

электрооборудования и сетей с более высокой надежностью, следствием этого является минимализация отказов и сокращению времени простоя оборудования; снижение массогабаритных характеристик и себестоимости благодаря реализации разного вида гальванических развязок, повышение точности измерений.

Цифровой трансформатор преобразует высоковольтные и высокотоковые сигналы в цифровой формат, что делает их более удобными для обработки, хранения и передачи данных. Это позволяет легко интегрировать устройство в цифровые системы мониторинга и управления. Суть внедрения таких систем – оптимизация и улучшение управления производством, передачей и потреблением электроэнергии. Сбор и анализ данных позволяет собирать большое количество данных о работе энергетических систем, включая информацию о производстве, передаче, распределении и потреблении электроэнергии. Эти данные затем анализируются для выявления паттернов, аномалий и возможных улучшений. Также цифровые системы позволяют оптимизировать распределение и использование электроэнергии, что ведет к экономии энергоресурсов и сокращению потерь.

Цифровые трансформаторы меньше своих классических аналогов за счёт внедрения оптической гальванической развязки. Такой метод проектирования позволяет уменьшить использование изоляционных материалов в измерительной части, что снижает стоимость, массогабаритные характеристики и издержки на эксплуатацию такого вида устройств. Также стоит учесть, что применение масла или элегаза, в качестве изоляционной диэлектрической среды, не требуется, что также влияет на массогабаритные показатели устройства, снижаются затраты на обслуживание. За счёт конструкции, где вторичная обмотка гальванически связана с измеряемой токоведущей частью, потенциал первичной и вторичной обмотки практически равны, в таком случае нам не нужна сложная изоляция, которая удорожает конструкцию и требует трепетной эксплуатации.

Добавление пояса Роговского позволяет избежать насыщение магнитопровода при больших токах КЗ, это является следствием роста токов ХХ и дальнейшему пробую, что не позволяет устройствам РЗА увеличить время срабатывания и исключить неселективное действие.

Протокол МЭК 61850 стандарт «Сети и системы связи на подстанциях» является международным, что позволяет интегрировать разработки, которые поддерживают этот протокол в большинство энергосистем мира. Данный факт открывает перспективы для крупного производства, выход на рынки не только СНГ, но и мира.

## **ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ НАКПОЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ЗАДАЧАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**Н.А. Солодников**

*Томский политехнический университет,  
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМ91*

Научный руководитель: Р.А. Уфа, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Внедрение возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) влечет за собой ряд сложностей, одной из которых является поддержание баланса мощности для регулирования частоты в сети, т. к. генераторы возобновляемых источников не обладают достаточным моментом инерции для обеспечения запаса устойчивости, а мощность, вырабатываемая ВИЭ, зави-

сит от нерегулируемых параметров. Следовательно, необходимо применение систем регулирования.

Одним из вариантов решения проблемы первичного регулирования частоты, применимым для возобновляемых источников электроэнергии, является использование систем накопления энергии, в частности, *Battery Energy Storage Systems (BESS)*. BESS представляют собой аккумуляторные батареи, которые могут накапливать энергию из разных источников и высвобождать ее при необходимости поддержания баланса генерируемой и потребляемой мощности. BESS состоит из одной или нескольких батарей и может использоваться для обеспечения резервного питания и повышения стабильности сети [1].

Для оценки возможности применения систем накопления энергии было произведено моделирование электроэнергетической системы в программной среде *MATLAB*. Для этого составлена система, состоящая из синхронного турбогенератора, линий электропередачи, шины бесконечной мощности (ШБМ), системы накопления энергии, нагрузки и трансформаторов (рис. 1). В узлах сети установлены блоки для измерения перетока мощности и частоты. Параметры оборудования были выбраны согласно модели, взятой за основу исследования и описанной в статье [2].

Система производит векторное управление выходным напряжением. При векторном управлении управление осуществляется по мгновенным значениям переменных [4]. Изменяя уставки, задаваемые в блоке управления можно изменять модуль напряжения и угол между направлением вектора напряжения сети и вектором напряжения на выходе СНЭ. Таким образом, изменяется величина, направление и характер перетоков мощности. Система управления осуществляет контроль и регулировку заряда/разряда батареи. Согласно задачам выполняемым СНЭ в данной работе, необходимо, чтобы батарея разряжалась при снижении частоты в сети, выдавая активную мощность и поддерживая тем самым баланс мощности в энергосистеме. При избытке же генерируемой мощности и, как следствие, повышении частоты, аккумулятор должен заряжаться, снижая избыток активной мощности в сети. Важно, чтобы батарея работала в надлежащем рабочем диапазоне для обеспечения длительного срока службы. Так, минимальный предел разряда достигается при величине заряда 20 %, максимально же допустимой величиной заряда принимается величина 70 %.

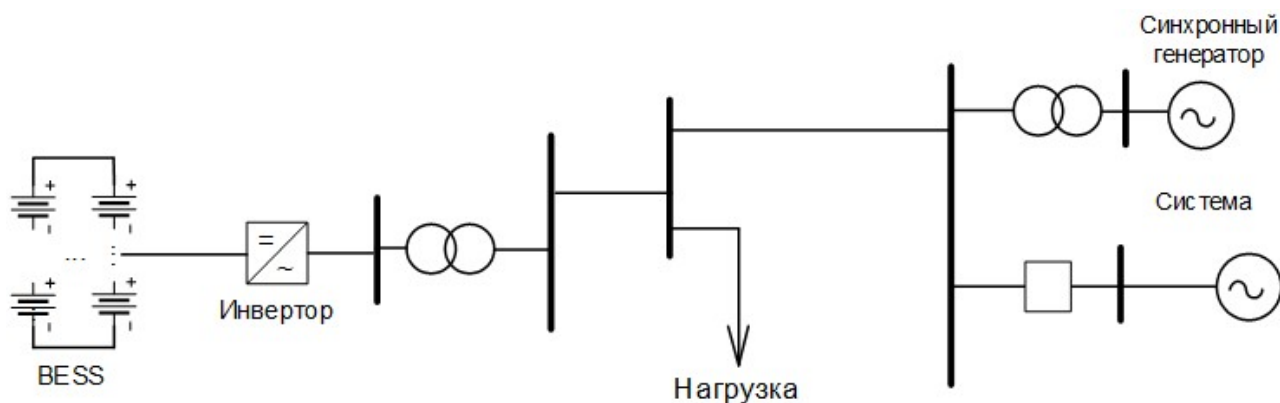


Рис. 1. Распределение температуры по толщине листа березы при воздействии лесного пожара низкой интенсивности в момент времени

Блоки контроля в системе управления построены на базе пропорционально-интегральных регуляторов (ПИ-регуляторов).

Для оценки эффективности системы накопления энергии проведены следующие опыты:

- отключение ШБМ от сети для оценки предела мощности нагрузки, при котором система способна ограничить снижение частоты не ниже минимально допустимой величины;

- моделирование трехфазного короткого замыкания (КЗ) на нагрузке при подключенной ШБМ с установленной мощностью короткого замыкания;
- моделирование работы накопителя при низкой величине заряда аккумулятора.

Первым рассматриваемым сценарием является отключение ШБМ от системы в момент времени равный 1,2 с и последующая работа энергосистемы в изолированном режиме. Для оценки эффективности применения СНЭ, моделирование проводится при наличии СНЭ и без нее. Мощность генератора во всех опытах равна 7,5 МВт.

В качестве максимально допустимого отклонения примем предельную величину кратковременного динамического отклонения в первой синхронной зоне равную 0,8 Гц, согласно [3].

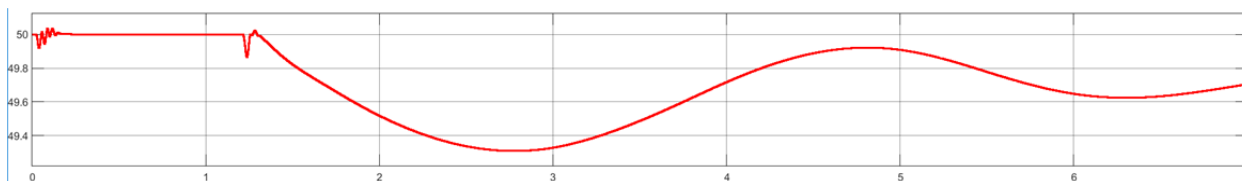


Рис. 2. Частота в сети при  $P_n = 7,5$  МВт при отсутствии СНЭ

Из полученных графиков можно наблюдать, что активной мощности генератора не хватает, чтобы поддержать баланс мощности при частоте 50 Гц. Как итог, частота снижается пике более чем на 0,6 Гц и устанавливается на новом значении, меньшем чем 50 Гц.

Выполнив аналогичный опыт, но с применением СНЭ, наблюдается меньшее максимальное отклонение. Также значение частоты в новом установившемся режиме более близко к 50 Гц.

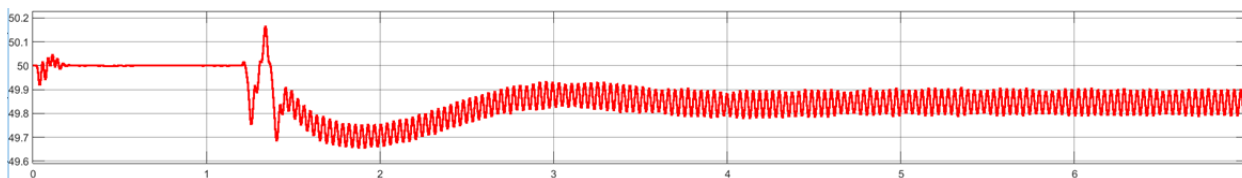


Рис. 3. Частота в сети при  $P_n = 7,5$  МВт с СНЭ

Зададим мощность нагрузки ( $P_n$ ) равной 8 МВт и повторим предыдущий сценарий.

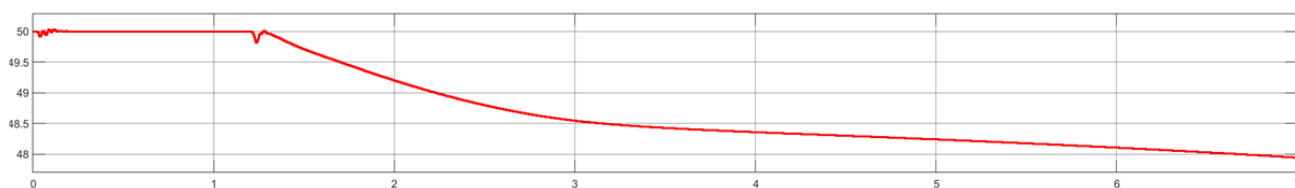


Рис. 4. Частота в сети при  $P_n = 8$  МВт при отсутствии СНЭ

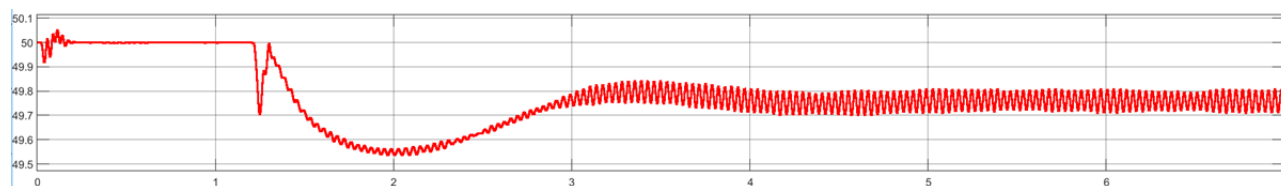


Рис. 5. Частота в сети при  $P_n = 8$  МВт с СНЭ

Синхронный генератор без СНЭ не справляется с возникшим дефицитом активной мощности, частота в сети безвозвратно снижается ниже минимально допустимой величины.

Выполнив аналогичный опыт, но с применением СНЭ, наблюдается сохранение частоты в пределах допустимых отклонений.

Для оценки переходного процесса, возникающего в сети с СНЭ при трехфазном коротком замыкании и его последующем отключении, в цепь подключены синхронный генератор, ШБМ с мощностью короткого замыкания 500 МВА в качестве объединенной энергосистемы, нагрузка мощностью 7,5 МВт и СНЭ. Короткое замыкание возникает в момент времени равный 1,5 с и отключается через 0,1 с. Для сравнения отдельно моделируется короткое замыкание в сети без СНЭ.

В случае КЗ на нагрузке при отсутствии СНЭ в системе наблюдается изменение частоты, представленное в виде графика на рис. 6.

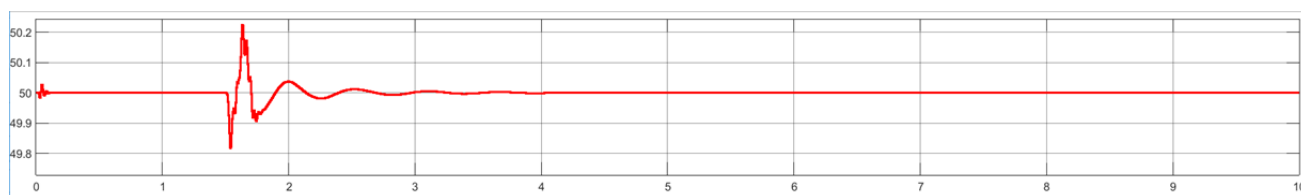


Рис. 6. КЗ на нагрузке в системе без СНЭ

Наблюдается возникновение затухающих колебаний, которые демпфируются ШБМ.

Смоделируем трехфазное короткое замыкание на нагрузке в сети с подключенной системой накопления энергии. Полученный график изменения частоты в сети (рис. 7) представлен ниже.

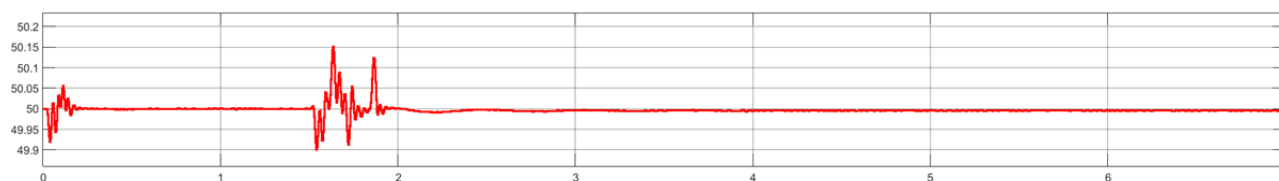


Рис. 7. КЗ на нагрузке в системе с СНЭ

По результатам моделирования видно, что применение СНЭ способствует меньшему снижению частоты, т. к. батарея, разряжаясь, выдает мощность в сеть.

Уменьшим мощность КЗ ШБМ до 300 МВА и проведем аналогичные опыты.

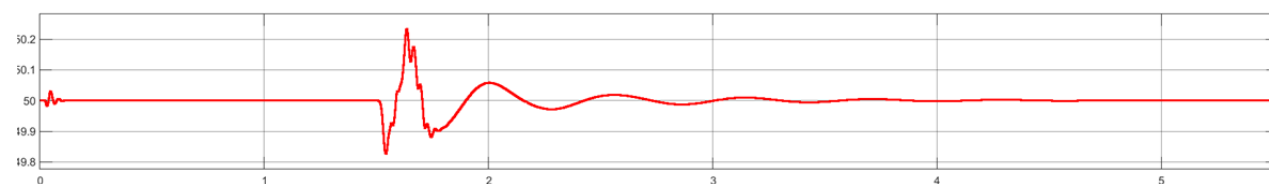


Рис. 8. КЗ на нагрузке в системе без СНЭ

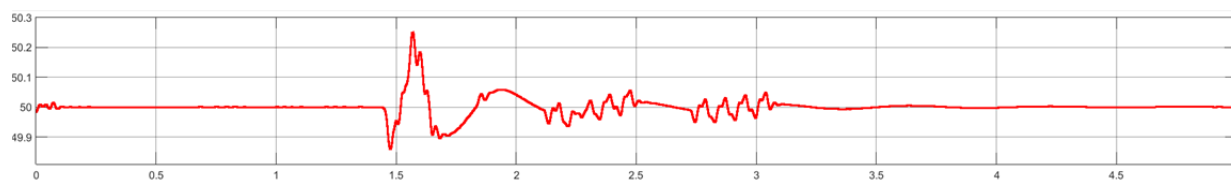


Рис. 9. КЗ на нагрузке в системе с СНЭ

Сравнив графики частоты, можно сделать вывод, что применение системы накопления энергии уменьшает снижение частоты в момент короткого замыкания, но генерирует дополнительные колебания несинусоидальной формы до момента наступления нового установившегося режима. Данное явление связано с неидеальной системой управления. Для устранения колебаний требуется усложнение системы управления или применение защиты, которая будет ограничивать выдачу мощности батареями при возникновении такого рода колебаний.

Изменим процент заряда аккумуляторной батареи. Исходные данные для опытов: емкость батареи 100 А·ч, нагрузка 8,5 МВт, заданная частота 50 Гц, ШБМ отключается на 1,2 с. На рис. 10 представлен график частоты и параметров СНЭ при начальном заряде батареи *SOC* (*state of charge*) равном 21 %.

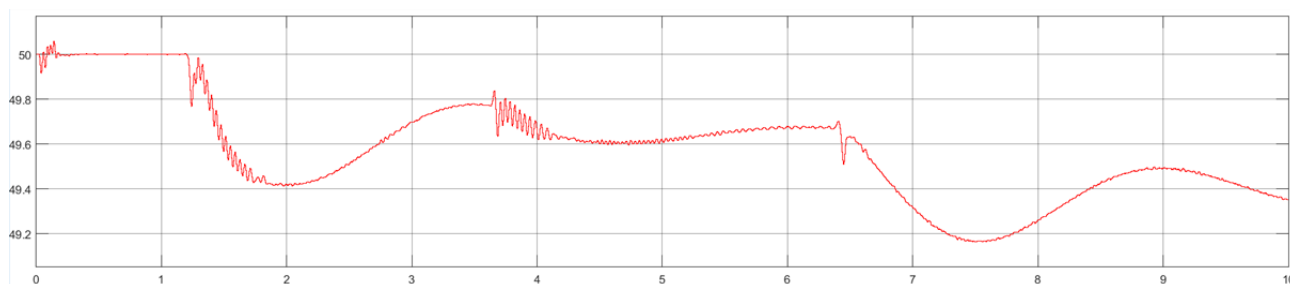


Рис. 10. Частота в сети

Наблюдается разряд батареи при отключении ШБМ, при этом снижается заряд аккумулятора. В момент достижения *SOC* 20 % (6,5 с) накопитель перестает высвобождать мощность в сеть, частота начинает стремиться к новому установившемуся значению меньшему по значению, т. к. общая мощность генерации в сети уменьшилась. Таким образом, накопитель ограничивает разряд аккумулятора до предельно малой величины согласно логике, заложенной в систему управления, в целях увеличения срока службы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Battery energy storage. – Siemens Energy. URL: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/storage-solutions/battery-energy-storage.html> (дата обращения: 05.11.2022)
2. King K.G. A three phase transistor class-b driver inverter with sinewave output and high efficiency // Inst. Elec. Eng. Conf., 1974. – P. 204–209.
3. ГОСТ Р 55890–2013. Регулирование частоты и перетоков активной мощности. Нормы и требования. Национальный стандарт Российской Федерации. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 05.12.2013 N 2164-ст) (ред. от 25.12.2019).
4. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2008. – 298 с.