

ВИРТУАЛЬНАЯ ИНЕРЦИЯ В СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Д.Д. Сарнаков

*Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А03*

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

Современная энергосистема переходит от использования синхронных машин к преобладанию инверторов с возобновляемыми источниками энергии, такими как ветер и солнце. Это приводит к нестабильности частоты, поэтому требуется использование инверторов с алгоритмами управления виртуальной инерцией (ВИ) для поддержания стабильности системы. Спрос на экологически чистую энергию постоянно растет из-за цен на топливо и законодательства. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) начинают доминировать в производстве электроэнергии, вытесняя традиционные источники, такие как уголь и атомная энергетика. Распределенные фотоэлектрические станции также становятся все более популярными. Отчеты показывают, что стабильность частоты вызывает озабоченность из-за отсутствия инерционной реакции ВИЭ. Это приводит к увеличению нарушений частоты, коррелирующих с ростом использования ВИЭ. Как результат, инерционный отклик ветротурбин становится обязательным во многих странах, а эта тенденция распространяется и на фотоэлектрические станции.

В энергосистеме применяются различные методы управления в течение различных временных интервалов. Основное управляющее воздействие происходит на протяжении 10–30 с, которое используется для уменьшения отклонения частоты. После этого, происходит управляющее воздействие, которое восстанавливает частоту до исходного значения.

Необходимость виртуальной инерции заключается в том, что при дисбалансе между потребляемой и генерируемой энергии, система не может сбалансироваться мгновенно. Из-за неспособности мгновенной реакции на изменение в системе, увеличивается скорость изменения частоты, тем самым низкая частота достигается в очень короткое время. Поэтому первичное регулирование частоты не всегда успевает среагировать за короткий промежуток времени (обычно менее 10 с), чтобы остановить изменение частоты системы.

В случае дисбаланса между производством и потреблением электроэнергии возможно срабатывание частотных реле, что может привести к низкочастотному отключению нагрузки и даже к каскадному отключению. Для предотвращения подобных ситуаций в систему можно добавить виртуальную инерцию, которая будет работать автономно в течение очень короткого времени (менее 10 с) и повысит устойчивость системы, позволяя более эффективно использовать возобновляемые источники энергии.

При подключении к сети частота регулируется основной сетью, и отклонения частоты невелики. Однако с ростом интеграции крупномасштабной безынерционной генерации сценарий постепенно меняется. IEEE рекомендует работать с частотой $\pm 0,006\%$ для систем, которые подключены к сети. NERC рекомендует запускать первый уровень защиты при снижении частоты системы ниже $1,2\%$. Активация защиты является последней автоматизированной мерой обеспечения надежности для противодействия снижению частоты и восстановления баланса системы. Рекомендуемые NERC управляющие воздействия отключают генераторы при снижении частоты ниже 5% или повышении выше 3% .

Существует несколько топологий для создания виртуальной инерции, рассмотрим самые популярные из них.

Синхронный преобразователь (СП)

После возмущения уравнение частоты может быть аппроксимировано, как показано в уравнении (1):

$$P_{\text{ген}} - P_{\text{п}} = J \cdot \omega \cdot \frac{d(\omega)}{d(t)} \quad (1)$$

где $P_{\text{ген}}$ – генерируемая мощность, $P_{\text{п}}$ – потребляемая мощность, J – момент инерции, ω – частота.

Данное уравнение преобразуется и решается системой, для регуляции частоты. В результате снимаются такие показания как, выходной ток инвертора и напряжение, а задаются такие параметры как, момент инерции и коэффициент демпфирования. С помощью данных параметров формируется виртуальная частота синхронизации, которая в последующем используется для широтно-импульсной модуляции. Результирующее уравнение образует контур с фазовой автоподстройкой. Но использование данного контура в небольших сетях является нецелесообразным. Также, результирующее уравнение не требует производную по частоте, что значительно облегчает обработку уравнения, т. к. сложность данных уравнений может привести к неустойчивости системы. Таким образом, данная модель воспроизводит динамику синхронного генератора для регулирования частоты и реализация виртуальной инерции.

Топология Ise lab

Топология Ise lab, похожа на топологию синхронного преобразователя, но вместо того, чтобы использовать модель синхронного генератора, данная топология решает уравнение колебаний частоты каждый раз, таким образом регулируя частоту. Как и в случае с синхронным преобразователем снимаются такие показания как, выходной ток инвертора и напряжение, и рассчитывается частота и активная мощность инвертора. В результате чего, решается уравнение, и формируется фазовая команда θ . Опять же, для решения уравнения не требуется производная от частоты.

Виртуальный синхронный генератор (ВСГ)

Основная идея виртуальных синхронных генераторов заключается в способности реагировать на изменение частоты. По сравнению с традиционными регуляторами, обеспечивающими только регулирование частоты, подход ВСГ позволяет осуществлять динамическое управление частотой.

Это динамическое управление основано на производной от измерения частоты. Несмотря на сложность данной топологии из-за использования производной по частоте, эта топология используется европейской исследовательской группой VSYNC, которая продемонстрировала эффективность эмуляции инерции с помощью топологии VSG с помощью моделирования в реальном времени и нескольких экспериментов. [2]

Сравнение топологий

Проведём сравнение топологий синхронного генератора, Ise Lab и виртуального синхронного генератора. Для этого в работе [1] смоделировали ступенчатое увеличение нагрузки на 2 кВт. Результаты моделирования представлены на рис. 1.

Результаты моделирования представлены в табл. 1. Для сравнения представлены такие параметры, как максимальная просадка частоты, максимальное увеличение скорости изменения частоты, пиковая мощность. В эксперименте считалось, что частота вернулась в нормальный диапазон в пределах изменения 0,25 Гц от конечного значения эксперимента до увеличения нагрузки. Из результатов в таблице, можно увидеть, что пиковая мощность различалась незначительно, самая высокая была у ВСГ. Необходимо заметить, что при исполь-

зовании виртуальной инерции время установления увеличивается в 1,1–1,6 раз. Это происходит из-за того, что добавление виртуальной инерции замедляет динамику частоты. Тем не менее, стандарт для генераторных установок рекомендует время установления 10 с, а в данный стандарт ни одна топология не укладывается.

Таблица 1. Сравнение производительности систем без виртуальной инерции (ВИ) и с ВИ, реализованной с помощью топологий синхронного преобразователя, Ise lab и ВСГ

Параметр	Без ВИ	Синхронный преобразователь	Ise lab	ВСГ
Минимальная частота, Гц	57,3	58,1	58,6	58,3
Максимальная скорость изменения частоты, Гц/с	1,9	1,5	1,6	1,7
Время установления процесса, с	11,3	13,2	17,7	17,9
Пиковое значение мощности, Вт	0	1825	1800	1929

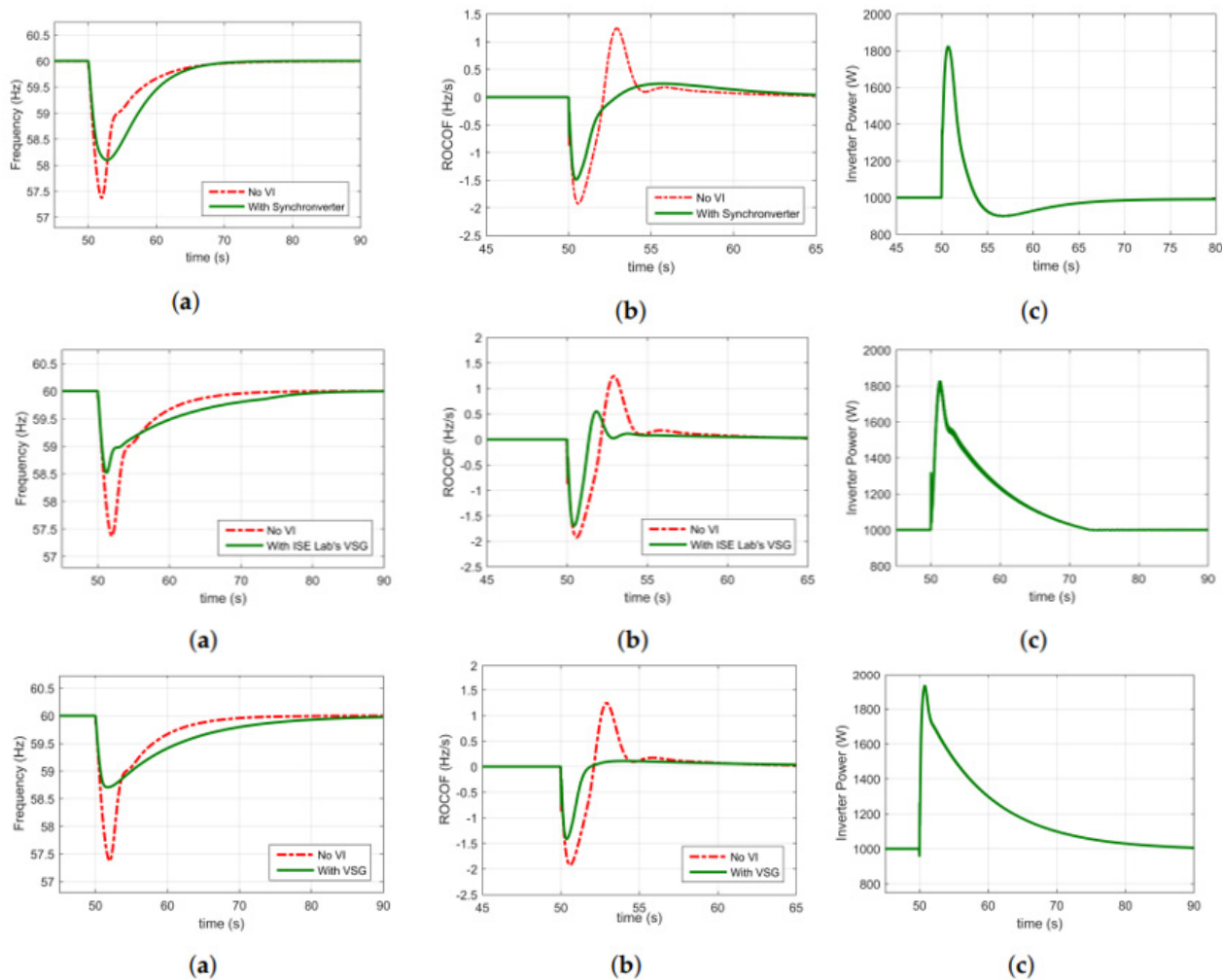


Рис. 1. Результаты моделирования работы синхронного преобразователя – 1 строка, Ise Lab – 2 строка, виртуальный синхронный генератор – 3-ья строка, (а) частота системы после ступенчатого увеличения нагрузки на 2 кВт; (б) увеличение скорости изменения частоты после ступенчатого увеличения нагрузки на 2 кВт; (в) увеличение мощности преобразователя в ответ на увеличение мощности системы

Выбор конкретной топологии зависит от области применения и желаемого уровня воспроизведения динамики СГ. Такие топологии, как СП и топология лаборатории Ise могут быть более подходящими для изолированных энергосистем, так как они могут работать автономно как устройства, образующие сеть. Топология VSG с другой стороны, по своему по-

ведению больше похожа на устройство слежения за сетью с дополнительными возможностями инерционного реагирования и больше подходит для взаимосвязанных операций, т. к. реагирует на изменение частоты.

В настоящее время, данные топологии стараются активно усовершенствовать. Так для топологии СП было предложено увеличение индуктивности фильтра СП и вспомогательный контур вокруг частотного контура, что повысит его скорость реакции на возмущение. Для топологии Ise Lab предложен подход, который основан на эмуляции переменного момента инерции, что уменьшит колебания мощности. Для уменьшения колебаний мощности также предложен приём с регулированием «виртуального реактивного сопротивления статора». Для ВСГ была разработана самонастраивающаяся система, использующая метод онлайн-оптимизации для настройки параметров алгоритма управления ВСГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tamrakar U. Et al. Current Trends and Future Directions // Applied sciences. – 2017. – № 4. – P. 1–29.
2. Саттаров Р.Р., Гарафутдинов Р.Р. Технология виртуального синхронного генератора для повышения устойчивости энергосистем. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2021. – С. 373–378.

СИНХРОНИЗАЦИЯ MICROGRID С ВНЕШНЕЙ ИЗОЛИРОВАННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

Т.А. Киргизалиев

*Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А03*

Микросеть представляет собой небольшую локализованную систему электроснабжения, которая может работать независимо от центральной электросети или быть интегрированной с ней. Времена, когда энергетическая система была представлена только большими централизованными электростанциями, уходят в прошлое. Сегодня микросети становятся все более распространенными, и именно поэтому вопрос об их синхронизации с внешней системой является столь актуальным. В наше время в качестве объединяющего элемента внешней сети с микросетью применяются реклоузеры, множество из которых не имеют функцию синхронизации, необходимой для работы в сетях с генерацией. Так как реклоузеры устанавливаются на участках сети, расположенных далеко от генераторов, синхронизацию необходимо выполнять на самих реклоузерах, а не на генераторных выключателях. В связи с этим, требуется совершенствовать функциональные возможности реклоузеров, например, с помощью блока синхронизации, который, как следует из вышесказанного, целесообразно установить в шкаф управления реклоузера, тем самым сделав реклоузер компонентом интеллектуальной сети.

При синхронизации микросети с большой внешней сетью очень часто возникают трудности, связанные с невыполнением условий синхронизации, главной причиной которых является частое изменение мощности нагрузок в microgrid. Данная причина является важной для учёта, потому что во время объединения внешней сети с microgrid нагрузка в микросети может измениться в момент подачи сигнала на включение объединяющего выключателя, что окажет влияние на несоответствие условий синхронизации еще до того момента, как объединяющий выключатель полностью включится, тем самым приводя к сдвигу угла фаз между векторами напряжений микросети и внешней сети. Так как угол сдвига фаз будет намного