УДК 613.313

С.Н. Ткаченко /к.т.н./, А.В. Коваленко, А.В. Панфилов
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

РОЛЬ И МЕСТО ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ КОНЦЕПЦИИ SMART GRID

В статье проведен анализ роли, места и особенностей функционирования ветроэнергетических установок в интеллектуальных электроэнергетических системах концепции Smart Grid с большой долей возобновляемых источников энергии. Приведен детальный анализ существующих ветровых агрегатов. Даны рекомендации по повышению надежности работы ветроэнергетических установок в интеллектуальных сетях.

Ключевые слова: *возобновляемые источники энергии, ветроэнергетические установки, концепция Smart Grid.*

Постановка проблемы

В настоящее время в связи с наличием проблемы исчерпания запасов ископаемых видов топлива (уголь, природный газ, торф, нефть и др.) в мире наблюдается тенденция развития и внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ), из которых наиболее перспективными являются ветроэнергетические установки (ВЭУ). Однако при массовом внедрении как ВЭУ, так и других ВИЭ в электроэнергетическую систему (ЭЭС) появляется целый круг проблем, связанных с трудностями управления и поддержанием устойчивости параллельной работы. Для решения вышеуказанных проблем была разработана концепция интеллектуальной ЭЭС Smart Grid [1-4]. Однако, несмотря на это, как показано в [4], нерешенными остаются вопросы обеспечения качественной работы систем управления и систем релейной защиты и противоаварийной автоматики, особенно ВЭУ, при нестабильности первичных источников энергии (энергии ветра, солнца и т.д.). Поэтому анализ роли и места, а также проблемных моментов функционирования ветроэнергетических установок в интеллектуальных системах концепции Smart Grid является актуальным.

Анализ последних исследований и публикаций

Вопросам анализа современных ветроэнергетических установок посвящено большое количество работ [1,4-14]. В [1,6,7,9] присутствует описание ключевых особенностей основных типов ВЭУ без рассмотрения релейной защиты и автоматики. Также в [1] содержится краткая информация о системах управления ветровыми агрегатами (ВА) и роли ВА в интеллектуальных энергосистемах концепции Smart Grid. Работы [10-12,14] посвящены анализу динамических режимов ВЭУ, а вопросы реализации и функционирования ВА релейной защиты и автоматики затрагиваются в [4,13]. В существующих стандартах [5,8] содержится классификации ветровых агрегатов, но без учёта ряда особенностей современных ВЭУ.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является проведение подробного анализа роли, места и особенностей функционирования ветроэнергетических установок в интеллектуальных электроэнергетических системах концепции Smart Grid с большой долей возобновляемых источников энергии.

Основной материал исследования

Современная ВЭУ представляет собой сложную и дорогостоящую электромеханическую систему преобразования первичной энергии ветрового потока во вторичную электрическую энергию. Ведущими производителями ВЭУ в настоящее время являются: Siemens AG (Германия), Vestas Wind Systems A/S (Дания), General Electric (США), Fuhrländer AG (Германия), Senvion SE (Германия), Nordex SE (Германия) и Enercon (Германия). Единичная номинальная мощность современных ВЭУ колеблется от нескольких киловатт до 10 МВт. Как правило, большинство ветроэнергетических установок являются трехлопастными с горизонтальной осью вращения, параллельной направлению ветрового потока. Опираясь на действующий государственный стандарт ГОСТ Р 51990, ВЭУ в зависимости от мощности подразделяют на четыре группы: первая группа (большой мощности) – свыше 1 МВт; вторая (средней мощности) – от 100 кВт до 1 МВт; третья (малой мощности) – от

5 до 100 кВт; четвертая (очень малой мощности) – менее 5 кВт [5]. Передовыми странами, в которых доля ВИЭ достаточно высока, являются Германия, Италия, Дания, Испания, КНР, Нидерланды и др. Например, к концу 2014 года, согласно [6,7], процент ВИЭ в Германии составлял более 20 %.

ВЭУ классифицируют по многим признакам, основными из которых являются: вид вырабатываемой энергии, мощность, признак работы с постоянной или переменной частотой вращения ветроколеса (ВК) и т.д. Согласно ГОСТ Р 51990 ВЭУ в зависимости от вида вырабатываемой энергии подразделяют на две группы: механические и электрические [1]. Электрические ветроэнергетические установки, в свою очередь, подразделяют на ВЭУ постоянного и переменного тока (рис. 1) В данной работе уделим внимание рассмотрению исключительно электрическим установкам переменного тока сетевой подгруппы.

В электрических агрегатах переменного тока принципы использования и способы управления отличаются друг от друга. Так, автономные ВЭУ рассчитаны для работы изолированно на собственную электрическую сеть с целью снабжения энергией конкретного заданного потребителя. Гибридные, или системные, ВЭУ предназначены для работы параллельно с другими энергетическими установками соизмеримой мощности (дизельные генераторы, малые ГЭС и т.п.) на общую электрическую сеть, ими образованную. Сетевые ВЭУ рассчитаны для работы непосредственно на параллельную работу с ЭЭС несоизмеримо большей мощности [1,5].

Как известно, сетевой ветроэлектрический агрегат (ВА) с электрическим генератором предназначен для параллельной работы с ЭЭС, мощность которых является бесконечно большой или большей, но соизмеримой по сравнению с номинальной мощностью самого ВА [8]. Согласно существующей нормативно-технической документации, существует два признака работы сетевых ВЭУ: при постоянной частоте вращения ВК и переменной, что проиллюстрировано на рис. 2.

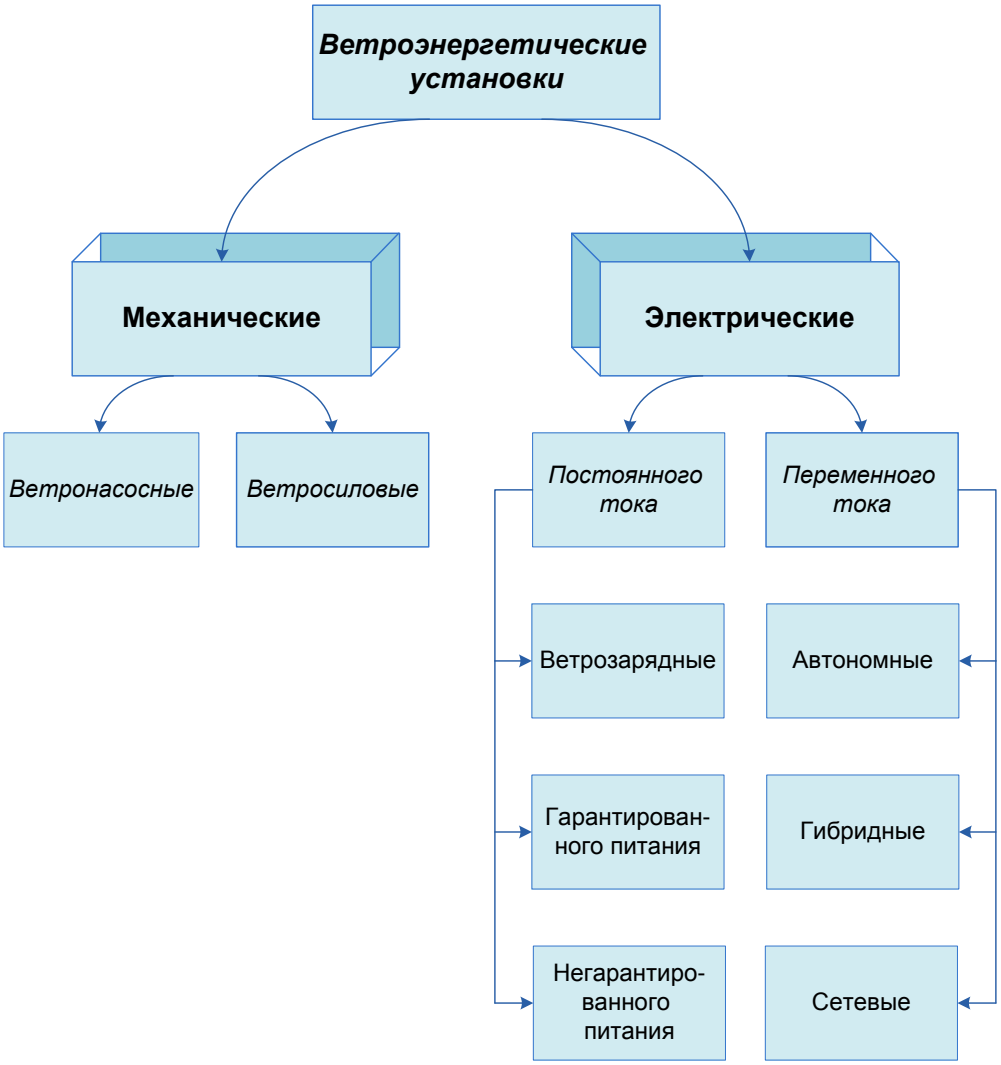

Рис. 1. Общая классификация ВЭУ

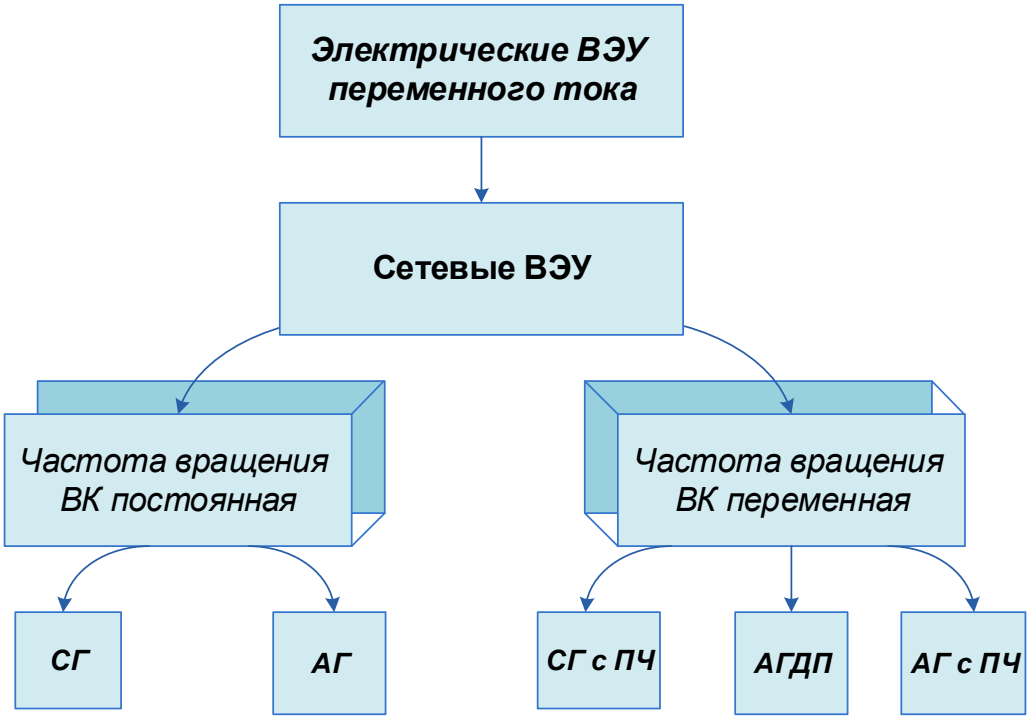

Рис. 2. Структурная схема сетевых ВЭУ

В первом случае способ управления – регулирование ВК при использовании в системе генерирования электрической энергии (СГЭЭ) либо синхронного генератора (СГ) или асинхронного генератора (АГ). Когда речь идет о втором случае, то способом управления выступает регулирование ВК и полупроводникового преобразователя частоты (ПЧ), которое может быть осуществлено раздельно или совместно. Тогда в состав СГЭЭ могут входить АГ с ПЧ, СГ с ПЧ или асинхронный генератор двойного питания (АГДП).

Анализируя существующую в странах постсоветского пространства нормативно-техническую документацию, следует отметить, что в этих документах отсутствует классификация ВЭУ по типу базирования, а именно на оффшорные (морского базирования) и береговые (наземного базирования). Также отсутствует классификация установок по наличию или отсутствию редуктора между ВК и электрическим генератором. При этом также не оговаривается, какой именно тип генератора должен входить в СГЭЭ ВЭУ конкретной группы.

На практике, исходя из современного состояния ветроэнергетики, можно выделить наиболее распространенные типы ветроэнергоустановок:

– ВЭУ на базе асинхронных генераторов с короткозамкнутым ротором (АГ с КЗР);

– ВЭУ на базе асинхронных генераторов двойного питания;

– ВЭУ на базе синхронных генераторов с классической обмоткой возбуждения на постоянном токе;

– ВЭУ на базе синхронных генераторов с постоянными (перманентными) магнитами на роторе (СГПМ).

Как правило, АГ с КЗР устанавливаются на ВЭУ мощностью до 1 МВт. ВЭУ с АГДП присутствуют в диапазоне мощности от 1 до 5 МВт. ВЭУ с СГ с постоянными магнитами, а также с классической обмоткой возбуждения применяются при мощности свыше 3 МВт.

Упрощенные схемы главных электрических соединений ВЭУ с асинхронными генераторами приведены на рис. 3.

АГ с КЗР прямого подключения в ЭЭС (рис. 3а) применяются при постоянной угловой частоте вращения независимо от скорости ветра. Ключевой особенностью подобных ВЭУ является наличие дополнительных конденсаторных батарей, необходимых для компенсации потребления реактивной мощности. К достоинствам следует отнести простоту и надежность, а также относительно низкую стоимость по сравнению с другими типами ВА. К основным недостаткам относятся: неконтролируемое потребление реактивной мощности, низкое значение КПД для скоростей ветра, отличных от номинальной, передача колебаний скорости ветра в ЭЭС, а также наличие высокого механического напряжения. Система управления ВЭУ с АГ с КЗР, а конкретно контроль выходной мощности генерации использует следующие аэродинамические принципы, такие как регулирование потери скорости (пассивный контроль) и управление по тангажу [9-11].

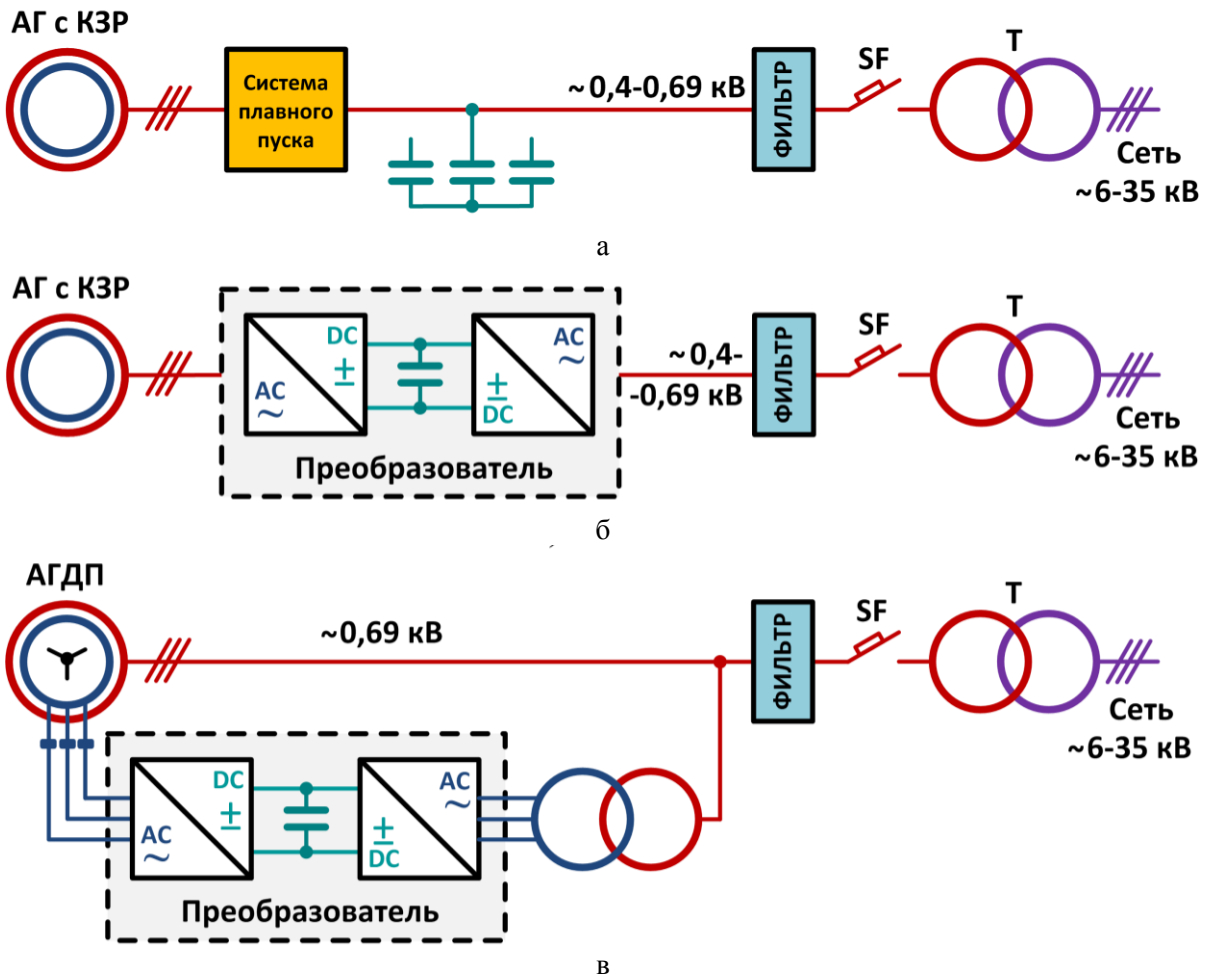

Рис. 3. Упрощенные схемы главных электрических соединений ВЭУ с АГ:
а – ВЭУ с АГ с короткозамкнутым ротором прямого подключения;
б – ВЭУ с АГ с короткозамкнутым ротором с преобразователем частоты в цепи статора;
в – ВЭУ с асинхронным генератором двойного питания

Подключение АГ с КЗР к энергосистеме через полупроводниковый ПЧ (см. рис. 3б) применяется при переменной угловой частоте вращения, что позволяет генерировать напряжение промышленной частоты. Управление выполнено в данных ВЭУ с контролем по тангажу и с контролем ПЧ на стороне генераторного напряжения. К недостаткам следует отнести снижение эффективности машины при частоте вращения вала, меньшей номинального значения, наличие проблемы регулирования реактивной мощности, а также проблемы качества напряжения генерации в связи с наличием преобразователя частоты.

На рис. 3в представлена схема ВЭУ на основе асинхронного генератора с двойным питанием. АГДП – это асинхронный генератор с фазным ротором. Трехфазная обмотка статора генератора подключена через блочный повышающий трансформатор к ЭЭС. К обмотке ротора подключен полупроводниковый ПЧ, необходимый для изменения угловой частоты вращения в определенном диапазоне. Данный диапазон ограничен как техническими характеристиками самого ПЧ, так и механическими параметрами ВА. Положительной особенностью является возможность регулирования коэффициента мощности и реактивной мощности АГДП. К недостаткам следует отнести наличие щеточного аппарата машины с фазным ротором, что сказывается на снижении надежности ВЭУ, также проблемы с качеством напряжения в сети из-за использования ПЧ. С экономической точки зрения ВЭУ с АГДП дешевле, чем установки, использующие дорогостоящие преобразователи частоты в цепи генераторного напряжения.

Система управления ВЭУ с АГДП включает контроль тангажа, контроль с ограничением максимальной мощности, или MPPT-контроллер, а также контроль ПЧ цепи фазного ротора [1,9-14].

На рис. 4 приведены упрощенные схемы главных электрических соединений ВЭУ с синхронными генераторами.

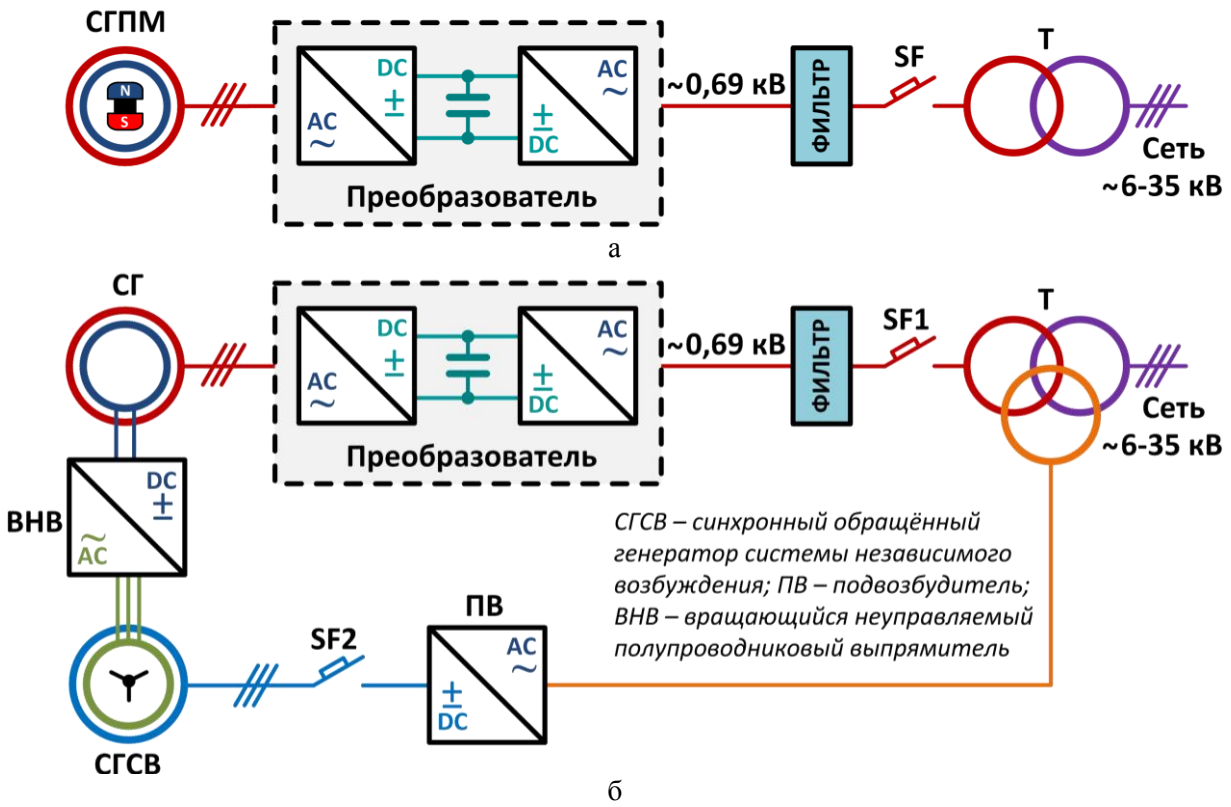

Рис. 4. Упрощенные схемы главных электрических соединений ВЭУ с СГ:
а – ВЭУ с СГПМ; *б* – ВЭУ с СГ с независимой бесщеточной системой возбуждения

Как правило, в данных ВЭУ отсутствует редуктор, что подразумевает непосредственную связь электрогенератора с ветротурбиной. Статор СГ подключается, как и в случае использования СГПМ (см. рис. 4а), так и в случае СГ с классической системой возбуждения (см. рис. 4б), к сети при помощи полупроводникового ПЧ, что позволяет турбине функционировать с регулируемой угловой частотой вращения. В настоящее время наиболее распространены ВЭУ с синхронными явнополюсными генераторами с бесщеточной системой возбуждения. СГПМ включают постоянные, или перманентные, магниты на роторе, что позволяет удешевить и упростить конструкцию.

Однако подобным машинам присущ недостаток потери требуемых магнитных свойств в процессе работы (размагничивание). Также к недостаткам вышеописанных схем с СГ можно отнести высокую стоимость ВЭУ по сравнению с другими типами ВА, влияние на ухудшение качества энергии в процессе генерации, а также наличие сложностей в управлении.

Система управления ВЭУ с СГ аналогична ветроэнергетическим установкам с АГДП [1,9].

В интеллектуальных ЭЭС концепции Smart Grid ветроэнергетические установки являются одним из ключевых ВИЭ.

Как правило, устанавливаемые ВЭУ образуют ветровые парки или ветровые электростанции суммарной мощностью от нескольких десятков киловатт до сотен МВт. Как показано в [4], при большой доле ВИЭ в ЭЭС возникает проблема поддержания требуемого уровня генерации мощности ввиду непостоянства первичных природных источников энергии. Это приводит к возникновению проблем работы устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗиА), а также к усложнению управления. Также в отечественных стандартах и нормативных документах отсутствуют требования к построению защит ВЭУ с учетом их особенностей, что приводит к установке неэффективной стандартной защитной логики, которая некорректно работает в ряде анормальных и аварийных режимах работы, а особенно в ЭЭС Smart Grid.

Одним из решений вышеуказанных проблем является модернизация и разработка новых систем РЗиА ВЭУ, например, разработка адаптивных защит с использованием протокола МЭК (IEC) 61850 [1-4], что повлияет на повышение надежности.

Выводы

В работе произведен детальный анализ современных ветроэнергетических установок, в

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

результате которого установлено, что наиболее рациональными и экономически выгодными являются ВЭУ с асинхронными генераторами двойного питания.

Установлено, что в рамках интеллектуальной электроэнергетической системы концепции Smart Grid ветроэнергетические установки являются одним из ключевых возобновляемых источников энергии, но при этом с наличием ряда специфических особенностей функционирования.

Для повышения надежности функционирования ВЭУ предложены пути модернизации релейной защиты и автоматики за счет разработки адаптивных защит с использованием протокола МЭК (IEC) 61850.

Список литературы

1. Стычинский, З. А. Возобновляемые источники энергии: Теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика / З. А. Стычинский, Н. И. Воропай. – Magdeburg: Издательство Магдебургского университета имени Отто-фон-Герике (Die Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg) docupoint GmbH, 2010. – 209 с.
2. Официальный сайт компании Siemens (Сименс) Smart grid [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://w3.siemens.com/ smartgrid/ global/en/Pages/Default.aspx
3. Лукьянченко, С.А. Проблемы управления в Smart grid системах / С.А. Лукьянченко // Вестник ДонНТУ. – № 1(7). – 2017. – С.38-42.
4. Ткаченко, С.Н. Пути совершенствования релейной защиты и автоматики современных ветроэнергетических установок / С.Н. Ткаченко, А.В. Коваленко, М.В. Тельная // Инновационные перспективы Донбасса: материалы II Международной научно-практической конференции. Секция «Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем», 25-26 мая 2016 г., г. Донецк. Т. 2. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – С. 255-261.
5. ГОСТ Р 51990-2002. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Классификация. – Введ. 01.07.2003. – Москва: Издательство стандартов, 2003. – 8 с.
6. Janssen, K. Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) Windenergie report Deutschland 2014 / K. Janssen [et al.]. – Ochsenfurt-Hohestadt: Konrad Triltsch GmbH. – 116 p.
7. Wind turbine plant capabilities report. 2013 Wind Integration Studies. – AEMO: Australian Energy Market Operator. – ABN 94 072 010 327. – 62 p.
8. ГОСТ Р 51237-98. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения. – Введ. 30.06.1999. – Москва: Издательство стандартов, 1999. – 12 с.
9. Соколовский, Ю.Б. Современные ветроэнергетические установки (обзор) / Ю.Б. Соколовский, А.Ю. Соколовский // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – Т. 2. – № 4. – 2015. – С. 27-38.
10. Snyder, M. A. Development of Simplified Models of Doubly-Fed Induction Generators (DFIG). A contribution towards standardized models for voltage and transient stability analysis: Master of Science thesis / Michael A. Snyder. – Dep. of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering: Chalmers University of Technology. – Göteborg, Sweden, 2012. – 106 p.
11. Petersson, A. Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines: thesis for the degree of Doctor of Philosophy /Andreas Petersson. – Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering: Chalmers University of Technology. – Göteborg, Sweden, 2005. – 176 p.
12. Y. Mahesh Babu. Fault analysis of wind generator connected power system using wavelet technique / Y. Mahesh Babu, B. Durga Prasad, B. Vijay Vihari // Proceeding of the IEEE International Conference on Green Computing, Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE'14), 6th-8th March, 2014, Coimbatore, India. – IEEE, 2014. – 1744 p.
13. Brady, C., D'Alfonso, N. Investigation of relay protection systems in MV networks with large in-feed of distributed generation: Master's thesis / Cormac Brady, Nicola D'Alfonso. – Dep. of energy technology. M. Sc. in electrical power systems and high voltage engineering. – Aalborg, Denmark, 2014. – 110 p.
14. Qureshi, Waqar A. Performance Assessment and Management of Large Wind Farms under Abnormal Grid Operating Conditions: PHD thesis / Wagar Ahmed Qureshi. – Department of Electrical and Computer Engineering, University of Auckland. – Auckland, New Zealand, 2013. – 180 p.

S.N. Tkachenko /Cand. Sci. (Eng.) /, A.V. Kovalenko, A.V. Panfilov
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE ROLE AND PLACE OF WIND POWER INSTALLATIONS IN SMART GRID POWER SYSTEMS

Background. *The paper considers the analysis of the role, place, and features of the functioning of wind power installations in intelligent electronic systems of smart grid concept with a large share of renewable energy sources. A detailed analysis of the existing wind turbines made. Recommendations to improve the reliability of wind turbines in intelligent networks given.*
Materials and/or methods. *The analysis of the existing normative and technical documentation, publications and literature devoted to the problems of introducing alternative energy sources into the Smart Grid intelligent networks carried out.*
Results. *The detailed analysis of modern wind power installations made, which established that the most rational and cost-effective are wind turbines with asynchronous dual power supply generators. Also established that within the framework of the Smart Grid concept, wind turbines are one of the key renewable energy sources, but with a number of specific features of operation.*
Conclusion. *The results are recommendations to improve the reliability of wind turbines. Ways of modernization of relay protection and automation by means of development of adaptive protections with the use of the IEC 61850 Protocol offered.*

Keywords: *renewable energy sources, wind power installations, Smart Grid concept.*

Сведения об авторах
С.Н. Ткаченко
SPIN-код: 5046-6030
Телефон: +380 (62) 301-03-72
Эл. почта: tsn1981@mail.ru
А.В. Панфилов
Телефон: +380 (62) 301-03-72
Эл. почта: alexey.panfilov.924@gmail.com
А.В. Коваленко
SPIN-код: 8432-3428
Телефон: +380 (62) 301-03-72
Эл. почта: anna.kovalenkoETF@gmail.com

Статья поступила 06.03.2018 г.
© С.Н. Ткаченко, А.В. Коваленко, А.В. Панфилов, 2018
Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский