

УДК 62-83-52-0313

П. Д. Андриенко, д-р техн. наук,
В. П. Метельский, канд. техн. наук,
И. Ю. Немудрый

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ МОЩНОСТИ ВЭУ С АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ МУЛЬТИПЛИКАЦИЕЙ

Аннотация. Рассмотрена возможность использования высокочастотного генератора индукторного типа для повышения эффективности ветроэнергетических установок с аэродинамической мультипликацией. Показано, что применение генератора с частотой 125 Гц, имеющего совмещенные обмотки возбуждения и статора, позволяет снизить массу активной части в два раза при более высоком КПД. Совместное использование генераторов с преобразователем частоты на базе инвертора, ведомого сетью, позволяет получить приемлемые технико-экономические показатели и увеличить мощность установок до 2000 кВт.

Ключевые слова: аэродинамическая мультипликация, ветроэлектрические установки, совмещенные обмотки, высокочастотный индукторный генератор, преобразователи частоты, инверторы, повышение эффективности, мощность ветровой турбины

P. D. Andrienko, ScD.,
V. P. Metelski, PhD.,
I. Yu. Nemudriy

HIGH FREQUENCY GENERATORS USAGE TO INCREASE WPS WITH AERODYNAMIC MULTIPLICATION POWER

Abstract. The possibility of using a high-frequency inductor-type generator to increase the efficiency of wind turbines with a wind animation is analyzed. It is shown that the use of an oscillator with a frequency of 125 Hz, having a combined winding and the stator, to reduce the mass of the active part twice with higher efficiency. Sharing a generator with a frequency converter on the basis of an inverter driven network provides a suitable technical and economic performance and increases the power plants up to 2000 kW.

Keywords: wind animation, wind power installation, combined coil, high-frequency inductor generator, frequency converters, inverters, efficiency, power wind turbine

П. Д. Андриенко, д-р техн. наук,
В. П. Метельский, канд. техн. наук,
И. Ю. Немудрый

ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ВЕУ С АЕРОДИНАМІЧНОЮ МУЛЬТИПЛІКАЦІЄЮ

Анотація. Розглянуто можливість використання високочастотного генератора індукторного типу для підвищення ефективності вітроенергетичних установок з аеродинамічною мультиплікацією. Показано, що застосування генератора з частотою 125 Гц, що має суміщені обмотки збудження і статора, дає змогу знизити масу активної частини у два рази при більш високому ККД. Спільне використання генераторів з перетворювачем частоти на базі веденого мережею інвертора дозволяє отримати прийнятні техніко-економічні показники і збільшити потужність ВЕУ до 2000 кВт.

Ключові слова: аеродинамічна мультиплікація, вітроелектричні установки, суміщені обмотки, високочастотні індукторні генератори, перетворювач частоти, інвертори, підвищення ефективності, потужність вітрових турбін

Введение. Созданная предприятием «Конкорд» (г. Днепропетровск) ветроэлектрическая установка с аэродинамической мультипликацией (ВЭУАМ) типов ТГ-750 и ТГ-100 принципиально позволяет работу на промышленную сеть без промежуточного преобразователя в широком диапазоне изме-

Немудрый И.Ю., 2013

нения скорости ветрового потока, чем она выгодно отличается от классических схем существующих ВЭУ. Конструктивно генераторы расположены на лопастях ВЭУ, что обеспечивает их работу на более высокой частоте вращения без механического мультипликатора. Отсутствие механического мультипликатора и преобразователя и более высокий

© Андриенко П.Д., Метельский В.П.,

момент инерции ветрового колеса существенно снижают себестоимость ВЭУ при относительно высоком качестве генерируемой энергии, поэтому она конкурентоспособна с известными промышленными ВЭУ [1 – 2; 7 – 8].

Повышение эффективности ВЭУ при переменных скоростях ветрового потока реализуется благодаря преобразователю [3; 6; 9]. Указанные достоинства ВЭУАМ обеспечивают перспективу их производства.

Вместе с тем при увеличении мощности ВЭУАМ в единицу применение турбогенераторов промышленной частоты существенно увеличивает их массу, что вызывает определенные трудности в создании механической прочности ветроколеса, на котором расположены турбины. Поэтому снижение веса генераторов при сохранении приемлемых характеристик является актуальной задачей при проектировании ВЭУАМ.

В ряде публикаций имеются сведения об улучшении массогабаритных показателей генераторов индукторного типа, применяемых в ВЭУАМ, однако при сохранении генерируемой частоты, предлагаемые технические решения не позволяют существенно снизить массу генераторов [5]. Это возможно при использовании высокочастотных генераторов, однако последнее требует установки преобразователей частоты, что приводит к дополнительным потерям электроэнергии и увеличению стоимости ВЭУ.

Ниже изложены результаты исследования использования высокочастотного индукторного генератора и способов построения преобразователей частоты, обеспечивающих сохранение основных достоинств ВЭУ с АМ.

Материалы исследования. В существующей установке ВЭУАМ типа ТГ-1000 используются индукторные генераторы типа СГИ-350-0,69-16 с номинальными параметрами (мощность $P_H = 350$ кВт; напряжение $U_H = 690$ В; число оборотов $n_H = 350$ об/мин при номинальной частоте 50 Гц). Обмотка возбуждения генератора – независимая, расположена на статоре.

В таблицы помещены сравнительные результаты расчетов генератора с частотой тока статора 125 Гц при сохранении внешнего диаметра и оборотов ротора генератора СГИ-350-0,69-16. Расчетные данные приведены в относительных единицах к соответствующим данным генератора СГИ. Существенным отличием расчетного генератора является совмещение обмотки возбуждения с обмоткой статора, которая выполнена по схеме соединений (см. рисунок) [5].

Применение совмещенных обмоток требует включения в цепь обмоток статора диодов и потенциально связывает источник питания с обмоткой статора. При напряжении 690 В такое совмещение не встречает технических трудностей при практической реализации.

1. Результаты расчетов характеристик генератора с частотой 125 Гц

Наименование параметра	Тип генератора	
	СГИ-350-0,69-16	Расчетный*
Номинальная мощность	1	1
Номинальное напряжение и ток статора	1	1
Номинальная частота статора	1	2,5
Номинальная частоты вращения ротора	1	1
Наружный диаметр статора	1	1
Число зубцов статора	1	0,66
Длина пакета статора	1	0,625
Число зубцов ротора	1	2,5
Активное сопротивление обмотки статора	1	0,7
Мощность возбуждения	1	0,17
Суммарный вес активной части стали статора и ротора	1	0,6
Вес меди	1	0,54
КПД (расчетный/относительный)	0,945 / 1	0,98 / 1,03
$\cos \varphi$ (расчетный/относительный)	0,95 / 1	0,95 / 1

*Расчет высокочастотного генератора произведен профессором Лушиком В. Д.

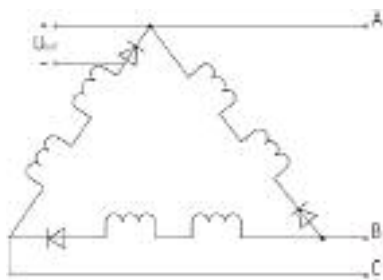


Рис. 1. Схема соединения обмоток статора и источника возбуждения генератора

Наличие внутренней положительной связи по току нагрузки способствует компенсации реакции якоря, что делает внешнюю характеристику генератора более жесткой (примерно в два раза). Это позволяет уменьшить установленную мощность или исключить конденсаторы, включаемые на зажимах статора для повышения жесткости его внешней характеристики [5].

Анализ данных таблицы показывает, что использование повышенной частоты 125 Гц с применением совмещенных обмоток возбуждения и статора позволяет снизить массу активной части генератора примерно в два раза при повышении КПД на 3,5 % и более чем в 5 раз мощность источника возбуждения и, соответственно, снизить стоимость генераторов для установок ТГ-1000.

Использование классической схемы высокочастотного генератора приводит к необходимости установки дополнительных колец для обмотки возбуждения, что в условиях ВЭУАМ нежелательно из-за сложности профилактического обслуживания.

Применение бесщеточного возбуждения приводит к снижению КПД генератора и к снижению надежности системы вследствие усложнения схемы возбуждения.

Заметим, что использование преобразователя частоты открывает перспективу применения синхронных генераторов повышенной частоты с постоянными магнитами, что должно способствовать дальнейшему совершенствованию ВЭУАМ.

Поскольку при заданном диаметре статора мощность и масса генератора пропорциональны его длине, то в габаритах генератора СГИ-350 при сохранении КПД на уровне

не 0,98 % можно получить мощность 650 – 700 кВт.

Для сохранения энергетических КПД на уровне установки ТГ-1000 КПД преобразователя не должен быть ниже

$$\eta_{i\delta} \geq \frac{\eta_A}{\eta_{AD}} = \frac{0,945}{0,98} = 0,96, \quad (1)$$

где $\eta_{пр}$, $\eta_{г}$, $\eta_{гр}$ – КПД преобразователя, высокочастотного и серийного генераторов.

Так как КПД современных преобразователей мощностью более 1000 кВт составляет 0,98-0,99, то очевидно, что совместное использование комплекса высокочастотный генератор-преобразователь обеспечивает приемлемые энергетические показатели.

Такое решение позволяет без увеличения массы генераторов создать ВЭУ АМ с установленной мощностью 1800–2000 кВт, что соответствует современным требованиям к ВЭУ для мощных кустовых ветроэлектростанций.

В работе [6] рассмотрен один из простейших вариантов: использование в качестве преобразователя системы выпрямитель-инвертор, ведомый сетью. Однако применение такого преобразователя при достаточно высоком КПД вызывает ряд проблем по электромагнитной совместимости с сетью.

Решение этой проблемы достигается использованием многофазного инвертирования и импульсного преобразователя повышающего напряжения (ИППН) в звене постоянного тока [3; 5; 9; 10].

С применением многофазного инвертирования снижается уровень гармонических составляющих до требований ГОСТ.

Импульсный преобразователь повышающего напряжения позволяет решить следующие задачи:

1) снизить пульсации момента, связанные с относительно низким быстродействием механизма поворота лопастей при порывах ветрового потока;

2) снизить пульсации мощности при её колебаниях, связанные с особенностью устройства ВЭУ АМ [2];

3) повысить уровень напряжения в звене постоянного тока с целью поддержания минимального угла опережения β инвертора при частоте вращения роторов генераторов

ниже номинальной для обеспечения работы ВЭУ в оптимальном режиме [2].

Для решения указанных задач напряжение ИППН в номинальном режиме регулируется в пределах $1,1 \div 1,15 U_d$. При работе со скоростями вращения ветрового колеса ниже 5 м/с, если минимальная рациональная скорость вращения ротора генератора $\approx 0,5 n_H$, диапазон изменения напряжения составляет $2,1 U_d$. Здесь U_d – выпрямленное напряжение выпрямителей турбогенераторов.

Поддержание постоянного инвертируемого напряжения в звене приводит к работе инвертора с углами $\beta \leq 25 \div 30$ эл. град., что и обеспечивает достаточно высокий коэффициент мощности ($\cos \varphi \approx 0,94 \dots 0,96$).

Компенсация коэффициента мощности по основной гармонике может быть произведена установкой регулируемых батарей косинусных конденсаторов или регулируемых компенсаторов реактивной мощности, наличие которых всегда необходимо при построении мощных ветроэлектростанций для поддержания уровня напряжения в точке подключения их к промышленной сети.

Выводы. Использование высокочастотных генераторов в комплекте с преобразователями позволяет создать ВЭУАМ мощностью свыше 1000 кВт с приемлемыми технико-экономическими показателями.

Список использованной литературы

1. Голубенко Н. С. Тенденции развития ветроэлектрических и безмультипликаторных ветровых установок / Н. С. Голубенко, С. И. Довголюк, А. М. Фельдман, В. А. Цыганов // Нетрадиционная энергетика XXI века - материалы IV международной конференции. – Крым, Гурзуф : – 2003. – С. 68 – 74.

2. Голубенко Н. С. / Моделирование электромеханической систему ВЭУ с аэродинамической мультипликацией в режиме стабилизации скорости ветровых турбин / Н. С. Голубенко, П. Д. Андриенко, И. Ю. Немудрый // *Электротехника и электроэнергетика*. – 2011. – № 1. – С.13 – 20.

3. Андриенко И. Ю. Повышение эффективности ветроэлектрических установок

ТГ–750 / П. Д. Андриенко, И. Ю. Немудрый, В. П. Метельский, А. А. Никонова / *Вестник СевНТУ «Механика, энергетика, экология»*. – 2011. – Вып.119. – С. 109 – 112.

4. Лущик В. Д. Индукторні генератори з суміщинними обмотками / В. Д. Лущик // *Вестник СевНТУ. «Механика, энергетика, экология»*. – 2012. – Вып.120. – С. 55 – 62.

5. Андриенко П. Д. Реализация автономного режима работы ветроэлектрической установки типа ТГ-1000 // П. Д. Андриенко, В. С. Кражан, И. Ю. Немудрый // *Вісник НТУ «ХП»*. – Харків, 2010. – № 2. – 243 с.

6. Цгоев Р. С. Сравнение режимных возможностей ветроэнергетических установок / Р. С. Цгоев. – // *Электротехника*. – Вып. – 12/07. – С. 32 – 38.

7. Johnson G., (1985), *Wind Energy System* / G. Johnson. – New York : – *Prentice Hall*, – No. 4. – 421 p.

8. CWE.C. *Global Wind Report. 2010* [Электронный ресурс]: <http://www.gwec.net> – 15.06.2010.

9. Schreiber D., (2009), *Voltage line side inverter for wind mill application* / D. Schreiber, P. Backedahe, I. Staudt. – *EPE. Wind Energy Chapter*.

10. Линдер Ш. Силовые полупроводниковые приборы обзор и сравнительная оценка / Ш. Линдер // *Электроника*. – 2007. – №10. – С. 9 – 11.

Получено 15.04.2013

References

1. Golubenko N., (2003), Trends in the development of wind power and wind installations without multiplicative / N. Golubenko, S. Dovgolyuk, A. Feldman, V. Ciganov // *Alternative Energy XXI century - the materials of the IV International Conference – Crimea, Gursuf*: – Pp. 68 – 74 [in Russian].

2. Golubenko N., (2011), Simulation of the electromechanical system wind turbines with the aerodynamic multiplication in mode stabilization speed wind turbine / N. Golubenko, P. Andrienko, I. Nemudry // *Electrical engineering and power engineering*. – No.1. – Pp. 13 – 20 [in Russian].

3. Andrienko P., (2011), Improving the efficiency of wind power plants TG-750 / P. Andrienko, I. Nemudry, V. Metelskiy, A. Nikonov // *SevNTU "Mechanics, Energy, Environment"*. – No. 119. – Pp. 109 – 112 [in Russian].

4. Lushchik V., (2012), Inductor generator with combined winding / V. Lushchik // *SevNTU "Mechanics, Energy, Environment"*. – No. 120. – Pp. 55 – 62 [in Ukrainian].

5. Andrienko P., (2010), The implementation of the autonomic mode wind power plant type TG-1000 / P. Andrienko, V. Krazhan, I. Nemudry // *News NTU "HPI"*. – Kharkov. – No. 2. – 243 p. [in Russian].

6. Tsgoev R. Comparison of the wind power modes / R. Tsgoev. // *Electrical Engineering*. – Vol. 12/07. – Pp. 32 – 38 [in Russian].

7. Johnson G., (1985), Wind Energy System / G. Johnson. – New York : – *Prentice Hall*. – No. 4. – 421 p. [in English].

8. CWE.C. Global Wind Report. (2010), [Electronic resource]: <http://www.gwec.net> – 15.06.2010 [in English]

9. Schreiber D., (2009), Voltage line side inverter for wind mill application / D. Schreiber, P. Backedahe, I. Staudt – *EPE. Wind Energy Chapter/ 2009* [in English].

10. Linder S., (2007), Power semiconductors review and comparative assessment / S. Linder // *Electronics*. – No. 10. – Pp. 9 – 11 [in Russian].



Андриенко
Петр Дмитриевич,
д-р техн. наук, проф.,
зав. каф. электрических и
электронных аппаратов За-
порожского нац. техниче-
ского ун-та,
(061) 22-38-381,
andrpd@ukr.net



Метельский
Владимир Петрович,
канд. техн. наук, проф.,
декан ЭТФ ЗНТУ,
(061) 764-46-25,
nikanto@mail.ru



Немудрый
Игорь Юрьевич, аспирант
ЗНТУ,
(061) 764-46-25,
nikanto@mail.ru