

II. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.24

Алексеевский Д. Г.¹, Андриенко П. Д.², Турышев К. О.³, Панкова О. О.⁴

¹ Канд. тех. наук, доцент кафедры Электронных систем, Запорожская государственная инженерная академия, Запорожье, Украина, e-mail: signald@mail.ru

² Д-р тех. наук, профессор, зав. каф. Электрических и электронных аппаратов, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина, e-mail: andrpd@ukr.net

³ Ассистент кафедры Электронных систем, Запорожская государственная инженерная академия, Запорожье, Украина

⁴ Аспирант кафедры Электронных систем, Запорожская государственная инженерная академия, Запорожье, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ ИППН В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЭУ С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ

Цель. Разработка методики согласования диапазонов входного и выходного напряжения импульсного преобразователя постоянного напряжения (ИППН), в составе электрооборудования ветроэнергетической установки (ВЭУ) с переменной скоростью вращения вала ветротурбины.

Методика. Для определения параметров ИППН был предложен графоаналитический метод расчета, который также является средством визуализации результатов.

Результаты. С помощью графоаналитического метода согласования диапазонов входного и выходного напряжений ИППН определены область «гарантированной управляемости», область «не отпирания», а также область «не записания». Первая область соответствует режимам работы ИППН, для которых обеспечивается устойчивая работа ВЭУ с переменной скоростью вращения вала ветротурбины. Вторая и третья области соответствуют аварийным режимам работы ВЭУ.

Научная новизна. Предложена графоаналитическая интерпретация диапазонов изменения напряжений ИППН в составе электромеханической системы ВЭУ, которая позволяет наглядно представить проблему согласования режимов работы оборудования ВЭУ.

Практическая значимость. Предложен порядок согласования диапазонов входного и выходного напряжений ИППН в составе электрооборудования для ВЭУ с переменной скоростью вращения вала ветротурбины, позволяющий определить область гарантированной управляемости ВЭУ.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, электромеханическая система, импульсный преобразователь постоянного напряжения, переменная скорость вращения, графоаналитическая интерпретация.

ВВЕДЕНИЕ

Достижения последних десятилетий в области преобразовательной техники дали ощутимый толчок развитию новых направлений в альтернативной энергетике. Изменения коснулись, прежде всего, новых возможностей в управлении энергетическими потоками в трактах преобразования энергии при одновременном снижении удельной стоимости преобразовательных устройств.

В отличие от использования полупроводниковых преобразователей (ПП) в качестве источников питания, где их функция заключается, главным образом, в обеспечении заданной внешней характеристики, в случаях их применения для альтернативных источников энергии (таких как ВЭУ и солнечные энергоустановки) на них возлагается задача обеспечения заданных входных характеристик.

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Для регулирования режимов ВЭУ с переменной скоростью вращения, а также для обеспечения заданного

переходного и установившегося режима, необходимо обеспечить заданный момент генератора. Исходя из свойств электромагнитного преобразования, данная задача может быть решена путем включения в цепь генератора ПП в режиме стабилизации тока [1–6].

В [7–11] рассмотрены особенности использования таких ПП, для которых заявлена возможность обеспечить заданный момент генератора ВЭУ. Однако при этом, сам вопрос методики, позволяющей обеспечить согласование диапазонов входного и выходного напряжений ИППН не рассмотрен [12–15].

В связи с этим, при проектировании электромеханической системы ВЭУ с переменной скоростью вращения, актуальной задачей является разработка методики согласования диапазонов входного и выходного напряжения ИППН, который входит в состав преобразователя частоты (ПЧ) в качестве регулятора входного тока. В рамках решения данной задачи была бы уместна графическая интерпретация, то есть представление ее решения в графоаналитической форме. Как известно, графоаналитические методы расчета не только могут быть спосо-

бом решения задачи, но и являются средством визуализации результатов [16].

Целью данной работы является разработка методики согласования диапазонов входного и выходного напряжения ИППН, в составе электрооборудования ВЭУ с переменной скоростью вращения вала ветротурбины, с использованием графоаналитического метода.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Задание тока генератора в электромеханической системе ВЭУ (рис. 1) осуществляется путем использования ИППН в режиме регулятора тока в цепи постоянного тока. Его значение задается величиной коэффициента заполнения ИППН – γ , который формируется в системе управления (СУ) на основе данных от датчиков тока (ДТ), скорости ветра (DV_B) и угловой скорости на валу генератора (D_{ω}).

При эксплуатации ВЭУ напряжение на выходе преобразователя частоты, в данной концепции управления, изменяется в определённых, достаточно широких пределах. Особенно это касается входного напряжения ПЧ, так

как угловая скорость на валу генератора может меняться в широком диапазоне.

Рассмотренный выше способ управления режимом электромеханической системы ВЭУ с переменной скоростью вращения генератора предполагает реализацию статической и динамических траекторий регулирования моментом генератора.

Типовые траектории (*статическая траектория* – толстая линия и *динамическая траектория* для случая торможения ветротурбины – стрелочная линия) могут быть рассмотрены в координатах механической характеристики электромеханической системы ВЭУ (см. рис. 2).

Наиболее тяжелым, с точки зрения момента генератора, является режим, возникающий при реализации динамической траектории регулирования, изображенной на рис. 2 в виде стрелочной линии.

При этой динамической траектории регулирования происходит тормозной переход от номинальной скорости вращения вала генератора к рабочей точке на гиперболе мощности с максимальным моментом.

Нужно заметить, что для обеспечения тормозного динамического момента электромеханической системы необходимо превышение момента генератора над максимальным моментом ветротурбины на величину заданного значения динамического момента.

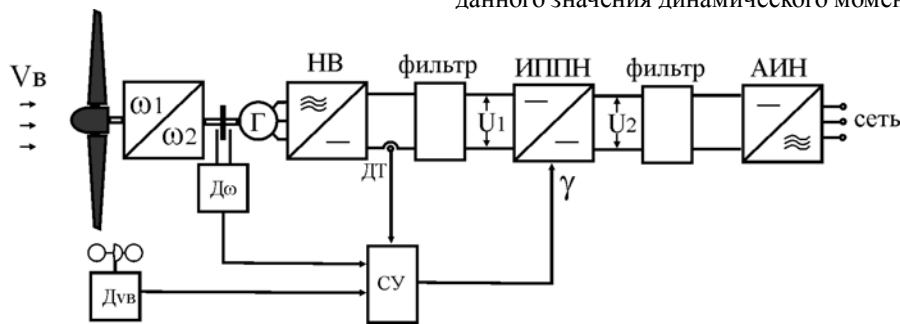


Рисунок 1 – Электромеханическая система ВЭУ с переменной скоростью вращения ветротурбины

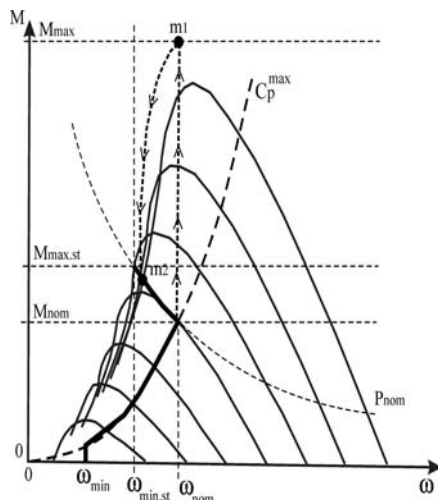


Рисунок 2 – Статическая и динамическая траектории регулирования момента генератора ВЭУ

Исходя из целей анализа, данную характеристику, вследствие свойств электромеханического преобразования, можно рассматривать в координатах тока и напряжения генератора. В связи с этим, рабочая точка динамической траектории – m_1 соответствует максимальному току генератора, который должен быть обеспечен диапазоном регулирования ИППН.

Значения минимального – U_1^{min} и максимального – U_1^{max} напряжения на входе ИППН определяются угловыми скоростями ω_{min} и ω_{nom} , соответственно.

Фактором, определяющим рабочий диапазон напряжений на выходе ИППН – $[U_2^{min} - U_2^{max}]$, является изменение напряжения в сети.

Рассмотрим систему координат $U_2(U_1)$ (см. рис. 3), где U_1 и U_2 входное и выходное напряжение ИППН, соответственно.

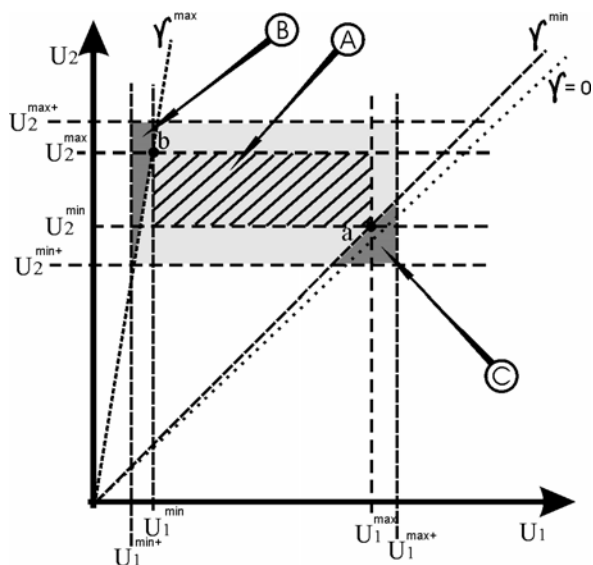


Рисунок 3 – Диаграмма диапазонов входного и выходного напряжений ИППН

В данном графическом представлении могут быть изображены следующие диапазоны:

– сектор $[\gamma^{\min}, \gamma^{\max}]$ соответствует допустимому изменению коэффициента заполнения ИППН. Значение границ диапазона определяется, в основном, процессами коммутации силовых ключей ИППН и условием существования режима непрерывного тока;

– линии « γ^{\min} » и « γ^{\max} » строятся с помощью выражений (1) и (2), соответственно:

$$U_2 = \left(\frac{1}{1-\gamma^{\min}} - \left(\frac{1}{1-\gamma^{\min}} \right)^2 \cdot R_e^* \right) \cdot U_1 ; \quad (1)$$

$$U_2 = \left(\frac{1}{1-\gamma^{\max}} - \left(\frac{1}{1-\gamma^{\max}} \right)^2 \cdot R_e^* \right) \cdot U_1. \quad (2)$$

Эквивалентное сопротивление R_e^* определяется из выражения:

$$R_e^* = \frac{R_e \cdot I_d^{\max}}{E_{d0}}, \quad (3)$$

где R_e – внутреннее сопротивление генератора с выпрямителем [17]; I_d^{\max} – максимальный входной ток ИППН; E_{d0} – ЭДС холостого хода входного выпрямителя.

В выражении (3) ток I_d^{\max} и ЭДС E_{d0} соответствуют точке максимального момента m_l (см. рис. 2).

Горизонталь « U_2^{\min} » и « U_2^{\max} » определяют диапазон изменения выходного напряжения. Эти значения соответствуют величине противо-ЭДС инвертора в зве-

не постоянного тока. Его изменение, в основном, вызвано изменением напряжения сети.

Вертикали « U_1^{\min} » и « U_1^{\max} » ограничивают диапазон изменения входного напряжения. Их значения, как уже было сказано, соответствуют различным угловым скоростям вращения вала генератора.

Рассмотренные три ограничения образуют область гарантированной управляемости – «А» (см. рис. 3). Ее свойством является то, что при любом сочетании значений U_1 и U_2 из этой области, система будет управляемой, в том смысле, что электрооборудование может обеспечить диапазон изменения заданного момента от нулевого до максимального значения.

Нужно отметить, что выход величины U_1 и U_2 за границы диапазона, приведет к появлению областей неуправляемости.

На рис. 3 данный случай показан областями $[U_1^{\min+}, U_1^{\max+}]$ и $[U_2^{\min+}, U_2^{\max+}]$.

Всего возникает две зоны неуправляемости:

а) *Область не отпирания* – «В», когда напряжение на входе ПЧ настолько мало, а напряжение сети настолько велико, что даже при максимальном значении коэффициента заполнения γ^{\max} напряжение на выходе ИППН не может превысить противо-ЭДС инвертора. Ток в цепи отсутствует, отсутствует и момент генератора. Такая ситуация может возникнуть как при малых скоростях ветра, так и при больших. Особенно опасен этот режим при больших (выше номинальных) скоростях ветра. В этом режиме генератор осуществляет ограничение в зоне срыва потока (восходящая характеристика ветротурбины) при достаточно большом моменте на валу генератора. Неспособность системы создать необходимый момент на валу генератора приведет к неконтролируемому увеличению скорости ветротурбины и возможно аварийному режиму.

б) *Область не записания* – «С», когда напряжение в сети настолько мало, а на зажимах генератора настолько велико, что даже при предельно малом значении коэффициента заполнения ИППН γ^{\min} , напряжение на выходе ИППН превышает напряжение противо-ЭДС инвертора и ток в системе не может быть отключен.

Такая ситуация может возникнуть в окрестностях номинального значения угловой скорости ветротурбины, например, при перерегулировании по скорости вращения ветротурбины во время электромеханического переходного процесса. Поэтому, при проектировании электромеханической системы ВЭУ с переменной скоростью вращения ветротурбины должны быть предусмотрены соответствующие запасы по ширине допустимых диапазонов изменения входного и выходного напряжения ПЧ.

Алгоритм согласования диапазонов напряжений может быть осуществлен в следующей последовательности:

1. Задание исходного диапазона изменения коэффициента заполнения ИППН – $[\gamma_{\min}, \gamma_{\max}]$. Построение соответствующих пунктирных линий (см. рис. 3).

2. Задание максимального значения входного напряжения ИППН. Оно определяется максимальным напряжением на зажимах генератора при максимальной угловой скорости на его валу с учетом внешней характеристики выпрямителя.

3. Определение минимального выходного напряжения (точка – **a** на рис. 3):

$$U_2^{\min} = \left(\frac{1}{1-\gamma^{\min}} - \left(\frac{1}{1-\gamma^{\min}} \right)^2 \cdot R_e^* \right) \cdot U_1^{\max} \quad (4)$$

4. Задание максимального выходного напряжения U_2^{\max} с учетом значения U_2^{\min} .

5. Определение минимального входного напряжения (точка **b** на рис.3) по значению U_2^{\max} :

$$U_1^{\min} = \frac{U_2^{\max}}{\left(\frac{1}{1-\gamma^{\max}} - \left(\frac{1}{1-\gamma^{\max}} \right)^2 \cdot R_e^* \right)} \quad (5)$$

Таким образом, может быть определена область гарантированной управляемости электромеханической системой.

Для обеспечения безопасной работы системы необходимо предварительно задать значения соответствующих коэффициентов запаса для первичного и вторичного напряжений:

$$k_1 = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_{1p}} = \frac{U_1^{\max} - U_1^{\min}}{U_{1p}^{\max} - U_{1p}^{\min}}, \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_{2p}} = \frac{U_2^{\max} - U_2^{\min}}{U_{2p}^{\max} - U_{2p}^{\min}}, \quad (7)$$

где $U_{1p}^{\min}, U_{1p}^{\max}, U_{2p}^{\min}, U_{2p}^{\max}$ – соответствующие границы рабочих диапазонов (с учетом запасов) входного и выходного напряжений ИППН.

После задания соответствующих коэффициентов запаса могут быть определены границы рабочей области с учетом запаса:

$$U_{1p}^{\max} = U_1^{\max} - \frac{1}{2k_1} \cdot (U_1^{\max} - U_1^{\min}), \quad (8)$$

$$U_{1p}^{\min} = U_1^{\min} + \frac{1}{2k_1} \cdot (U_1^{\max} - U_1^{\min}), \quad (9)$$

$$U_{2p}^{\max} = U_2^{\max} - \frac{1}{2k_2} \cdot (U_2^{\max} - U_2^{\min}), \quad (10)$$

$$U_{2p}^{\min} = U_2^{\min} - \frac{1}{2k_2} \cdot (U_2^{\max} - U_2^{\min}). \quad (11)$$

Предложенная выше методика согласования диапазонов входного и выходного напряжения ИППН, в составе электрооборудования ВЭУ с переменной скоростью вращения вала ветротурбины, с использованием графоаналитического метода может быть использована в определении области гарантированной управляемости. Это позволит исключить вероятности появления аварийных режимов ВЭУ, а также повысить эффективность генерации электроэнергии.

ВЫВОДЫ

Предложена графическая интерпретация диапазонов изменения напряжений ИППН в составе электромеханической системы ВЭУ, которая позволяет наглядно представить проблему согласования режимов работы оборудования.

С помощью графоаналитического метода согласования диапазонов входного и выходного напряжений ИППН определены область «гарантированной управляемости», область «не отпирания», а также область «не запириания». Первая область соответствует режимам работы ИППН, для которых обеспечивается устойчивая работа ВЭУ с переменной скоростью вращения вала ветротурбины. Вторая и третья области соответствуют аварийным режимам работы ВЭУ.

Предложенная методика согласования диапазонов входного и выходного напряжений ИППН также позволяет сформировать порядок расчета системы, при отличном от рассмотренного выше сочетании заданных и определяемых параметров системы, т.е. выбрать параметры генератора и ветротурбины при заданном диапазоне изменения угловой скорости.

В работе рассмотрен только ИППН второго рода. Аналогичный подход может быть применен и для преобразователей постоянного напряжения других типов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sharmila Deve V., Karthiga S. (2012) Advanced control techniques in variable speed stand alone wind turbine system. International Journal of Advances in Engineering & Technology, Vol. 3, Issue 1, pp. 549–557.
2. Bunlung Neammanee, Somporn Sirisumrannukul, Somchai Chatratana (2010) Control Strategies for

- Variable-speed Fixed-pitch Wind Turbines. Wind Power, INTECH, Croatia, pp. 189–232.
3. Mahmoud M. Hussein. (2012) Simple Sensorless Maximum Power Extraction Control for A Variable Speed Wind Energy Conversion System. International Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol.1, Issue 10, pp. 1–10.
 4. Dimitrios Bourlis (2011) Control Algorithms and Implementation for Variable Speed Stall Regulated Wind Turbines. PhD dissertation. University of Leicester. URL: <https://ira.le.ac.uk/handle/2381/28800>
 5. Sharmila Deve V. (2012) Advanced Control Techniques in Variable Speed Stand Alone Wind Turbine System. International Journal of Advances in Engineering & Technology, Issue. 3. pp. 549–557.
 6. Яримбаш Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя [Текст] / Д. С. Яримбаш, М. И. Коцур, С. Т. Яримбаш, И. М. Коцур // Електротехніка та електроенергетика – 2016. – №2 – С. 43–50. DOI 10.15588/1607-6761-2016-2-5
 7. Alejandro R., Alvaro L., Gerardo V. (2009) Modeling of a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 734–739.
 8. Makvana V.T., Ahir R.K. (2013) Study of PID Controller Based Pitch Actuator System for Variable Speed HAWT using MATLAB, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Volume 2, Issue 5. – pp. 1496–1504.
 9. Cuesta A.B., Gomez-Gil F. J. (2013) Feasibility of a Simple Small Wind Turbine with Variable-Speed Regulation Made of Commercial Components, Energies, Volume 6, Issue 6, pp. 3373–3391.
 10. Belghazi O., Cherkaoui M (2012) Pitch angle control for variable speed wind turbines using genetic algorithm controller, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Volume 39, Issue 1, pp. 6–10.
 11. Ofualagba G., Ubeku E. (2011) The Modeling and Dynamic Characteristics of a Variable Speed Wind Turbine, Journal of Energy Technologies and Policy, Volume 1, Issue 3, pp. 10–22.
 12. Mali S. S., Kushare B. E. (2013) MPPT Algorithms: Extracting Maximum Power from Wind Turbines, International Journal Of Innovative Research In Electrical, Electronics, Instrumentation And Control Engineering, Volume 1, Issue 5, pp. 199–202.
 13. Ramakrishnan V., Srivatsa S. K. (2012) Pitch Control of Wind Turbine Generator by using New Mechanism/ V. Ramakrishnan, Volume 6, Issue 13, pp.1–15.
 14. Chunting Mi., Mariano Filippa (2004) Modeling and Control of a Variable-Speed Constant-Frequency Synchronous Generator with Brushless Exciter, IEEE Transactions on Industry Applications, Volume.40, Issue 2, pp. 565–573.
 15. Коцур М. И. Особенности ударного теплового воздействия на асинхронный двигатель с модифицированной системой импульсного регулирования в условиях частых пусков [Текст] / М. И. Коцур, // Електротехніка та електроенергетика. – 2014 – №1 – С. 32–36. DOI 10.15588/1607-6761-2014-1-5
 16. Новиков, А. М. Методология научного исследования [Текст] / А. М. Новиков, Д. А. Новиков – М.: Либроком. –2010 – 280с.
 17. Немудрий І. Ю. Підвищення ефективності електро-механічної системи вітроелектричних установок з аеродинамічною мультиплікацією [Текст]: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.09.03 /Немудрий Ігор Юрійович. — Дніпропетровськ, 2015. — 20 с.

Статья поступила в редакцию 9.03.17

Алексієвський Д. Г.¹, Андрієнко П. Д.², Туришев К. О.³, Панкова О. О.⁴

¹Канд.тех.наук, доцент кафедри Електронних систем, Запорізька державна інженерна академія, Запоріжжя, Україна

²Д-р тех. наук, професор, зав. каф. Електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

³Асистент кафедри Електронних систем, Запорізька державна інженерна академія, Запоріжжя, Україна

⁴Аспірант кафедри Електронних систем, Запорізька державна інженерна академія, Запоріжжя, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ РОБОЧОЇ ОБЛАСТІ ІППН У СКЛАДІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВЕУ ЗІ ЗМІННОЮ ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ

Мета. Розробка методики узгодження діапазонів вхідної та вихідної напруг імпульсного перетворювача постійної напруги (ІППН), в складі електрообладнання вітроенергетичної установки (ВЕУ) зі змінною швидкістю обертання валу вітротурбіни.

Методика. Для визначення параметрів ІППН були використані графоаналітичні методи розрахунку, які також є засобом візуалізації результатів.

Результати. За допомогою графоаналітичного методу узгодження діапазонів вхідної та вихідної напруги ІППН, визначені область «гарантованої керованості», область «не відмикання», а також область «не зами-

канья». Перша область відповідає режимам роботи ІППН, для яких забезпечується стійка робота ВЕУ зі змінною швидкістю обертання валу вітрогенератора. Друга та третя області відповідають аварійним режимам роботи ВЕУ.

Наукова новизна. Запропоновано графоаналітичну інтерпретацію діапазонів зміни напружень ІППН в складі електромеханічної системи ВЕУ, яка дозволяє наочно уявити проблему узгодження режимів роботи обладнання ВЕУ.

Практична значимість. Запропоновано порядок узгодження діапазонів вхідного і вихідного напруг ІППН в складі електрообладнання для ВЕУ зі змінною швидкістю обертання валу вітрогенератора, що дозволяє визначити область гарантованої керованості ВЕУ.

Ключові слова: вітроенергетична установка, електромеханічна система, імпульсний перетворювач постійної напруги, змінна швидкість обертання, графоаналітична інтерпретація.

Alekseevskiy D.G.¹, Andrienko P.D.², Tyrushev K.O.², Pankova O.O.⁴

¹PhD, Assoc. Prof. of the department of the electronic Systems, Zaporozhe State Engineering Academy

²ScD, Prof., Chief of the department of the electrical and electronic apparatuses, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

³ Assistant of the department of the electronic Systems, Zaporozhe State Engineering Academy

⁴Postgraduate student of the department of the electronic Systems, Zaporozhe State Engineering Academy

DETERMINATION OF THE OPERATING ZONE OF THE PULSE DC VOLTAGE CONVERTER IN THE ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF THE WIND POWER PLANT WITH A VARIABLE ROTATION SPEED

Purpose. Development of the method for matching of the input and output voltage ranges of the pulse DC voltage converter, as part of the electrical equipment of the wind power plant with a variable speed of rotation of the wind turbine shaft.

Methods. Graphoanalytical calculation methods, which are also a means of the results visualization for determinate the parameters of the pulse DC voltage converter was offered.

Results. The graph interpretation of the «guaranteed controllability» area, «non-unlocking» area, and «non-locking» area with the help of the grapho-analytical method of matching of the input and output voltage ranges of the pulse dc voltage converter are defined. The first area corresponds to the operation modes of the pulse dc voltage converter, for which a stable operation of the wind turbine with a variable rotation speed of the wind turbine shaft is provided. The second and third areas correspond to the emergency operating modes of the power plant.

Originality. The graphoanalytical interpretation of the converter voltage variation ranges as part of the electromechanical system of the wind power plant, which allows to visually presenting the problem of matching of the operation modes of the wind power plant equipment is offered.

Practical value. The order of matching the ranges of input and output voltages of the pulse DC voltage converter in the structure of the electrical equipment for wind power plant with variable rotation speed of the wind turbine shaft, which allowing to determinate the zone of guaranteed controllability of the wind power plant is proposed.

Keywords: wind power system, electromechanical system, pulse DC voltage converter, variable rotation speed, graphoanalytical interpretation.

REFERENCES

- Sharmila Deve V., Karthiga, S. (2012). Advanced control techniques in variable speed stand alone wind turbine system. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 3, 1, 549–557.
- Bunlung Neammanee, Somporn Sirisumrannukul. (2010). Somchai Chatratana Control Strategies for Variable-speed Fixed-pitch Wind Turbines. *Wind Power, INTECH, Croatia*, 189–232.
- Mahmoud M. Hussein. (2012). Simple Sensorless Maximum Power Extraction Control for A Variable Speed Wind Energy Conversion System. *International Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 10, 1–10.
- Dimitrios Bourlis Control Algorithms and Implementation for Variable Speed Stall Regulated Wind Turbines. (2011). PhD dissertation. University of Leicester. URL: <https://lra.le.ac.uk/handle/2381/28800>
- Sharmila Deve V. Advanced Control Techniques in Variable Speed Stand Alone Wind Turbine System. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 2012, Issue. 3. pp. 549–557.
- Yarimbash, D. S., Kotsur, M. I., Yarimbash, S. T., Kotsur, I. M. (2016). Osobennosti trekhmernogo modelirovaniya elektromagnitnykh poley asinkhronnogo dvigatelya, *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, 2, 43–50. DOI 10.15588/1607-6761-2016-2-5
- Alejandro, R., Alvaro, L., Gerardo, V. (2009). Modeling of a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet

- Synchronous Generator. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 734–739.
8. Makvana, V. T., Ahir, R. K. (2013). Study of PID Controller Based Pitch Actuator System for Variable Speed HAWT using MATLAB. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2, 5. 1496–1504.
 9. Cuesta, A. B., Gomez-Gil, F. J. (2013). Feasibility of a Simple Small Wind Turbine with Variable-Speed Regulation Made of Commercial Components. *Energies*, 6, 6, 3373–3391.
 10. Belghazi O., Cherkaoui M Pitch angle control for variable speed wind turbines using genetic algorithm controller. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, Vol. 39, 2012, Issue 1, pp. 6–10.
 11. Ofualagba, G., Ubeku, E. (2011). The Modeling and Dynamic Characteristics of a Variable Speed Wind Turbine. *Journal of Energy Technologies and Policy*, 1, 3, 10–22.
 12. Mali, S. S., Kushare, B. E. (2013). MPPT Algorithms: Extracting Maximum Power from Wind Turbines, *International Journal Of Innovative Research In Electrical, Electronics, Instrumentation And Control Engineering*, 1, 5, 199–202.
 13. Ramakrishnan, V., Srivatsa, S. K. (2012). Pitch Control of Wind Turbine Generator by using New Mechanism, 6, 13, 1–15.
 14. Chunting, Mi., Mariano Filippa. (2004). Modeling and Control of a Variable-Speed Constant-Frequency Synchronous Generator with Brushless Exciter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40, 2, 565–573.
 15. Kotsur M. I. (2014). Osobennosti udarnogo teplovogo vozdeystviya na asinhronnyiy dvigatel s modifitsirovannoy sistemoy impulsnogo regulirovaniya v usloviyah chastyih puskov. *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, 1, 32–36. DOI 10.15588/1607-6761-2014-1-5
 16. Novikov, A. M., Novikov, D. A. (2010). Metodologiya nauchnogo issledovaniya, Moscow, Librokom, 280.
 17. Nemudriy, I. Yu. (2015). Pidvischennya effektivnosti elektromehanichnoyi sistemi vitroelektrichnih ustanovok z aerodinamichnoyu multiplikatsieyu: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tehn. nauk : 05.09.03 Dnipropetrovsk, 20 p.