

ВЭС (мощность которых соизмерима с мощностью энергосистемы) могут оказывать влияние на частоту в сети. Данную особенность необходимо учитывать при подключении ВЭС к шинам ЭЭС, с целью заблаговременных расчетов статической устойчивости ЭЭС при различных вариантах подключения.

Устройства и оборудование в составе ВЭС имеют собственные требования к защите в зависимости от типа генератора ВЭУ и наличия преобразователя, конфигурации коллекторной системы и т.д. Для ЭЭС с ВЭУ нет универсальной методики выбора устройств и уставок релейной защиты. Каждый случай должен быть детально проработан, смоделирован и проверен. Наиболее распространенными видами ВЭУ являются ветряки 3-го и 4-го типа: ВУЭ на основе асинхронного генератора с двойным питанием и ВЭУ с синхронным генератором с постоянными магнитами. Для режима работы ВЭУ 3 и 4 типа, а, следовательно, и для ЭЭС в целом опасными являются несимметричные (одно- и двухфазные) КЗ. В силу небольшого тока КЗ, относительно номинального тока ВЭУ, они могут быть нечувствительны органами релейной защиты и вызывать тяжелые последствия для генераторов ВЭУ. Так, к примеру, для ВЭУ 3 типа в связи с возникновением напряжения обратной последовательности (которое вращается в противоположном направлении вращения ротора), возникает скольжения около 2 о.е. Из-за высокого значения напряжения даже небольшие значения напряжения обратной последовательности статора могут вызвать в роторе напряжение, превышающее напряжение шины постоянного тока. В отличие от затухающего переходного процесса, вызванного симметричным трехфазным КЗ, напряжение обратной последовательности будет продолжать существовать до тех пор, пока не будет устранено несимметричное КЗ. Таким образом, если дисбаланс достаточно высок, ток ротора будет продолжать увеличивать напряжение на шине постоянного тока преобразователя, что может привести к ложной коммутации силовых ключей. В ходе изучения материала был сделан вывод, о том, что существующие методы защиты сети либо ограничивают внедрение нового оборудования, либо сложно реализуемы, либо недостаточно гибкие. Как следствие, можно говорить о необходимости разработки новых методов и средств для настройки РЗ. Одно из главных условий решения проблемы, названной выше, - возможность анализа работы основных элементов схем устройств РЗ в конкретных режимах работы сети. Это позволит оценивать процессы изменения токов и напряжений в защищаемых объектах и применяемых устройствах релейной защиты. Уже после оценки процессов изменения, можно будет формировать параметры схожие с реальными условиями функционирования настройки РЗ. Обеспечить указанную возможность в совокупности с адекватным симулятором ЭЭС позволяют детализированные математические модели РЗ. После анализа данных моделей уже можно рассматривать дальнейшее внедрение изученных и пригодных методов защиты в сети с ВИЭ.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант МК-3249.2021.4*

#### Литература

1. Де Рензо Д. Ветроэнергетика. – Рипол Классик, 1982.
2. Венге К. и др. Возобновляемые источники энергии: теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика. – 2010.

### **ОБОСНОВАНИЕ РАЗМЕЩЕНИЯ И МОЩНОСТИ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ**

**Малькова Я.Ю., Уфа Р.А., Разживин И.А.**

Научный руководитель, доцент Р.А. Уфа

***Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия.***

Особенности функционирования объектов генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), например, солнечных и ветряных электростанций, такие как непостоянство выработки электроэнергии, обусловленное суточными и сезонными погодными изменениями, а также несоответствие периодов максимальной генерации и потребления электроэнергии, определяют необходимость иметь в горячем резерве предсказуемую маневренную генерацию (например, дизельный генератор) или же систему накопления энергии (СНЭ), в частности, водородный накопитель. Реализация совместной установки объекта возобновляемой генерации и СНЭ является более предпочтительной в контексте актуальной климатической повестки. Установке данных объектов в энергосистему (ЭС) предшествует осуществление выбора их оптимальных параметров, в том числе, мощности и места подключения, в соответствии с оказываемым влиянием на режим работы ЭС в целом.

Процедура определения оптимальных параметров объекта ВИЭ была представлена авторами ранее, например, в [4]. В рамках же данной статьи остановимся более подробно на методике выбора параметров совместно устанавливаемой с объектом ВИЭ СНЭ. Предположим, что при рассмотрении расчетного сценария, описанного в [7], объект ВИЭ мощностью 718 кВт был установлен в узел 3 исследуемой схемы (15-узловая схема IEEE [2]).

Далее необходимо составить суточный график суммарной нагрузки схемы и генерации данного объекта ВИЭ. Ввиду того, что исследуемая схема является типовой, и отсутствуют сведения о характере потребителей, размещенных в ее узлах, для всех узлов принят обобщенный характер нагрузки [6].

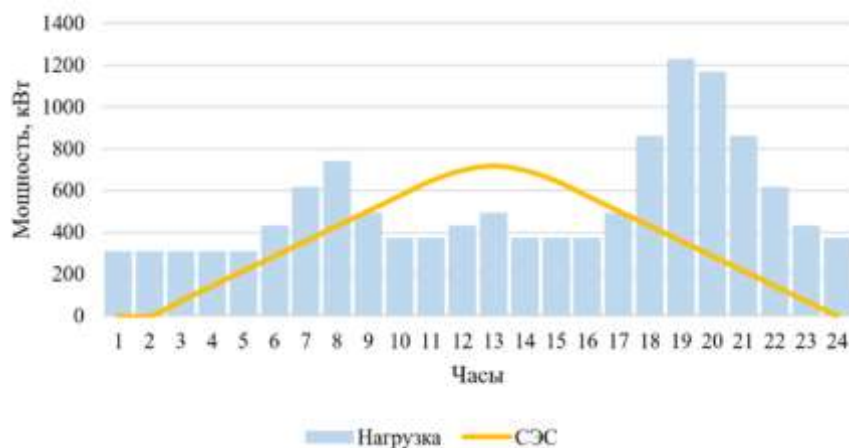


Рис. 1. Суточный график суммарной нагрузки схемы и генерации объекта ВИЭ

Согласно рис. 1, суммарная избыточная генерация установленного объекта ВИЭ в дневные часы, а именно с 9 до 17 часов (включительно), составляет 1764 кВт ч. Однако с учетом КПД двойного преобразования [8, 9] из избыточной электроэнергии в водород и из водорода обратно в электроэнергию для потребления нагрузкой в вечерние часы дефицита местной генерации данная величина сокращается, и располагаемая емкость накопителя составляет 917 кВт ч.

В предположении, что к установке планируются две СНЭ по 458,5 кВт каждая: первая – стационарная, размещенная в узле установки объекта ВИЭ, вторая – передвижная, рассмотрены различные сценарии разряда. Далее приведены результаты расчетов одного из них.

Выполнена разрядка обеих СНЭ за три часа, а именно за 19-ый, 20-ый и 21-ый часы исследуемых суток (рис. 1). Дополнительно установлено ограничение на выдачу мощности СНЭ: за один час не более 152,8 кВт.

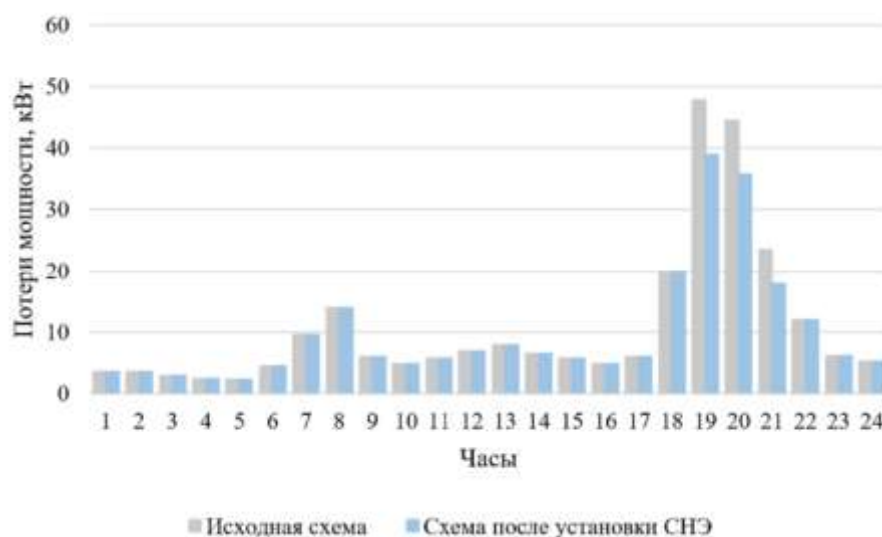


Рис. 2. Суммарные потери мощности в исследуемой схеме до и после установки СНЭ

Согласно полученным результатам расчета для трех заданных вечерних часов, оптимальным для размещения второй (передвижной) СНЭ является узел 7, а выдаваемая накопителем мощность соответствует предельному значению установленного ограничения.

При этом, наблюдается сокращение суммарных потерь мощности в исследуемой схеме. Так, до установки СНЭ с оптимальными параметрами величина суммарных потерь мощности за сутки составляла 257 кВт (исходная схема с установленным объектом ВИЭ оптимальной конфигурации), а после установки СНЭ – 234 кВт. Таким образом, имеет место сокращение суммарных потерь мощности на 10 %.

Стоит отметить, что данная установка СНЭ, а именно:

- стационарный накопитель – узел размещения 3, мощность 458,5 кВт;
- передвижной накопитель – заряд в узле 3 и разряд в узле 7, мощность 458,5 кВт,

при разряде в течение трех вечерних часов с 19 до 21 часа (включительно), помимо сокращения суммарных потерь мощности в схеме за исследуемые сутки, характеризуется также более сглаженным графиком суммарной нагрузки

и генерации объекта ВИЭ, а также имеет экономическую целесообразность, так как разряд осуществляется в часы максимального дефицита генерации (при максимальной стоимости тарифа на электроэнергию).

Решение представленной оптимизационной задачи определения оптимальных параметров, совместно устанавливаемых объекта ВИЭ и СНЭ будет отличаться в зависимости от заданной целевой функции, а также наложенных граничных и расчетных условий для обоих объектов. В частности, целевая функция может быть представлена не одним критерием оптимизации (в данном случае величиной суммарных потерь мощности), а функциональной зависимостью, например, линейной, тех или иных критериев, принятых в соответствии с исходными данными той или иной задачи.

В контексте же обозначенной задачи и на примере исследуемой схемы может быть осуществлен одновременный учет влияния внедрения совместно устанавливаемых объектов ВИЭ и СНЭ как на режимные параметры ЭС, так и на регулирование и планирование стоимости тарифа на электроэнергию (экономический фактор) [1, 3]. Кроме того, частичный переход на возобновляемую генерацию способствует сокращению величины углеродного следа [5], что также может быть учтено при формировании целевой функции для проведения всестороннего анализа оптимальности размещения проектируемых объектов.

Таким образом, установлено, что для обеспечения надежности электроснабжения конечного потребителя при планировании нового ввода местной генерации (объекта ВИЭ) необходимо рассматривать его совместную установку со СНЭ, в частности, водородным накопителем. Для оценки емкости водородного накопителя осуществляется оценка величины избыточной генерации объекта ВИЭ с учетом КПД преобразований, происходящих в самом накопителе. После чего следует рассмотреть все возможные сценарии разряда данной емкости, а именно для формирования сценариев можно варьировать:

- количество и тип СНЭ;
- распределение мощности между СНЭ;
- ограничение по выдаче мощности за интервал времени;
- период времени разряда (указание конкретных часов и их количества).

В результате чего, из всех рассмотренных вариантов установки СНЭ будет выбран оптимальный, соответствующий минимальному значению заданной в контексте конкретной задачи целевой функции и при выполнении всех наложенных ограничений.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант МК-3249.2021.4.*

#### Литература

1. Ahmadi B., Ceylan O., Ozdemir A. A multi-objective optimization evaluation framework for integration of distributed energy resources //Journal of Energy Storage. – 2021. – Т. 41. – С. 103005.
2. Sudhakar T. D. et al. Modeling and simulation of distribution network with the integration of distribution generator using Matlab //Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Т. 9. – №. 12. – С. 1-7.
3. Suresh M. C. V., Belwin E. J. Optimal DG placement for benefit maximization in distribution networks by using Dragonfly algorithm //Renewables: Wind, Water, and Solar. – 2018. – Т. 5. – №. 1. – С. 1-8.
4. Ufa R. A. et al. Algorithm for optimal pairing of res and hydrogen energy storage systems //International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – Т. 46. – №. 68. – С. 33659-33669.
5. Wu, Q. Multi-objective Optimization of Integrated Renewable Energy System Considering Economics and CO2 Emissions [Text] / Q. Wu, J. Zhou, S. Liu, X. Yang, H. Ren // Energy Procedia. – 2016. – V. 104. – P. 15-20. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.12.004.
6. Будзко И. А., Лещинская Т. Б., Сукманов В. И. Электроснабжение сельского хозяйства //М.: Колос. – 2000. – Т. 536.
7. Малькова Я. Ю., Уфа Р. А., Мыцко Е. А. Разработка алгоритма определения оптимального места и мощности объекта генерации в электрической сети // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – №. 39. – С. 34-53.
8. Петин С. Н. Энергетическая эффективность производства и потребления водорода //Вестник Московского энергетического института. – 2019. – №. 2. – С. 29-36.
9. Филимонова А. А. и др. Электрохимические технологии для автомобилей на водородном топливе //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2021. – Т. 23. – №. 2. – С. 104-115.