

ОЦЕНКА ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ И ДЕТАЛЬНОЙ МОДЕЛЕЙ ВИРТУАЛЬНОГО синхронного генератора

Малюта Б.Д.

Научный руководитель доцент А.А. Суворов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Введение. На данный момент одним из ведущих направлений развития электроэнергетики является интеграция в современные энергосистемы (ЭС) возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Процент от общей генерации, приходящийся на мощности, источниками первичной энергии которых являются ВИЭ, растёт в крупнейших мировых ЭС – об этом свидетельствуют данные, собранные Международным Агентством по Возобновляемой Энергии (IRENA) за период с 2012 по 2021 гг [1]. Данная тенденция, однако, приводит к возникновению существенных проблем с устойчивостью ЭС, обусловленных тем, что ВИЭ-генерация не вносит вклада в общую инерцию энергосистемы, т.к. такие мощности не обладают либо непосредственной электрической связью с ЭС, либо запасами кинетической энергии, необходимыми для обеспечения инерции [2].

Последнее, впрочем, малозначимо для современных ЭС, т.к. на данный момент ВИЭ интегрируются в ЭС через силовые преобразователи (СП) – инверторы – управляемые через специальные алгоритмы. Однако, наиболее распространённым на данный момент является управление СП по принципу ведомости сетью – СП через контур фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) определяет частоту напряжения в сети и подстраивает под неё выходную мощность. При этом отсутствует возможность управления частотой и амплитудой выходного напряжения и, как следствие возможность вклада в общую инерцию. В качестве одного из решений проблем данного метода управления была предложена концепция Виртуального Синхронного Генератора (ВСГ), основанная на принципе имитации СП поведения реальной синхронной машины (СМ), а точнее основных её особенностей: инерционности, статизма по напряжению и частоте.

Для формирования выходных сигналов система управления СП должна в реальном времени решать систему уравнений, описывающую поведение реальной СМ. Таким образом, скорость и точность решения имеют решающее значение. Однако, при решении полной системы дифференциальных уравнений СМ обеспечить их довольно трудно, ввиду наличия нелинейностей и общей громоздкости данной системы. Решением проблемы может послужить линеаризация полной модели ВСГ в окрестностях выбранной рабочей точки. Данная работа посвящена оценке эквивалентности полной и линеаризованной моделей ВСГ на основании сравнения их отклика на одни и те же возмущения.

Описание исследуемой модели.

В рамках данной работы рассматривается модель ВСГ, управляемого по напряжению (ВСГ-Н), Схема, описывающая устройство данной модели, приведена на рисунке 1 [3].

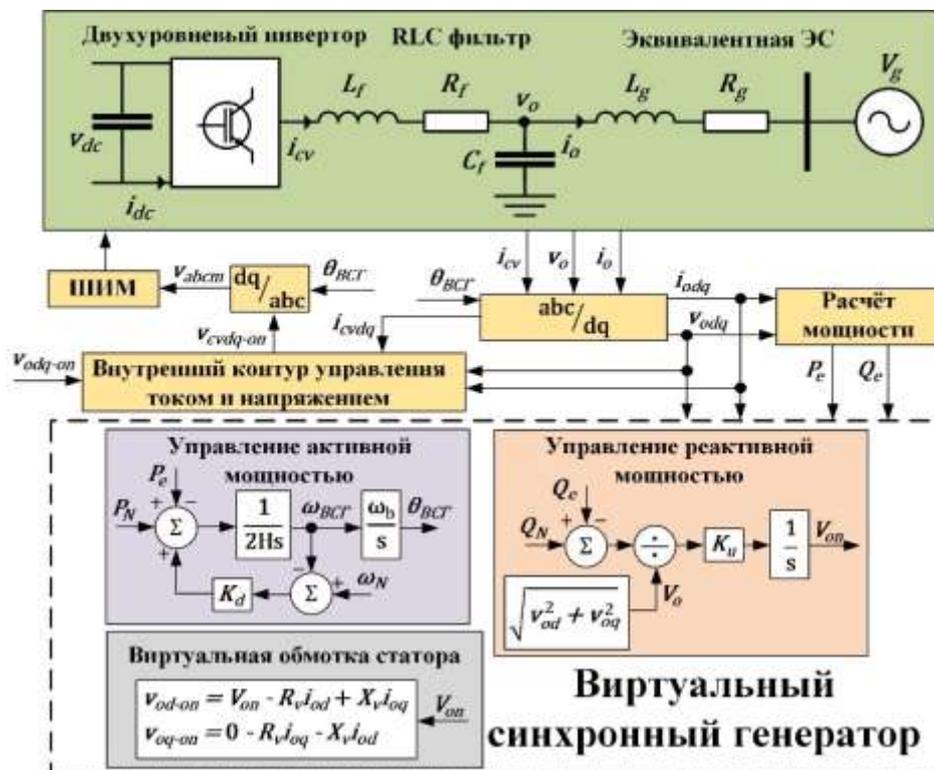


Рис. 1. Схема, описывающая устройство исследуемой модели ВСГ-Н

В данной модели все ВИЭ-генераторы эквивалентированы до одного выпрямленного напряжения, подаваемого на вход эквивалентного инвертора через конденсатор, имитирующий инерционность ротора генератора при его пуске/остановке. Данный инвертор через фильтр соединён с энергосистемой, эквивалентированной по теореме Тевенена. Входными сигналами СП являются выходной ток инвертора, выходные ток и напряжение фильтра.

В системе управления СП происходят следующие процессы. Входные сигналы поступают в блок преобразования Парка-Горева, где из трёхфазной системы координат преобразуются в двухфазную синхронную, после чего выходные ток и напряжение поступают на вход одновременно трёх блоков: блока расчёта мощности (рассчитывает мгновенные значения активной и реактивной мощностей, поступающих на вход блока ВСГ), блока управления током и напряжением (рассчитывает величину необходимого напряжения на выходе преобразователя в dq-координатах на основании входных величин системы управления СП и выходных напряжений ВСГ) и блока ВСГ (осуществляет расчёт фазового угла $\theta_{\text{ВСГ}}$ на основании уравнения движения и статизма по частоте, расчёт величины начального напряжения обмотки статора генератора по оси d V_{od-on} на основании статизма по напряжению, расчёт мгновенных напряжений обмотки статора V_{od-on} и V_{oq-on} на основании уравнений, рассчитывающих процессы в обмотке статора реального генератора). Выходной сигнал блока управления током и напряжением подаётся на вход блока обратного преобразования Парка-Горева из dq-координат в abc-координаты, после чего выходное трёхфазное напряжение подаётся в качестве управляющего воздействия в блок широтно-импульсной модуляции, осуществляющего управление выходным напряжением инвертора.

Сравнение откликов линеаризованной и полной моделей.

Моделирование откликов осуществлялось в программных комплексах Matlab\Simulink (линеаризованная модель) и PSCAD™/EMTDC™ (полная модель). В качестве тестовых возмущений было осуществлено изменение уставок по активной и реактивной мощностям от 0 до 0.2 о.е. В качестве выходных переменных были выбраны выходная активная мощность СП в о.е. и изменение его частоты в о.е. Результаты приведены на рисунке 2.

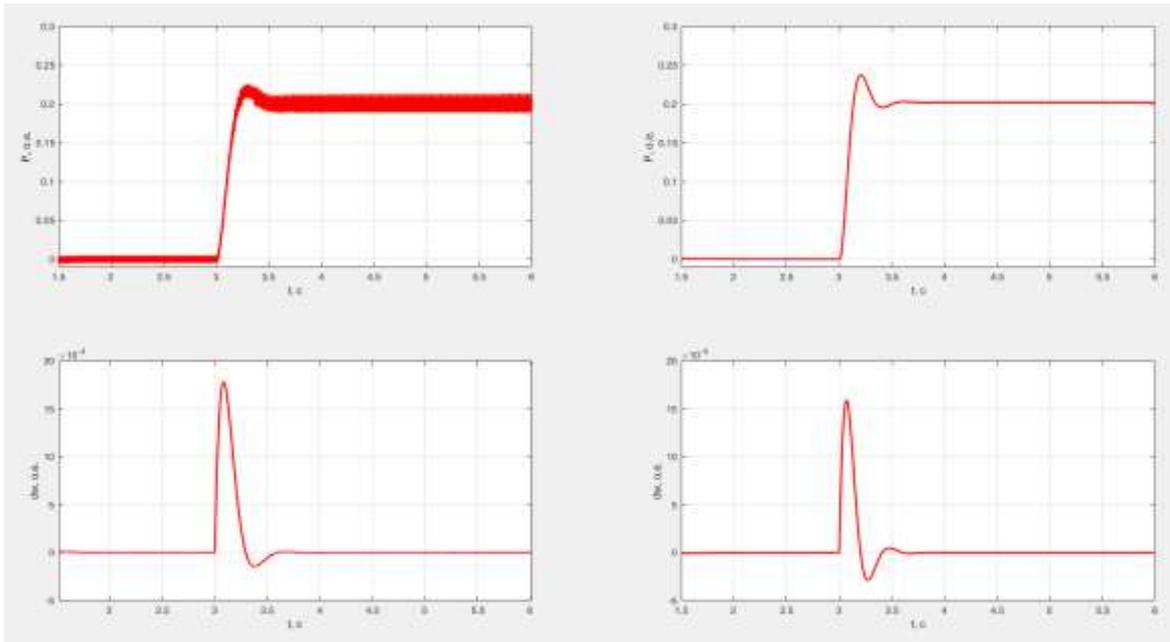


Рис. 2. Результаты моделирования откликов линеаризованной и полной моделей ВСГ-Н

Полученные в процессе моделирования результаты обладают крайне высокой степенью схожести, что позволяет сделать вывод о достаточной их эквивалентности.

Литература

1. IRENA (2022), Renewable Energy Statistics 2022, The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
2. Tielens P. The relevance of inertia in power systems [Text] / P. Tielens, D.Van Hertem // Renewable and Sustainable Energy Reviews 55. – 2016. – P. 999 – 1009. DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.016
3. Suvorov A. Comparative small-signal stability analysis of voltage-controlled and enhanced current controlled virtual synchronous generators under weak and stiff grid conditions [Text] / A. Suvorov, A. Askarov, Y. Bay, B. Maliuta, A. Achitayev, K. Suslov // Electrical Power and Energy Systems 147. – 2023. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108891