

печения требуемого качества электрической энергии, а также повысить надежность работы установки при выборе безредукторных ВЭУ.

Заключение

В докладе рассмотрены топологии ВЭУ, отражены преимущества и недостатки каждого типа. Рассмотрена актуальность применения ВЭУ в России, отмечен оптимальный вариант топологии ВЭУ для работы в составе энергосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bensalah A., Barakat G., Amara Y. Electrical generators for large wind turbine: Trends and challenges // *Energies*. – 2022. – Т. 15. – № 18. – С. 6700.
2. ГОСТ Р. 54418.27. 1-2019 (МЭК 61400-27-1: 2015) Возобновляемая энергетика // *Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть*. – С. 27–31.
3. Santoso M.S.S., Singh M. Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants // *NREL national laboratory of the US Department of Energy*. – 2011. – С. 15–17.
4. Blaabjerg, F.; Chen, Z.; Teodorescu, R.; Iov, F. Power Electronics in Wind Turbine Systems // *In Proceedings of the 2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, Shanghai, China, 14–16 August 2006*. – Vol. 1. – P. 1–11.
5. Hansen, A.D. *Generators and Power Electronics for Wind Turbines*. – John Wiley & Sons, Ltd.: West Sussex, UK, 2012.
6. Елистратов В.В. *Возобновляемая энергетика*. – 3-е изд., доп. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 424 с.
7. Годовой отчет за 2023 г. Некоммерческого партнерства «Совет Рынка» [Электронный ресурс] // Ассоциация «НП Совет Рынка» [Офиц. сайт]. – URL: [https:// www.np-sr.ru/sites/default/files/1_godovoy_otchet_zh_2023_god.pdf](https://www.np-sr.ru/sites/default/files/1_godovoy_otchet_zh_2023_god.pdf) (дата обращения: 10.11.2024).
8. Гзенгер Ш., Денисов Р. Перспективы ветроэнергетического рынка в России // Интернет-ресурс. Режим доступа: <https://www.wwindea.org/wp-content/uploads/2017/06/170612-FES-Windenergie-rus-print.pdf> (дата обращения: 10.11.2024). – 2017.
9. Разживин И.А. *Всережимное моделирование ветроэнергетической установки в электроэнергетической системе: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.14.02 : дис.* – 2019.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ЗА СЧЕТ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЧАСТИ ЕЕ МОЩНОСТИ

Е.А. Бернякович

Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ41

Научный руководитель: Н.Ю. Рубан, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ



Введение

В условиях стремительного роста доли возобновляемых источников энергии, в частности фотоэлектрических станций (ФЭС), перед энергосистемами встает задача обеспечения надежного и качественного электроснабжения. ФЭС, характеризующиеся переменчивостью выработки в зависимости от солнечной доступности, требуют эффективных методов регулирования частоты для поддержания стабильности энергосистемы.

В данной статье рассматривается стратегия регулирования частоты энергосистемы с использованием ФЭС за счет резервирования части её мощности. Поставленной целью является оценка эффективности данного метода резервирования, его влиянию на общую надежность системы и экономическую целесообразность применения данного подхода.

Подход к регулированию частоты в ЭЭС с помощью СЭС

Для поддержания стабильной частоты энергосистемы часть мощности фотоэлектрической станции резервируется. Этот резерв используется в случае необходимости увеличения выработки электроэнергии, что помогает предотвратить колебания частоты. При необходимости управления частотой с помощью ФЭС, её мощность снижается на заранее определенный процент, исходя из необходимого резерва.

Для резервирования определенного количества активной мощности фотоэлектрическая генерация электроэнергии должна работать с отклонением от максимальной мощности [1]. В статье используется метод пропорционального запаса мощности и целевой коэффициент запаса мощности определяется как $r^* \%$, выраженный в виде уравнения (1) [2]:

$$r^* \% = \frac{P_{\text{map}} - P_{r^* \%}}{P_{\text{map}}}, \quad (1)$$

где P_{map} представляет максимальную мощность фотоэлектрической решетки, а на ее величину влияют внешняя освещенность и температура; $P_{r^* \%}$ обозначает целевую мощность в точке запаса мощности.

Для наглядного примера предлагаемой стратегии управления, рассматривается двухконтурная инерция выработки электроэнергии. Структура топологии и общая схема управления изображены на рис. 1 [3].

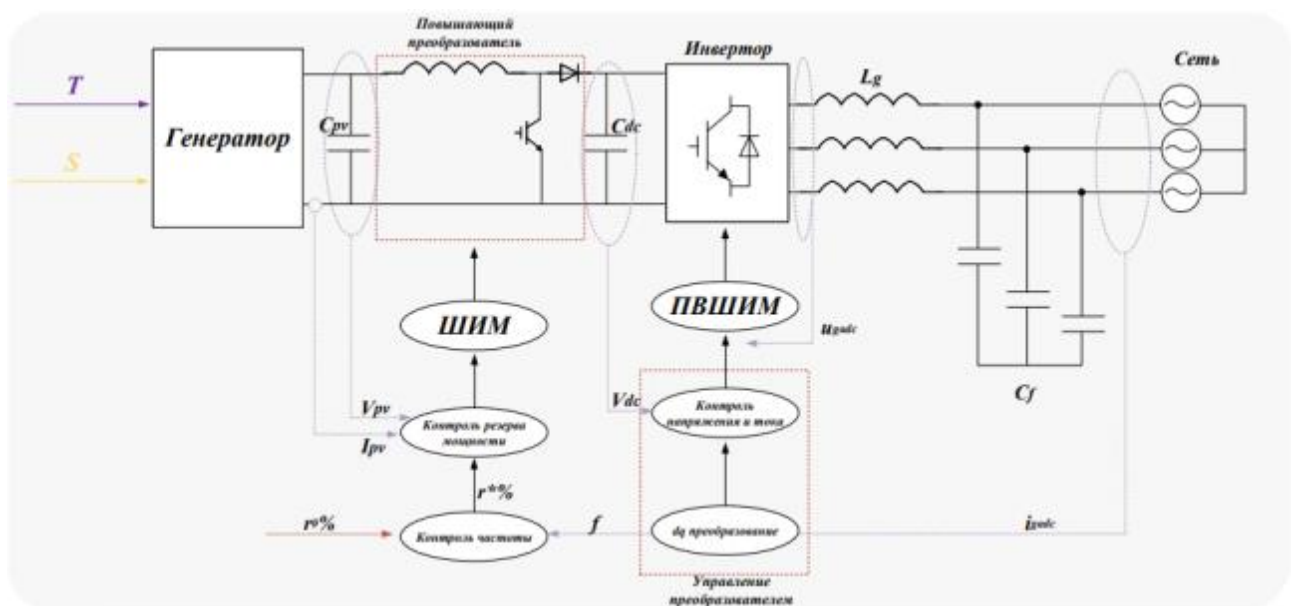


Рис. 1. Структурная блок-схема предлагаемой стратегии управления

На рис. 1, S представляет интенсивность окружающего света, T обозначает температуру окружающей среды, C_{pv} обозначает конденсатор на стороне фотоэлектрической системы, C_{dc} – конденсатор на стороне постоянного тока, L_g обозначает индуктивность фильтрации, C_f представляет фильтрующий конденсатор, u_{gabc} – напряжение, подключенное к сети, i_{gabc} – ток, подключенный к сети, и f – частота сети, измеряемая с помощью контура фазовой автоподстройки частоты (PLL²).

Роль частотного регулирования заключается в передаче целевого коэффициента запаса мощности r^* %, полученного от управления запасом мощности, на основе изменений частоты сети. Это позволяет ФЭС выработки электроэнергии демонстрировать характеристику первичной частотной модуляции, аналогичную характеристике традиционных энергоблоков. Чтобы придать фотоэлектрическим системам характеристики инерции, напоминающие синхронные машины, была принята схема регулирования частоты, изображенная на рис. 2 [3]. Блок-схема управления включает в себя как регулирование снижения частоты, так и инерционное управление, с выражением для целевого коэффициента запаса мощности r^* % следующим образом в уравнении (2):

$$r^* \% = r_0 \% + r_1 \% + r_2 \% = r_0 \% + k_d \Delta f + k_i \frac{df}{dt}. \quad (2)$$

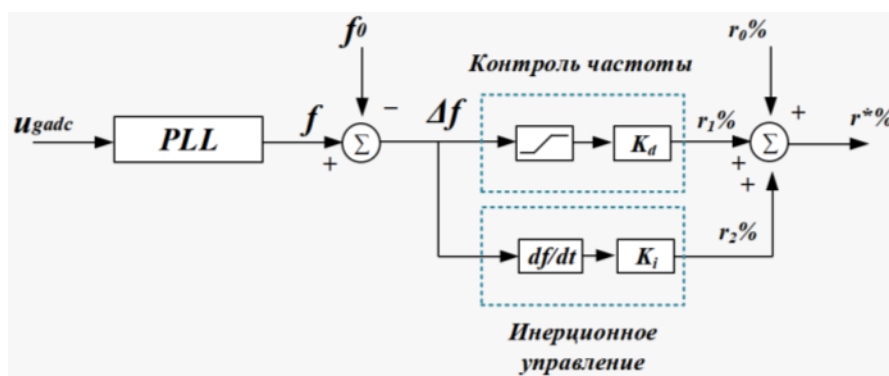


Рис. 2. Первичное регулирование частоты

На рис. 2, f_0 обозначает номинальную частоту электросети; k_d представляет коэффициент провисания; k_i – коэффициент инерции; r_0 % обозначает данный начальный коэффициент запаса мощности; r_1 % и r_2 % – значения отклонения коэффициента уменьшения нагрузки, вызванные регулировкой провисания и инерционным звеном соответственно. R^* % определяется путем добавления начального коэффициента запаса мощности r_0 % к значениям отклонения r_1 % и r_2 % от коэффициента запаса мощности. Оно служит эталонным значением для коэффициента запаса мощности и действует как входные данные для управления запасом мощности.

Когда частота сети f отклоняется от номинальной f_0 , происходит отклонение, приводящее к снижению опорного коэффициента запаса мощности r_1 % и опорного коэффициента запаса мощности по инерции r_2 %. Это приводит к созданию нового эталонного коэффициента запаса мощности r^* %, позволяющего фотоэлектрической системе отслеживать этот новый эталонный коэффициент запаса мощности.

Для повышения эффективности работы фотоэлектрической станции и оптимизации её мощности, предлагается динамически регулировать коэффициент запаса мощности в зависимости от уровня освещенности и нагрузки. Учитывая сильную зависимость выработки

² PLL (phase-locked loop) – электронная схема с генератором, управляемым напряжением или током, который постоянно настраивается для совпадения фазы с частотой входного сигнала.

ФЭС от интенсивности света, коэффициент запаса мощности должен увеличиваться при ярком освещении (для снижения избыточной генерации и предотвращения повышения частоты) и уменьшаться при слабом освещении (для увеличения генерации и предотвращения снижения частоты). Такой подход, основанный на изменении коэффициента запаса мощности во времени, позволяет уменьшить колебания частоты энергосистемы, обусловленные изменениями условий освещенности.

В отличие от других методов, предлагаемый в данной статье подход учитывает текущую нагрузку энергосистемы. При низкой нагрузке повышается коэффициент запаса мощности фотоэлектрической станции, увеличивая резерв мощности системы. При высокой нагрузке коэффициент запаса мощности снижается, увеличивая активную мощность ФЭС и обеспечивая баланс генерации и потребления. Таким образом, для эффективного долговременного управления необходимо учитывать динамику изменения нагрузки при определении кривой изменения коэффициента запаса мощности.

Учитывая приведенный выше анализ, предлагается функция коэффициента запаса мощности для фотоэлектрических электростанций следующим образом в уравнении (3):

$$r \% = 10 \% \cdot \frac{S}{1000} \cdot \frac{P_{av}}{P_L}, \quad (3)$$

В уравнении (3), S представляет прогнозируемую будущую интенсивность освещения на основе интенсивности освещения в определенное время, P_L – мгновенная нагрузка системы в то же будущее время на суточной кривой нагрузки, предсказанной методом прогнозирования нагрузки, а P_{av} – средняя нагрузка за этот день.

За счет настройки переменной скорости снижения нагрузки эффективность регулирования частоты фотоэлектрической установки поддерживается без компромиссов, при одновременном повышении эффективности выработки электроэнергии и экономических показателей [4].

На рис. 3 приведен наглядный пример того, как с помощью участия блока синтетической инерции можно уменьшить амплитуду и количество колебаний частоты.

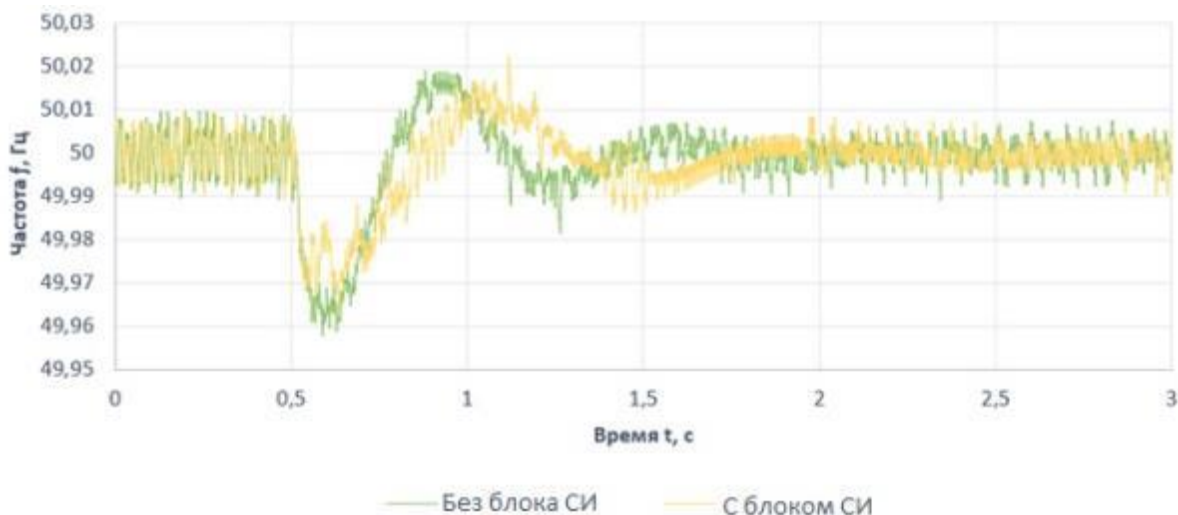


Рис. 3. График зависимости частоты от времени без использования блока СИ и с его использованием

Заключение

В данной статье исследовалась эффективность регулирования частоты энергосистемы с помощью солнечной электростанции (СЭС) путем резервирования части ее мощности. Анализ показал, что динамическое управление коэффициентом запаса мощности СЭС, учитыва-

ющее как уровень солнечной инсоляции, так и текущую нагрузку энергосистемы, является перспективным подходом к обеспечению стабильности частоты при высокой доле возобновляемой генерации. Предложенный метод позволяет оптимизировать выработку электроэнергии СЭС, снижая избыточную генерацию при высоком уровне освещенности и компенсируя дефицит мощности при низком уровне освещенности. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку более совершенных алгоритмов управления, учитывающих прогнозирование погоды и нагрузки, а также на оценку экономической эффективности предлагаемого метода в сравнении с традиционными методами регулирования частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 2014 // Sciencedirect 2014 – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061514000969?via=ihub#preview-section-references> (дата обращения 18.11.2024).
2. Ли К. Исследование по производству фотоэлектрической энергии, участвующей в регулировании частоты сети. Кандидатская диссертация. – Пекин: Северо-Восточный университет электроэнергетики, 2022.
3. Чжоу С. Исследование стратегии активного регулирования мощности ветровой и солнечной генерации, участвующей в регулировании частоты электросети. Кандидатская диссертация. – Цзинь, Китай: Северо-Восточный электроэнергетический университет, 2018.
4. Ву П., Лю Б., Ян П., Сонг С., Лю З., Цинь Л. Первичное управление частотной модуляцией и оценка фотоэлектрической энергии с учетом погоды и рабочего состояния // Журнал Уханьского университета. – 2022. – 55 (3). – 275–282.

МОНИТОРИНГ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПРИ ПОМОЩИ ПРЕДОБУЧЕННОЙ МОДЕЛИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

А.А. Сухобоков

Белорусский национальный технический университет, ФИТР, РТС, группа 10703222

Научный руководитель: Н.В. Воюш, ст. преподаватель РТС БНТУ

В современных условиях энергоснабжение играет ключевую роль в обеспечении устойчивого развития экономики и промышленности. Линии электропередач являются важнейшей составляющей энергетической инфраструктуры, обеспечивающей передачу электроэнергии на большие расстояния. Надежность и эффективность эксплуатации ЛЭП напрямую зависят от их конструкции, а также от своевременного анализа возможных дефектов и структурных повреждений. На данный момент мониторинг линий осуществляется непосредственно специалистами, бригада которых начинает работу на участке уже при наличии проблемы. Этот процесс является неэффективным и ресурсозатратным, это может привести к длительному ограничению полноценной работы ЛЭП, тем самым к созданию угрозы работающих предприятий.

Предложенным решением является использование дронов для съемки опор линий электропередач с различных ракурсов. Изображения со съемки использовать в качестве входных данных для специально обученной модели нейронной сети, которая решая задачу обнаружения объектов, будет определять дефекты в конструкции, а также структуре ЛЭП. Использование дронов экономит ресурсы на передвижении специалистов, так как будет необходимо участие одного диспетчера-пилота, а использование нейронной сети повысит эффективность обработки входящей информации.

Функцией нейронной сети будет являться определение дефектов в структуре линии электропередач. Определение дефектов на объекте будет происходить путем распознавания изображений, передаваемых с дрона и для этих целей лучше использовать модели нейронной сети сверточной архитектуры.