

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СЕТЕВОГО ИНВЕРТОРА В РЕЖИМЕ «ВЕДУЩИЙ» В ОДНОМАШИННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Б.Д. Малюта

Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа АЗ-42

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

Введение

В современных энергосистемах (ЭС) все большую роль играют силовые преобразователи (СП). Они активно используются в составе устройств FACTS, в различных нагрузках и в генерации: так, значительное число генерирующих электроустановок на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – к таковым относятся солнечные панели и ветроустановки 4-го типа – подключаются к энергосистемам посредством СП – инверторов. Для управления такими преобразователями, как правило, используется подход, согласно которому инвертор является «ведомым» по отношению к сети [1]. Таким образом, инвертор «подстраивается» под частоту сети, а скорость изменения частоты и амплитуды выходного тока/напряжения зависит только от инерционности силовых ключей и регуляторов. Следствием этого является существенное снижение общей инерции энергосистемы, что, с учетом невозможности регулирования частоты и амплитуды напряжения в таких инверторах, а также особенностей контуров фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [1], приводит к значительному ухудшению динамических свойств ЭС.

Для решения вышеуказанных проблем была предложена иная структура управления СП. Согласно ей, инвертор работает как «ведущий» по отношению к сети, самостоятельно формируя частоту и амплитуду выходного напряжения. Одним из наиболее распространённых подходов к реализации такой структуры является виртуальный синхронный генератор (ВСГ). В рамках данного подхода СП имитирует работу синхронного генератора, обеспечивая за счёт алгоритмов традиционный инерционный отклик и возможность участия в процессах регулирования частоты и напряжения.

В то же время, ввиду новизны данного подхода, актуальными являются вопросы исследования его влияния на характер переходных процессов в ЭС, взаимодействия с другими СП нагрузок и генерирующих установок, а также с традиционными синхронными машинами [2, High penetration]. Для исследования данного влияния активно применяется инструментальный математического моделирования, предоставляющий широкий спектр способов анализа процессов, протекающих в ЭС с СП. В рамках данного доклада проводится анализ динамических свойств одномашинной ЭС с СП на базе алгоритма ВСГ-Т. Для этого используется анализ в области как больших, так и малых сигналов.

Доклад структурирован следующим образом: в первой части приводится описание модели и алгоритма управления, затем проводится модальный анализ и анализируются его результаты, после чего приводятся и анализируются результаты моделирования в мгновенных значениях.

Структура исследуемой системы

Одномашинная ЭС, модель которой была использована для исследования, приведена на рис. 1. Она состоит из энергосистемы, в соответствии с теоремой Тевенена представленной в виде трёхфазного источника напряжения и RL-сопротивления, трёхфазного инвертора, подключённого к ЭС через RLC-фильтр на стороне переменного тока, и источника постоянного напряжения на стороне постоянного тока инвертора.

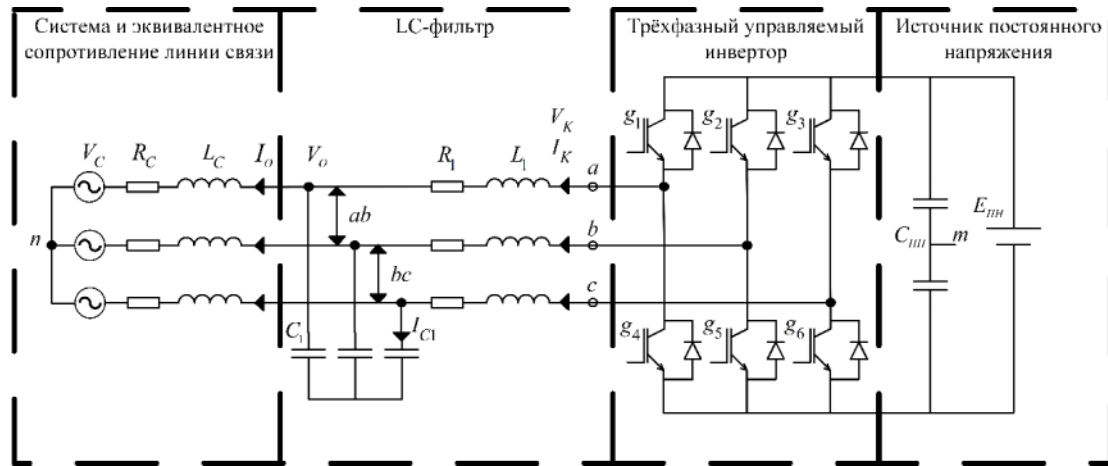


Рис. 1. Принципиальная схема исследуемой ЭС

Структурная схема алгоритма управления инвертором приведена на рис. 2 [1].

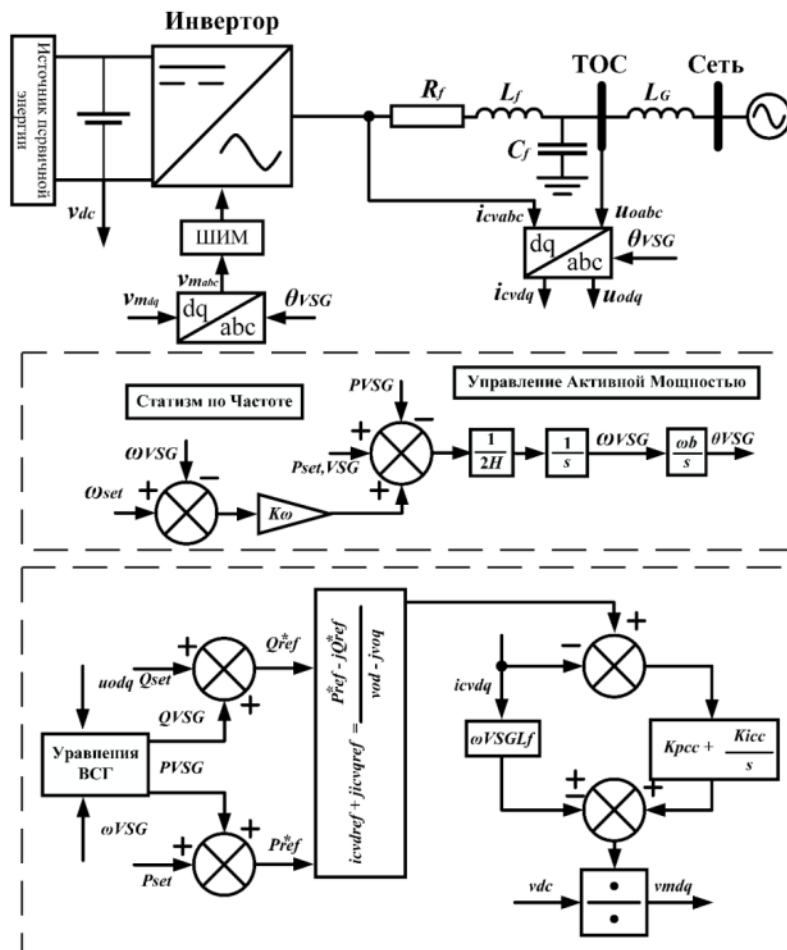


Рис. 2. Структурная схема алгоритма ВСТ-Т

В данном алгоритме отсутствует контур ФАПЧ, таким образом для dq-преобразования выходных токов и напряжений используется собственный угол инвертора, определяемый из уравнения движения. Также реализован функционал статизма по активной и реактивной мощностям. Управляющие воздействия для ШИМ получают посредством ПИ-регулятора по току.

Модальный анализ

Модальный анализ основывается на понятии мод колебаний, характеризующих характер возможных колебательных процессов в рассматриваемой системе. Для их расчёта необходимо составить модель в пространстве состояний и линеаризовать её. Матрицу полученных коэффициентов при переменных состояния называют матрицей состояния системы, а моды в таком случае являются собственными числами для данной матрицы.

Рассматриваемая модель обладает 14-м порядком и, ввиду ограничений на объём доклада, не может быть в нём представлена. Рассчитанные моды колебаний приведены в табл. 1.

Таблица 1. Собственные числа исследуемой системы

№	Величина	Частота, Гц	Декремент	№	Величина	Частота, Гц	Декремент
1,2	$-10,3 \pm 4354,5i$	693,04	0,00	9,10	$-55,6 \pm 99,2i$	15,79	0,49
3,4	$-22,9 \pm 3883,8i$	618,13	0,01	11,12	$-6,8 \pm 13,6i$	2,16	0,45
5,6	$-42,6 \pm 406,1i$	64,63	0,10	13	-2,4	0,00	1,00
7,8	$-157,8 \pm 354,5i$	56,42	0,41	14	-5,4	0,00	1,00

Моды с высокими частотами колебаний (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10) влияют, как правило не на характер изменения выходной величины, а на её дополнительные колебания. Такие, например, видны у откликов детальной модели.

Чем меньше собственная частота колебаний моды, тем больше влияния она оказывает на тенденцию изменения выходной величины. Частота колебаний как активной мощности, так и частоты (рис. 3) совпадает с частотой мод 11, 12, хотя данная мода демпфирована значительно лучше мод 1, 2, 3, 4, 5, 6, и примерно так же, как моды 7, 8 и 9, 10.

Детальное моделирование

Моделирование мгновенных значений или же детальное моделирование позволяет получить наиболее приближенный к реальности отклик модели. Для моделирования рассматривалось возмущение при изменении уставки по активной мощности от 0 до 0,2 о.е. Кривые частоты и активной мощности приведены на рис. 3. Также на них приведены кривые линеаризованной модели, использованной для модального анализа, для её верификации.

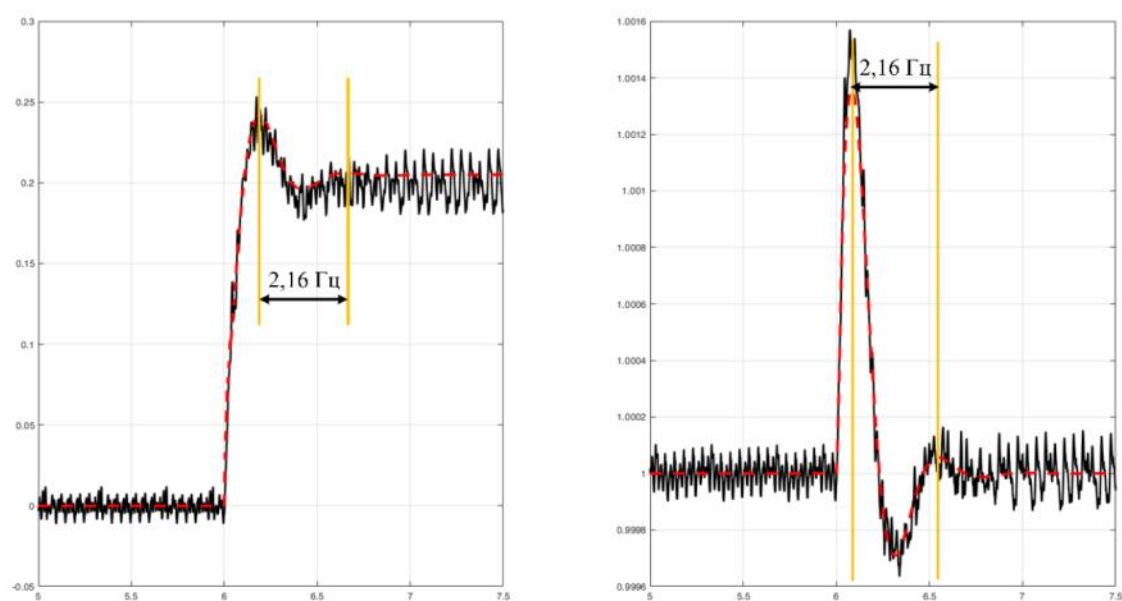


Рис. 3. Сравнительные отклики линеаризованной (красный пунктир) и детальной (чёрная сплошная линия) моделей по активной мощности (слева) и частоте (справа)

Из кривых заметен реализованный в рамках алгоритма инерционный отклик, аналогичный традиционным синхронным генераторам, как по активной мощности, так и по частоте. При этом заметны высокочастотные колебания, обусловленные модами с невысоким декрементом и значительной частотой собственных колебаний. Также стоит отметить, что моды с наименьшей собственной частотой определяют общий характер переходного процесса – из кривых заметно, что его частота совпадает с частотами мод 11 и 12.

При этом заметны общие тенденции в линеаризованной и детальной моделях, хотя в нелинеаризованной модели отсутствуют высокочастотные колебания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Suvorov A., Askarov A., Bay Y., Maliuta B., Achitayev A., Suslov K. Comparative small-signal stability analysis of voltage-controlled and enhanced current-controlled virtual synchronous generators under weak and stiff grid conditions // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2023. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108891
2. Chen M., Zhou D., Blaabjerg F. High penetration of inverter-based power sources with VSG control impact on electromechanical oscillation of power system // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2022. – V. 142. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108370>

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В ПО РЕЕАТ

А.Е. Петрова

АО «ИТЦ «ДЖЭТ», Проектный офис «Фабрика»

Научный руководитель: Б.Д. Малюта, инженер 3 категории ООО «ДЖЭТ ЛАБ»

С развитием интеллектуальных энергетических систем происходит внедрение новых источников возобновляемой энергии и устройств FACTS (Flexible alternating current transmission system – гибкие системы передачи на переменном токе), изменение топологии сетей за счет перехода к распределенной энергетике. Эти изменения влияют на значения и характер изменения параметров режима энергосистемы, её устойчивость. В таком случае встает вопрос о настройке и эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), поскольку от их функционирования напрямую зависит надёжная и устойчивая работа энергосистемы. Для получения информации об установившихся и переходных процессах в защищаемых объектах энергосистем, как правило, используется математическое моделирование. При этом программные комплексы располагают моделями основного электроэнергетического оборудования (синхронных генераторов, линии электропередач и т. д.), тогда как модели РЗА встречаются довольно редко. В связи с этим актуальным является вопрос о математическом моделировании устройств РЗА, необходимом для анализа их работы и корректного задания параметров. Среди отечественных программных продуктов для такого моделирования предлагается использовать программный комплекс РЕЕАТ.

В данной работе демонстрируется применение математического моделирования для расчёта уставок дифференциально-токовой защиты (ДТЗ) трёхфазного двухобмоточного трансформатора со схемами соединения обмоток Y/D. Для моделирования использовалось ПО РЕЕАТ. Расчет проводился согласно [1, 2], логика работы защиты реализована на базе шкафа защиты трансформатора типа ШЭ2607 041 фирмы «ЭКРА». Функциональная схема реализованной логики работы ДТЗ приведена на рис. 1.