

Бесконтактный генератор с регулируемым возбуждением

КОПТЯЕВ Е.Н., ИВЛЕВ М.Л.

САФУ, Архангельск, Россия

Развитие ветроэнергетических установок идет в направлении повышения их надежности и эффективности, снижения затрат на обслуживание при длительной эксплуатации. Для этого используются синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов, параметры которых во многом определяют эффективность и габариты энергоустановки в целом. В статье предложена новая конструкция бесщеточного синхронного генератора с продольным к оси вращения ротора возбуждением. Генератор отличается простотой полюсов ротора и удвоенной частотой напряжения на вторичной обмотке. Отмечается возможность изготовления корпуса статора из дешевого пластика и подобных немагнитных материалов, благодаря чему достижимо снижение массы и стоимости генератора в целом, а основной областью применения могут быть энергоустановки малой и средней мощности. Для замыкания магнитного потока возбуждения ротора установлены продольные магнитопроводы с катушками на них в вырезах немагнитного корпуса статора. Это позволяет улучшить теплоотвод от вторичной обмотки и упростить сборку. Возможно плавное регулирование выходного напряжения в широком диапазоне частоты вращения. Приведены результаты моделирования магнитного поля в воздушном зазоре статор–ротор и формы выходного напряжения для базовой конфигурации магнитной системы.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ветроэнергетическая установка, синхронный генератор, обмотка возбуждения, габариты

Ветроэнергетические установки (ВЭУ) широко используются во многих регионах мира. В ряде случаев их совокупная мощность покрывает значительную часть всей потребности в электроэнергии. К достоинствам ВЭУ относят не только экологичность, но и возможность эксплуатации в удаленных районах, не имеющих связи с внешними распределительными сетями. Кроме того, при использовании энергии ветра решается проблема обеспечения запасами топлива районов Крайнего Севера. Мировой опыт эксплуатации ВЭУ показывает рентабельность их использования в регионах с высоким ветропотенциалом [1–3]. Известны и распределенные электрические сети с большим количеством возобновляемых источников энергии малой и средней мощности, работающих на общую сеть [3–8].

Последние годы ВЭУ комплектуются синхронными генераторами на постоянных магнитах, что объясняется как их хорошими массогабаритными показателями и эффективностью, так и отсутствием щеточного аппарата [5–7]. Однако создание полюсов из массива постоянных магнитов с чередующейся полярностью сложно технологически и, кроме того, радиальное расположение может вызвать их разрушение при большой скорости вращения в аварийных режимах [5, 7]. Применение когтеобразной конструкции полюсов ротора генератора, как правило, ограничено размерами цилиндрического магнита и ведет к увеличению габаритов с ростом мощности генераторов. В целом, себестоимость генератора в известной степени находится во взаимосвязи с массой и определяет целесообразность его применения.

ВЭУ характерны значительные колебания скорости вращения ротора генератора и частоты переменного напряжения на его выходной обмотке. Использование двойного преобразования электроэнергии со звеном постоянного тока и автономным инвертором напряжения (АИН) [8–22] обеспечивает стабильность частоты и уровня напряжения на выходе, а также возможность управления распределением мощности в электрических сетях с большим количеством ВЭУ. Выходная обмотка синхронного генератора выполняется многофазной и подключается к полупроводниковому выпрямителю, питающему звено постоянного тока АИН [9–12]. Поскольку у современных полупроводниковых комплектов в настоящее время исчерпаны пути для ощутимого повышения эффективности преобразования электрической энергии, а их габариты компактны, то одним из основных путей совершенствования ВЭУ становится улучшение конструкции генераторов, в том числе упрощение технологии их сборки и снижение эксплуатационных расходов на обслуживание.

Использование постоянных магнитов позволяет снизить массогабаритные показатели генераторов, но усложняет их конструкцию и сборку [5–7]. Генераторы на постоянных магнитах не позволяют регулировать выходное напряжение в широком диапазоне и снимать возбуждение в аварийных ситуациях.

На рис. 1,а показан ротор с когтеобразными полюсами, изготовленными из ферромагнитного материала. Благодаря особой форме обеспечивается чередование полярности полюсов N и S . Как правило, такая кон-

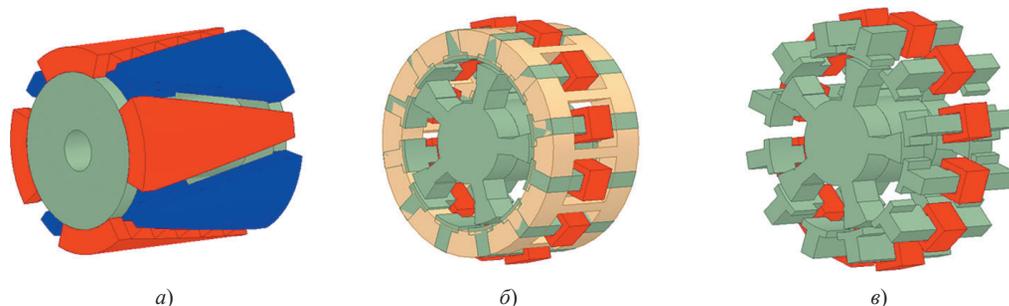


Рис. 1. Конструкции синхронного генератора с возбуждением от постоянного магнита: *a* – когтеобразный ротор для синхронных генераторов; *б* – генератор с продольным возбуждением в сборе; *в* – магнитная система генератора с продольным возбуждением без корпуса статора

Fig. 1. Designs of a synchronous generator with excitation from a permanent magnet: *a* – claw-like rotor for synchronous generators; *b* – generator with longitudinal excitation in assembly; *c* – magnetic system of a generator with longitudinal excitation without a stator housing

струкция удобна для применения в электрических микромашинах, но характеризуется повышенными полями рассеяния, а также более сложной геометрией магнитной системы из шихтованной электротехнической стали. Поток возбуждения формируется цилиндрическим магнитом в центре ротора и намагниченным в направлении оси вращения. Торцевые пакеты полюсов загнуты внутрь и установлены с чередованием полярности. В таком случае формируемое магнитное поле ротора распределено нелинейно и сужается на концах полюсов, что делает конструкцию неудобной для использования в генераторах средней и большой мощности.

Предлагается генератор с продольным возбуждением, показанный на рис. 1, *б* в сборе [23]. Очевидно, что корпус статора может быть немагнитным и выполнять функцию только держателя магнитной системы с обмотками. Полюса ротора при такой конструкции играют роль раздачи магнитного потока возбуждения. На рис. 1, *в* показана конструкция магнитной системы генератора с продольным возбуждением без несущего корпуса. Оригинальность конструкции генератора с продольным магнитным потоком подтверждена патентами [24, 25].

Из рис. 2 видно, что на роторе генератора предлагаемой конструкции с торцов расположены полюса, которые не загнуты, а магнитопровод статора представляет собой комплект продольных штырей, которые замыкают между собой магнитный поток с полюсов ротора и выполняются шихтованными для исключения вихревых токов в них. Полярность магнитного потока в такой конструкции не изменяется, а полюса с любой стороны ротора имеют одинаковую полярность. Магнитная система полюсов выступает “механическим” коммутатором магнитного поля ротора, этого достаточно для генерации переменного напряжения в обмотках статора.

Использование продольного возбуждения по оси вращения ротора означает, что массив корпуса статора в этом случае может выполняться из немагнитного материала (например некоторых видов пластика) и как следствие, иметь меньшие массу и стоимость. Катуш-

ки обмоток расположены на продольных штырях из ферромагнитного материала, закрепленных в проемах внутри полости статора. Отличием рассматриваемой конструкции (рис. 2) является расположение обмоток возбуждения (полюсов) также на статоре, что дает возможность отказаться от щеток и колец, сохранив глубокое регулирование.

Сложный характер распределения магнитного потока приводит к искажениям формы выходного напряжения (рис. 3). Однако качество переменного напряжения на выходе можно улучшить за счет оптимизации магнитной системы, в частности, используя нелинейный воздушный зазор под полюсами, что позволяет достичь лучшего качества наведенной ЭДС в катушках. Несколько улучшается форма напряжения и в составных обмотках с большим количеством катушек, включенных последовательно.

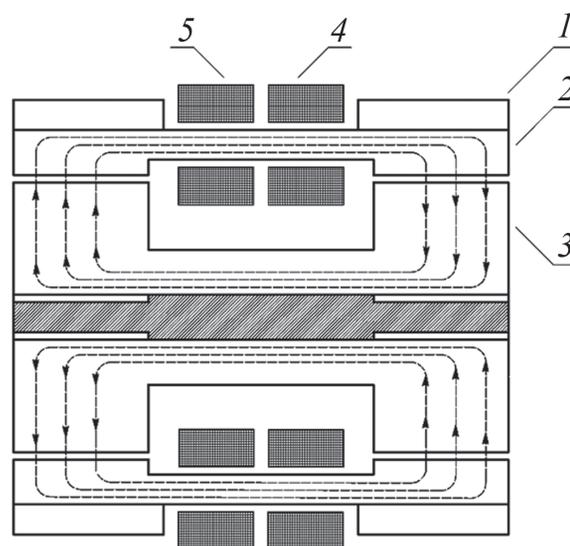


Рис. 2. Сечение генератора с продольным возбуждением вдоль оси вращения: *1* – корпус статора; *2* – стержень магнитной системы; *3* – полюса ротора; *4* – катушка выходной обмотки; *5* – катушка обмотки возбуждения

Fig. 2. View of a generator with longitudinal excitation along the axis of rotation: *1* – stator housing; *2* – magnetic system rod; *3* – rotor poles; *4* – output coil, *5* – excitation coil

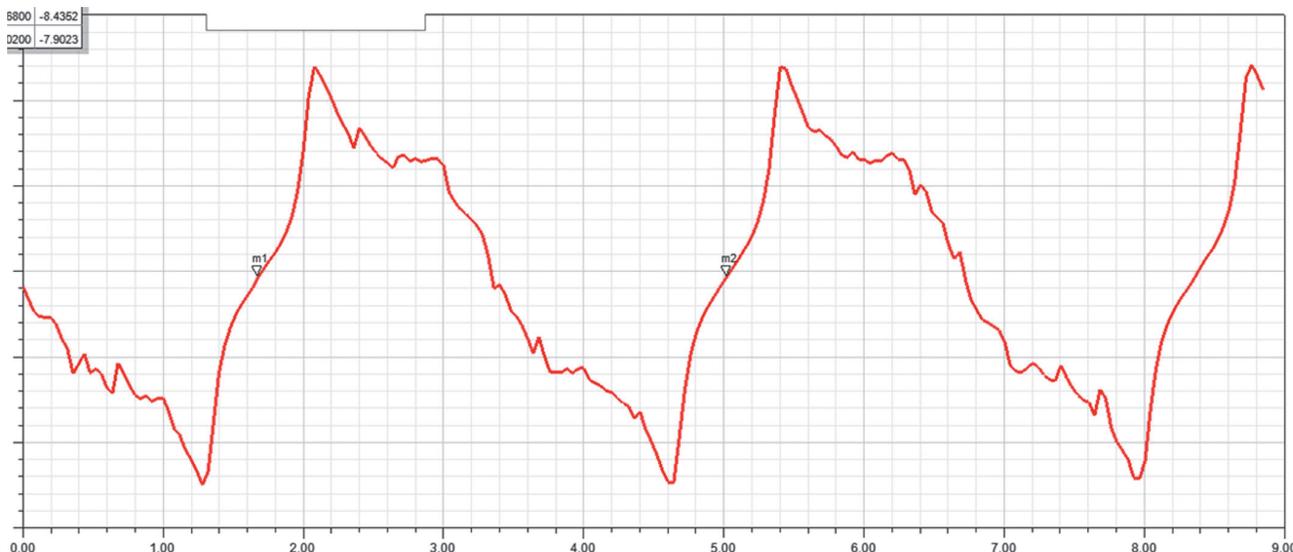


Рис. 3. Форма выходного напряжения для единичной выходной катушки генератора с продольным возбуждением

Fig. 3. The output voltage form for a single output coil of the generator with longitudinal excitation

Особенности предлагаемой конструкции упрощают сборку и снижают себестоимость генератора в целом. В отличие от известных конструкций бесконтактных генераторов на основе составной электрической машины “подвозбудитель–возбудитель–генератор”, где на основе обращенной конструкции промежуточного возбудителя удалось исключить из конструкции щетки и контактные кольца, данная конструкция (рис. 2) не является составной.

В ВЭУ, как было отмечено выше, часто используется двойное преобразование электроэнергии по цепочке выпрямитель–инвертор–сеть. В таких установках может иметь большее значение частота на выходе генератора, что определяет количество пульсаций выпрямленного напряжения, и в случае продольного униполярного возбуждения она является удвоенной и описывается формулой:

$$f = \left(\frac{60}{N_{RPM} P} \right)^{-1},$$

где N_{RPM} – скорость вращения ротора; P – количество полюсов ротора.

На рис. 4 показана типовая структура ВЭУ, в которой СГ может быть генератором с регулируемым продольным возбуждением. По своей сути он является униполярным (*homopolar*), поскольку полярность магнитного потока никогда не меняет свой знак, однако наводимая ЭДС также является переменной и симметричной, что определяется законом электромагнитной индукции [26], согласно которому полярность наведенной ЭДС определяется знаком производной и может изменяться без смены полюсов возбуждения.

Действительно, вместе с общеизвестным фактом, что амплитуда наведенной в обмотке ЭДС определяет-

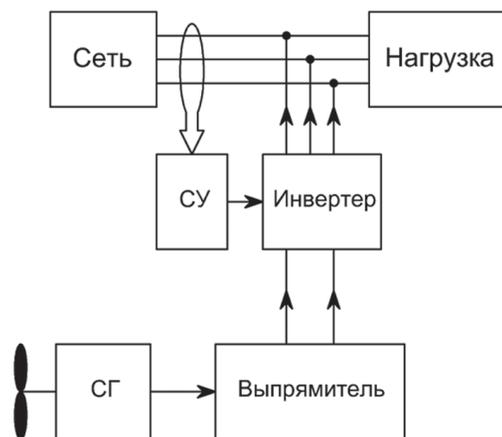


Рис. 4. Структура современной ВЭУ: СГ – синхронный генератор; СУ – система управления

Fig. 4. The structure of a modern wind turbine: СГ – synchronous generator; СУ – control system

ся скоростью изменения магнитного потока, а не его абсолютными значениями, вытекает зависимость полярности ЭДС от характера изменения магнитного потока. Вне зависимости от полярности процесс нарастания скорости изменения во времени магнитного потока дает отрицательную ЭДС, а ее убывание – положительную. Это определяет сдвиг на 90 эл. градусов между графиком полувольт магнитного потока и наведенной в обмотке ЭДС (рис. 5). График на рис. 5 соответствует классическому ротору с когтеобразными полюсами и чередованием полярности магнитных полюсов.

На рис. 6 показан полученный в среде программирования ANSYS график выходной ЭДС для предлагаемой конструкции с продольным возбуждением генератора при последовательном соединении катушек статора.

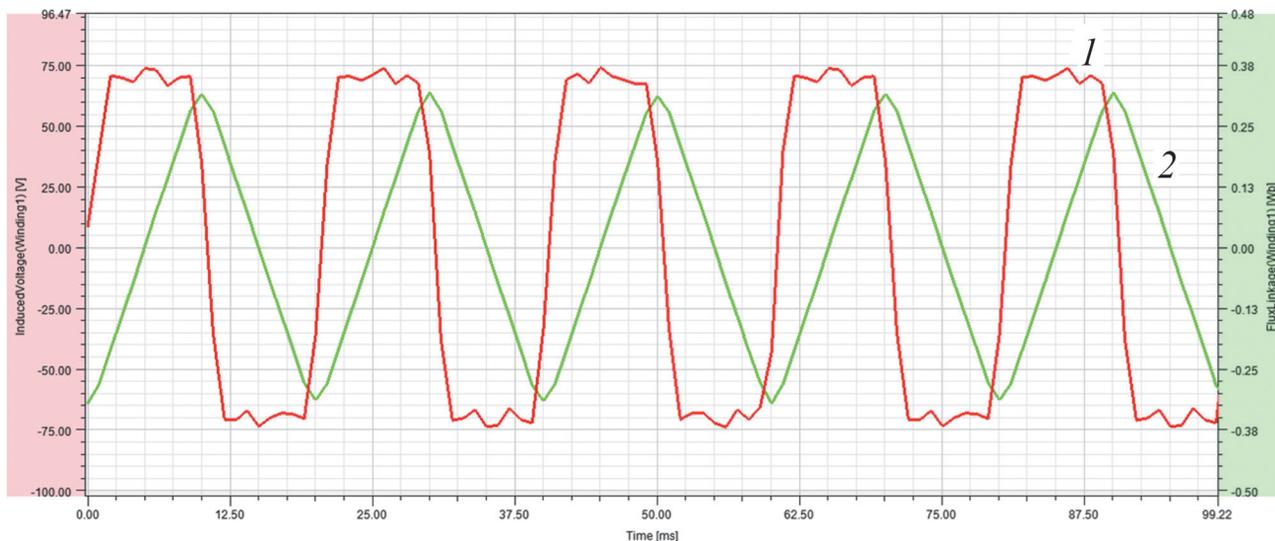


Рис. 5. График выходной ЭДС (1) и потокосцепления (2) для ротора с чередованием магнитных полюсов

Fig. 5. Waveform of output EMF (1) and flux linkage (2) for a rotor with alternating magnetic poles

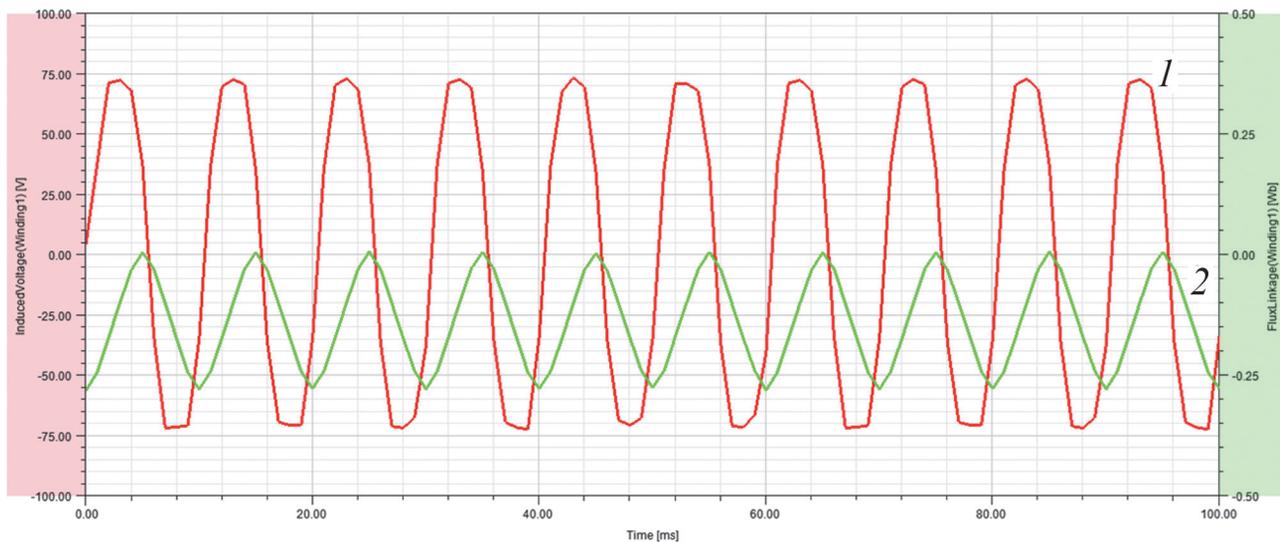


Рис. 6. График выходной ЭДС (1) и потокосцепления (2) для ротора без смены полярности магнитных полюсов

Fig. 6. Waveform of output EMF (1) and flux linkage (2) for a rotor without alternating magnetic poles

Из графиков видно, что полярность ЭДС на выходе катушки статора изменяет свой знак при потокосцеплении одной полярности (кривая в нижней половине). Частота наведенной ЭДС ожидаемо равна частоте переменной составляющей потокосцепления, однако разница заключается качественно в характере изменения магнитного потока: при той же скорости вращения ротора и количестве полюсов будет удвоенное количество полуволн выходной ЭДС из-за периодичности смены процессов нарастания и убывания скорости изменения магнитного потока. В этом случае каждый полюс ротора формирует выходную полуволну ЭДС. Это позволяет говорить о возможном преимуществе предлагаемой конструкции генератора при низкой скорости вращения вала ротора, заключающемся в удвоении частоты на выходе обмотки статора и получении больше

пульсаций на выходе выпрямителя, питающего вход АИН. Удвоение частоты на выходе генератора предлагаемой конструкции объясняется заменой пар разноименных полюсов на единичные полюса.

Вместе с тем, будут иметь значение как число полюсов ротора (которое может быть нечетным), так и их соотношение с числом стержней с катушками на статоре. И если частота на выходе единичной катушки будет определяться скоростью вращения и числом полюсов ротора, то фазовый сдвиг на ней определяется пространственным сдвигом катушек на статоре. Возможно создание многофазных вариантов, когда катушки обмотки возбуждения охватывают более двух стержней статора, а количество полюсов (зубцов) ротора более чем в два раза меньше, чем число стержней магнитопровода на статоре. В целом необходимо обеспечивать

это соотношение кратным, причем количество полюсов ротора всегда будет меньше числа стержней магнитопровода на статоре в целое число раз.

Следует отметить, что при вращении ротора происходит коммутация магнитного потока катушек возбуждения, расположенных на статоре и охватывающих по два или более стержней магнитопровода каждая, а меньшее в два и более раз число полюсов ротора обеспечивает переход магнитного потока между ними.

На рис. 7 изображена модель описанной конструкции, созданная в программном комплексе ANSYS.

Представленный вариант является однофазным, т.е. обеспечивает генерирование однофазной ЭДС, однако сам принцип его работы может быть масштабирован до трехфазной системы, а в некоторых случаях и шестифазной. Расположение катушек обмотки возбуждения на статоре с катушками выходной обмотки на общих стержнях магнитопровода обеспечивает свободный доступ без щеток и контактных колец в единой, а не составной конструкции. Ротор выступает в качестве коммутатора поля обмотки возбуждения на статоре и не содержит контактных колец и щеток.

Выводы. Предложенная конструкция генератора может применяться в ВЭУ средней мощности, имеет ряд конструктивных особенностей и преимуществ. Благодаря удобной компоновке и конструкции генератора может быть упрощена технология сборки и снижена стоимость составных частей. Созданная 3D-модель показала, что удвоение частоты напряжения в катушках статора происходит при той же скорости вращения. Это может быть актуально в низкооборотных ВЭУ средней мощности и позволит улучшить качество напряжения в звене постоянного тока. Главным же преимуществом является отсутствие щеток и колец в единой конструкции генератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика. СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2016, 424 с.
2. Мартьянов А.С. Исследование алгоритмов управления и разработка контроллера ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск: 2016, 174 с.
3. Yuan X., et al. DC-link Voltage Control of a Full Power Converter for Wind Generator Operating in Weak-Grid Systems. – IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, vol. 24, No. 9, pp. 2178–2192, DOI:10.1109/TPEL.2009.2022082.
4. Bingyi Z., et al. A Switchable Cascaded Multi-DC-Branch for Permanent Magnet Synchronous Generator in Wide Speed Range on Wind Energy Conversion System. – IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2017, DOI:10.1109/PEDS.2017.8289210.
5. Furlani E.P. Permanent Magnet and Electromechanical Devices. San Diego: Academic press, 2001, 537 p.
6. Gieras J., Wing M. Permanent Magnet Motor Technology. N.Y.: Marcel Dekker, 2002, 611 p.
7. Hanselman D.C. Brushless Permanent-Magnet Motor Design. N.Y.: McGraw-Hill, 1994, 195 p.
8. Labidi Z.R., Schulte H., Mami A. Modeling and Optimal Torque Control of Small Wind Turbines with Permanent Magnet Synchronous Generators. – International Conference on Green Energy Conversion Systems, 2017, DOI:10.1109/GECS.2017.8066149.

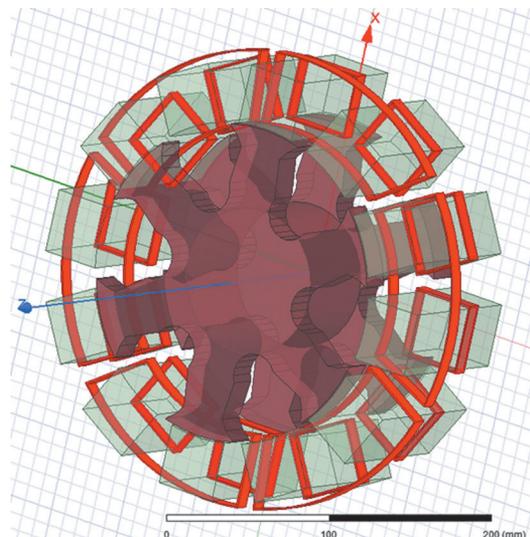


Рис. 7. Внешний вид бесконтактного генератора с обмоткой возбуждения на статоре в 3D-отображении программы ANSYS

Fig. 7. Overview of a contactless generator with a excitation winding on the stator in 3D display of the ANSYS software

9. Maslov A.E., Mytsyk G.S. Voltage-Stabilized Brushless Permanent Magnets Generator with Reversible Voltage Booster Channel. – International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, Sochi, Russia, 2019, DOI:10.1109/ICIEAM.2019.8743079.
10. Godoy R.B., et al. A HPF AC-AC Converter for Permanent Magnet Generator Applications. – SPEEDAM, Pisa, Italy, 2010, DOI:10.1109/SPEEDAM.2010.5542286.
11. Shyam B., Raj A.B., Thomas P.C. A Novel Wind Energy Conversion System with Power Quality Improvement Features. – ISGT2011, India, 2011, DOI:10.1109/ISET-India.2011.6145360.
12. Singh A., Benzaquen J., Mirafzal B. Current Source Generator–Converter Topology for Direct-Drive Wind Turbines. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, vol. 54, iss. 2, pp. 1663–1670.
13. Bharanikumar R., et al. Steady State Analysis of Wind Turbine Driven PM Generator with Power Converters. – First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, India, 2008, DOI:10.1109/ICETET.2008.135.
14. Saleh S.A.M. Testing the Performance of a Resolution-Level MPPT Controller for PMG-Based Wind Energy Conversion Systems. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, vol. 53, iss.3, pp. 2526–540.
15. Xu Z., et al. Unified Control for the Permanent Magnet Generator and Rectifier System. – 26th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Fort Worth, TX, USA, 2011, DOI:10.1109/APEC.2011.5744853.
16. Otero-Verdejo C., et al. Grid-Connected Wind Microinverter for a PMG Based Savonius–Gorlov Turbine. – International Conference on New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE), Spain, 2013, DOI:10.1109/SmartMILE.2013.6708184.
17. Saleh S.A., Ahshan R. Resolution-Level-Controlled WM Inverter for PMG-Based Wind Energy Conversion System. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, vol. 48, iss. 2, pp.750–763.
18. Tsuda T., et al. Effects of the Built-in Permanent Magnet Rotor on the Equivalent Circuit Parameters of a Permanent Magnet Induction Generator. – IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, vol. 22, iss. 3, pp. 798–799.
19. Nihonyanagi A., Takemoto M., Ogasawara S. Examination of an Axial-Gap Generator with Ferrite Permanent Magnets Realizing Miniaturization and High Output Power of Engine Generators. – IEEE

International Electric Machines & Drives Conference, ID, USA, 2015, DOI:10.1109/IEMDC.2015.7409075.

20. **Yang X., Patterson D., Hudgins J.** Permanent Magnet Generator Design and Control for Large Wind Turbines. – IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, CO, USA, 2012, DOI:10.1109/PEMWA.2012.6316367.

21. **Virfan B., et al.** Pole Magnets Segmentation Effect on Permanent Magnet Synchronous Generators. – International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN), Romania, 2017, DOI:10.1109/SIELMEN.2017.8123318.

22. **Muyeen S.M., et al.** Transient Stability Analysis of Permanent Magnet Variable Speed Synchronous Wind Generator. – International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), South Korea, 2007, DOI:10.1109/ICEMS.2007.4412242.

23. **Сковпень С.М., Коновалова А.И., Коптяев Е.Н.** Синхронный генератор с продольным возбуждением от постоянного магнита. – Научно-технические ведомости Севмашвуза, 2020, № 1, с. 15–19.

24. **Пат. RU 197778 U1.** Генератор с продольным возбуждением / Е.Н. Коптяев, 2020.

25. **Пат. RU 198522 U1.** Улучшенный генератор с продольным возбуждением / Е.Н. Коптяев, 2020.

26. **Демирчян К.С. и др.** Теоретические основы электротехники: т.1. СПб.: Питер, 2003, 463 с.

[23.09.2021]



Авторы: Коптяев Евгений Николаевич – старший преподаватель кафедры “Судовая электроэнергетика и автоматика”, Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия.



Ивлев Марк Леонидович – кандидат техн. наук, доцент кафедры “Судовая электроэнергетика и автоматика”, Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия.

Elektrichestvo, 2022, No. 2, pp. 65–71

DOI:10.24160/0013-5380-2022-2-65-71

A Brushless Adjustable Excitation Generator

КОПТЯЕВ Evgeniy N. (Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia) – Senior Lecturer of the Ship Power Engineering and Automation Dept.

IVLEV Mark L. (Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia) – Docent of the Ship Power Engineering and Automation Dept., Cand. Sci. (Eng.).

Wind turbines are further developed toward improving their reliability and efficiency, and reducing maintenance costs during long-term operation. For this purpose, synchronous generators with excitation from permanent magnets are used, the parameters of which determine in many respects the efficiency and dimensions of the power plant as a whole. The article proposes a new design of a brushless synchronous generator with excitation longitudinal with respect to the rotor rotation axis. The generator features a simple design of its rotor poles and double frequency of the secondary winding voltage. The possibility of manufacturing the stator housing from cheap plastic or similar non-magnetic materials is noted, due to which a reduction in the generator mass and cost can be achieved; such generator can find use mainly in small and medium capacity power plants. To close the rotor excitation magnetic flux, longitudinal magnetic cores with coils on them are installed in the slots of the non-magnetic stator housing. This makes it possible to improve heat removal from the secondary winding and simplify the assembly. Smooth adjustment of the output voltage in a wide range of rotation speeds is possible. The results of modeling the magnetic field in the air gap between the stator and rotor and the output voltage waveform for the basic magnetic system configuration are presented.

Key words: wind turbine, synchronous generator; excitation winding, overall dimensions

REFERENCES

1. **Elistratov V.V.** *Vozobnovlyаемая энергетика* (Renewable Energy). SPb.: Izd-vo politekhn. un-ta, 2016, 424 p.

2. **Mart'yanov A.S.** *Issledovanie algoritmov upravleniya i razrabotka kontrollera vetroenergeticheskoy ustanovki s vertikal'noy os'yu vrashcheniya: dis. ... kand. tekhn. nauk* (Control Algorithms Research and Development of a Controller of a Wind Turbine with a Vertical Axis of Rotation: dis. ... Cand. Sci. (Eng.)). Chelyabinsk: 2016, 174 p.

3. **Yuan X., et al.** DC-link Voltage Control of a Full Power Converter for Wind Generator Operating in Weak-Grid Systems. – IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, vol. 24, No. 9, pp. 2178–2192, DOI:10.1109/TPEL.2009.2022082.

4. **Bingyi Z., et al.** A Switchable Cascaded Multi-DC-Branch for Permanent Magnet Synchronous Generator in Wide Speed Range on Wind Energy Conversion System. – IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2017, DOI:10.1109/PEDS.2017.8289210.

5. **Furlani E.P.** Permanent Magnet and Electromechanical Devices. San Diego: Academic press, 2001, 537 p.
6. **Gieras J., Wing M.** Permanent Magnet Motor Technology. N.Y.: Marcel Dekker, 2002, 611 p.
7. **Hanselman D.C.** Brushless Permanent-Magnet Motor Design. N.Y.: McGraw-Hill, 1994, 195 p.
8. **Labidi Z.R., Schulte H., Mami A.** Modeling and Optimal Torque Control of Small Wind Turbines with Permanent Magnet Synchronous Generators. – International Conference on Green Energy Conversion Systems, 2017, DOI:10.1109/GECS.2017.8066149.
9. **Maslov A.E., Mytsyk G.S.** Voltage-Stabilized Brushless Permanent Magnets Generator with Reversible Voltage Booster Channel. – International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, Sochi, Russia, 2019, DOI:10.1109/ICIEAM.2019.8743079.
10. **Godoy R.B., et al.** A HPF AC-AC Converter for Permanent Magnet Generator Applications. – SPEEDAM, Pisa, Italy, 2010, DOI:10.1109/SPEEDAM.2010.5542286.
11. **Shyam B., Raj A.B., Thomas P.C.** A Novel Wind Energy Conversion System with Power Quality Improvement Features. – ISGT2011, India, 2011, DOI:10.1109/ISET-India.2011.6145360.
12. **Singh A., Benzaquen J., Mirafzal B.** Current Source Generator–Converter Topology for Direct-Drive Wind Turbines. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, vol. 54, iss. 2, pp. 1663–1670.
13. **Bharanikumar R., et al.** Steady State Analysis of Wind Turbine Driven PM Generator with Power Converters. – First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, India, 2008, DOI:10.1109/ICETET.2008.135.
14. **Saleh S.A.M.** Testing the Performance of a Resolution-Level MPPT Controller for PMG-Based Wind Energy Conversion Systems. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, vol. 53, iss.3, pp. 2526–540.
15. **Xu Z., et al.** Unified Control for the Permanent Magnet Generator and Rectifier System. – 26th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Fort Worth, TX, USA, 2011, DOI:10.1109/APEC.2011.5744853.
16. **Otero-Verdejo C., et al.** Grid-Connected Wind Microinverter for a PMG Based Savonius–Gorlov Turbine. – International Conference on New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE), Spain, 2013, DOI:10.1109/SmartMILE.2013.6708184.
17. **Saleh S.A., Ahshan R.** Resolution-Level-Controlled WM Inverter for PMG-Based Wind Energy Conversion System. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, vol. 48, iss. 2, pp.750–763.
18. **Tsuda T., et al.** Effects of the Built-in Permanent Magnet Rotor on the Equivalent Circuit Parameters of a Permanent Magnet Induction Generator. – IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, vol. 22, iss. 3, pp. 798–799.
19. **Nihonyanagi A., Takemoto M., Ogasawara S.** Examination of an Axial-Gap Generator with Ferrite Permanent Magnets Realizing Miniaturization and High Output Power of Engine Generators. – IEEE International Electric Machines & Drives Conference, ID, USA, 2015, DOI:10.1109/IEMDC.2015.7409075.
20. **Yang X., Patterson D., Hudgins J.** Permanent Magnet Generator Design and Control for Large Wind Turbines. – IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, CO, USA, 2012, DOI:10.1109/PEMWA.2012.6316367.
21. **Virlan B., et al.** Pole Magnets Segmentation Effect on Permanent Magnet Synchronous Generators. – International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN), Romania, 2017, DOI:10.1109/SIELMEN.2017.8123318.
22. **Muycen S.M., et al.** Transient Stability Analysis of Permanent Magnet Variable Speed Synchronous Wind Generator. – International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), South Korea, 2007, DOI:10.1109/ICEMS.2007.4412242.
23. **Skovpen' S.M., Konovalova A.I., Koptyaev E.N.** *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sevmarshvtuza – in Russ. (Scientific and Technical Bulletin of Sevmarshvtuz)*, 2020, No. 1, pp. 15–19.
24. **Pat. RU 197778 U1.** *Generator s prodol'nym vzbuzhdeniem (Generator with Longitudinal Excitation)* / E.N. Koptyaev, 2020.
25. **Pat. RU 198522 U1.** *Uluchshenny generator s prodol'nym vzbuzhdeniem (Improved Generator with Longitudinal Excitation)* / E.N. Koptyaev, 2020.
26. **Demirchyan K.S., et al.** *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniky (Theoretical Foundations of Electrical Engineering): vol.1.* SPb.: Piter, 2003, 463 p.

[23.09.2021]