

Заключение

В результате проведенных экспериментов была разработана нейронная сеть, способная распознавать несколько режимов с высокой точностью: нормальный режим, режим короткого замыкания и режим броска тока намагничивания. Такой алгоритм может служить как основной автономный защитный механизм, так и дополнительная защита для трансформатора. Оценка возможности применения данного алгоритма в электроэнергетической индустрии требует дальнейших серьезных исследований.

Дальнейшее развитие данного исследования может быть связано с разработкой алгоритмов дифференциальной защиты для трансформаторов с различными типами обмоток и заземлений, а также совмещением традиционных методов защиты с новыми технологиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рашидов Т. Создаем Нейронную сеть. – Москва: Вильямс, 2018. – 272 с.
2. Rudra P.M., Verma H.K., Manoj T. Power Transformer Differential Protection Based On Optimal Probabilistic Neural Network. – IEEE. – 2010. – № 25. – С. 102–112.
3. Fault Prediction of Intelligent Electricity Meter Based on Multi-classification Machine Learning Model / J. Yan, Z. Guo, T. Yuan et al. – IEEE. – 2021. – С. 293–297.

ОБЪЕДИНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ВИРТУАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА И БЛОКА СИНТЕТИЧЕСКОЙ ИНЕРЦИИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

П.П. Радько¹, Ю.Д. Бай²

*Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМ21¹; ИШЭ, ОЭЭ²*

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

Введение

В связи с глобальной тенденцией перехода к возобновляемым источникам процент их внедрения в электроэнергетические системы постоянно растет. Однако динамика внедрения ВИЭ приводит к уменьшению постоянной инерции, что проявляется в появлении более стремительных переходных процессов, особенно связанных с изменением частоты при использовании традиционной системы управления силовым преобразователем.

В России проблема встает более остро, поскольку из-за большой территории много энергорайонов являются удаленными или даже изолированными (рис. 1) от единой энергосистемы [1]. Следовательно, при наличии объектов ВИЭ в таких районах любые возмущения будут приводить к резким изменениям режимных параметров, которые могут в свою очередь привести к тяжелым авариям.

Таким образом встает задача обеспечить на объектах ВИЭ, в данном исследовании на солнечной электростанции, инерционного отклика, сравнимого с тем, что наблюдается на традиционных источниках энергии, в сильных (в составе ЕЭС) и слабых (удаленных) сетях.

Существующие направления решения

Сгладить кривые мощности можно применением накопителей энергии, но это требует как капитальных, так и эксплуатационных расходов и в данной работе этот метод не рассматри-

вается. Вместо этого лучше увеличить инерцию станции с помощью алгоритмов ее управления.

Есть два основных способа это сделать: использование блока синтетической инерции (СИ), который представляет собой дополнительный контур системы управления, кратковременно увеличивающий вырабатываемую мощность при возникновении тормозящего момента (рис. 2), и использование виртуального синхронного генератора (ВСГ), являющегося более комплексной системой управления, имитирующей работу традиционной генерирующей установки при большем количестве сценариев (рис. 3) [2].

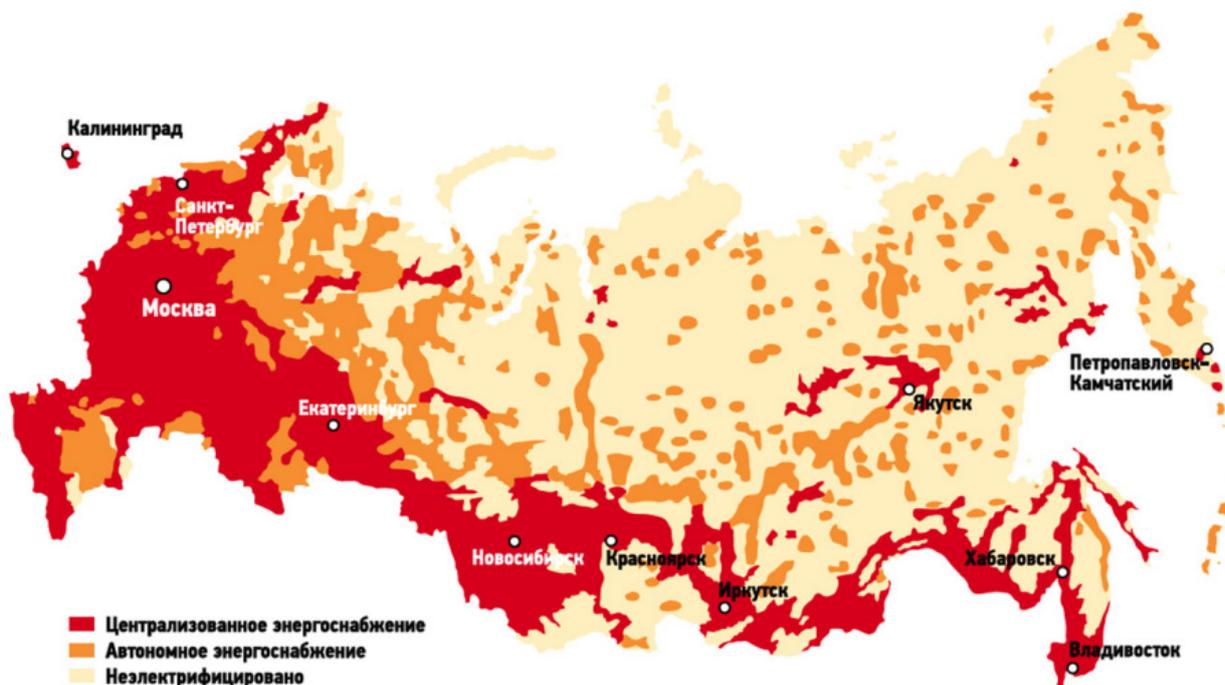


Рис. 1. Рынок автономных энергосистем РФ

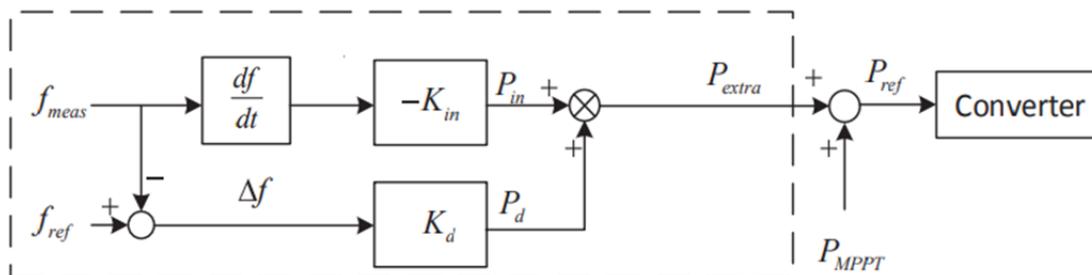


Рис. 2. Структурная схема модуля синтетической инерции

Как видно из описания, оба решения весьма ситуативные, т. е. их применение будет сопровождаться разной эффективностью в зависимости от условий и запросов. Из анализа отечественных и зарубежных литературных источников, а также исходя из собственных работ можно сделать ряд выводов о работе блока СИ и ВСГ.

В сильной сети оба метода показывают свою эффективность без проявления негативных факторов, поэтому в случае, если есть возможность разгрузить фотоэлектрические установки, применение блока синтетической инерции может оказаться вполне подходящим способом повысить устойчивость системы.

В слабой же сети работа блока СИ приводит к возникновению гармонических высокочастотных колебаний режимных параметров, из-за чего его применение в таких сетях не явля-

ется целесообразным. В это же время виртуальный синхронный генератор не имеет таких проблем, ко всему прочему эффективно участвуя в регулировании частоты.

Таким образом закономерным развитием рассмотренных мер является их синтез, т. е. разгрузка фотоэлектрической установки, управляемой инвертором с виртуальным синхронным генератором, с возможностью использовать образованный резерв через блок синтетической инерции. Исследованию описанной системы управления и посвящена данная работа.

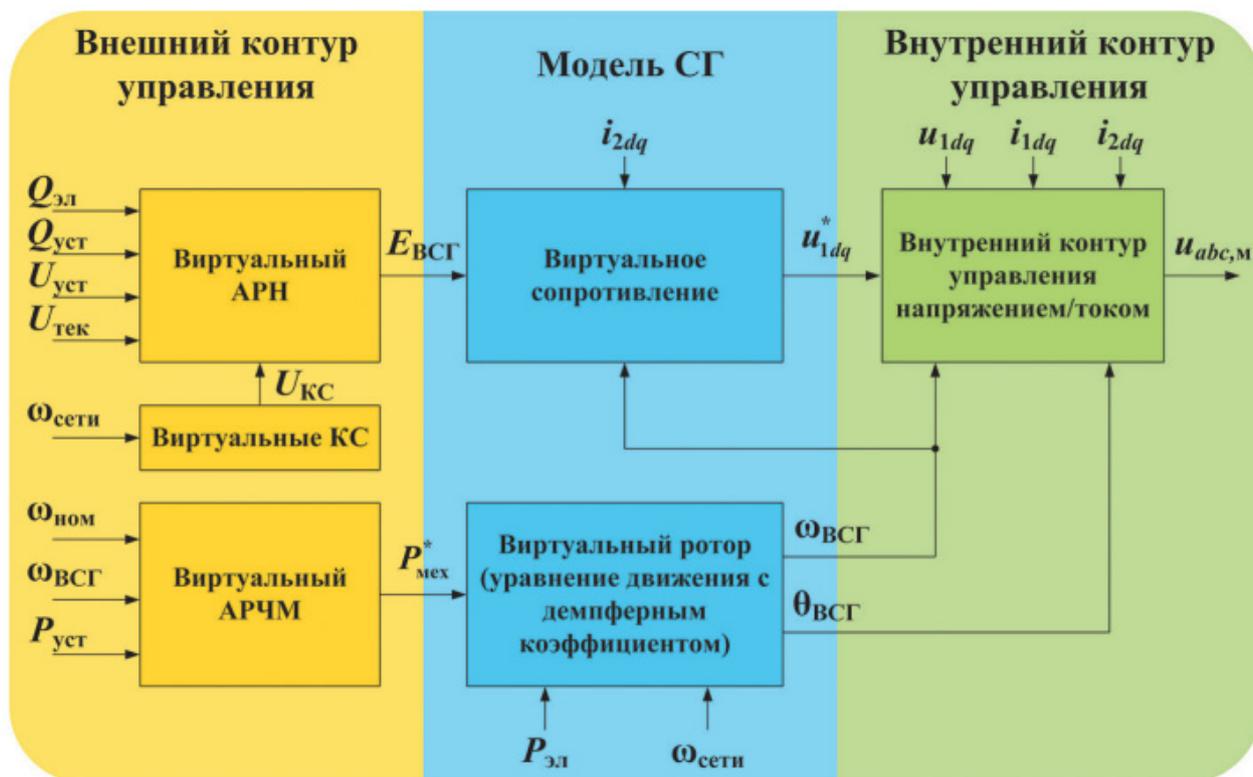


Рис. 3. Классическая структура управляемого по напряжению ВСГ (ВСГ-Н)

Исследуемая модель

Исследуемая модель представляет собой одномашинную систему, приведенную на рис. 4. Шина 4 представлена шиной бесконечной мощности. Стоит отметить, что линия Л1 значительно длиннее линии Л2. Это приводит к тому, что при работе обеих линий сеть считается сильной, а при отключенной Л2 сеть становится слабой. Затем, в качестве возмущения, проводится увеличение нагрузки Н1.

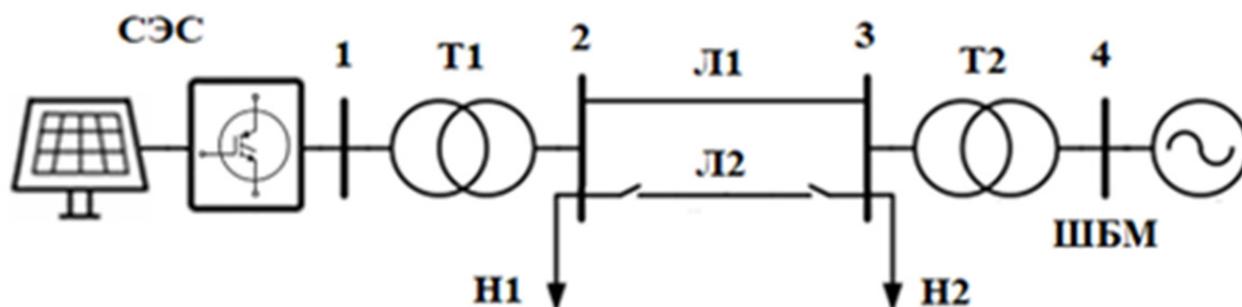


Рис. 4. Схема исследуемой энергосистемы

Эксперименты проводятся для случая применения ВСГ-Н (виртуальный синхронный генератор с контролем по напряжению) и при использовании ВСГ с адаптивной разгрузкой (ВСГ+СИ) в программно-аппаратной среде RTDS/RSCAD.

Результаты опытов

Не смотря на создание резерва мощности (10 %) при использовании случая применения ВСГ+СИ, мощность СЭС до возмущения в обоих случаях была одинаковой. Это необходимо для того, чтобы производимый наброс нагрузки (10 МВт) имел одинаковое влияние на переходный процесс во всех экспериментах.

На рис. 5 представлены осциллограммы частоты после увеличения нагрузки в сильной сети. Из осциллограмм видно, что скорость изменения, а также предельное отклонение частоты при внедрении блока синтетической инерции не изменились, в то время как демпфирующие свойства станции улучшились значительно. Данные результаты можно объяснить инертностью системы управления: из-за апериодических звеньев сигнал на увеличении мощности после появления небаланса приходит не сразу, что теоретически можно решить более точной настройкой блока СИ. Улучшение демпфирования колебаний объясняется наличием дифференциального звена в контуре управления синтетической инерции, реагирующем на скорость отклонения частоты.

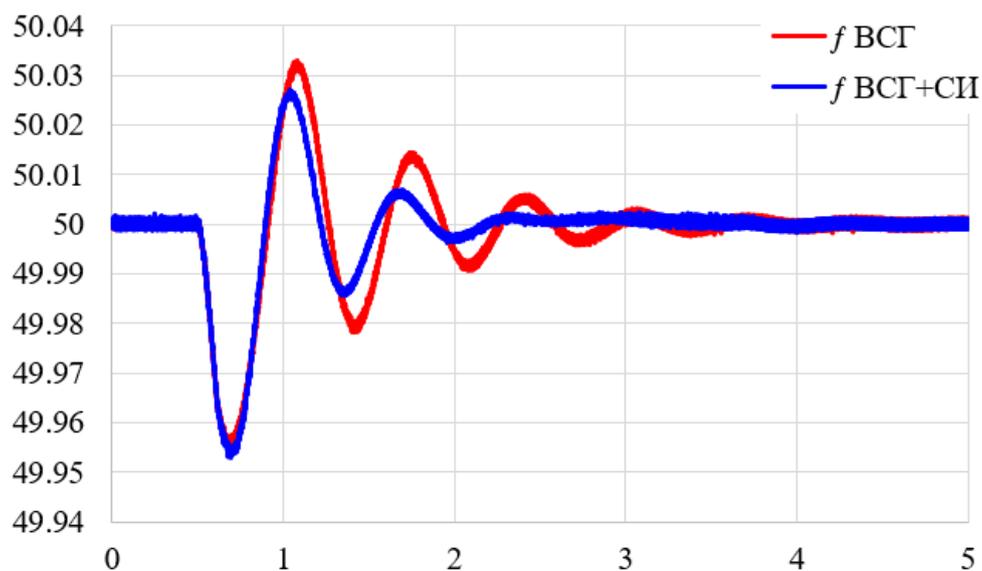


Рис. 5. Осциллограммы частоты после изменения нагрузки в сильной сети

Осциллограммы частоты после наброса нагрузки в слабой сети приведены на рис. 6. Из результатов экспериментов видно, что без блока СИ виртуальный синхронный генератор перестает правильно формировать сигнал после значительных увеличений нагрузки. Очевидно, что при замене ШБМ даже на идеальный источник с собственными регуляторами подобные условия приведут к потере устойчивости системы в целом.

В то же время внедрение контура СИ позволяет увеличить диапазон возмущений, при которых виртуальный синхронный генератор работает корректно, в том числе и при больших набросах нагрузки.

Количественное сравнение применения ВСГ и ВСГ+СИ в сильных и слабых сетях приведено в табл. 1. Анализ проводился с помощью интегрального показателя качества I , оценивающего среднее отклонение от номинальной частоты на протяжении всего переходного процесса (чем значения показателя меньше, тем лучше).

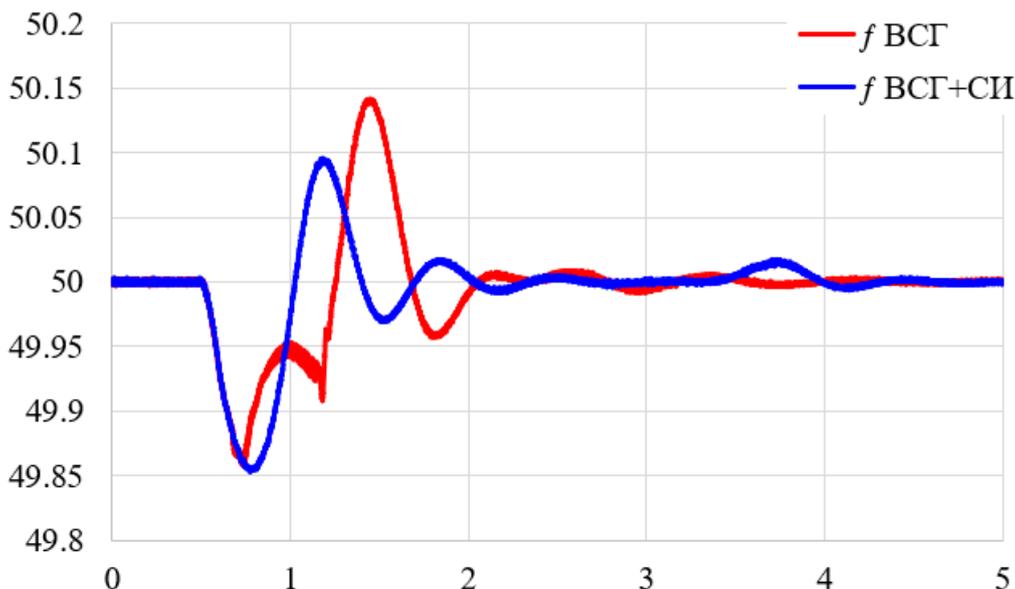


Рис. 6. Осциллограммы частоты после изменения нагрузки в сильной сети

Таблица 1. Сравнение влияния ВСГ и ВСГ+СИ на переходный процесс

Система управления	$I(\text{ВСГ}), \text{о.е.}$	$I(\text{ВСГ+СИ}), \text{о.е.}$	Улучшение в зависимости от системы управления, %
Плотность сети			
Сильная сеть	$2,094 \cdot 10^4$	$1,168 \cdot 10^4$	44,21
Слабая сеть	$36,045 \cdot 10^4$	$19,6 \cdot 10^4$	45,56

Заключение

Основными методами обеспечения инерционного отклика на СЭС являются применение блока синтетической инерции и виртуального синхронного генератора, однако в разных условиях степень влияния на переходные процессы этих методов может разительно отличаться. Для того чтобы усилить преимущества данных методов можно объединить их в один комплексный.

Применение ВСГ с адаптивной разгрузкой позволяет добиться улучшенного демпфирования возникающих колебаний. Качество переходного процесса увеличилось приблизительно на 45 % как в сильной, так и в слабой сети.

Из этого можно сделать вывод, что в случае, если есть возможность разгрузить фотоэлектрические установки, или же если есть необходимость обеспечить на солнечной электростанции резерв, применение виртуального синхронного генератора совместно с применением блока синтетической инерции может оказаться весьма целесообразным решением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бердников Р., Холкин Д., Чаусов И. Оптимизация систем энергоснабжения удаленных и изолированных территорий за счет управления энергетической гибкостью // Энергетическая политика. – 2023. – № 1(179). – С. 94–106. – DOI: 10.46920/2409-5516_2023_1179.94. – EDN CRQLOW.
- Wang M., Meng K., Yuan L., Liang Z. Comparative Synthetic Inertia Assessment Between Droop And Virtual Synchronous Generator Control For Weak Grids Integration // IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). – 2022. – P. 4493–4498. – DOI: 10.1109/CIEEC54735.2022.9845936.