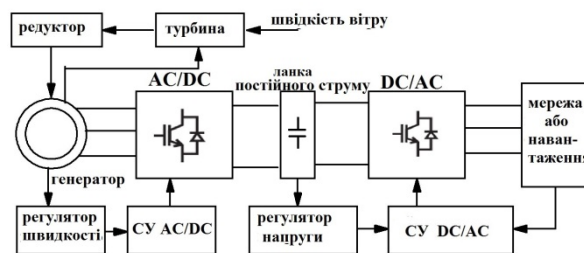


Рис. 2. Блок-схема енергетичної системи

Призначення регулятора напруги у ланці постійного струму полягає у збереженні напруги в його еталонному значенні для збереження працездатності перетворювача в цілому, якщо напруга зменшиться нижче ніж лінійна напруга фаз генератора, або мережі, порушиться його робота.

Перетворювач складається з двох контурів: АС/DC перетворювача, система управління якого та регулятор швидкості генератора забезпечують оптимальну передачу енергії від вітрогенератора, і вхідного DC/АС перетворювача, виконаного на базі активного випрямляча для забезпечення електромагнітної сумісності. Між вхідним інвертором і активним випрямлячем знаходиться ланка постійної напруги (конденсатор). На виході перетворювача не-

обхідно встановлювати дроселі, для формування необхідних струмів мережі.

На рисунку 3 представлена принципова схема силової частини перетворювача.

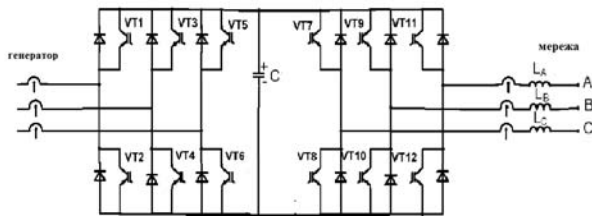


Рис. 3. Силова частина перетворювача

Вирази, які описують процеси в DC/AC при релейному регулюванні, для фази А:

$$i_{Az} - i_A = \Delta i_A$$

$$L_A \frac{di_A}{dt} + i_A R_A = u_A + \alpha U_C, -a \leq \Delta i_A \leq a \quad \frac{di_A}{dt} > 0$$

$$L_A \frac{di_A}{dt} + i_A R_A = u_A - \alpha U_C, -a \leq \Delta i_A \leq a \quad \frac{di_A}{dt} < 0$$

для фази В:

$$i_{Bz} - i_B = \Delta i_B$$

$$L_B \frac{di_B}{dt} + i_B R_B = u_B + \beta U_C, -a \leq \Delta i_B \leq a \quad \frac{di_B}{dt} > 0$$

$$L_B \frac{di_B}{dt} + i_B R_B = u_B - \beta U_C, -a \leq \Delta i_B \leq a \quad \frac{di_B}{dt} < 0$$

для фази С:

$$i_{Cz} - i_C = \Delta i_C$$

$$L_C \frac{di_C}{dt} + i_C R_C = u_C + \gamma U_C, -a \leq \Delta i_C \leq a \quad \frac{di_C}{dt} > 0$$

$$L_C \frac{di_C}{dt} + i_C R_C = u_C - \gamma U_C, -a \leq \Delta i_C \leq a \quad \frac{di_C}{dt} < 0$$

де U_C – напруга в ланці постійного струму;

u_A, u_B, u_C – миттєві значення фазних напруг,

i_{Az}, i_{Bz}, i_{Cz} та i_A, i_B, i_C – струми завдання та реальні їх значення у фазах;

L_A, L_B, L_C – індуктивності фазних дроселів;

R_A, R_B, R_C – активні опори фазних дроселів;

$2a$ – ширина петлі гістерезису релейних регуляторів;

α, β, γ – коефіцієнти розподілення напруги U_C по фазам перетворювача [9].

Процеси які описуються в AC/DC для фаз А, В, С відповідно:

$$i_{az} - i_a = \Delta i_a$$

$$L_{ag} \frac{di_a}{dt} + i_a R_{ag} = \alpha U_C, -a \leq \Delta i_a \leq a \quad \frac{di_a}{dt} > 0$$

$$L_{ag} \frac{di_a}{dt} + i_a R_{ag} = -\alpha U_C, -a \leq \Delta i_a \leq a \quad \frac{di_a}{dt} < 0$$

$$i_{bz} - i_b = \Delta i_b$$

$$L_{bg} \frac{di_b}{dt} + i_b R_{bg} = \beta U_C, -a \leq \Delta i_b \leq a \quad \frac{di_b}{dt} > 0$$

$$L_{bg} \frac{di_b}{dt} + i_b R_{bg} = -\beta U_C, -a \leq \Delta i_b \leq a \quad \frac{di_b}{dt} < 0$$

$$i_{cz} - i_c = \Delta i_c$$

$$L_{cg} \frac{di_c}{dt} + i_c R_{cg} = \gamma U_C, -a \leq \Delta i_c \leq a \quad \frac{di_c}{dt} > 0$$

$$L_{cg} \frac{di_c}{dt} + i_c R_{cg} = -\gamma U_C, -a \leq \Delta i_c \leq a \quad \frac{di_c}{dt} < 0$$

де i_{az}, i_{bz}, i_{cz} та i_a, i_b, i_c – струми завдання та реальні їх значення у фазах;

L_{ag}, L_{bg}, L_{cg} – індуктивності фаз генератора;

R_{ag}, R_{bg}, R_{cg} – активні опори фаз генератора.

Дослідження проводилось цифровим моделюванням у Matlab/Simulink. Рис. 4 демонструє змінення струму генератора, та змінення його частоти з 125 Гц до 25 Гц, при цьому у струмі який протікає в мережі виникає перехідний процес при зміненнях в AC/DC перетворювачі. Струм з мережі синусоїдальний, в протифазі з напругою, оскільки енергія віддається в мережу.

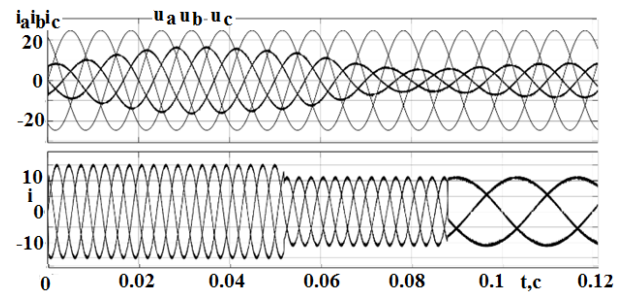


Рис. 4. Результати моделювання

Рисунок 5 демонструє змінення напруги генератора, при цьому струм мережі також змінив своє значення, в даному випадку зменшився.

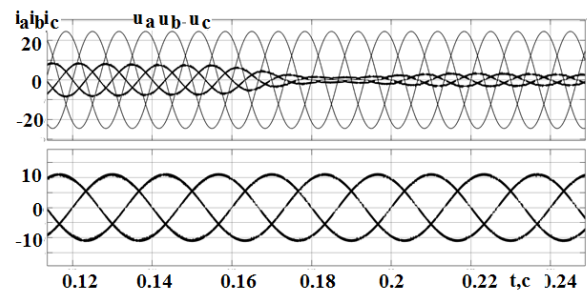


Рис. 5. Результати моделювання при зміненні напруги

На рис 6 представлено результати аналізу струму на гармонійні складові.

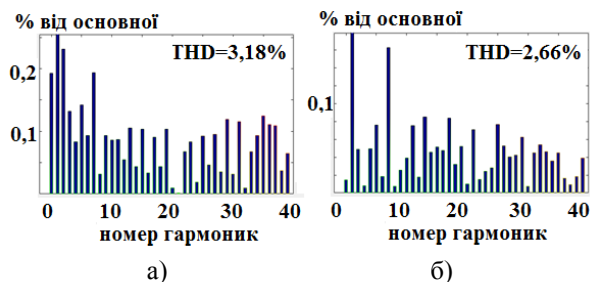


Рис. 6. Гармонійний склад струмів мережі (а) та генератора (б)

THD струму мережі складає 3,18%, що задовольняє міжнародним стандартам на якість електроенергії [1,2].

THD струму генератора складає 2,66%, висока якість струму збільшує тривалість експлуатації генератора, не призведе до перегрівання кабелів.

Висновки. Перетворювач частоти струму забезпечує електромагнітну сумісність з мережею завдяки активному випрямлячу в його складі, AC/DC перетворювач забезпечує можливість регулювання частоти та струму, и може бути використаний у вітроенергетичних установках. .

Результати моделювання показують можливість використання перетворювача з релейним керування у вітроенергетичних установках.

Гармонійний аналіз показав, що запропонований перетворювач забезпечує хорошу якість споживаної енергії. THD істотно менше 5% встановлених стандартом.

Література

1. CEI, 61000-1-1 : Electromagnetic compability (EMC), Part 1 : General, section 1 : application and interpretation of fundamental definitions and terms, 2001.
2. IEEE-519. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems..W.: JSC, 1992.,65 p.
3. Poopak Rozhanfekr: Energy-efficient Generating System for HVDC Off-shore Thesis / Poopak Rozhanfekr: Sweden 2013
4. Llu'is Trilla Romero: Power converter optimal control for wind energy conversion systems. Thesis Barcelona, 2013
5. Kotb B. Tawfiq, Arafa S. Mansour, Haitham S. Ramadan, Mohamed Becherif, E.E. El-kholy, Wind Energy Conversion System Topologies and Converters: Comparative Review, Energy Procedia, Volume 162, 2019, Pages 38-47.
6. Y. Oğuz, İ. Güney and H. Çalık, "Power quality control and design of power converter for variable-speed wind energy conversion system with permanent-magnet synchronou s generator", *The Scientific World Journal*, 2013.
7. Rodriguez J. Multilevel Voltage-Source-Converter Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives / J. Rodriguez, S. Bernet, Wu Bin, J. O. Pontt, S. Kouro // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*..vol. 54, no. 6, P. 2930-2945, 2007.
8. Kolar J. W. The essence of three-phase PFC rectifier systems–Part 1 / J. W. Kolar, T. Friedli // *IEEE Trans. Power Electron.*,2013. – vol. 28 – P. 176–198.

9. Высокоэффективные источники электропитания: Монография / Ю. П. Самчелев, В. Г. Дрючин, Г. С. Белоха, Н. И. Андреева.Алчевск: ДонГУ, 2013. – 219 с.

References

1. CEI, 61000-1-1 : Electromagnetic compability (EMC), Part 1 : General, section 1 : application and interpretation of fundamental definitions and terms, 2001.
2. IEEE-519. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems..W.: JSC, 1992.,65 p.
3. Poopak Rozhanfekr: Energy-efficient Generating System for HVDC Off-shore. Thesis: Sweden 2013.
4. Llu'is Trilla Romero: Power converter optimal control for wind energy conversion systems. Thesis Barcelona, 2013
5. Kotb B. Tawfiq, Arafa S. Mansour, Haitham S. Ramadan, Mohamed Becherif, E.E. El-kholy, Wind Energy Conversion System Topologies and Converters: Comparative Review, Energy Procedia, Volume 162, 2019, pp 38-47.
6. Y. Oğuz, İ. Güney and H. Çalık, "Power quality control and design of power converter for variable-speed wind energy conversion system with permanent-magnet synchronou s generator", *The Scientific World Journal*, 2013.
7. Rodriguez J. Multilevel Voltage-Source-Converter Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives / J. Rodriguez, S. Bernet, Wu Bin, J. O. Pontt, S. Kouro // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*..vol. 54, no. 6, P. 2930-2945, 2007.
8. Kolar J. W. The essence of three-phase PFC rectifier systems–Part 1 / J. W. Kolar, T. Friedli // *IEEE Trans. Power Electron.*,2013. – vol. 28 – P. 176–198.
9. Vysokoeffektivnyye istochniki elektropitaniya: Monografiya / Yu. P. Samcheleyev, V. G. Dryuchin, G. S. Belokha., N. I. Andreyeva.Alchevsk: DonGTU. 2013. 219 p/

Белоха Г.С. Преобразователь частоты в системе генерирования энергии ветроэнергетических установках

В последнее время системы преобразования энергии ветра увеличивают свое проникновение в электрические сети в почти все страны мира. Интеграция энергии ветра в энергетические системы вызывает проблему с точки зрения качества электроэнергии. В статье рассмотрено электрическую систему в составе ветрогенераторных установок с переменной скоростью вращения ротора, чтобы получить максимальную мощность ветра. Показаны основные задачи управления ветрогенераторных установок то зоны работы ветряков. Приведены обзор преобразователей частоты. Предложено преобразователь частоты (AC-DC-AC) со звеном постоянного тока. В его состав входят входной AC / DC преобразователь, система управления которого и регулятор скорости генератора обеспечивают оптимальную передачу энергии от ветрогенератора, и выходной DC / AC преобразователя, выполненного на базе активного выпрямителя. Между входным инвертором и активным выпрямителем находится звено постоянного напряжения (конденсатор). Система управления такого преобразователя релейная. Такое управление обеспечивает с релейным управлением, позволяет обеспечить практически мгновенную реакцию на отклонение от задания. Точность воспроизведения (отслеживание) сигнала задания будет определяться

шириной петли гистерезиса релейных регуляторов. Таким образом обеспечивается электромагнитная совместимость с питающей сетью. Представлены математическое описание электромагнитных процессов в активном выпрямителе и инверторы, которые входят в состав преобразователя. С помощью цифрового моделирования в программе Matlab проведено исследование режимов работы (изменение напряжения генератора, частоты тока генератора) и выполнен анализ токов на содержание гармоник. Гармонический анализ показал, что предложенный преобразователь обеспечивает хорошее качество потребляемой энергии THD существенно менее 5% удовлетворяющий международным стандартам на качество электроэнергии.

Ключевые слова: преобразователь частоты, активный выпрямитель, ветроэнергетическая установка

Bielokha H.S. Frequency converter in the system energy generation wind turbines

Wind power systems have increased their penetration into electrical grids in recent years. One of the interesting renewable energy sources for generation of electrical power is wind. Modern wind turbine based energy sources use power converters to enhance their performance and range of operation. The article discusses the electrical system in the structure of the wind energy conversion systems (WECS) with variable rotor speed. The wind energy conversion system is a complex system that converts wind energy to mechanical energy and then electric energy. The electrical subsystem comprises the generator, the three phase power converter, the filters and line inductances or the transformer. This article introduces the simulation and control of the three phase AC-

DC-AC (frequency converter). Frequency converter consist of two subsections: AC-DC (two-level active rectifier) and DC-AC (two-level voltage source inverter) with DC link and hysteresis current control. The control system can be split in three parts: speed control, machine-side converter (AC-DC) control, and grid-side converter (DC-AC) control. The controlled rectifier gives the bidirectional power flow capability, which is not possible in the diode rectifier based power conditioning system. A mathematical model of three-phase voltages and currents AC-DC and DC-AC with hysteresis current control is presented. AC-DC rectifier supply its load and at the same time compensate for AC grid current harmonics of neighborhood nonlinear loads. Frequency converter is electromagnetically compatible with the network. With the active rectifier, the generator torque can be fully controlled and the terminal voltage adjusted within certain limits. In this study, dynamic simulation and control of a wind turbine with the proposed frequency converter is done using MATLAB/Simulink. Simulation results show that the output current, voltage and frequency reach the desired operating values. The total harmonic distortion (THD) of current in generator 3,18%, in load less 3%, which meets the standards international for the quality of electricity.

Keywords: frequency converter, active rectifier, wind turbine

Бєлоха Г.С. – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, pointage13@gmail.com

Стаття подана 20.10.2020.