

Система автоматического управления силовым преобразователем на основе свободно конфигурируемой структуры виртуального синхронного генератора

СУВОРОВ А.А., АСКАРОВ А.Б., АНДРЕЕВ М.В., БАЙ Ю.Д., РУДНИК В.Е.
ТПУ, Томск, Россия

Одним из направлений развития современных электроэнергетических систем является широко-масштабное использование возобновляемых источников энергии, в составе которых присутствует силовой преобразователь, осуществляющий подключение генерирующих установок к сети. В результате внедрения подобного рода установок возникают проблемы надежного и эффективного регулирования частоты и напряжения в электрической сети, связанные с традиционным подходом к их управлению. Эффективным направлением решения данных проблем является использование альтернативной парадигмы управления возобновляемыми источниками энергии, в рамках которой многими научными группами предложена концепция на основе виртуального синхронного генератора. При этом сам режим работы силового преобразователя изменяется с ведомого на ведущего по аналогии с традиционной синхронной генерацией. Однако существующие подходы подразумевают последовательную структуру системы управления с жесткой направленностью сигналов. В связи с этим возникают фундаментальные проблемы, присущие такой структуре, например взаимозависимость в управлении активной и реактивной мощностью. В статье для реализации системы автоматического управления силовым преобразователем предлагается свободно конфигурируемая структура виртуального синхронного генератора, в которой ее структурные блоки и контуры управления могут переноситься с одного уровня на другой, а сами уровни могут располагаться не только последовательно, но и параллельно. Показано, что для синтезированной структуры обеспечивается наиболее эффективное регулирование напряжения и частоты сети, а также демпфирование возникающих колебаний. Приведены результаты качественного и количественного сравнения предлагаемой системы управления с классической структурой виртуального синхронного генератора. Экспериментальные исследования выполнены с применением средств математического моделирования.

К л ю ч е в ы е с л о в а: возобновляемые источники энергии, распределенная генерация, силовой преобразователь, система автоматического управления, виртуальный синхронный генератор

В традиционных электроэнергетических системах (ЭЭС) доминирующими источниками электроэнергии являются синхронные генераторы (СГ), которые обладают основополагающими свойствами и возможностями, необходимыми для управления режимами ЭЭС и обеспечения ее устойчивого функционирования. Среди них одним из основных является механическая инерция ротора и первичного двигателя СГ [1]. Естественный инерционный отклик позволяет одновременно уменьшить величину снижения частоты и ее скорость при возникновении различных возмущений, например коротких замыканий. Наличие демпферной обмотки в СГ приводит к возникновению дополнительного асинхронного момента, который способствует демпфированию колебаний режимных параметров [2]. Кроме этого, оснащение традиционных СГ устройством автоматического регулирования частоты и мощности (АРЧМ), а также автоматическим регулятором возбуждения в целом обеспечивает надежное регулирование частоты и напряжения сети.

Однако в последние десятилетия из-за известной необходимости перехода на низкоуглеродные или без-

углеродные источники энергии, заметного ежегодного роста потребления электроэнергии и других причин наблюдается широкомасштабное внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ), преимущественно на основе энергии ветра и солнца [3]. В связи с этим происходит существенное изменение динамических свойств ЭЭС, в первую очередь связанное со спецификой функционирования объектов ВИЭ, большинство из которых подключаются к сети с помощью устройств силовой полупроводниковой техники, из-за чего величина их механической инерции минимальна или отсутствует вовсе [4]. В результате снижается общая инерция системы, что приводит к недостаточному для сохранения устойчивости частотному отклику при различных возмущениях. Проблемы существенного снижения частоты и ее большой скорости в низкоинерционных системах известны и подробно рассматриваются в [1]. Кроме этого, объекты ВИЭ, как правило, при использовании традиционного подхода к их управлению работают только в режиме выдачи максимальной активной мощности для обеспечения высокой

эффективности подобных установок, а синхронизация с сетью осуществляется с помощью замкнутого контура регулирования фазы (ЗКРФ). В результате объекты ВИЭ являются ведомыми сетью и практически не участвуют в регулировании режима сети. При этом также существуют фундаментальные проблемы функционирования ЗКРФ, особенно в слабых и сверхслабых сетях с низкой общей инерцией, которые широко известны и в последнее время стали объектом многих исследований и дискуссий [5]. Таким образом, в рамках существующего традиционного подхода к управлению объектами ВИЭ по мере роста уровня их внедрения будет усугубляться проблема надежного и эффективного регулирования частоты и напряжения в ЭЭС.

Для решения обозначенной проблемы вначале для микрогрид, а затем и для «больших» ЭЭС была предложена и адаптирована новая парадигма управления силовым преобразователем (СП) объектов ВИЭ, согласно которой СП становится ведущим, а объекты ВИЭ имитируют свойства и возможности традиционной синхронной генерации [6]. Среди существующих подходов в обозначенной парадигме управления наиболее перспективной и эффективной считается концепция управления на основе виртуального синхронного генератора (ВСГ). В настоящее время предложены различные структуры ВСГ [7], такие как *Synchronverter*, *VISMA* и др.

Для всех существующих концепций ВСГ используется последовательная структура системы автоматического управления (САУ) с жесткой направленностью сигналов (рис. 1), которая копирует традиционные СГ и является наиболее распространенной в настоящее время [8]. Внешний контур управления используется для задания уставок по выдаваемой мощности и обеспечивает регулирование напряжения и частоты сети за счет автоматического регулятора напряжения (АРН) и АРЧМ соответственно. Выдаваемые им сигналы являются входными переменными для механического и электромагнитных уравнений электрической машины, с помощью которых в свою очередь формируются опорные сигналы тока или напряжения для внутреннего контура управления СП. Последний является выходной частью всей САУ и формирует опорные сигналы напряжения $u_{abc,m}$ для широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Согласно приведенной структуре выдача активной мощности ВСГ определяется отличным от нуля внутренним углом $\delta_{\text{ВСГ}}$ между виртуальной ЭДС $E_{\text{ВСГ}}$ и напряжением в точке подключения U_1 . Величина этого угла в установившемся режиме зависит от заданной уставки по активной мощности с учетом статизма по частоте. Причем, как известно, с увеличением данного угла возникают фундаментальные проблемы: уменьшается как область устойчивости СГ, так и способность его участия в регулировании частоты и напряжения сети, а также усиливается взаимозависимость

в управлении активной и реактивной мощностью [9]. Поэтому становится необходимым применение различных дополнительных элементов или целых контуров, которые усложняют структуру ВСГ или процедуру ее настройки, приводят к необходимости поиска компромисса между производительностью и качеством регулирования, имеют ограниченную область применения, улучшают одни свойства ВСГ, но при этом ухудшают другие и т.д. В связи с этим актуальной становится разработка структуры ВСГ, которая не была бы подвержена обозначенным фундаментальным проблемам, но при этом обеспечивала бы требуемое качество регулирования частоты и напряжения сети при различных возмущениях. Подобное осуществимо за счет использования предлагаемой в статье свободно конфигурируемой структуры ВСГ (ВСГ-СК), в которой ее структурные блоки могут переноситься с одного уровня на другой, а сами уровни могут располагаться не только последовательно, но и параллельно, что в совокупности позволяет улучшить возлагаемые на ВСГ задачи по регулированию и обеспечению устойчивого режима функционирования ЭЭС. Такая идея реализуема на основе подхода, предложенного в [10], а затем более детально описанного в [11]. При этом в обозначенных работах рассматривается только реализуемость предлагаемого подхода, а внешние регулирующие контуры не рассматриваются, как и не приводится сравнение с существующими моделями ВСГ.

Анализ классической структуры ВСГ-Н. Классическая структура ВСГ-Н (рис. 1) состоит из трех основных частей [12]. Внутренний контур является наиболее типовой частью всей САУ и имеет одинаковую структуру с традиционным управлением, когда СП является ведомым сетью. Его детальное описание и анализ представлены во многих работах и в данной статье не рассматриваются. Внешний контур управления и контур воспроизведения динамики СГ являются основными частями ВСГ и состоят из пяти структурных блоков, от которых в основном зависит характер функционирования всей генерирующей установки на базе ВИЭ. В связи с этим статья сосредоточена на их анализе.

Основная функция виртуального автоматического регулятора частоты и мощности (АРЧМ) заключается в поддержании номинального значения частоты. Данный регулятор с учетом задаваемой уставки по активной мощности формирует опорное значение имитируемой механической мощности $P_{\text{мех}}^*$ согласно (1):

$$P_{\text{мех}}^* = K_d(\omega_{\text{ном}} - \omega) + P_{\text{уст}}^* \quad (1)$$

где $\omega_{\text{ном}}$ – номинальное значение частоты сети, отн.ед.; ω – текущая частота вращения, отн.ед.; K_d – коэффициент статизма по частоте; $P_{\text{уст}}^*$ – уставка ВСГ по активной мощности.

В качестве контролируемого параметра ω могут использоваться аналогично традиционному СГ частота

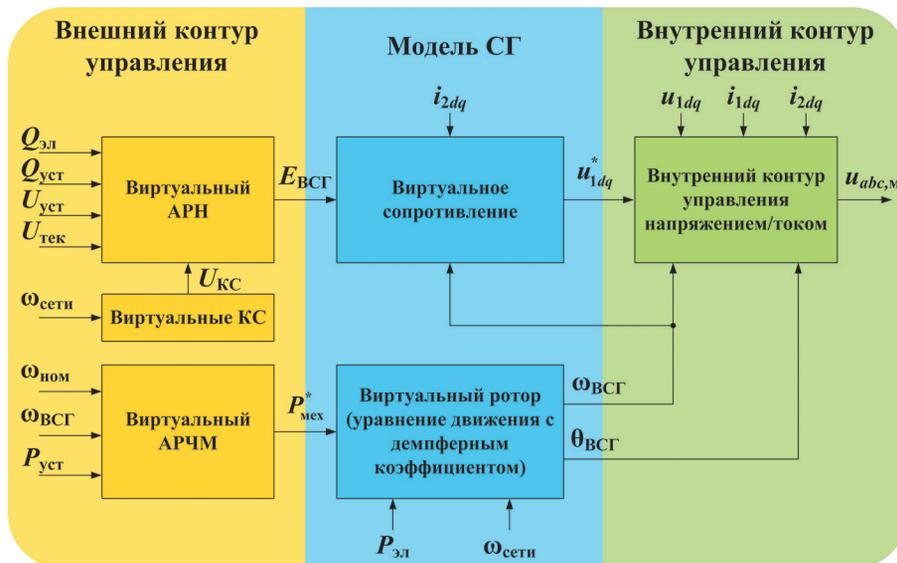


Рис. 1. Классическая структура управляемого по напряжению ВСГ (ВСГ-Н)

Fig. 1. Conventional structure of the voltage-controlled VSG

сети $\omega_{\text{сети}}$, которая в данном случае определяется с помощью ЗКРФ, или частота вращения ротора ВСГ $\omega_{\text{ВСГ}}$ [7].

Виртуальный ротор в составе ВСГ обеспечивает инерционный отклик согласно (2):

$$\begin{cases} P_{\text{мех}}^* - P_{\text{эл}} - D(\omega_{\text{ВСГ}} - \omega_{\text{сети}}) = T_J \frac{d\omega_{\text{ВСГ}}}{dt}; \\ \frac{d\theta_{\text{ВСГ}}}{dt} = \omega_{\text{ВСГ}} \omega_b, \end{cases} \quad (2)$$

где $P_{\text{эл}}$ – выходная активная мощность генерирующей установки; T_J – виртуальная постоянная инерции ВСГ; $\theta_{\text{ВСГ}}$ – виртуальный угол ротора ВСГ; ω_b – базисное значение частоты вращения в рад/с; D – демпферный коэффициент.

В уравнении (2) за счет введения коэффициента D упрощенно осуществляется учет демпфирующих свойств традиционного СГ. Причем при реализации ВСГ коэффициент демпфирования и коэффициент статизма из (1) довольно часто объединяются, и левая часть уравнения (2) преобразуется к виду:

$$P_{\text{уст}} - P_{\text{эл}} - K_d(\omega_{\text{ВСГ}} - \omega_{\text{ном}}) = T_J \frac{d\omega_{\text{ВСГ}}}{dt}. \quad (3)$$

В таком случае коэффициент K_d одновременно отражает демпферные свойства ВСГ и статизм АРЧМ, в результате чего последний исключается из модели. Также такая реализация позволяет исключить применение ЗКРФ, поскольку вместо $\omega_{\text{сети}}$ используется номинальное значение частоты. Однако, несмотря на кажущуюся эффективность обозначенной реализации, ей присущ существенный недостаток: всегда возникает необходимость поиска компромисса при задании значения коэффициента K_d , который, с одной сторо-

ны, должен обеспечивать требуемый статизм регулирования, а с другой – необходимый уровень демпфирования. Достижение первого приводит к снижению эффективности второго и наоборот [13]. В связи с очевидными недостатками обоих вариантов в настоящий момент разрабатываются альтернативные направления воспроизведения демпферных свойств СГ [14, 15]. Для представленных работ общим является их реализация в контуре по управлению активной мощностью, и, соответственно, использование для демпфирования мощности, извлеченной из кинетической энергии вращения ветроколеса или в результате разряда конденсатора в цепи постоянного тока СП фотоэлектрической установки. При этом, для того чтобы иметь необходимый запас по активной мощности, необходимо учитывать либо недозагрузку генерирующего оборудования, либо установку внешнего накопителя энергии. Данный факт ограничивает область применения таких подходов. Таким образом, в статье для классической структуры ВСГ-Н используется наиболее распространенное в настоящее время описание демпферных свойств СГ на основе (2). Однако ввиду обозначенной особенности подобного подхода в статье также рассмотрена возможность применения контура по управлению реактивной мощностью для обеспечения необходимого уровня демпфирования.

В целом контур по управлению реактивной мощностью ВСГ может быть реализован разными способами. Наиболее детальный подход предполагает учет полной модели обмотки возбуждения и ее САУ по аналогии с традиционным СГ [16]. Однако такая реализация сложна и перенимает все негативные свойства реальных СГ. При этом эффективность регулирования напряжения существенно не повышается. Поэтому наиболее рациональным является подход, заключающийся в форми-

ровании результирующей виртуальной ЭДС в зависимости от отклонения реактивной мощности с учетом статизма по напряжению. На основании этого в статье функционирование виртуального АРН в операторной форме определяется уравнением:

$$Q_{уст} + K_q (U_{уст} - U_{тек}) - Q_{эл} = E_{ВСГ} K_{АРН} P, \quad (4)$$

где $Q_{уст}$ – уставка ВСГ по реактивной мощности; $Q_{эл}$ – выходная реактивная мощность генерирующей установки; $U_{уст}$ – уставка ВСГ по напряжению; $U_{тек}$ – напряжение в точке подключения генерирующей установки; K_q – коэффициент статизма по напряжению; $K_{АРН}$ – постоянная времени интегрирования; $E_{ВСГ}$ – виртуальная ЭДС.

Альтернативным способом демпфирования колебаний с помощью ВСГ является использование возможностей контура по управлению реактивной мощностью и, соответственно, добавление *виртуальных каналов стабилизации* (КС) в АРН по аналогии с традиционными СГ, для которых данный подход является крайне эффективным. Наиболее распространенная структура КС, используемая в большинстве промышленных устройств для традиционного генерирующего оборудования, в общем случае основана на комбинации фильтров высоких частот и компенсации фазы. Именно данная структура и ее различные вариации наиболее часто встречаются в составе ВСГ [17]. Кроме самой структуры, важным аспектом являются контролируемые параметры в составе КС, от которых также непосредственно зависит эффективность демпфирования колебаний. Зачастую в качестве данных параметров используются частота сети, активная мощность или частота вращения ротора. Однако в первом случае возникает необходимость в применении ЗКРФ, что нежелательно, учитывая его проблематику, а во втором и третьем возникает заметное влияние на инерционный и регуляторный отклик ВСГ [17]. В связи с этим в статье для формирования результирующего сигнала по отклонению напряжения частоты Δf_u в точке подключения генерирующей установки используется способ, предложенный в [18]. Учитывая вышеизложенное, структура рассматриваемых в данной статье виртуальных КС в операторной форме описывается уравнением:

$$\left(\Delta f_u \frac{G_{F1} T_{F1} P}{1 + T_{F1} P} \frac{1}{1 + T_{F2} P} \right) K_F = U_{КС}, \quad (5)$$

где G_{F1} , K_F , T_{F1} , T_{F2} – коэффициенты усиления и постоянные времени КС.

Воспроизведение динамики СГ в структуре САУ СП на основе ВСГ может полностью отсутствовать или выполняться в виде моделей 7, 4 или 2-го порядков. В [12] представлено их сравнение, согласно которому модель 2-го порядка дает схожие результаты с моделью 7-го порядка, но при этом исключена излишняя

детализация. Таким образом, опорные сигналы напряжений для внутреннего контура u_{1dq}^* с учетом падения напряжения на виртуальных сопротивлениях R_v , L_v и записи модели СГ для установившихся режимов [8] формируются согласно уравнению:

$$\begin{cases} u_{1d}^* = E_{ВСГ} + \omega_{ВСГ} L_v i_{2q} - R_v i_{2d}; \\ u_{1q}^* = 0 - \omega_{ВСГ} L_v i_{2d} - R_v i_{2q}, \end{cases} \quad (6)$$

где i_{2dq} – выходной ток в осях dq .

Описание структуры ВСГ-СК. Структурная схема предлагаемой САУ СП на основе ВСГ-СК представлена на рис. 2, которая также состоит из трех основных частей. Внутренний контур управления током (ВКУТ) представлен аналогично ВСГ-Н. Главной особенностью ВСГ-СК является появление дополнительных двух уровней, которые условно можно разделить на верхний и нижний. Причем работают данные уровни параллельно. Основная функция верхнего уровня заключается в формировании уставок по активной и реактивной мощности для генерирующей установки. Нижний уровень воспроизводит динамику СГ, и формируемые им выходные мощности РВСГ и QВСГ прибавляются к значениям уставки. Из результирующих опорных значений мощности P^* и Q^* вычисляются опорные значения токов i_{2dq}^* для ВКУТ:

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

В представленной САУ воспроизводимый СГ работает с нулевой нагрузкой, т.е. $P_{уст, ВСГ} = Q_{уст, ВСГ} = 0$, и, соответственно, с нулевым внутренним углом. Благодаря этому нижний уровень функционирует только в переходном процессе и не влияет на установившийся режим работы генерирующей установки. Также за счет того, что выходом каждого уровня являются сигналы по мощности, структурные блоки, отвечающие за регулирование, могут быть установлены либо на нижнем, либо на верхнем уровне. В результате такого разделения удастся существенно повысить эффективность и быстродействие регулирования частоты и напряжения. При этом структура самих блоков не усложняется. Динамика виртуального АРН описывается уравнением (1) с исключенной уставкой по активной мощности. Виртуальные КС полностью совпадают с (5). Для виртуального АРН используется уравнение (8), которое является альтернативной формой записи (4):

$$(K_{АРН} P + K_q)(U_{уст} - U_{тек}) = Q_{АРН}^*. \quad (8)$$

Для описания динамики СГ используется четырехконтурная схема. Продольная ось d принята опережающей поперечную ось q на 90° . Входными параметрами модели СГ являются напряжения в точке подключения u_{1dq} в осях dq . Уравнение (9) описывает цепь статора, в котором индуктивные сопротивления по осям d и q

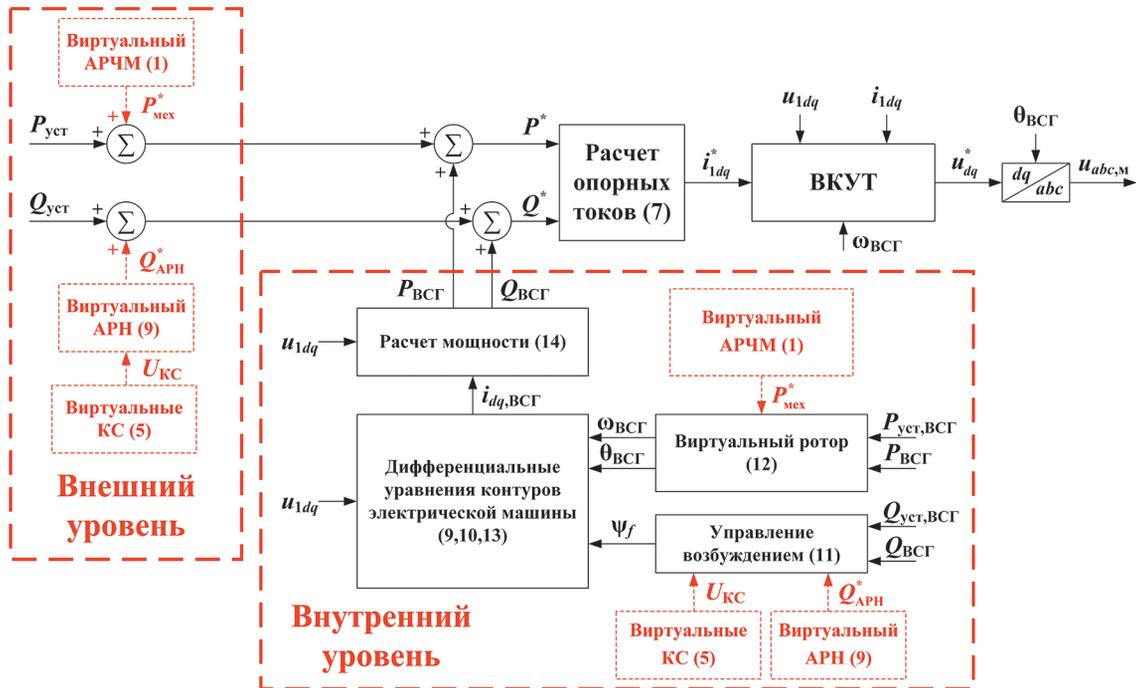


Рис. 2. Структурная схема системы управления на основе ВСГ-СК

Fig. 2. Structural diagram of the control system based on VSG-FC

приняты одинаковыми и обозначены L_v . Демпферная обмотка (обозначается индексом «Q») задается только в поперечной оси, как предложено в [19]. Причем для исключения излишней детализации в обозначенной работе сопротивление взаимной индукции между статорной и демпферной обмотками L_{AQ} принимается равным индуктивному сопротивлению рассеяния демпферной обмотки L_Q . Последнее в свою очередь исключается из демпферного контура. В связи с этим потокосцепление демпферной обмотки определяется по уравнению (10). Обмотка возбуждения представляется идеальным контуром, в котором согласно задаваемой постоянной времени T_f формируется результирующее потокосцепление Ψ_f (11). В случае установки регулирующих блоков на верхний уровень в уравнении (11) исключаются соответствующие переменные, а закон управления возбуждением поддерживает нулевую загрузку СГ по реактивной мощности. Уравнение движения ротора имеет аналогичную задачу относительно активной мощности. Запись уравнения (12) аналогична (2), но с исключением демпферного коэффициента D , роль которого в структуре ВСГ-СК выполняет демпферная обмотка. В итоге с учетом вышеизложенного выходные токи ВСГ $i_{dq, ВСГ}$ определяются с помощью (13). Расчет значений выходной мощности ВСГ $P_{ВСГ}$ и $Q_{ВСГ}$ осуществляется по (14).

$$\begin{aligned} u_{1d} &= -\frac{1}{\omega_6} \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \omega_{ВСГ} - R_v i_{d, ВСГ}; \\ u_{1q} &= -\frac{1}{\omega_6} \frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \omega_{ВСГ} - R_v i_{q, ВСГ}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$0 = \frac{1}{\omega_6} \frac{d\Psi_Q}{dt} + \frac{R_Q}{L_Q} \Psi_Q - R_Q i_{q, ВСГ}; \quad (10)$$

$$\Psi_f = \frac{1}{T_f} \int \left(\frac{(Q_{уст, ВСГ} - Q_{ВСГ}) + Q_{АРН}^*}{U_{тек}} + U_{КС} \right) dt; \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_{уст, ВСГ} - P_{ВСГ} = T_J \frac{d\omega_{ВСГ}}{dt}; \\ \frac{d\theta_{ВСГ}}{dt} = \omega_{ВСГ} \omega_6; \end{cases} \quad (12)$$

$$i_{d, ВСГ} = \frac{\Psi_d - \Psi_f}{L_v}; \quad (13)$$

$$i_{q, ВСГ} = \frac{\Psi_q - \Psi_Q}{L_v};$$

$$\begin{aligned} P_{ВСГ} &= u_{1d} i_{d, ВСГ} + u_{1q} i_{q, ВСГ}; \\ Q_{ВСГ} &= u_{1d} i_{q, ВСГ} - u_{1q} i_{d, ВСГ}. \end{aligned} \quad (14)$$

Описание тестовой схемы. Исследования выполнены в программно-аппаратном комплексе моделирования электромагнитных переходных процессов. Анализ функционирования и сравнение отклика моделей ВИЭ с САУ СП на основе ВСГ-Н и ВСГ-СК осуществлялись в двухмашинной схеме (рис. 3) [20], в которой источник постоянного напряжения через трехфазный статический преобразователь напряжения, LCL -фильтр с повышающим трансформатором подключен к сети. Сеть представлена линией электропередачи и идеальным трехфазным источником напряжения.

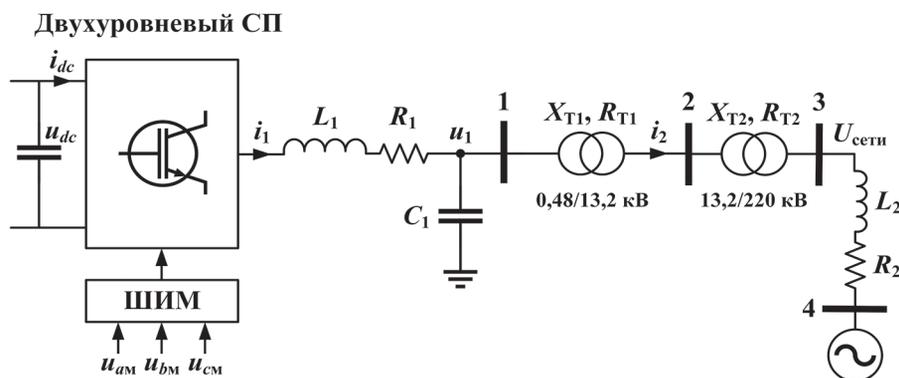


Рис. 3. Однолинейная тестовая схема электрической сети

Fig. 3. Single-line diagram of the test system

Сравнение функционирования систем управления при изменении частоты. Одними из основных функций, возлагаемых на подключенные к внешней сети ВИЭ с САУ на основе ВСГ, являются возможность участия в регулировании частоты, а также обеспечение инерционного отклика при возмущениях по аналогии с традиционными СГ. Причем результирующий динамический отклик рассматриваемых структур ВСГ зависит как от инерционного, так и регуляторного отклика. Инерционный отклик обеспечивается за счет применения в ее структуре классического уравнения движения ротора СГ. Регуляторный отклик при изменении частоты сети формируется в САУ за счет добавления в ее структуру виртуального АРЧМ.

Для исследуемых структур ВСГ рассматриваются два варианта реализации АРЧМ (рис. 4): первый вариант – основанный на сравнении $\omega_{ном}$ с $\omega_{ВСГ}$ (обозначается при исследованиях индексом «а»), второй – на сравнении с $\omega_{сети}$, получаемой с помощью ЗКРФ (индекс «б»). В структуре ВСГ-СК также учитывается установка АРЧМ на нижнем и верхнем уровнях (индексы «I» и «II» соответственно). Такой подход позволяет оценить значимость вклада от регуляторного отклика на результирующий динамический отклик. Для оценки эффективности работы САУ осуществляется скачкообразное снижение частоты сети до 59,75 Гц. В данном эксперименте исключен демпферный коэффициент ($D = 0$)

в структуре ВСГ-Н, а для ВСГ-СК исключен демпферный контур. Результаты эксперимента приведены на рис. 5. Для структуры САУ на основе ВСГ-Н использование $\omega_{сети}$ в структуре виртуального АРЧМ приводит к возникновению нарастающих колебаний и нарушению устойчивости в исходном установившемся режиме, в связи с чем данная модель далее не рассматривается.

Наибольшее отклонение частоты характерно для структуры ВСГ-Н (0,402 Гц). Использование $\omega_{сети}$ в структуре виртуального АРЧМ при его нахождении на любом уровне в структуре САУ на основе ВСГ-СК не приводит к существенным отличиям от ВСГ-Н. Значительное изменение глубины снижения частоты для ВСГ-СК происходит при использовании сигнала $\omega_{ВСГ}$ для АРЧМ на любом из уровней, а его установка на нижний уровень позволяет добиться наилучшего эффекта. Просадка частоты уменьшается до 0,355 Гц, что на 11,7 % меньше, чем у ВСГ-Н. Скорость снижения частоты у подобной структуры ВСГ-СК также меньше на 13,7 %. Подобная реакция достигается за счет объединения инерционного и регуляторного отклика на одном уровне управления. Введение дополнительного сигнала от АРЧМ в уравнение движения приводит к увеличению управляющего сигнала ΔP , что в итоге улучшает динамические характеристики генерирующей установки при участии в регулировании частоты. Таким образом, структура САУ СП на основе ВСГ-СК

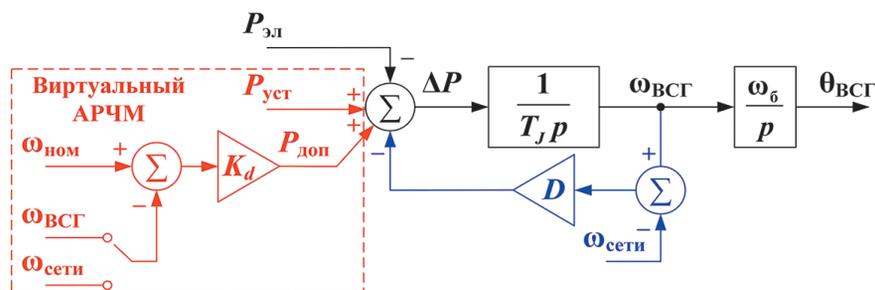


Рис. 4. Структурная схема виртуального АРЧМ

Fig. 4. Structural diagram of the virtual governor

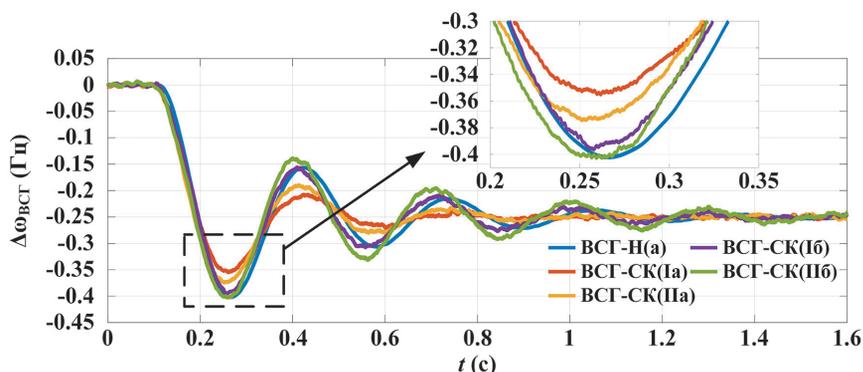


Рис. 5. Сравнение характера изменения частоты ВСГ для разных структур САУ при скачкообразном снижении частоты сети

Fig. 5. Comparison of the behavior of change in VSG frequency for different structures of control system under a step grid frequency drop

с АРЧМ, установленным на нижнем уровне и основанном на контроле ω_{VSG} позволяет достигнуть лучшего профиля изменения частоты при возмущении за счет соответствующего результирующего динамического отклика генерирующей установки.

Сравнение функционирования систем управления при изменении напряжения. В данном эксперименте исследования проводились для рассматриваемых структур ВСГ с учетом добавления в их состав виртуального АРН. Как было обозначено, реализация данного регулятора для ВСГ-Н (рис. 6,а) и ВСГ-СК (рис. 6,б) отличается, при этом сам закон регулирования идентичен.

По аналогии с предыдущим экспериментом для структуры ВСГ-СК рассматриваются два случая установки АРН – на нижнем и верхнем уровнях. Для оценки возможности участия генерирующих установок с принципом управления на основе ВСГ в поддержании и регулировании напряжения с помощью выдачи необходимой реактивной мощности осуществляется скачкообразное снижение напряжения сети на 10 % (рис. 7).

Для рассматриваемой структуры ВСГ-Н наблюдается наибольшая скорость снижения напряжения (0,52 отн.ед./с), которая определяется характером выдаваемой реактивной мощности: структура и заданные параметры данной САУ приводят к тому, что регулирование напряжения осуществляется без перерегулирования по реактивной мощности и с минимальным

временем установления на новом уровне. Использование структуры ВСГ-СК позволяет осуществить выдачу дополнительной реактивной мощности, что положительно сказывается на профиле изменения напряжения. Подобный отклик модели способствует уменьшению скорости снижения напряжения на 25 % при установке АРН на верхнем уровне управления. Время установления реактивной мощности после возмущения зависит от заданной постоянной времени T_f виртуальной обмотки возбуждения.

При этом использование АРН на нижнем уровне управления приводит к влиянию постоянной времени контура возбуждения на результирующий сигнал по реактивной мощности. Данный факт становится причиной меньшего на 10,9 % всплеска выходной реактивной мощности, что выражается в большей на 8,4 % скорости снижения напряжения в сравнении со случаем установки АРН во внешнем контуре управления. В связи с этим формирование дополнительного сигнала $Q_{АРН}^*$ для результирующего сигнала Q^* непосредственно перед ВКУТ позволяет достигнуть наибольшего быстродействия в случае изменения напряжения сети. Таким образом, установка АРН на верхнем уровне ВСГ-СК является более эффективной.

Также данный эксперимент показывает наличие критической зависимости выходной активной мощности генерирующей установки от изменения напряжения при использовании структуры ВСГ-Н, которая выража-

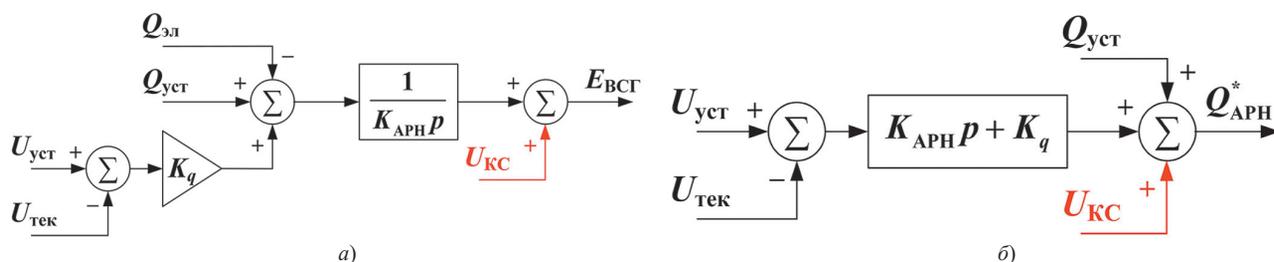


Рис. 6. Структурные схемы виртуального АРН: а – для ВСГ-Н; б – для ВСГ-СК

Fig. 6. Structural diagrams of the virtual AVR: a – for voltage-controlled VSG; б – for VSG-FC

ется в существенном отклонении активной мощности ($\Delta P_{эл}$ на рис. 7). Причем подобное негативное свойство САУ значительно снижается при любой предлагаемой структуре ВСГ-СК, что доказывается меньшим на 68,6 % отклонением активной мощности от исходного значения при сравнении с ВСГ-Н.

Сравнение функционирования систем управления при демпфировании колебаний за счет использования возможностей контура по управлению активной мощностью. Как было обозначено ранее, основным способом демпфирования колебаний при использовании классической структуры ВСГ-Н является применение демпферного коэффициента D в уравнении движения (соответствующая часть выделена синим цветом на рис. 4). Однако из-за использования сигнала $\omega_{сети}$ эффективность демпфирования существенно зависит от ЗКРФ, который чувствителен к изменениям напряжения в точке подключения, особенно при резких и глубоких просадках напряжения или при скачке фазы напряжения. Предлагаемая структура ВСГ-СК исключает использование эквивалентной мощности демпфирования в уравнении движения за

счет введения в структуру управления контура виртуальной демпферной обмотки.

Для оценки качества демпфирования колебаний проводились следующие возмущения: изменения уставки $P_{уст}$ (с 0,85 до 0,25 отн.ед. и обратно), а также скачок фазы напряжения в точке подключения на -10 градусов (рис. 8). Причем из-за разных структур рассматриваемых моделей ВСГ для их корректного сравнения изначально выполнена настройка, обеспечивающая идентичное отклонение активной мощности сразу после возмущения и одинаковые демпфирующие возможности у обеих моделей.

Как видно из рис. 8, даже без введения виртуальной демпферной обмотки структура ВСГ-СК позволяет добиться меньшего уровня колебаний и времени их затухания (в среднем на 50 %) при одинаковых возмущениях. Введение демпферного коэффициента и демпферной обмотки позволяет значительно улучшить демпферные свойства моделей ВСГ: время затухания для ВСГ-Н уменьшилось на 88,7 %, для ВСГ-СК – на 78,1 %. При этом характер протекания процессов является достаточно схожим. Единственным отличием

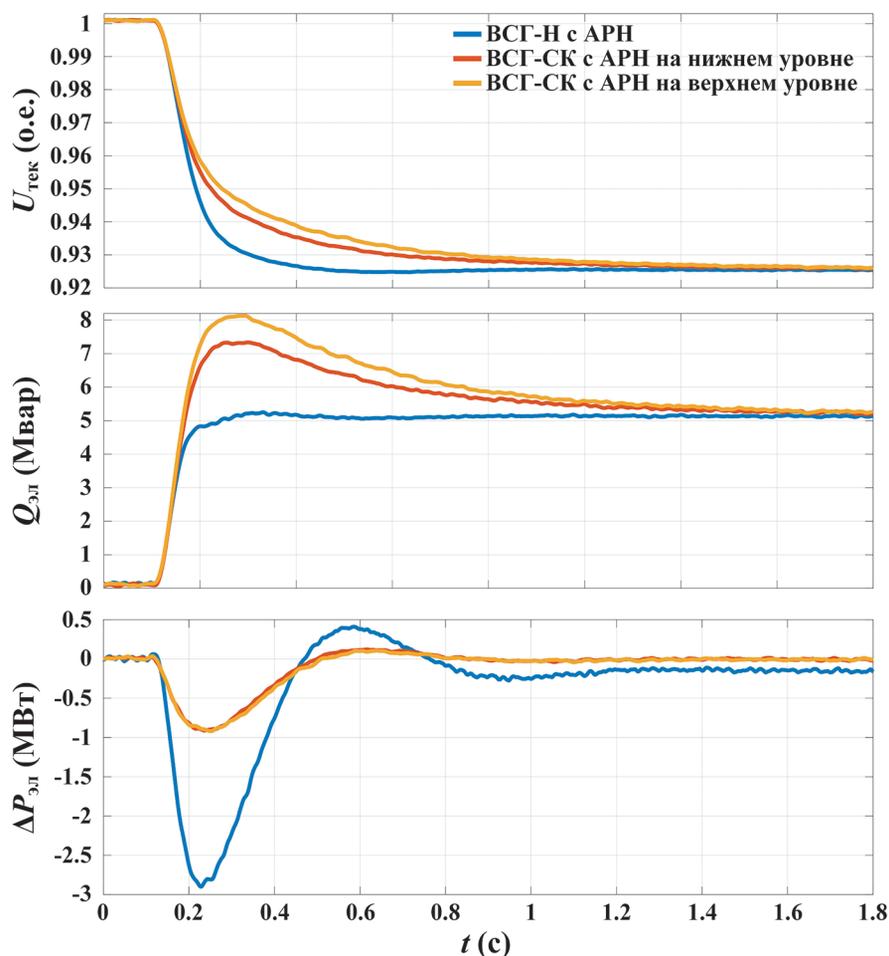


Рис. 7. Сравнение динамического отклика разных структур ВСГ при скачкообразном снижении напряжения сети

Fig. 7. Comparison of the dynamic response of different VSG structures under a step grid voltage drop

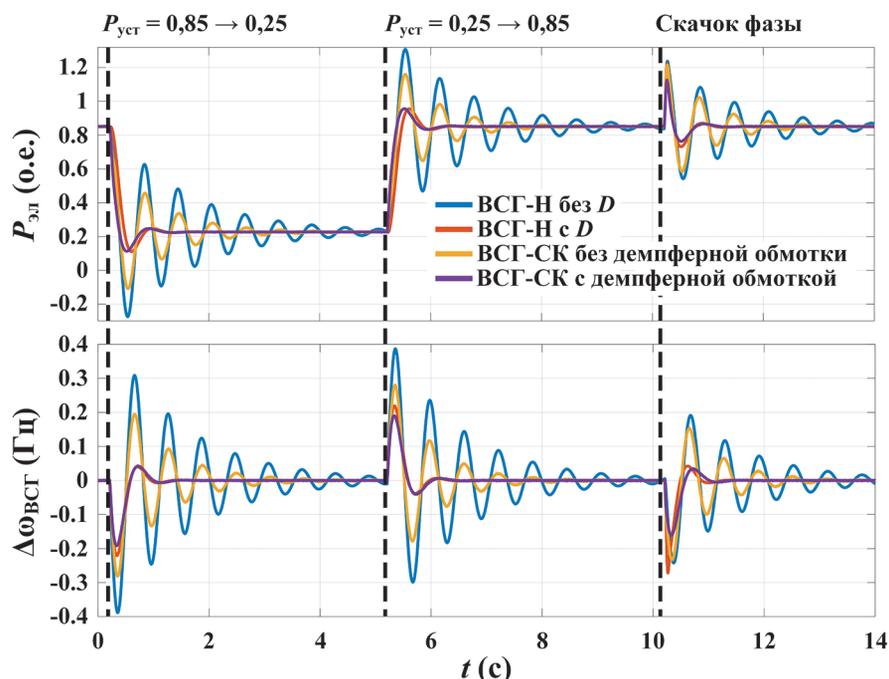


Рис. 8. Сравнение демпфирующих возможностей разных моделей ВСГ за счет контура по управлению активной мощностью при тестовых возмущениях

Fig. 8. Comparison of damping properties of different VSG structures with the use of the active power control loop under test disturbances

является скорость изменения активной мощности, которая в 1,3 раза больше у ВСГ-СК. Последнее приводит к меньшему на 29,63 % отклонению $\omega_{\text{ВСГ}}$ у данной структуры, эффективность демпфирования находится примерно на одинаковом уровне с ВСГ-Н – разница во времени затухания составляет примерно 3 %.

При этом рассматриваемая структура ВСГ-СК исключает использование D в уравнении движения и, соответственно, дополнительной мощности демпфирования, влияющей непосредственно на результирующий управляющий сигнал ΔP , а сигнал на изменение выдаваемой активной мощности $P_{\text{уст}}$ в ее структуре вводится напрямую в ВКУТ, что позволяет достичь наибольшей скорости изменения активной мощности генерирующей установки. При этом виртуальная демпферная обмотка в ВСГ-СК влияет только на качество демпфирования и не связана с сигналом по управлению активной мощностью.

Сравнение функционирования систем управления при демпфировании колебаний за счет использования возможностей контуров по управлению активной и реактивной мощностью. Последний рассматриваемый случай направлен на оценку динамического отклика структур ВСГ, в которых учитывается применение демпферного коэффициента (для ВСГ-Н) и демпферной обмотки (для ВСГ-СК), а также виртуальных КС. При этом для структуры ВСГ-СК рассматривалась установка КС на верхнем уровне управления совместно с АРН, поскольку ранее экспериментально доказано, что подобный вариант позволяет значитель-

но улучшить реакцию всей системы при изменении выходной реактивной мощности. На рис. 9 приведены полученные осциллограммы процессов при возмущении в тестовой схеме с низкой инерцией (в данном случае источник напряжения замещался эквивалентным генератором). Тестовое возмущение заключалось в отключении одной из параллельных частей эквивалентной линии электропередачи.

Согласно полученным результатам эффективность демпфирования увеличивается при добавлении КС в структуру ВСГ-СК с демпферной обмоткой, время затухания уменьшается на 26,9 %. Из сравнения отклика рассматриваемых структур ВСГ-Н и ВСГ-СК следует, что время затухания и глубина снижения частоты у ВСГ-СК меньше на 47 и 22,45 % соответственно. Таким образом, предлагаемая в статье структура САУ СП на основе ВСГ-СК позволяет существенно повысить качество демпфирования колебаний за счет совместного использования возможностей контуров по управлению активной и реактивной мощностью.

Отдельно стоит отметить, что для САУ на основе ВСГ-Н совместное использование КС и демпферного коэффициента в уравнении движения приводит к ухудшению демпфирующих свойств системы: наблюдается увеличение времени затухания возникающих колебаний на 8,9%. Данный факт непосредственно связан с наличием сильной нелинейной зависимости активной мощности от напряжения, из-за которой формирование дополнительного стабилизирующего эффекта за счет изменения выходной реактивной мощности так-

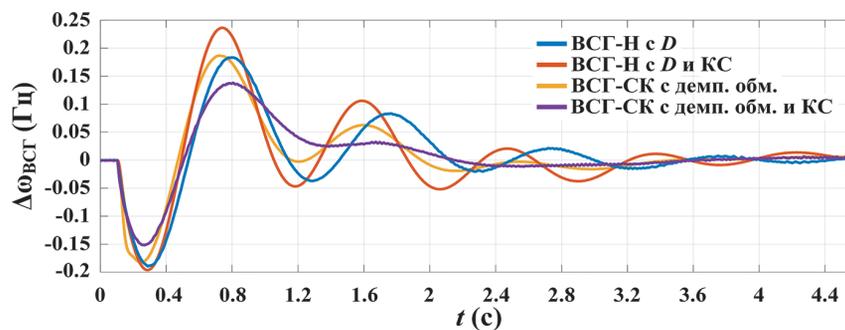


Рис. 9. Сравнение динамического отклика разных моделей ВСГ при отключении линии

Fig. 9. Comparison of the dynamic response of different VSG structures under line tripping

же приводит к изменениям в активной мощности, что в свою очередь сказывается на амплитуде колебаний и их демпфировании в целом. В итоге обеспечение высокого уровня демпфирования за счет комбинации возможностей контуров по управлению активной и реактивной мощностью для структуры ВСГ-Н является нецелесообразным без использования дополнительных средств и контуров, направленных на ослабление взаимозависимости в управлении активной и реактивной мощностью.

Выводы. Полученные результаты доказывают, что, изменяя конфигурацию структуры САУ СП на основе ВСГ и контролируемые режимные переменные, можно добиться существенного повышения эффективности ее функционирования при различных возмущениях, тем самым повысив качество регулирования напряжения и частоты сети. При этом предлагаемая в статье структура ВСГ-СК позволяет естественным образом исключить фундаментальные проблемы, присущие классической последовательной структуре ВСГ с жесткой направленностью сигналов, например взаимозависимость в управлении активной и реактивной мощностью, не используя дополнительные контуры, которые усложняют модель. Согласно проведенному исследованию различных возможных вариаций ВСГ-СК получено, что самой эффективной является структура с параллельным функционированием нижнего и верхнего уровней. На нижнем уровне осуществляется воспроизведение электрических и механических свойств СГ, которые проявляются только в переходном процессе. Верхний уровень используется для задания уставок по выдаваемой мощности генерирующей установки, а также осуществления регулирования реактивной мощности и напряжения. Причем применение виртуальных АРН и КС именно на верхнем уровне позволяет добиться высокого быстродействия в регулировании, что сказывается на лучшем динамическом отклике установки при различных возмущениях. Кроме этого, предлагаемая в данной статье структура ВСГ-СК предполагает одновременное использование контуров по управлению активной и реактивной мощностью для демпфирования возникающих колебаний, тем самым

обеспечивая большую эффективность по сравнению со случаями использования только одного из них.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tielens P., Van Hertem D. The relevance of inertia in power systems. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 55, pp. 999–1009, DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.016.
2. Афанасьев А.А., Нудельман Г.С. Математическое моделирование эквивалентной демпферной обмотки явнополюсной синхронной машины. – *Электричество*, 2019, № 10, с. 34–41.
3. Ашинянц С.А. Некоторые тенденции развития мировой электроэнергетики. – *Электрические станции*, 2021, № 12(1085), с. 53–57.
4. Разживин И.А. и др. Оценка влияния ветроэлектростанций на изменение суммарной инерции электроэнергетической системы. – *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 2021, т. 25, № 2(157), с. 220–234.
5. Li Y., Fan L., Miao Z. Wind in Weak Grids: Low-Frequency Oscillations, Subsynchronous Oscillations, and Torsional Interactions. – *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, vol. 35, No. 1, pp. 109–118, DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2924412.
6. Rathnayake D.B., et al. Grid Forming Inverter Modeling, Control, and Applications. – *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 114781–114807, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3104617.
7. Mallemaci 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, 107516, DOI: 10.1016/j.epr.2021.107516.
8. 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, vol. 122, pp. 180–197, DOI: 10.1016/j.epr.2015.01.001.
9. Shintai T., Miura Y., Ise T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator. – *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, vol. 29, No. 2, pp. 668–676, DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2281359.
10. Mandrile F., Carpaneto E., Bojoi R. Grid-Tied Inverter with Simplified Virtual Synchronous Compensator for Grid Services and Grid Support. – *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2019, pp. 4317–4323, DOI: 10.1109/ECCE.2019.8912266.
11. Mandrile F., Carpaneto E., Bojoi R. Grid-Feeding Inverter with Simplified Virtual Synchronous Compensator Providing Grid Services and Grid Support. – *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, vol. 57, No. 1, pp. 559–569, DOI: 10.1109/TIA.2020.3028334.
12. Chen M., Zhou D., Blaabjerg F. Modelling, Implementation, and Assessment of Virtual Synchronous Generator in Power Systems. – *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2020, vol. 8, No. 3, pp. 399–411, DOI: 10.35833/MPCE.2019.000592.

13. **Yan X., Mohamed S.Y.A.** Comparison of virtual synchronous generators dynamic responses. – 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), 2018, pp. 1–6, DOI: 10.1109/CPE.2018.8372573.

14. **Chen Y., et al.** Improving the grid power quality using virtual synchronous machines. – International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2011, pp. 1–6, DOI: 10.1109/PowerEng.2011.6036498.

15. **Karimi-Ghartemani M.** Universal integrated synchronization and control for single-phase DC/AC Converters. – IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, vol. 30, No. 3, pp. 1544–1557, DOI: 10.1109/TPEL.2014.2304459.

16. **Beck H.-P., Hesse R.** Virtual synchronous machine. – 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 2007, pp. 1–6, DOI: 10.1109/EPQU.2007.4424220.

17. **Ebrahimi M., Khajehoddin S.A., Karimi-Ghartemani M.** An Improved Damping Method for Virtual Synchronous Machines. – IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, vol. 10, No. 3, pp. 1491–1500, DOI: 10.1109/TSTE.2019.2902033.

18. **Седойкин Д.Н., Юрганов А.А.** Способ расчета частоты по мгновенным значениям напряжений в трехфазных сетях. – Известия НТЦ Единой энергетической системы, 2017, № 2(77), с. 74–77.

19. **Mandrile F., Carpaneto E., Bojoi R.** Virtual Synchronous Generator with Simplified Single-Axis Damper Winding. – 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2019, pp. 2123–2128, DOI: 10.1109/ISIE.2019.8781233.

20. **Танфильев О.В., Филиппова Т.А., Танфильева Д.В.** Особенности параметрирования автоматики ликвидации асинхронного хода в неполнофазных режимах. – Научный вестник Новосибирского государственного технического университета, 2018, № 2(71), с. 175–187.

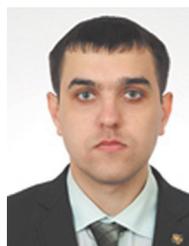
[17.01.2022]



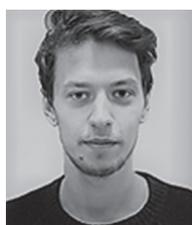
Авторы: Суворов Алексей Александрович – кандидат техн. наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.



Аскарлов Алишер Бахражонович – аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.



Андреев Михаил Владимирович – кандидат техн. наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.



Бай Юлий Дмитриевич – ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.



Рудник Владимир Евгеньевич – аспирант, инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории «Моделирование электроэнергетических систем» Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.

An Automatic Control System of a Power Converter Based on a Freely Configurable Virtual Synchronous Generator Structure

SUVOROV Aleksey A. (National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia) – Docent of the Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy & Power Engineering, Cand. Sci. (Eng.).

ASKAROV Alisher B. (National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia) – Postgraduate Student, Assistant of the Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy & Power Engineering.

ANDREEV Mikhail V. (National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia) – Docent of the Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy & Power Engineering, Cand. Sci. (Eng.).

BAY Yuliy D. (National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia) – Assistant of the Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy & Power Engineering.

RUDNIK Vladimir E. (National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia) – Postgraduate Student, Research Engineer of the Research and Development Laboratory «Electric Power System Simulation», School of Energy & Power Engineering.

One of the trends in the development of modern electric power systems is a widespread use of renewable energy sources, which include a power converter through which the generating units are connected to the grid. The introduction of such installations entails problems with ensuring reliable and efficient maintenance of frequency and voltage in the grid, which are associated with the conventional approach to their control. An effective way of solving these problems is to use an alternative strategy for the control of renewable energy sources, in the framework of which many scientific groups have proposed a concept based on a virtual synchronous generator. In this case, the power converter changes from grid-following to grid-forming mode, similar to the conventional synchronous generation. However, existing approaches imply a series control system structure with a stiff direction of signals. This gives rise to fundamental problems inherent in such a structure, e.g., interdependence in control of active and reactive power. A freely configurable structure of a virtual synchronous generator is proposed for implementing a power converter automatic control system, in which its structural units and control loops can be shifted from one level to another, and the levels themselves can be located not only in series but also in parallel. It is shown that for the synthesized structure, the most effective control of frequency and voltage, as well as damping of oscillations, are provided. Results of qualitative and quantitative comparison of the proposed control system with the conventional structure of a virtual synchronous generator are presented. Experimental studies are carried out by means of mathematical modeling.

Key words: *renewable energy sources, distributed generation, power converter, automatic control system, virtual synchronous generator*

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 21-79-00129.

REFERENCES

1. **Tielens P., Van Hertem D.** The Relevance of Inertia in Power Systems. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 55, pp. 999–1009, DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.016.
2. **Afanas'ev A.A., Nudel'man G.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2019, No. 10, pp. 34–41.
3. **Ashinyants S.A.** *Elektricheskie stantsii – in Russ. (Electrical Power Plants)*, 2021, No. 12(1085), pp. 53–57.
4. **Razhivin I.A., et al.** *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – in Russ. (Bulletin of Irkutsk State Technical University)*, 2021, vol. 25, No. 2(157), pp. 220–234.
5. **Li Y., Fan L., Miao Z.** Wind in Weak Grids: Low-Frequency Oscillations, Subsynchronous Oscillations, and Torsional Interactions. – *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, vol. 35, No. 1, pp. 109–118, DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2924412.
6. **Rathnayake D.B., et al.** Grid Forming Inverter Modeling, Control, and Applications. – *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 114781–114807, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3104617.
7. **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, 107516, DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107516.
8. **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, vol. 122, pp. 180–197, DOI: 10.1016/j.epsr.2015.01.001.
9. **Shintai T., Miura Y., Ise T.** Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator. – *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, vol. 29, No. 2, pp. 668–676, DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2281359.
10. **Mandrile F., Carpaneto E., Bojoi R.** Grid-Tied Inverter with Simplified Virtual Synchronous Compensator for Grid Services and Grid Support. – 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2019, pp. 4317–4323, DOI: 10.1109/ECCE.2019.8912266.
11. **Mandrile F., Carpaneto E., Bojoi R.** Grid-Feeding Inverter with Simplified Virtual Synchronous Compensator Providing Grid Services and Grid Support. – *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, vol. 57, No. 1, pp. 559–569, DOI: 10.1109/TIA.2020.3028334.
12. **Chen M., Zhou D., Blaabjerg F.** Modelling, Implementation, and Assessment of Virtual Synchronous Generator in Power Systems. – *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2020, vol. 8, No. 3, pp. 399–411, DOI: 10.35833/MPCE.2019.000592.
13. **Yan X., Mohamed S.Y.A.** Comparison of virtual synchronous generators dynamic responses. – 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), 2018, pp. 1–6, DOI: 10.1109/CPE.2018.8372573.
14. **Chen Y., et al.** Improving the grid power quality using virtual synchronous machines. – *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2011, pp. 1–6, DOI: 10.1109/PowerEng.2011.6036498.
15. **Karimi-Ghartemani M.** Universal integrated synchronization and control for single-phase DC/AC Converters. – *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, vol. 30, No. 3, pp. 1544–1557, DOI: 10.1109/TPEL.2014.2304459.
16. **Beck H.-P., Hesse R.** Virtual synchronous machine. – 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 2007, pp. 1–6, DOI: 10.1109/EPQU.2007.4424220.
17. **Ebrahimi M., Khajehoddin S.A., Karimi-Ghartemani M.** An Improved Damping Method for Virtual Synchronous Machines. – *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, vol. 10, No. 3, pp. 1491–1500, DOI: 10.1109/TSTE.2019.2902033.
18. **Sedoykin D.N., Yurganov A.A.** *Lvestiya NTTs Edinoy energeticheskoy sistemy – in Russ. (News of the STC of the Unified Energy System)*, 2017, No. 2(77), pp. 74–77.
19. **Mandrile F., Carpaneto E., Bojoi R.** Virtual Synchronous Generator with Simplified Single-Axis Damper Winding. – 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2019, pp. 2123–2128, DOI: 10.1109/ISIE.2019.8781233.
20. **Tanfil'ev O.V., Filippova T.A., Tanfil'eva D.V.** *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – in Russ. (Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University)*, 2018, No. 2(71), pp. 175–187.

[17.01.2022]