

ОБЗОР АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕРТОРОМ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ  
ВИРТУАЛЬНОГО синхронного генератора

Белокуров Д.В., Руденок В.А.

Научный руководитель доцент А.А. Суворов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

**Введение.** Современные тенденции ведут к увеличению числа внедряемых альтернативных и возобновляемых источников энергии постоянного тока, включаемых на параллельную работу с основным источником питания, представляющий из себя синхронный генератор (СГ) или мощную сеть переменного тока, через полупроводниковый автономный инвертор. Для обеспечения условий их синхронизации и дальнейшей длительной устойчивой совместной работы был разработан метод виртуального СГ (ВСГ), позволяющий инвертору имитировать статические и динамические свойства реального СГ. В данной статье будут рассмотрены различные алгоритмы управления инвертором на основе концепции виртуального синхронного генератора.

**Виртуальный синхронный генератор.** Подключенные к сети инверторы, имитирующие установившиеся и переходные характеристики синхронных генераторов, называются виртуальными синхронными генераторами (ВСГ) [6]. ВСГ представляет собой комбинацию алгоритмов, управления возобновляемых источников энергии, систем её накопления и силовой электроники, которая имитирует инерцию традиционной энергосистемы. Согласно литературе, концепции первичной модели одинаковы для разных топологий, однако реализация каждой из них отличается. Некоторые используют математические уравнения для полной имитации поведения синхронного генератора (СГ), в то время как другие используют уравнение колебаний для копирования неравномерной работы СГ, а в прочих блоки распределённой генерации реагируют на изменения частоты системы инженерной сети.

**Варианты алгоритмов.** Существует множество вариаций различных алгоритмов управления инвертором. Обратимся к базовой структуре ВСГ, показанной на рисунке. На нём, через блок измерения мощности данные поступают в блок управления ВСГ, где формируются электродвижущая сила (ЭДС) и фазовый угол ВСГ. Они в свою очередь отправляются на широтно-импульсную модуляцию (ШИМ), откуда сигналы, поступают на инвертор, который выдаёт переменное напряжение.

Мощность генератора и системы накопления энергии предполагается как входной крутящий момент двигателя, а инвертор предполагается как электромеханический преобразователь энергии между статором и ротором [2]. Затем основная составляющая напряжения в средней точке представляет собой электродвижущую силу ВСГ. Сопротивление и индуктивность блока фильтра, представляющие импеданс обмотки статора.

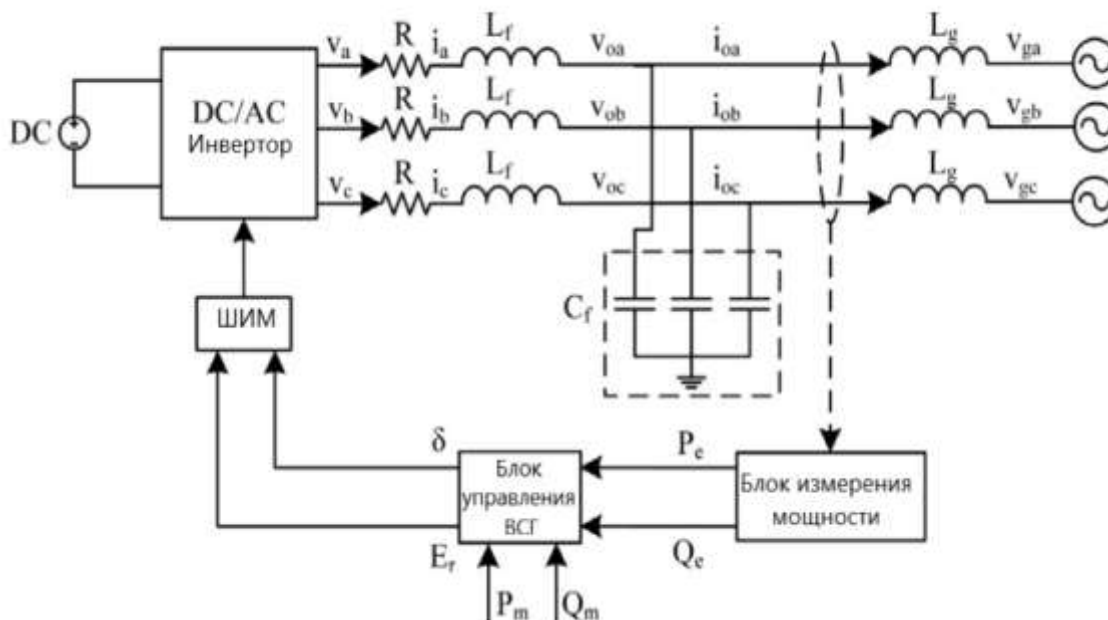


Рис. Базовая структура ВСГ

Иными словами, ВСГ имитирует электромагнитную связь и механическое движение синхронного генератора, в то время как алгоритм управления в основном использует регулирование частоты и напряжения для реализации управления активной и реактивной мощностью.

Если сгруппировать алгоритмы управления инвертором на основе ВСГ, то модели можно разделить в зависимости от потребности в дополнительном компоненте, таком как аккумуляция энергии [8]. Существующие алгоритмы ВСГ делятся на низший и высший порядок. Например, к высшему можно отнести ВСГ основанные на модели СГ 5-ого и 7-ого порядка, а к низшему ВСГ на модели 2-ого. Помимо этого, независимо от предыдущего

классификатора подобные алгоритмы можно также делить на те, где требуется и не требуется внешний накопитель энергии. Как итог это влияет на стоимость внедрения алгоритма.

Стратегии управления ВСГ более высокого или более низкого порядка могут быть разработаны путем незначительной модификации структуры управления. На данный момент, существуют различные вариации управления ВСГ, позволяющие электронному преобразователю имитировать характеристики СГ.

Обычными методами управления являются управление активной и реактивной мощностью, управление напряжением и частотой. Зачастую, применение стратегии управления в системе зависит от режима работы энергосистемы.

Следовательно, инвертор и ВСГ в чем-то похожи. Единственное отличие состоит в том, что ВСГ имитирует характеристики СГ посредством алгоритма управления. Алгоритм управления ВСГ можно разделить на две большие категории, которые описаны ниже.

#### **Регуляторы активной и реактивной мощности.**

В большинстве методов управления используется метод управления активной и реактивной мощностью из-за его простоты. [3]. Благодаря ему мы можем получить выходную мощность распределенных генераторов постоянной и плавной. Управление активной мощностью ВСГ является копией блока регулятора СГ. Её распределение можно реализовать в соответствии с пропускной способностью.

Другое дело регулирование реактивной мощности, на которое легко воздействуют импеданс линии, колебания нагрузки и другие факторы, что приводит к отклонению результата регулирования от требуемых характеристик и, в конечном итоге, к неточности распределения реактивной мощности. В [4] говорится, что традиционный метод развязки мощности не подходит для среднего и низкого напряжения. В связи с чем, предлагается усовершенствованный метод развязки мощности, который оценивает напряжение в точке общей связи и отслеживая их опорные значения, выходную активную и реактивную мощности инверторов, может выполнять динамическую развязку. Кроме того, в этом исследовании анализируется устойчивость новой структуры управления и выбор соответствующих коэффициентов.

#### **Управление напряжением и частотой.**

Блок управления напряжением ВСГ достигает амплитуды напряжения, имитируя функцию регулятора возбуждения СГ. Как правило, управление напряжением регулирует выходное напряжение в соответствии с отклонением амплитуды выходного напряжения ВСГ и использует коэффициент регулировки напряжения для регулировки напряжения ВСГ [1].

Для достижения постоянного выходного напряжения ВСГ, [2] предлагает метод параллельного подключения нескольких ВСГ. Параллельно подключенные они генерируют сигнал ошибки при несоответствии активной и реактивной мощности требуемой мощности. Этот сигнал ошибки используется для достижения постоянного выходного напряжения ВСГ.

Из вариаций также стоит отметить, что [5] предложил схему адаптивного сброса нагрузки для стабилизации энергосистемы на базе ВСГ. Эта предложенная схема локально измеряет параметры системы, особенно сигналы напряжения и частоты. После этого будет происходить ступенчатый сброс нагрузки в местах с наибольшим падением напряжения и колебаниями частоты. Следовательно, шаг сброса нагрузки изменяется в зависимости от определенных факторов, таких как скорость сброса, местоположение и величина, а также скорость изменения частоты. Предлагаемый подход исключает регулируемые нагрузки для возврата частоты обратно к требуемому значению.

#### **Заключение.**

Таким образом, осознавая, что ВСГ в некоторой степени решает проблему низкой инерции, ведутся разработки различных алгоритмов управления инвертором на его основе. Стоит отметить, что их разработка обеспечивает удобное и экономичное решение по использованию возобновляемых источников энергии и расширяет перспективы их применения.

#### **Литература**

1. Alipoor J., Miura Y., Ise T. Stability assessment and optimization methods for microgrid with multiple VSG units // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2016. – Т. 9. – №. 2. – С. 1462-1471.
2. Chang Y. H. Design and analysis of pulse-width modulation-based two-stage current-mode multi-phase voltage doubler // *IET circuits, devices & systems*. – 2010. – Т. 4. – №. 4. – С. 269-281.
3. Hirase Y. et al. A novel control approach for virtual synchronous generators to suppress frequency and voltage fluctuations in microgrids // *Applied Energy*. – 2018. – Т. 210. – С. 699-710.
4. Li B. et al. Improved power decoupling control strategy based on virtual synchronous generator // *IET Power Electronics*. – 2017. – Т. 10. – №. 4. – С. 462-470.
5. Marzband M. et al. Adaptive load shedding scheme for frequency stability enhancement in microgrids // *Electric Power Systems Research*. – 2016. – Т. 140. – С. 78-86.
6. Tamrakar U. et al. Improving transient stability of photovoltaic-hydro microgrids using virtual synchronous machines // *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*. – IEEE, 2015. – С. 1-6.
7. Zhang C. H. et al. An improved synchronverter model and its dynamic behaviour comparison with synchronous generator. – 2013.
8. Zhong Q. C., Weiss G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators // *IEEE transactions on industrial electronics*. – 2010. – Т. 58. – №. 4. – С. 1259-1267/