

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ СИЛОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Гусаров И.Н.,

Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, 5АМ31, ing8@tpu.ru

Введение

Одним из векторов развития современной электроэнергетики является увеличение доли “зеленой” энергии, вырабатываемой возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ). Одной из особенностей ВИЭ является их подключение к электрической сети через силовые преобразователи [1]. Однако увеличение доли ВИЭ приводит к изменению как динамических характеристик сети, так и ее режимных процессов. В частности, использование силовых преобразователей уменьшает общий инерционный отклик сети, изменяет вклад в формирование токов короткого замыкания от объектов генерации и ухудшает условия для нормальной работы устройств релейной защиты и автоматики [2]. Одним из предлагаемых технических решений является использование алгоритмов управления силовыми преобразователями, основываясь на поведении синхронного генератора. Данный метод подразумевает создание концепции виртуального синхронного генератора (ВСГ) в рамках алгоритма системы автоматического управления (САУ).

Основная часть

Данный раздел посвящен описанию различных решений по реализации ВСГ.

Концепция использования алгоритма ВСГ в САУ для силовых преобразователей подразумевает под собой использование особенностей поведения синхронной машины при управлении инвертором. На рис. 1 приведена обобщенная аппаратно-структурная схема, отражающая подключение силового преобразователя к электрической сети с учетом управления на основе ВСГ.

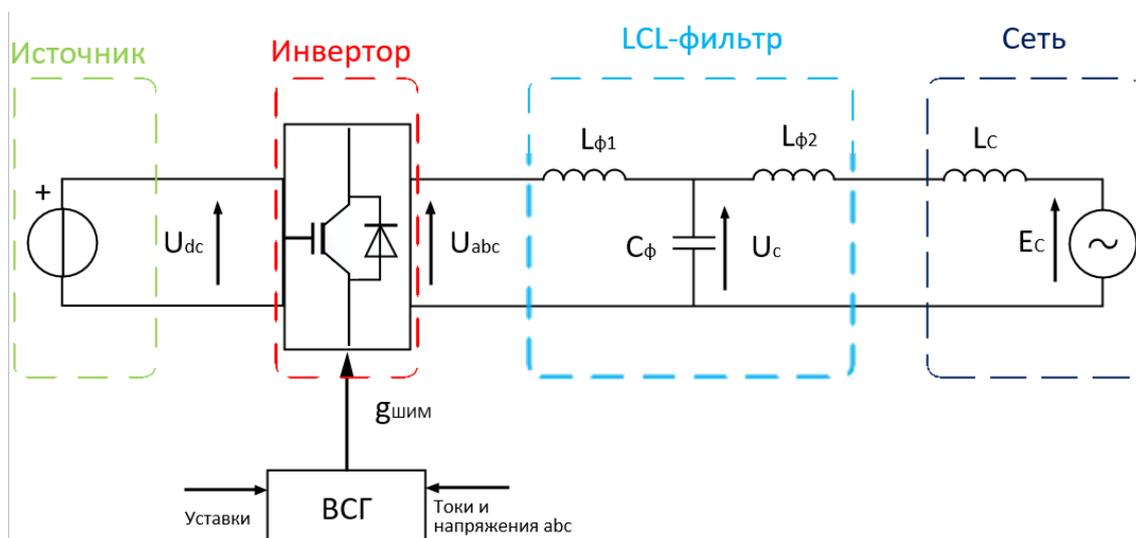


Рис. 4. Аппаратно-структурная схема силового преобразователя с алгоритмом ВСГ

Как видно из рис. 1, схема состоит из источника напряжения, инвертора, выходного LCL-фильтра и блока ВСГ. В роли источника энергии в цепи постоянного тока рассматривается идеальный источник постоянного напряжения, в реальности же это могут быть объекты ВИЭ с накопителями энергии. Данный источник питает трехфазный инвертор, подключенный к сети через LCL-фильтр. Такой фильтр является одним из наиболее распространенных решений для подключения силовых преобразователей к электрической сети [3]. Блок ВСГ включает в себя все алгоритмы управления силовыми ключами, моделирующие поведение синхронного генератора и необходимые для синхронизации инвертора и электрической сети.

Чтобы подробнее рассмотреть типовой алгоритм функционирования САУ силовыми преобразователями на основе концепции ВСГ необходимо рассмотреть следующую схему, представленную на рис. 2 [4].

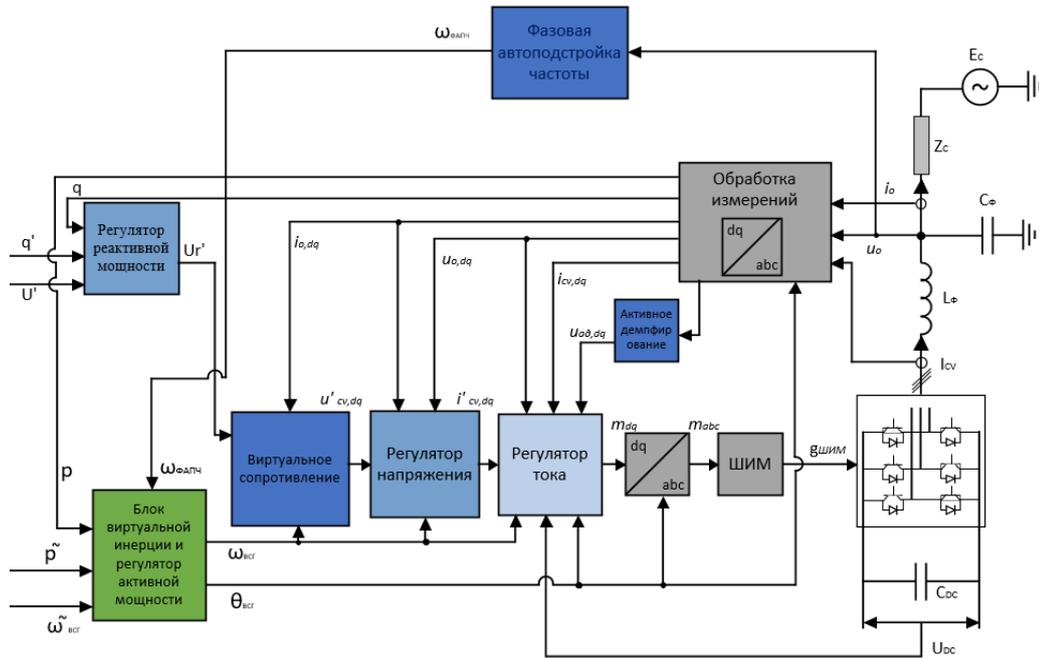


Рис.5. Структурная схема САУ силового преобразователя на основе концепции ВСГ

Общая концепция схемы управления заключается в том, что из электрической сети берутся параметры тока, напряжения, мощности и частоты, после они проходят через ряд математических преобразований и на выходе САУ выдается управляющее воздействие на открытие ключей силового преобразователя, что позволяет имитировать динамику синхронной машины. Далее представляется краткое описание работы каждого блока.

Блок виртуальной инерции и регулятора активной мощности строится на основе уравнения движения ротора:

$$P_{уст} - P_{эл} - k_d \cdot (\omega_{ВСГ} - \omega_{ФАПЧ}) - k_\omega \cdot (\omega_{ВСГ} - \omega_{ном}) = T_J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

где $P_{уст}$ – уставка по активной мощности ВСГ, $P_{эл}$ – электромагнитная мощность на выходе инвертора, T_J – постоянная инерции ВСГ, $d\omega$ – изменение угловой скорости, k_ω – коэффициент статизма по частоте, k_d – коэффициент демпфирования, $\omega_{ВСГ}$ – фактическая частота ВСГ, $\omega_{ФАПЧ}$ – частота, получаемая от блока фазовой автоподстройки (ФАПЧ), $\omega_{ном}$ – номинальная частота. Таким образом данный блок вычисляет разницу между уставкой мощности и измеренной мощностью, а дальше полученное значение делится на постоянную инерцию ВСГ и проходит через интеграторы, выдавая значения изменения угловой скорости и фазового угла [5]. Также в данном блоке происходит моделирование эффекта демпфирования реальной синхронной машины, за счет наличие коэффициента демпфирования в обратной связи.

Другой блок – блок регулятора реактивной мощности – используется для внутренних контуров регулятора напряжения и тока. В данном блоке сравнивается реактивная мощность уставки и выдаваемая реактивная мощность, после чего, полученная разница прибавляется к значению измеренного напряжения и выдается управляющее напряжение.

Задача блока фазовой автоподстройки частоты заключается в отслеживании текущей частоты напряжения сети для блока виртуальной инерции и регулятора активной мощности. Данный блок принимает на вход трехфазное напряжение сети, преобразует их в d-q составляющие и с помощью функции обратного тангенса $atan2$ [6] определяется угол между векторами U_q и U_d . Дальше значения, проходя через ПИ-регулятор, преобразуются в значения фазового угла напряжения и частоты сети.

Блок регулятора напряжения необходим для формирования опорных значений токов с учетом виртуальных сопротивлений ВСГ. Виртуальное сопротивление может рассматриваться, как сопротивление традиционного синхронного генератора. В данном блоке предусматривается ограничение выдаваемых токов в результате, например, значительного снижения напряжения или внутренних ошибок в работе алгоритма.

Далее опорные значения токов подаются в блок регулятора тока, с помощью которого формируется управляющее воздействие для открытия ключей силового преобразователя.

Дальнейшие исследования в этой области так или иначе связаны с базовой структурой построения ВСГ и поведением реального СГ, однако применяются другие различные подходы к формированию управляющих воздействий. Например, предложенный в [7] “synchronoverter” подразумевает самосинхронизацию ВСГ подобно синхронной машине без использования блока фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Данное улучшение связано с тем, что для нормальной работы установок с другими алгоритмами ВСГ в электрической сети может быть необходимо наличие традиционной синхронной генерации. Алгоритм самосинхронизации позволяет избежать этого, а также решает другие проблемы, связанные с блоком ФАПЧ. Исследования в области самосинхронизации ВСГ проводились и в рамках других работ [8, 9].

Другой подход к реализации алгоритма ВСГ заключался в детальном описании электромеханических и электромагнитных уравнений традиционного синхронного генератора [10, 11]. При этом при работе алгоритма ВСГ параметры настройки контуров управления не привязываются к конкретной реализации синхронной машины, а могут быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить необходимый динамический отклик генерирующей установки. Однако такой подход может оказаться излишне детальным, что усложнит подходы к настройке ВСГ и приведет к ухудшению отклика алгоритмов ВСГ на различные возмущения в сети.

Заключение

Развитие технологий ВСГ представляет собой возможность более глубокого внедрения возобновляемой энергетики в мире, а также полноценный переход к распределенной энергетике. На сегодняшний день существует множество подходов к выстраиванию алгоритмов управления ВСГ в составе системы автоматического управления силовыми преобразователями.

В данной работе описаны лишь некоторые основные подходы к реализации ВСГ. Исходя из анализа различных источников [12,13], можно сделать вывод, что перспективой развития ВСГ может являться технология гибкой подстройки параметров алгоритмов ВСГ при различных режимах работы генерирующих установок или возмущениях в электрической сети. Такие технологии позволят не привязываться к параметрам конкретной синхронной машины, а подстраиваться под любые крупные или мелкие системные возмущения, используя паттерны поведения синхронных машин. Подобные свойства могут достигаться, например, с применением технологий искусственного интеллекта [14].

Список использованных источников

1. Фролов М.Ю., Фишов А.Г., Энхсайхан Э. Совместимость динамических характеристик традиционной и электронной генерации в электроэнергетических системах // Вестник Иркутск. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 23, № 6 (149). – С. 1175–1186. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-6-1175-1186 .
2. Оценка влияния ветроэлектростанций на изменение суммарной инерции электроэнергетической системы / И.А. Разживин, Н.Ю. Рубан, В.Е. Рудник, А.С. Гусев // Вестник Иркутск. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 25, № 2 (157). – С. 220–234. – DOI: 10.21285/1814-3520-2021-2-220-234.
3. Kundur P. Power system stability //Power system stability and control. – 2007. – Vol. 10. – P. 7–1.
4. S. D’Arco, J.A. Suul, O.B. Fosso, A virtual synchronous machine implementation for distributed control of power converters in SmartGrids, Electr. Power Syst.Res. 122 (2015) 180–197.
5. К ВОПРОСУ О СОВРЕМЕННЫХ ПРИНЦИПАХ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА. Аскарлов А.Б., Суворов А.А., Андреев М.В., Гусев А.С. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2022. № 41. С. 5-30.
6. Zunaib Ali, Nicholas Christofides, Lenos Hadjidemetriou, Elias Kyriakides, Yongheng Yang, Frede Blaabjerg, Three-phase phase-locked loop synchronization algorithms for grid-connected renewable energy systems: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – P. 434–452.
7. Zhong Q. C., Weiss G. Static synchronous generators for distributed generation and renewable energy // 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. – 2009. – P. 1–6.
8. Zhong, Qing-Chang, and George Weiss. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators.// IEEE transactions on industrial electronics, – 2010. – Vol. 58 (4) – P. 1259–1267.
9. Vasudevan K. R. et al. Synchronverter: A comprehensive review of modifications, stability assessment, applications and future perspectives // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 131565–131589.
10. Mallema V. et al. A comprehensive comparison of Virtual Synchronous Generators with focus on virtual inertia and frequency regulation //Electric Power Systems Research. – 2021. – Vol. 201. – P. 107516.
11. Wang X., Yue M., Muljadi E. PV generation enhancement with a virtual inertia emulator to provide inertial response to the grid // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2014. – P. 17–23. – DOI: 10.1109/ECCE.2014.6953370.

12. Shadoul, M.; Ahshan, R.; AlAbri, R.S.; Al-Badi, A.; Albadi, M.; Jamil, M. A Comprehensive Review on a Virtual-Synchronous Generator: Topologies, Control Orders and Techniques, Energy Storages, and Applications // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – P. 8406.

13. Суворов А.А., Аскарлов А.Б., Рудник В.Е., Андреев М.В., Бай Ю.Д. Синтез и тестирование типовых структур систем автоматического управления на основе виртуального синхронного генератора для генерирующих установок с силовым преобразователем // *Электрические станции*. – 2022. – № 3 (1088). – С. 43–57.

14. Xu Q., Dragicevic T., Xie L. and Blaabjerg F. Artificial Intelligence-Based Control Design for Reliable Virtual Synchronous Generators // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2021. – Vol. 36, no. 8. – P. 9453–9464. – DOI: 10.1109/TPEL.2021.3050197.