

Научная статья
УДК 621.311
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.2.005

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ КОЛЬСКОЙ ВЭС

Вера Васильевна Ярошевич¹, Алексей Сергеевич Карпов², Елизавета Игоревна Губская³

^{1, 2, 3}Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия

¹*v.yaroshevich@ksc.ru*

²*a.karpov@ksc.ru*

³*e.gubskaya@ksc.ru*

Аннотация

Объект исследования в данной статье — электрическая сеть Кольской ВЭС, которая является самым крупным действующим ветропарком за полярным кругом. Приведено описание нового объекта и результаты точечных регистраций показателей качества электроэнергии на подстанции, имеющей гальваническую связь с Кольской энергосистемой. Также выполнен упрощенный аналитический обзор наиболее уязвимых с точки зрения электромагнитной совместимости мест для рассматриваемого участка энергосистемы.

Ключевые слова:

подстанция, электрическая сеть, ветроэлектростанция, показатели качества электроэнергии, электромагнитная совместимость

Благодарности:

работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-20051 «Разработка технических решений для эффективного электроснабжения потребителей Арктической зоны РФ»).

Original article

STUDY OF ELECTRIC POWER PARAMETERS OF THE KOLA WIND FARM

Vera V. Yaroshevich¹, Aleksei S. Karpov², Elizaveta I. Gubskaya³

^{1, 2, 3}*Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia*

¹*v.yaroshevich@ksc.ru*

²*a.karpov@ksc.ru*

³*e.gubskaya@ksc.ru*

Abstract

The research object is the electrical network of the Kola Wind Farm that is the largest one operating above the Arctic Circle. The article describes this new facility and shows the results of power quality indices point recordings carried out at the substation which has galvanic connection with the Kola grid. A simplified analytical review of locations that are the most vulnerable for the considered section of the power system in terms of electromagnetic compatibility is also performed.

Keywords:

substation, electrical network, wind farm, power quality indices, electromagnetic compatibility

Acknowledgments:

This work was supported by the Russian Science Foundation (project № 24-29-20051 “Development of technical solutions for efficient power supply to consumers of the Arctic zone of the Russian Federation”).

Развитие Арктики является приоритетным на сегодняшний момент направлением для многих мировых держав, при этом удаленные потребители Арктики (как промышленные, так и муниципальные) нуждаются в стабильном энергоснабжении. Для этих целей в 2023 г. был сооружен крупнейший за полярным кругом ветропарк «Кольская ВЭС». Строительством ветропарка занималась итальянская компания «Энел», имевшая до конца 2023 г. представительство в России — ПАО «Энел Россия». Площадкой для строительства было выбрано место в 80 км от города Мурманска в сторону поселка Териберка и каскада Серебрянских ГЭС на основе исследований и обосновывающих расчетов ЦЭС КНЦ РАН, произведенных в 1990-х гг.

Ветрогенераторы, точнее целые парки генераторов, становятся незаменимыми в условиях Арктики, и характерным примером этого является Кольская ВЭС, ветропарк которой оснащен 57 турбинами, его площадь 257 гектаров, а общая установленная мощность после запуска 2-й очереди достигла 202 МВт.

В ходе реорганизации текущим владельцем Кольской ВЭС является ПАО «ЭЛ5-Энерго», в составе которой находятся 3 ГРЭС (Конаковская, Среднеуральская и Невинномысская), а также ВЭС в Ростовской области, при этом основным держателем акций является Группа «Лукойл».

Оборудование ветропарка «Кольская ВЭС» является основным потребителем подстанции ПС 150/35 кВ, которая подключена к энергосистеме Мурманской области (Мурманского филиала ПАО «Россети Северо-Запад») через ПС «Мурманская». Все ветроустановки (ВЭУ) ветропарка объединены в 7 коллекторов (КЛ), в каждом от 7 до 9 ВЭУ, посредством подземных кабельных линий 35 кВ они собираются на подстанции. Далее мощность передается на главный трансформатор подстанции, где напряжение повышается до 150 кВ и далее по воздушной линии передается на подстанцию в Мурманске (рис. 1). Длина линии около 70 км. При помощи Кола-Карельского транзита мощность может перетекать из Мурманской области в Карельскую энергосистему и через нее в общую энергосистему страны. Одним из важных преимуществ новой ВЭС по сравнению с традиционными источниками электроэнергии является динамичность системы при общем первичном регулировании частоты (ОПРЧ). Для ВЭС этот показатель составляет 100 % за 10 секунд (по данным АО «Системный оператор единой энергетической системы»). Данный показатель диверсифицирует генерирующие возможности Кольской энергосистемы и позволяет более гибко производить автоматическое управление электроэнергетическим режимом.

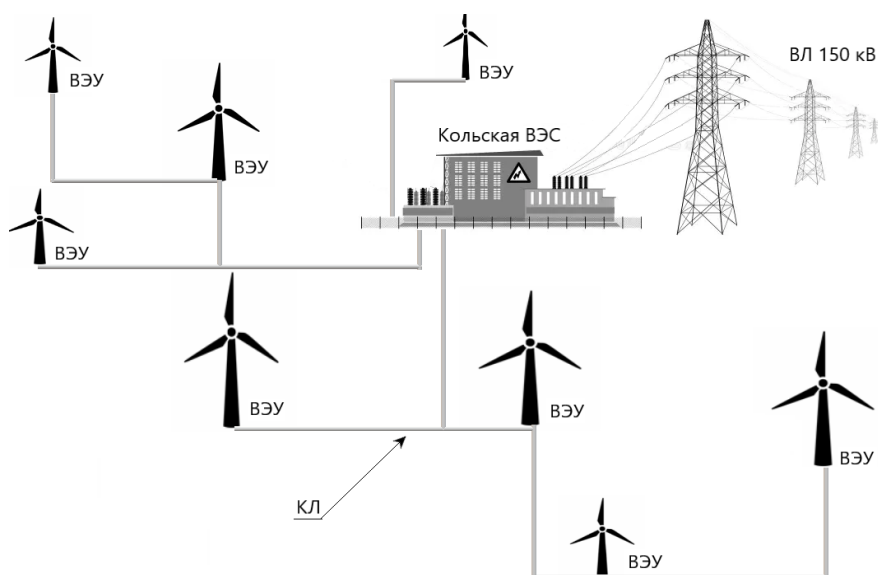


Рис. 1. Схематичное электроснабжение ветропарка
Fig. 1. Schematic diagram of the wind farm power supply

Для подключения новых объектов энергетики (Кольская ВЭС) к Единой системе электроснабжения необходимо, чтобы показатели качества электрической энергии (ПКЭ) новых объектов соответствовали нормам стандарта ГОСТ 32144-2013 [1–5]. Практики использования подобных ВЭУ в тундре Заполярья и анализа электрических характеристик их работы ранее не существовало ни в России, ни в мире, что является уникальным опытом для электроэнергетики Крайнего Севера. С целью проверки соответствия значений ПКЭ установленным требованиям [2] на подстанции «Кольская ВЭС» и была разработана методика синхронизированной одновременной регистрации значений ПКЭ и произведены замеры четырьмя сертифицированными приборами.

Для контроля ПКЭ использовались сертифицированные анализаторы качества электрической энергии Metrel типа MI 2893. Прибор Metrel MI 2893 Power Master XT является анализатором класса А по ГОСТ 30804.4.30 [3], что позволяет использовать его для сертификации электрической энергии в соответствии с ГОСТ 32144 [1].

Испытания проведены в соответствии с ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [1]; ГОСТ 30804.4.30-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии» [3]; ГОСТ 33073-2014 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг» [2].

Измерения выполнялись во вторичных цепях измерительных трансформаторов напряжения и тока и не требовали снятия напряжения с токоведущих частей оборудования. Подключение оборудования для проверки соответствия ПКЭ требованиям, установленным ГОСТ 32144-2013, производилось на 1-й и 2-й секциях шин 35 кВ в релейных шкафах ЗРУ-35 кВ соответственно. Для более детального изучения электрических характеристик в сети 35 кВ были установлены два дополнительных регистратора качества электроэнергии на две секции шин в ячейке «5ВЭУ» и ячейке «НТ2». К ячейке «5ВЭУ» подключен коллектор, состоящий из семи ВЭУ, а к ячейке «НТ2» подключен нейтралеобразующий трансформатор. На основании проведенных экспериментов получены протоколы регистраций показателей качества электроэнергии согласно ГОСТ 32144-2013.

Места подключения приборов указаны в табл. 1, а фото с места проведения измерений приведены на рис. 2.

Таблица 1

Места подключения приборов на подстанции «Кольская ВЭС»
Points of the instruments connection to the Kola Wind Farm substation

№ прибора	Место установки	Время усреднения, с	Время записи, дни
1	2 сш	10	7
2	1 сш	10	7
3	5ВЭУ	3	2
4	НТ2	3	2

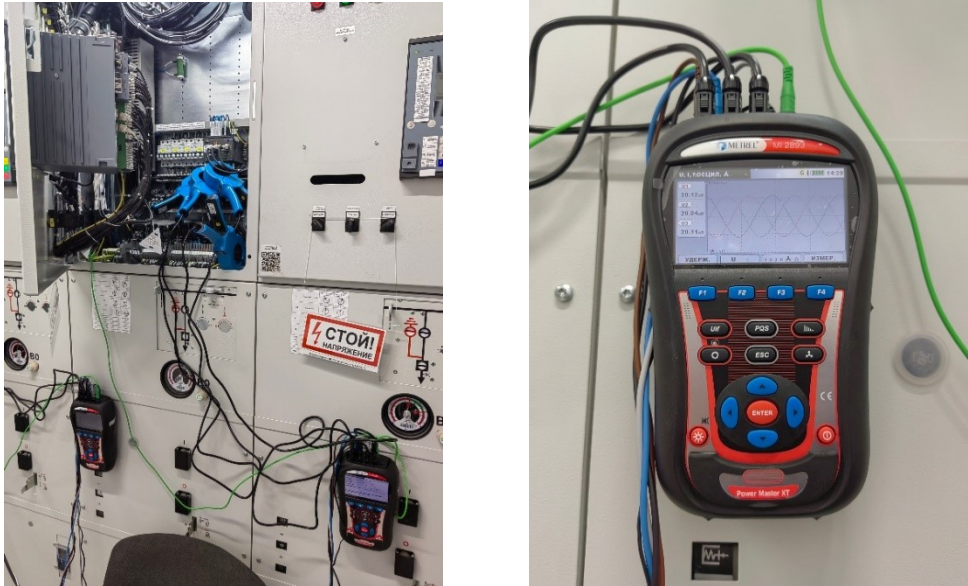


Рис. 2. Регистрация ПКЭ на ПС «Кольская ВЭС»
Fig. 2. Power quality indices recording at the Kola Wind Farm substation

Анализ протоколов измерений показал наличие искажений только на вводе 2-й системы шин РУ 35 кВ подстанции «Кольская ВЭС». Обобщенные данные из протоколов измерений на вводах 1-й и 2-й систем шин сведены в табл. 2.

Из данных табл. 2 видно, что на 2-й системе шин такой показатель качества электроэнергии, как коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения, не соответствует норме ГОСТ 32144-2013 [1], в данном случае искажена 18-я гармоника, а все остальные параметры находятся в допустимых пределах. График искаженной 18-й гармоники представлен на рис. 3. Для наглядности на рис. 4 представлены графики изменения 18-й гармоники на 1 сш, которая, согласно протоколу, считается нормальной, то есть соответствующей стандарту.

На рисунках 3 и 4 показаны изменения 18-й гармоники по трем фазам за все время регистраций на 1 и 2 сш подстанции, а также нормативные значения $K_{U(18)(95\%)} = 0,2$ (синяя граница) и $K_{U(18)(100\%)} = 0,3$ (красная граница). Как видно из рисунков, превышения нормативов зафиксированы на обеих системах шин, но из-за усреднения в 10 минут (ГОСТ 32144-2013 [1]) эти значения не вошли в протоколы либо значительно занижены (см. табл. 2). Так, например, максимальное значение 18-й гармоники на фазе В 2 сш $K_{U(18)}$ равно 0,74, а в протоколе 0,41 (см. табл. 2).

Изменения 18-й гармоники на присоединениях ко 2 сш (5ВЭУ и НТ2) приведены на рис. 5.

Зарегистрированы искажения 18-й гармоники (см. рис. 5), которые превышают предельное значение $K_{U(18)} = 0,3$ (красная граница) по двум фазам. Искажения зафиксированы в обоих присоединениях, но из-за усреднения в протокол эти значения не попали.

Таблица 2

Показатели качества электрической энергии на ПС «Кольская ВЭС»
Power quality indices recorded at the Kola Wind Farm substation

Показатель	Место измерения	Время измерений	Измеренные значения			Норма
			А	В	С	
$\delta U, \%$	1 сш	100	-1,80÷1,86	-1,82÷1,62	-2,01÷1,77	±10
	2 сш	100	-1,94÷1,59	-1,94÷1,42	-2,15÷1,48	±10
$K_U, \%$	1 сш	95	0,86	1,00	0,9	5,0
		100	1,52	1,57	1,39	8,0
	2 сш	95	0,74	0,87	0,73	5,0
		100	1,22	1,39	1,16	8,0
$K_{U(18)}, \%$	1 сш	95	0,08	0,08	0,08	0,20
		100	0,17	0,17	0,17	0,30
	2 сш	95	0,18	0,19	0,18	0,20
		100	0,38	0,41	0,40	0,30
$P_{ST}, \text{о. е.}$	1 сш	100	1,24	0,47	0,84	1,38
	2 сш	100	1,25	0,48	0,84	1,38
$P_{LT}, \text{о. е.}$	1 сш	100	0,54	0,23	0,37	1,0
	2 сш	100	0,55	0,23	0,38	1,0
$\Delta f, \text{Гц}$	1 сш	95	-0,03÷0,03			±0,2
		100	-0,06÷0,06			±0,4
	2 сш	95	-0,03÷0,03			±0,2
		100	-0,06÷0,06			±0,4
$K_{2U}, \%$	1 сш	95	0,22			2
		100	0,42			4
	2 сш	95	0,23			2
		100	0,42			4
$K_{0U}, \%$	1 сш	95	0,2			2
		100	0,2			4
	2 сш	95	0,3			2
		100	0,4			4

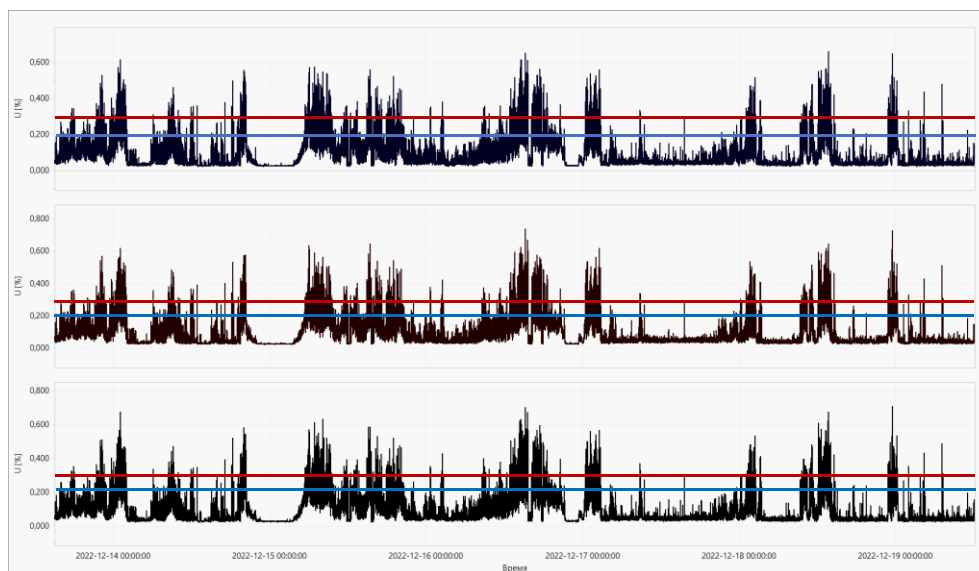


Рис. 3. Изменения 18-й гармоники на 2 сш ПС «Кольская ВЭС»
Fig. 3. 18th harmonic variation at the 2nd bus of the Kola Wind Farm substation

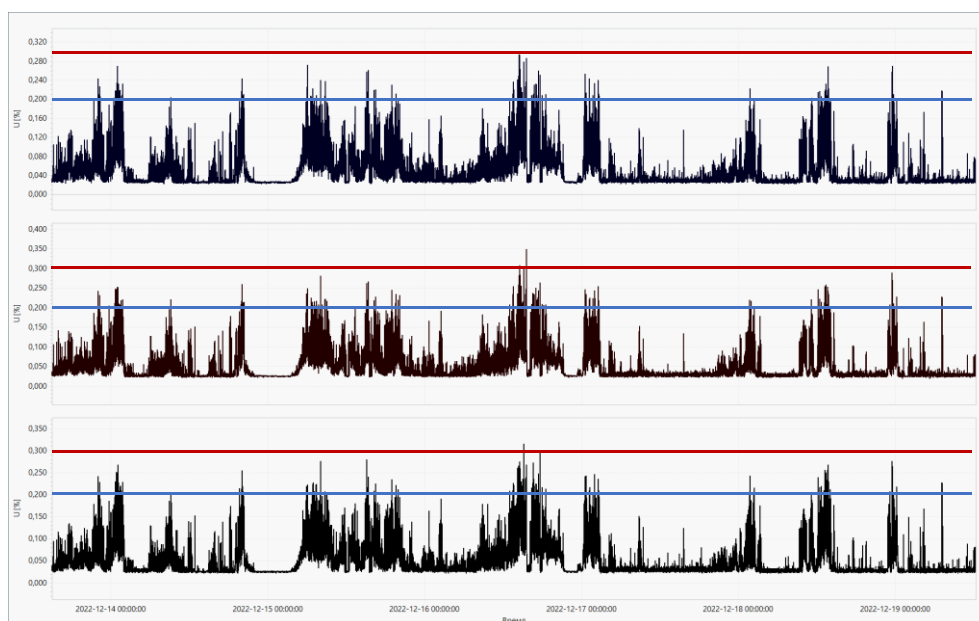


Рис. 4. Изменения 18-й гармоники на 1 сш ПС «Кольская ВЭС»
Fig. 4. 18th harmonic variation at the 1st bus of the Kola Wind Farm substation

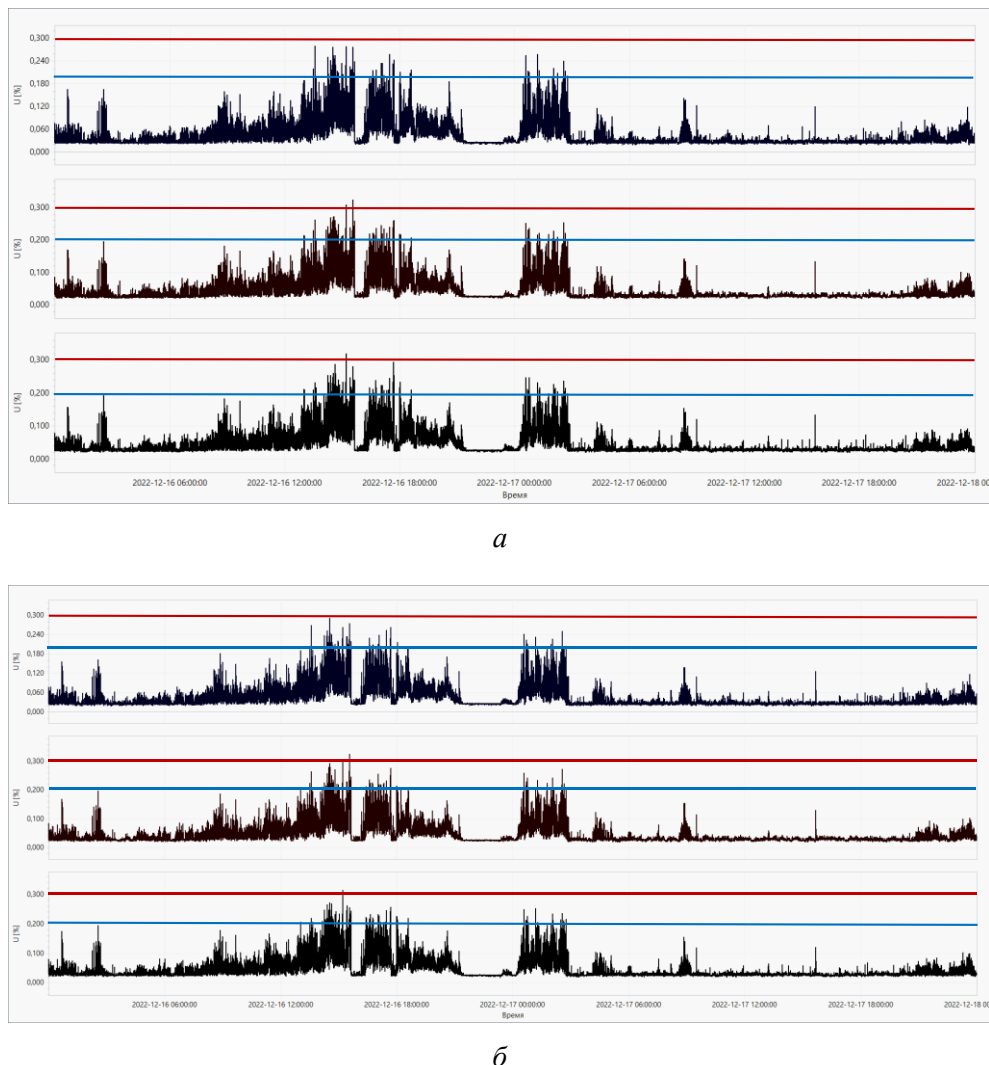


Рис. 5. Изменения 18-й гармоники на присоединениях 2 сш ПС «Кольская ВЭС»:
 a — 5ВЭУ; b — НТ2
Fig. 5. 18th harmonic variation at the 2nd bus connections of the Kola Wind Farm substation:
 a — 5WT; b — NT2

Наличие четных гармоник, превышающих нормативные значения, может свидетельствовать о наличии в сети источника их появления. В случае постоянно присутствующего фактора, генерирующего гармоники, их воздействие может обуславливать различные негативные последствия, одним из которых является сопутствующий нагрев, выводящий из строя изоляцию двигателей, обмоток трансформаторов, снижающий сопротивление конденсаторов и т. д. При нагревании фазного провода или других токопроводящих элементов в диэлектриках возникают необратимые процессы, снижающие их изоляционные свойства.

Одним из источников гармоник в сети ветропарка являются силовые трансформаторы. Обычно трансформаторы излучают небольшую долю нечетных гармоник (до 20-го порядка) за счет намагничивающего тока, однако переход в режим насыщения, например при перенапряжении, способствует увеличению доли гармонических составляющих, регистрируемых в точке общего присоединения [6; 7].

Кроме того, в качестве источника гармонических искажений могут выступать непосредственно ветроэнергетические установки (ВЭУ). Главным образом это связано с применением в ветроэнергетике технологий, основанных на использовании устройств силовой электроники [8–12]. Ветропарк «Кольская ВЭС» включает 57 ВЭУ типа SG 3.4-132 компании Siemens-Gamesa [13], конструкция которых также предусматривает наличие силовых преобразователей. Установки данного типа оснащены асинхронным генератором с фазным ротором АГ, статор которого подключается к электрической сети через трансформатор Т, как показано на рис. 6. Преобразователь частоты ПЧ, посредством которого осуществляется соединение ротора с тем же трансформатором Т, предназначен для компенсации разницы между механической и электрической частотами за счет подачи на ротор тока с переменной частотой. Это обеспечивает получение стабильных напряжений и частоты на выходе генератора в широком диапазоне изменения частоты вращения ротора [14].

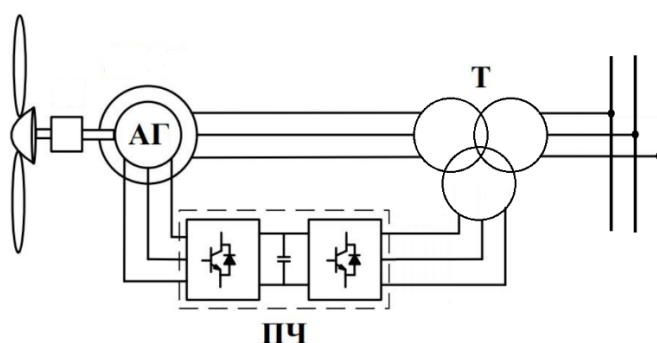


Рис. 6. Схема ВЭУ с генератором двойного питания:

АГ — асинхронный генератор; Т — трансформатор; ПЧ — преобразователь частоты

Fig. 6. Diagram of wind turbine using a doubly-fed induction generator:

АГ — asynchronous generator; Т — transformer; ПЧ — frequency converter

Наиболее широко применяемые силовые преобразователи генерируют характерный спектр гармонических токов, который включает нечетные гармоники 5-го, 7-го, 11-го, 13-го и т. д. порядков. Преобразователь может выдавать в сеть четные гармоники, однако это возможно в том случае, когда его регулирование неправильно настроено, в результате чего возникает асимметрия срабатывания электронных ключей [15].

Важным фактором повышения уровня гармонического искажения в сети ветропарка является гармонический резонанс. Явление резонанса особенно характерно для ветропарков, оборудованных конденсаторными батареями. Тем не менее длинные подземные кабели, по которым электроэнергия от каждой ВЭУ передается в сеть, также могут приводить к резонансу, причем на более высоких частотах. Это обусловлено тем, что кабельные линии обладают значительной шунтирующей емкостью и в сочетании с их индуктивностью и индуктивностью трансформатора образуют резонансный контур для источника высших гармоник. Если резонансная частота соответствует характерной гармонической частоте данной системы, это приводит к усилению гармонических искажений напряжения и/или тока, генерируемого ветропарком [16; 17].

В случае постоянно присутствующего фактора, генерирующего гармоники, их воздействие может обуславливать различные негативные последствия в электрической сети, из которых особо следует выделить:

- сопутствующий нагрев, выводящий из строя изоляцию двигателей, обмоток трансформаторов, снижающий сопротивление конденсаторов и т. д. При нагревании фазного провода или других токопроводящих элементов в диэлектриках возникают необратимые процессы, снижающие их изоляционные свойства;

- ложное срабатывание в распределительных сетях — приводит к отключению автоматов, высоковольтных выключателей и прочих устройств, реагирующих на изменение режима, обусловленное гармониками;

- появление асимметрии в промышленных сетях с трехфазными источниками при возникновении гармоники на одной фазе, от чего может нарушаться нормальная работа трехфазных выпрямителей, силовых трансформаторов, трехфазных ИБП и прочего оборудования;

- возникновение шума в сетях связи, влияние на смежные слаботочные и силовые кабели за счет наведенной ЭДС. На величину гармоники ЭДС влияет как расстояние между проводниками, так и продолжительность их приближения;

- преждевременное электрическое старение оборудования. За счет разрушения чувствительных элементов высокоточные приборы утрачивают класс точности и подвергаются преждевременному изнашиванию;

- дополнительные финансовые расходы, обуславливаемые потерями от индуктивных нагрузок, остановкой производства, внеочередными ремонтами и преждевременной поломкой.

Заключение

В качестве генерирующего объекта Кольская ВЭС успешно интегрирована в энергосистему Мурманской области. Принципиально новый вид генерации открывает для региона более широкие возможности как по выдаваемой мощности «зеленой» электроэнергии, так и по возможностям регулирования этой мощности. На основе данного источника энергии возможно развитие удаленных промышленных объектов, вырабатывающих продукцию с низким углеродным следом.

Проведенные исследования показателей качества электроэнергии на подстанции «Кольская ВЭС» не выявили существенных отклонений. Однако в протоколах присутствует несоответствие по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения, что требует дополнительных мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости высоковольтных установок.

Анализ регистраций также выявил наличие существенных краткосрочных отклонений, которые из-за усреднений «сглаживаются». Данные процессы не являются критическими и не описываются приведенными в статье нормативными стандартами, однако являются определенным маркером событий, требующих дополнительного исследования и устранения, поскольку напрямую влияют как на стабильность работы всего участка данной системы, так и на долговечность и работоспособность элементов сети.

Также анализ выявил (не попавшее в протоколы) отклонение значений четных гармоник, превышающее нормативные значения. Для определения природы его формирования и мероприятий по устранению необходимы дополнительные специализированные исследования.

Список источников

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
2. ГОСТ 33073-2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.01.2015. М.: Стандартинформ, 2015. 46 с.
3. ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 60 с.
4. ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009). Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2013. 40 с.

5. ГОСТ IEC/TR 61000-3-7-2020 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3–7. Нормы. Оценка норм электромагнитной эмиссии для подключения установок, создающих колебания напряжения, к системам электроснабжения среднего, высокого и сверхвысокого напряжения. Введ. 01.01.2021. М.: Стандартинформ, 2020. 58 с.
6. Kocewiak Ł. H., Hjerrild J., Bak C. L. Harmonic models of a back-to-back converter in large offshore wind farms compared with measurement data // Proceedings of Nordic Wind Power Conference. Rønne, Denmark, 2009. P. 1–7.
7. Yang K. Wind Turbine Harmonic Emissions and Propagation through A Wind Farm: Thesis for the degree of Licentiate of Engineering. Skellefteå, 2012. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:991380/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 30.10.2023).
8. Ackermann T. Wind Power in Power Systems. Chichester: Wiley, 2005. 692 p.
9. Норматов Н. Н. и др. Влияние возобновляемых источников энергии на энергосистему // Сборник научных трудов V Международной научно-технической конференции «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий». Уфа, 2020. С. 119–124.
10. Bollen M., Hassan F. Integration of Distributed Generation in the Power System. Hoboken, NJ: Wiley, 2011. 528 p.
11. Кармазин А. А. Обзор основных типов промышленных ветроэлектрических установок // Альтернативная энергетика и экология. 2013. Т. 121, № 3. С. 90–95.
12. Chandram K., Soujanya K. Detection and Quantification of Harmonic Emissions in Doubly Fed Induction Generator // Int. J. Electr. Eng. Technol. 2017. Vol. 8, № 5. P. 20–31.
13. Kola (Russia) — Wind farms — Online access // The Wind Power. URL: https://www.thewindpower.net/windfarm_en_10778_kola.php (дата обращения: 30.10.2023).
14. Безруких П. П., Безруких (мл.) П. П., Грибков С. В. Ветроэнергетика: Справочно-методическое издание / под общей редакцией П. П. Безруких. М.: Интехэнергоиздат, Теплоэнергетик, 2014. 304 с.
15. Rice D. E. A Detailed Analysis of Six-Pulse Converter Harmonic Currents // IEEE Trans. Ind. Appl. 1994. Vol. 30, No. 2. P. 294–304.
16. Bollen M., Yang K. Harmonic aspects of wind power integration // J. Mod. Power Syst. Clean Energy. 2013. Vol. 1, No. 1. P. 14–21.
17. Zheng R., Bollen M. Harmonic Resonances Associated with Wind Farms. Skellefteå: Luleå University of Technology, 2010. 56 p.

References

1. GOST 32144-2013. *Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehnikeskikh sredstv jelektr magnitnaja. Normy kachestva jelektricheskoy jenerгии v sistemah jelektr snabzhenija obshhego naznachenija* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards of power quality in general-purpose power supply systems]. Moscow, Standartinform, 2014, 20 p.
2. GOST 33073-2014. *Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehnikeskikh sredstv jelektr magnitnaja. Kontrol' i monitoring kachestva jelektricheskoy jenerгии v sistemah jelektr snabzhenija obshhego naznachenija* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Control and monitoring of power quality in general-purpose power supply systems]. Moscow, Standartinform, 2015, 46 p.
3. GOST 30804.4.30-2013. *Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehnikeskikh sredstv jelektr magnitnaja. Metody izmerenij pokazatelej kachestva jelektricheskoy jenerгии* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Methods of measurement of power quality indices]. Moscow, Standartinform, 2014, 60 p.
4. GOST 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009). *Sovmestimost' tehnikeskikh sredstv jelektr magnitnaja. Obshhee rukovodstvo po sredstvam izmerenij i izmerenijam garmonik i intergarmonik dlja sistem jelektr snabzhenija i podkljuchaemyh k nim tehnikeskikh sredstv* [General guide to measuring instruments and measurements of harmonics and interharmonics for power supply systems and technical means connected to these]. Moscow, Standartinform, 2013, 40 p.

5. GOST IEC/TR 61000-3-7-2020 *Jelektromagnitnaja sovmestimost' (JeMS). Chast' 3-7. Normy. Ocenka norm jelektromagnitnoj jemissii dlja podkljuchenija ustanovok, sozdajushhih kolebanija naprjazhenija, k sistemam jelektronsnabzhenija srednego, vysokogo i sverhvyssokogo naprjazhenija* [Electromagnetic compatibility (EMC). Part 3–7. Limits. Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems]. Moscow, Standartinform, 2020, 58 p.
6. Kocewiak Ł. H., Hjerrild J., Bak C. L. Harmonic models of a back-to-back converter in large offshore wind farms compared with measurement data. *Proceedings of Nordic Wind Power Conference*, Rønne, 2009, pp. 1–7.
7. Yang K. Wind Turbine Harmonic Emissions and Propagation through A Wind Farm: Thesis for the degree of Licentiate of Engineering. Skellefteå, 2012. Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:991380/FULLTEXT01.pdf> (accessed 30.10.2023).
8. Ackermann T. *Wind Power in Power Systems*. Chichester, England, Wiley, 2005, 692 p.
9. Normamatov N. N., Shanazarov A. Je., Ajtbaev N. A., Rahmonov M. T. Vlijanie vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии na jenergosistemu [Renewable energy impact on the grid]. *Sbornik nauchnyh trudov V Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii "Jelektroprivod, jelectrotehnologii i jelektrooborudovanie predpriyatij"* [Proceedings of the 5th International Scientific and Technical Conference "Electric drive, electrical technologies and electrical equipment of enterprises"]. Ufa, 2020, pp. 119–124. (In Russ.).
10. Bollen M., Hassan F. *Integration of Distributed Generation in the Power System*. Hoboken, NJ, Wiley, 2011, 528 p.
11. Karmazin A. A. Obzor osnovnyh tipov promyshlennyh vetrojelektricheskikh ustanovok [A review of the main types of industrial wind turbines]. *Al'ternativnaja jenergetika i jekologija* [Alternative Energy and Ecology], 2013, Vol. 121, No. 3, pp. 90–95. (In Russ.).
12. Chandram K., Soujanya K. Detection and Quantification of Harmonic Emissions in Doubly Fed Induction Generator. *International Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2017, Vol. 8, No. 5, pp. 20–31.
13. Kola (Russia) — Wind farms — Online access — The Wind Power. Available at: https://www.thewindpower.net/windfarm_en_10778_kola.php (accessed 30.10.2023).
14. Bezrukih P. P., Bezrukih (ml.) P. P., Gribkov S. V. *Vetrojenergetika: Spravochno-metodicheskoe izdanie* [Wind power engineering: Reference and methodological edition]. Moscow, Intehjenergoizdat, Teplojenergetik, 2014, 304 p.
15. Rice D. E. A Detailed Analysis of Six-Pulse Converter Harmonic Currents. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1994, Vol. 30, No. 2, pp. 294–304.
16. Bollen M., Yang K. Harmonic aspects of wind power integration. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2013, Vol. 1, No. 1, pp. 14–21.
17. Zheng R., Bollen M. *Harmonic Resonances Associated with Wind Farms*. Skellefteå, Luleå University of Technology, 2010, 56 p.

Информация об авторах

В. В. Ярошевич — научный сотрудник;

А. С. Карпов — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

Е. И. Губская — инженер.

Information about the authors

V. V. Yaroshevich — Research Associate;

A. S. Karpov — PhD (Engineering), Senior Research Associate;

E. I. Gubskaya — Engineer.

Статья поступила в редакцию 27.04.2024; одобрена после рецензирования 13.05.2024; принята к публикации 17.05.2024.

The article was submitted 27.04.2024; approved after reviewing 13.05.2024; accepted for publication 17.05.2024.