

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЕВЫМ ИНВЕРТЕРОМ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ ВИРТУАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА МОДИФИЦИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ

А.А. Суворов, А.Б. Аскарлов
ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский
политехнический университет

Использование устройств и установок с силовыми преобразователями (СП) значительно увеличивается как в электроэнергетических системах (ЭЭС) различных стран мира, так и в Единой энергетической системе России. К подобного рода объектам относятся генерирующие установки (ГУ) на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности, ветроэнергетические установки третьего и четвертого типов и фотоэлектрические установки, промышленные системы накопления электрической энергии на базе литий-ионных аккумуляторных батарей, а также различные технологии гибких систем передачи переменного тока. Общим свойством для обозначенных установок является, как это уже было отмечено, применение в их топологии инверторов, в основном статических преобразователей напряжения, которые в общем случае выполняют роль интерфейса подключения источника постоянного напряжения к трехфазной электрической сети переменного тока [1]. В результате динамика функционирования подобного рода установок определяется работой самого СП, которая напрямую зависит от его системы автоматического управления (САУ).

Применение классического подхода к управлению СП подразумевает, что последний работает в режиме ведомого сетью, поскольку синхронизация с сетью в таком случае осуществляется с использованием блока фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Данный блок использует в качестве входного сигнала трехфазное напряжение сети в точке подключения ГУ с СП для формирования фазового угла напряжения, на основе которого выполняется синхронизация. При таком подходе ГУ с СП практически не чувствуют в регулировании режима энергосистемы, а объекты на базе ВИЭ, как правило, работают только в режиме выдачи максимальной активной мощности. Кроме того, за счет применения СП вклад новых объектов генерации в общую постоянную инерцию системы становится минимальным или отсутствует вовсе. В результате подобные изменения в энергосистеме негативно сказываются на ее динамических свойствах и характеристиках, из-за чего значительно возрастает скорость протекания про-

цессов, а также усиливаются проблемы обеспечения устойчивости и надежности функционирования ЭЭС в целом [2]. В то же время существует проблематика устойчивости ФАПЧ при динамических возмущениях, особенно в слабых и ультра-слабых электрических сетях [3]. Таким образом становится актуальной задача формирования новых подходов к управлению ГУ с СП, которые позволяют обеспечить как устойчивость их работы в широком многообразии схемно-режимных условий работы ЭЭС, так и возможность их участия в регулировании режима ЭЭС.

Для решения обозначенной проблемы предложена и адаптирована новая стратегия управления СП, согласно которой последний работает в режиме ведущего, а ГУ с СП имитируют свойства и возможности традиционной синхронной генерации [4]. Среди существующих подходов наиболее перспективной и эффективной считается концепция виртуального синхронного генератора (ВСГ). С помощью подобного подхода становится возможным значительно расширить перечень системных функций, которые способны обеспечивать ГУ с СП и которые включают в себя максимальный вклад в формирование тока короткого замыкания, гибко настраиваемый инерционный отклик, а также быстрое регулирование напряжения и частоты сети. Однако для традиционной структуры ВСГ характерным недостатком является последовательное формирование контуров управления и жесткая направленность сигналов, в результате чего воспроизводимая виртуальная машина становится ответственной за формирование опорных значений по активной и реактивной мощности ГУ с СП. Последнее приводит к снижению запасов устойчивости ГУ и неизбежному унаследованию отрицательных колебательных характеристик присущих традиционному синхронному генератору (СГ), что может выражаться в неудовлетворительном динамическом отклике ГУ с СП в целом.

Таким образом, в работе предлагается модифицированная структура САУ СП на основе уравнений ВСГ с упрощенной демпферной обмоткой по поперечной оси [5], в которой осуществляется параллельная работа разных уровней управления преобразователем, а также становится возможным использование дополнительных структурных блоков (например, регуляторов) на любом из уровней в зависимости от требуемого характера динамического отклика ГУ с СП (рис. 1). Блоки системы управления описываются в соответствии с уравнениями (1)–(10). Предлагаемая в работе структура САУ схожа с классическим представлением структуры ВСГ, управляемой по току, но с более детальным учетом электромеханических и электромагнитных характеристик СГ.

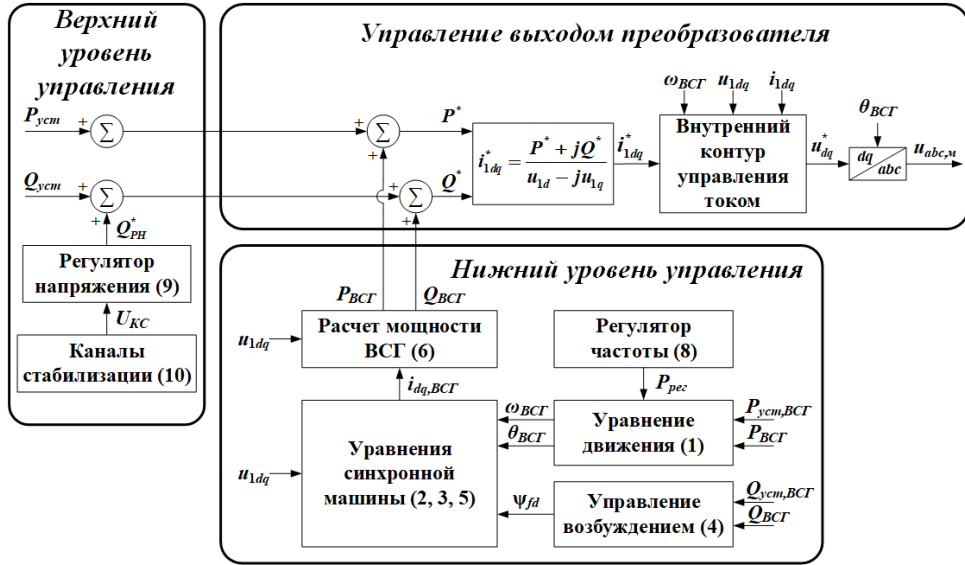


Рис. 1. Структурная схема ВСГ с параллельной структурой (ВСГ-П)

$$P_{уст,ВСГ} - P_{ВСГ} + P_{рег} = T_J \frac{d\omega_{ВСГ}}{dt}, \quad \frac{d\theta_{ВСГ}}{dt} = \omega_{ВСГ} \omega_{\delta} \quad (1)$$

$$u_{1d} = -\frac{1}{\omega_{\delta}} \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \omega_{ВСГ} - R_v i_{d,ВСГ}, \quad u_{1q} = -\frac{1}{\omega_{\delta}} \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \omega_{ВСГ} - R_v i_{q,ВСГ} \quad (2)$$

$$0 = \frac{1}{\omega_{\delta}} \frac{d\psi_Q}{dt} + \frac{R_Q}{L_Q} \psi_Q - R_Q i_{q,ВСГ} \quad (3)$$

$$\psi_f = \frac{1}{T_f} \int \left(\frac{Q_{уст,ВСГ} - Q_{ВСГ}}{U_{тек}} \right) dt \quad (4)$$

$$i_{d,ВСГ} = \frac{\psi_d - \psi_f}{L_v}, \quad i_{q,ВСГ} = \frac{\psi_q - \psi_Q}{L_v} \quad (5)$$

$$P_{ВСГ} = u_{1d} i_{d,ВСГ} + u_{1q} i_{q,ВСГ}, \quad Q_{ВСГ} = u_{1d} i_{q,ВСГ} - u_{1q} i_{d,ВСГ} \quad (6)$$

$$i_{1dq}^* = i_{1d}^* + j i_{1q}^* = \frac{P^* + jQ^*}{u_{1d} - j u_{1q}} \quad (7)$$

$$K_d (\omega_{ном} - \omega_{ВСГ}) = P_{рег} \quad (8)$$

$$(K_{PH} p + K_q)(U_{уст} - U_{тек}) = Q_{PH}^* \quad (9)$$

$$\Delta f_u \left(K_{KC} \frac{pT_1}{1 + pT_1} \frac{1 + pT_2}{1 + pT_3} \right) = U_{KC} \quad (10)$$

где: $P_{уст,ВСГ}$ – уставка ВСГ по активной мощности; $P_{ВСГ}$ – активная мощность ВСГ; $P_{рег}$ – сигнал от регулятора частоты; T_J – постоянная инерции ВСГ; $\theta_{ВСГ}$ – угол ротора ВСГ; ω_{δ} – базисное значение частоты

вращения в рад/с; ω_{BCG} – текущая частота вращения в о.е.; u_{1dq} – напряжения в осях dq в точке подключения ГУ с СП к сети; ψ_d и ψ_q – потокосцепления виртуального статора в осях dq ; R_v и L_v – виртуальные сопротивления статора; $i_{dq,BCG}$ – выходной ток ВСГ в осях dq ; R_Q и L_Q – виртуальные сопротивления демпферной обмотки; ψ_Q – потокосцепление виртуальной демпферной обмотки; T_f – постоянная времени виртуальной обмотки возбуждения; ψ_f – потокосцепление виртуальной обмотки возбуждения; $Q_{уст,BCG}$ – уставка ВСГ по реактивной мощности; Q_{BCG} – реактивная мощность ВСГ; $U_{тек}$ – действующее значение напряжения в точке подключения ГУ с СП к сети; P^* и Q^* – опорные значения активной и реактивной мощности; i_{1dq}^* – опорные значения тока в осях dq ; $\omega_{ном}$ – номинальная частота вращения в о.е.; K_d и K_q – коэффициенты статизма по частоте и напряжению; K_{PH} – постоянная времени интегрирования; $U_{уст}$ – уставка ГУ с СП по напряжению; Q_{PH}^* – сигнал от регулятора напряжения; Δf_u – сигнал отклонения частоты в Гц; $K_{СК}$, T_1 , T_2 , T_3 – коэффициент усиления и постоянные времени виртуального канала стабилизации.

Представленные особенности ВСГ-II позволяют учесть уравнение движения ротора в структуре ВСГ, что исключает необходимость использования ФАПЧ для синхронизации ГУ с сетью, а также ввести виртуальную демпферную обмотку в модель виртуальной машины для осуществления эффективного демпфирования возникающих колебаний, что позволяет исключить использование демпферного коэффициента в уравнении движения, который способен оказывать влияние на инерционный и регуляторный отклик. Таким образом структура ВСГ-II может быть разделена на три основные части: верхний уровень управления, нижний уровень управления и уровень управления выходом инвертора, включающим блок преобразования опорных значений мощности в опорные токи и внутренний контур управления током. Место установки виртуального регулятора частоты обусловлено необходимостью объединения инерционного и регуляторного отклика на одном уровне управления. Последнее приводит к большему воздействию на управляющий сигнал непосредственно в уравнении движения, что в итоге улучшает динамические характеристики СИГ при участии в регулировании частоты. За счет установки виртуального регулятора напряжения на верхнем уровне обеспечивается максимальное быстродействие в управлении при изменении напряжения, что выражается в быстродействующем изменении выходной реактивной мощности СИГ, которое по существу не зависит от электромагнитных характеристик виртуальной синхронной машины, воспроизводимой на нижнем уровне управления. Также совместно с регулятором напряже-

ния в работе предлагается использование дополнительных каналов стабилизации для демпфирования колебаний за счет использования возможностей контура по управлению реактивной мощностью ГУ с СП.

Далее в работе приводятся результаты тестирования предлагаемой структуры ВСГ-П в сравнении с традиционной структурой ВСГ, управляемой по напряжению (ВСГ-Н) [6], и традиционным СГ в случае скачка фазы источника переменного напряжения на 15 градусов. Исследования проводились в программно-аппаратном комплексе моделирования электромагнитных переходных процессов на примере тестовой модели ЭЭС (рис. 2). Исходя из полученных осциллограмм (рис. 3) следует, что в случае применения СГ наблюдаются как наибольшая амплитуда (0,64 о.е.), так и наибольшее время затухания колебаний (1,95 с). В то же время установка ГУ с СП при использовании САУ на основе любой структуры ВСГ позволяет значительно улучшить характер протекания переходного процесса: время затухания относительно случая с СГ для ВСГ-Н уменьшается на 41%, для ВСГ-П – на 73%. Наиболее оптимальный динамический отклик наблюдается при использовании предлагаемой структуры ВСГ-П, что, в частности, становится возможным за счет комбинированного использования виртуальной демпферной обмотки и каналов стабилизации для демпфирования колебаний.

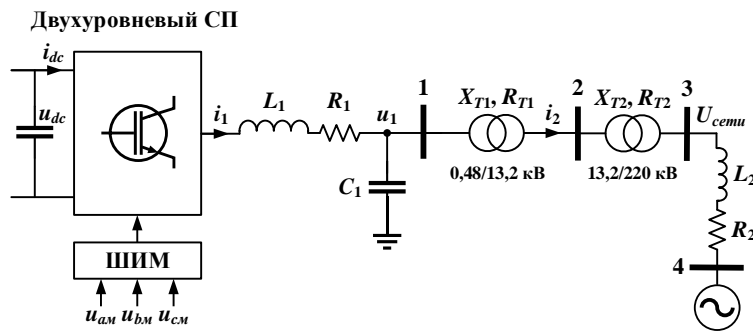


Рис. 2. Тестовая схема ЭЭС

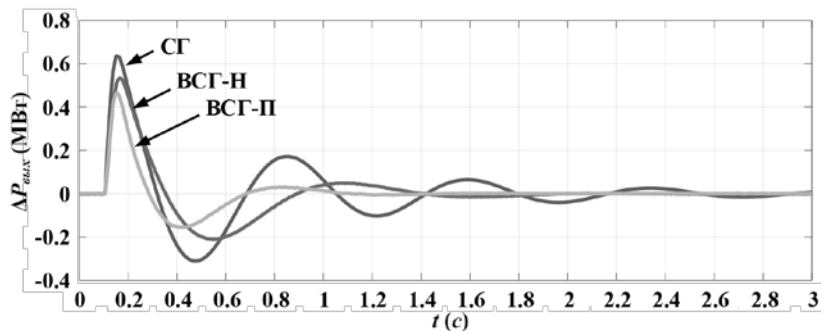


Рис. 3. Осциллограммы отклонения активной мощности при скачке фазы источника напряжения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе результаты показывают, что за счет изменения структуры ВСГ можно добиться существенного повышения эффективности функционирования ГУ с СП при их работе в ЭЭС. При этом предлагаемая структура ВСГ-П позволяет естественным образом исключить фундаментальные проблемы присущие традиционной структуре ВСГ. Также с помощью ВСГ-П становится возможным одновременно использовать контур по управлению активной и реактивной мощностью для демпфирования возникающих колебаний, тем самым обеспечивая большую эффективность по сравнению со случаями использования только одного из данных контуров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00129.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Илюшин П.В., Симонов А.В. О функционировании распределенных источников энергии с силовыми преобразователями в составе энергосистем и изолированных энергорайонов // Релейная защита и автоматизация. 2020. № 2 (39). С. 30-38.
2. Разживин И.А., Рубан Н.Ю., Рудник В.Е., Гусев А.С. Оценка влияния ветроэлектростанций на изменение суммарной инерции электроэнергетической системы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 2 (157). С. 220-234.
3. Li Y., Fan L., Miao Z. Wind in Weak Grids: Low-Frequency Oscillations, Subsynchronous Oscillations, and Torsional Interactions // IEEE Transactions on Power Systems. 2020. № 35 (1). P. 109–118.
4. Rathnayake D.B., Akrami M., Phurailatpam C., Me S.P., Hadavi S., Jayasinghe G., Zabihi S., Bahrani B. Grid Forming Inverter Modeling, Control, and Applications // IEEE Access. 2021. № 9. P. 114781–114807.
5. Суворов А.А., Аскарлов А.Б., Андреев М.В., Бай Ю.Д., Рудник В.Е. Система автоматического управления силовым преобразователем на основе свободно конфигурируемой структуры виртуального синхронного генератора // Электричество. 2022. № 4. С. 15-26.
6. D'Arco S., Suul J.A., Fosso O.B. A Virtual Synchronous Machine implementation for distributed control of power converters in

SmartGrids // Electric Power Systems Research. 2015. № 122. P. 180–197.