

УДК 621.314.5
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4779
Шифр специальности ВАК: 2.4.2
Научная статья

Совершенствование системы управления сетевыми инверторами в распределенных сетях электроснабжения газокомпрессорных станций

П.Ю. Пустохин^{1,2✉}, А.М. Зюзов², О.В. Крюков³

¹ ООО «Газпром трансгаз Югорск», Россия, г. Югорск

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Россия, г. Екатеринбург

³ ООО «ТСН-Электро», Россия, г. Нижний Новгород

✉ ppy12@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью сохранения надежности системы электро-снабжения газоконпрессорных станций в условиях возрастающей доли распределенной генерации с использованием сетевых инверторов напряжения. *Цель:* разработка системы управления сетевым инвертором, не вносящим вклад в снижение инерционности энергосистемы, сохраняющим работоспособность при кратковременных исчезновениях питающего напряжения и обеспечивающим плавный переход на режим работы в автономной сети. *Объект:* статический сетевой инвертор в составе источника распределенной генерации газоконпрессорной станции, обеспечивающий передачу электроэнергии в сеть от звена постоянного тока. *Методы:* теоретические основы электротехники, теория электрических машин, теория автоматического управления, компьютерное моделирование нелинейных динамических систем с применением программного пакета Matlab/Simulink и численных методов решения. *Результаты.* Разработана и подробно описана система управления сетевым инвертором, имитирующая поведение синхронной машины, а также учитывающая физические ограничения преобразователя. С помощью компьютерного моделирования проведена апробация спроектированной и существующей системы управления преобразователем. На основе полученных результатов проведен сравнительный анализ работы двух систем в статических и динамических режимах. Сделаны выводы о преимуществах и недостатках предлагаемой системы. *Выводы.* Применение преобразователей типа виртуальная синхронная машина при внедрении распределенной генерации является одним из способов сохранения инерции энергосистемы, необходимой для сохранения стабильной работы электрической сети газоконпрессорной станции. Возможность работы в автономной сети данных преобразователей и их плавный переход в этот режим также позволит повысить показатели надежности системы электроснабжения газоконпрессорной станции.

Ключевые слова: трубопроводный транспорт газа, интеллектуальные электрические сети, распределенная генерация, сетевые инверторы, виртуальная синхронная машина

Для цитирования: Пустохин П.Ю., Зюзов А.М., Крюков О.В. Совершенствование системы управления сетевыми инверторами в распределенных сетях электроснабжения газоконпрессорных станций // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 6. – С. 46–58. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4779

UDC 621.314.5
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4779
Scientific paper

Improvement of the control system of network inverters in distributed power supply networks of gas compressor stations

P.Yu. Pustokhin^{1,2}✉, A.M. Ziuzev², O.V. Kryukov³

¹ «Gazprom transgaz Yugorsk» LLC, Yugorsk, Russian Federation

² Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation

³ «TSN-electro» LLC, Nizhny Novgorod, Russian Federation

✉ ppy12@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to maintain the reliability of the power supply system of gas compressor stations in conditions of an increasing proportion of distributed generation using network voltage inverters. **Aim.** To develop a network inverter control system that does not contribute to reducing the inertia of the power system, maintains operability in case of short-term supply voltage failures and ensures a smooth transition to operation in an autonomous network. **Object.** Grid inverter as part of a distributed generation source of a gas compressor station, which provides electricity transmission to the network from a DC link. **Methods.** Theoretical foundations of electrical engineering, electric drive theory, automatic control theory, computer simulation of nonlinear dynamic systems using the Matlab/Simulink software package and numerical solution methods. **Results.** The authors have developed and described in detail network inverter control system, simulating the behavior of a synchronous machine, as well as taking into account the physical limitations of the converter. Using computer simulation, the approbation of the designed and existing converter control system was carried out. Based on the obtained simulation results, a comparative analysis of the operation of two systems in static and dynamic modes was carried out. Conclusions are drawn about the advantages and disadvantages of the proposed system. **Conclusions.** The use of virtual synchronous machine type converters in the implementation of distributed generation is one of the ways to preserve the inertia of the power system necessary to maintain stable operation of the electric network of the gas compressor station. The ability to work in an autonomous network of these converters and their smooth transition to this mode will also improve the reliability of the gas compressor station power supply system.

Keywords: pipeline gas transportation, intelligent electric networks, distributed generation, grid inverters, virtual synchronous machine

For citation: Pustokhin P.Yu., Ziuzev A.M., Kryukov O.V. Improvement of the control system of network inverters in distributed power supply networks of gas compressor stations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 6, pp. 46–58. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4779

Введение

Вследствие необходимости обеспечения непрерывного транспорта природного газа по магистральному газопроводу к электросетям газокompрессорных станций (ГКС) предъявляются повышенные требования для обеспечения бесперебойного электроснабжения оборудования. Традиционно электроснабжение оборудования ГКС осуществляется по радиальной схеме, однако в настоящее время, следуя мировой тенденции, на компрессорных станциях внедряется распределенная генерация. В ООО «Газпром трансгаз Югорск» завершилась опытно-конструкторская работа по созданию интеллектуальных электрических сетей на базе одного из компрессорных цехов, оснащенных газоперекачивающими агрегатами (ГПА) типа ГПА-Ц-16 с приводом электрогенераторов от цен-

тробежных нагнетателей НЦ-16/76, преобразователем частоты и мультиагентной системой управления верхнего уровня [1]. Кроме того, в компании уже накоплен положительный опыт эксплуатации источников распределенной генерации (ИРГ) на базе генератора собственных нужд ГПА типа ГТК-25И(Р). Кроме газотурбинных установок приводными механизмами для ИРГ на ГКС могут выступать турбодетандерные агрегаты, установки утилизации тепла выхлопных газов ГТУ. Внедрение ИРГ позволяет повысить надежность системы электроснабжения (СЭС) ГКС за счет дополнительного резервирования питания электрооборудования, а также снизить общую энергоемкость транспорта газа, используя энергию вторичных энергетических ресурсов (тепло выхлопных газов ГТУ, энергия расширения газа).

В текущей реализации в состав ИРГ помимо электрического генератора, преобразующего механическую энергию вращения ГТУ в электрическую, входит двухзвенный преобразователь частоты (ПЧ), обеспечивающий требуемое качество электроэнергии генератора для передачи в сеть ГКС и позволяющий приводному механизму работать с частотой, отличной от номинальной частоты вращения генератора. Питание электроприемников собственных нужд осуществляется в автономной сети с помощью двух автономных инверторов в режиме ШИМ-модуляции. Выдачу заданной электрической мощности в сеть ГКС от звена постоянного тока осуществляет «ведомый» сетевой инвертор напряжения (СИН), работающий в режиме источника тока и не участвующий в регулировании режима сети. Однако такой тип инверторов имеет несколько недостатков.

Во-первых, данный тип преобразователей имеет крайне низкую инерцию по сравнению с традиционным синхронным генератором, что снижает общую инерцию энергосистемы [2]. В системах электроснабжения с преобладанием источников распределенной генерации значительное снижение инерционности энергосистемы может привести к нежелательным последствиям:

- колебаниям частоты, выходящими за пределы, регламентируемые требованиями к качеству электроэнергии [3];
- срабатываниям устройств автоматики частотной разгрузки энергосистем ниже 46,5–48,8 Гц (АЧР-1) и защит максимальной скорости вращения электродвигателей выше 55 Гц;
- синхронным качаниям, а также подсинхронному и надсинхронному резонансам [4].

Во-вторых, синхронизация СИН с сетью происходит с помощью модуля фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), постоянно отслеживающего угол и частоту сети. Однако напряжение реальной сети электроснабжения не идеальное – возможны пропадания, прерывания, снижения напряжения. В этом случае модуль ФАПЧ не может корректно отследить угол и частоту питающей сети, поэтому качество выходной электроэнергии СИН резко снижается.

В-третьих, для работы СИН в режиме источника тока необходимо наличие мощного источника со стабильной амплитудой и частотой напряжения. Чем меньше мощность задающего источника, тем более вероятны колебания напряжения на питающей шине при коммутации нагрузок, которые в значительной степени будут усилены находящимися в СЭС СИН. Такой сценарий на ГКС возможен в случае пропадания напряжения основного и резервного ввода, последующего включения или, тем более, невключения аварийной дизельной электро-

станции, а также при удаленном от сетей централизованного электроснабжения местонахождении станции.

Известны решения, при которых СИН работает в режиме источника напряжения, поддерживая сеть с маломощными источниками питания или вовсе при их отсутствии [5, 6]. Однако переход в этот так называемый автономный или «островной» режим работы при пропадании напряжения питающей сети осуществляется дискретно. В этом случае ввиду крайне низкой инерционности СИН возникает довольно трудная задача мгновенного детектирования пропадания напряжения среди прерываний, снижений уровня и других отклонений напряжения сети. Также к недостаткам СИН в режиме источника напряжения можно отнести отсутствие поддержки частоты питающей сети, что может создавать риски возникновения аварийных ситуаций при работе в автономной сети, состоящей из одного или нескольких ИРГ.

Одним из возможных решений данных проблем может быть новый тип преобразователей, имитирующий поведение синхронной машины. В зарубежной литературе рассмотрены различные варианты построения подобных устройств (виртуальная синхронная машина (ВСМ), виртуальный синхронный генератор, синхронвертер и др.) [7–11]. Во всех вариантах исполнения управление преобразователем строится на механических и электрических уравнениях синхронной машины.

Такое решение позволяет:

- увеличить инерционность преобразователя и тем самым снизить вероятность выхода частоты сети за регламентируемые пределы, срабатывания АЧР-1, а также возникновения синхронных качаний, надсинхронного и подсинхронного резонанса;
- обеспечить более корректное детектирование пропадания напряжения для возможности перехода в «островной» режим за счет запаса по времени, обусловленного увеличением постоянной инерции преобразователя. Более того, в отдельных конфигурациях системы управления при потере сети изменение режима работы не требуется;
- снизить зависимость качества выходного напряжения от работы ФАПЧ за счет ориентации по внутреннему углу, рассчитанному с помощью основного уравнения движения электропривода;
- обеспечить поддержку выходной частоты напряжения внешней сети при работе в автономной сети с помощью «droop» контроллера.

В то же время такой преобразователь имеет преимущество и перед традиционной синхронной машиной, которое заключается в отсутствии реаль-

ной механической инерции, что дает возможность мгновенного аварийного отключения с помощью закрытия ключей преобразователя.

Для систем электроснабжения ГКС наиболее перспективным вариантом можно считать ВСМ [12], так как он сочетает в себе преимущества не только синхронной машины, упомянутые выше, но и СИН как в режиме источника тока (контроль выходного тока, в том числе ограничение токов при коротком замыкании), так и в режиме источника напряжения (контроль выходного напряжения без статической ошибки, благодаря ПИ-регулятору), а также учет внутренних ограничений преобразователя. При этом общим недостатком СИН и ВСМ остается отсутствие подпитки места короткого замыкания [13] ввиду отсутствия необходимой перегрузочной способности преобразователя, так как ключи выбираются без запаса по току из экономических соображений.

Система управления ВСМ

Математическая модель ВСМ и ее система управления основывается на структуре классического трехфазного СИН в режиме источника тока с присущими ему контуром регулирования токов, блоками ФАПЧ, вычисления выходной активной и реактивной мощности, а также блоками преобразования фазных величин в проекции на оси прямо-

угольной вращающейся системы координат. Описанная система находится в средней части общей структуры силовой и управляющей частей ВСМ, изображенной на рис. 1.

Справа на рисунке представлена упрощенная структура силовых цепей ВСМ в составе СЭС ГКС. Для снижения объема вычислений при компьютерном моделировании автономные инверторы для питания нагрузки собственных нужд учитываться не будут и на схеме не отображены. Стоит отметить идентичность силовой части ВСМ и СИН. Это обстоятельство позволит в дальнейшем модифицировать существующие СИН лишь с помощью доработки программного обеспечения (при наличии доступа) без вмешательства в силовую часть.

Поведение синхронной машины (СМ) воспроизводится с помощью блока имитации СМ, расположенного в левой части рисунка. Блок состоит из четырех частей: электрической части СМ, автоматического регулятора напряжения обмотки статора СМ, электромеханической части СМ и регулятора скорости вращения СМ. В данном случае система управления ориентирована именно по углу СМ, тогда как частота сети, полученная от ФАПЧ, используется в качестве демпфирующей обратной связи, что существенно снижает влияние автоподстройки на систему.

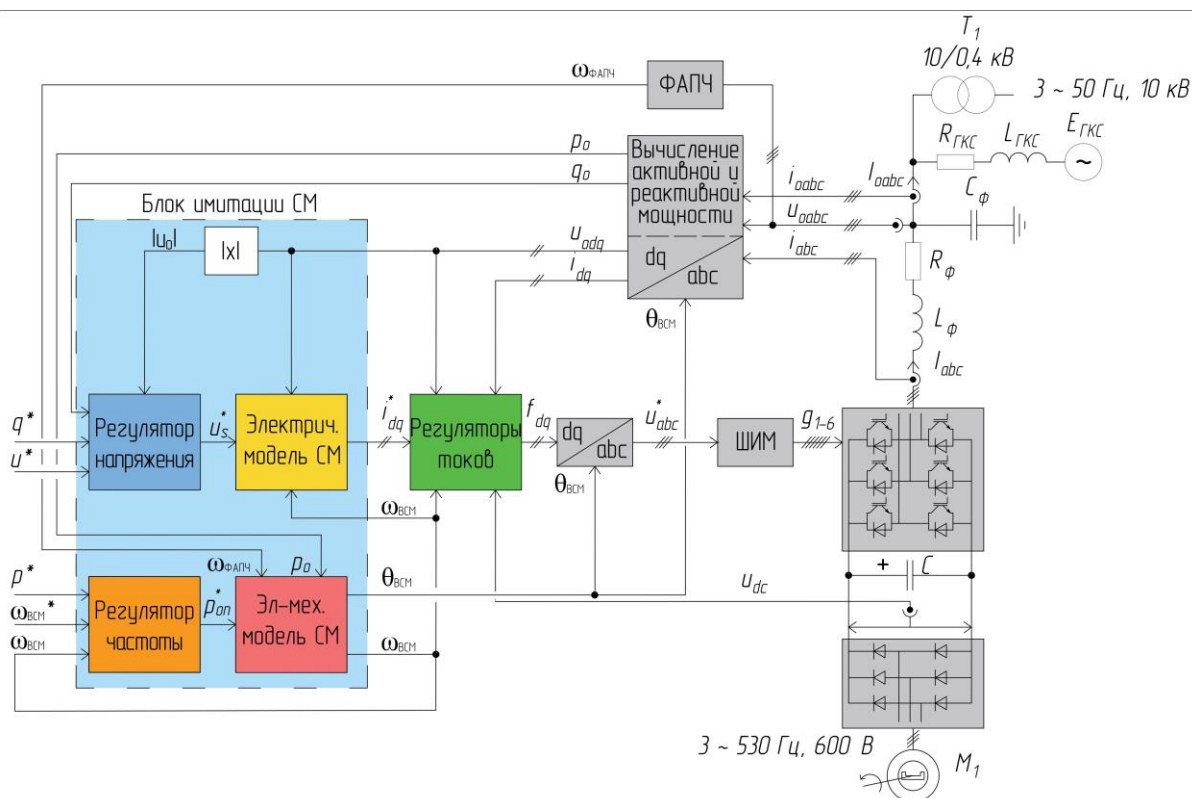


Рис. 1. Структурная схема системы управления ВСМ и внешней энергосистемы

Fig. 1. Virtual synchronous machine (VSM) control system and the external power system block diagram

В [14] имеются предложения полного отказа от сигнала ФАПЧ с его заменой сигналом частоты ВСМ после низкочастотной фильтрации. Такое решение полностью исключает негативное влияние ФАПЧ, однако, если скорость изменения частоты сети выше, чем динамика ВСМ, система может потерять стабильность.

Далее приведен подробный анализ данной системы управления преобразователем.

Условные обозначения при моделировании

На схеме силовых цепей (рис. 1) физические величины, обозначенные прописными символами, являются абсолютными значениями, однако переменные системы управления приведены в системе относительных единиц и обозначены строчными символами.

Система управления в относительных единицах имеет следующий базис:

- базовое напряжение $U_6 = U_N \sqrt{2} = 230 \sqrt{2}$ В;
- базовый ток $I_6 = I_N \sqrt{2} = 320 \sqrt{2}$ А;
- базовая частота $f_6 = f_N = 50$ Гц;
- базовая постоянная времени $T_6 = 1/2\pi f_N$;
- базовое активное сопротивление $R_6 = U_6/I_6$;
- базовая индуктивность $L_6 = T_6 U_6/I_6$;
- базовая емкость $C_6 = T_6 I_6/U_6$;
- коэффициент обратной связи по току $k_i = 1/I_6$;
- коэффициент обратной связи по напряжению $k_u = 1/U_6$.

Как уже было упомянуто выше, система управления представлена во вращающейся прямоугольной системе координат $dq0$. Преобразование вели-

чин из трехфазной системы координат осуществляется с помощью преобразования Парка [15], при этом ось d совмещена с вектором напряжения сети, а ось q опережает ось d на 90° .

Значения измеряемых выходных активной и реактивной мощности находятся по уравнениям (1), (2):

$$p = u_{od}i_d + u_{oq}i_q, \quad (1)$$

$$q = u_{oq}i_d - u_{od}i_q. \quad (2)$$

Согласно выбранным базисным единицам, модули векторов напряжения и тока в номинальном режиме равны 1 о.е. и могут быть найдены по формулам (3), (4):

$$|u_o| = \sqrt{u_{od}^2 + u_{oq}^2}, \quad (3)$$

$$|i| = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}. \quad (4)$$

Внутренний контур управления ВСМ

Объектом управления внутреннего контура тока ВСМ является RL-цепь фильтра. Синтез регуляторов тока проведен на основании широко известной математической модели активного выпрямителя напряжения (АВН), рассмотренной в [16], с использованием типовой методики подчиненного регулирования, подробно описанной в [17].

Структурная схема исследуемой системы приведена на рис. 2.

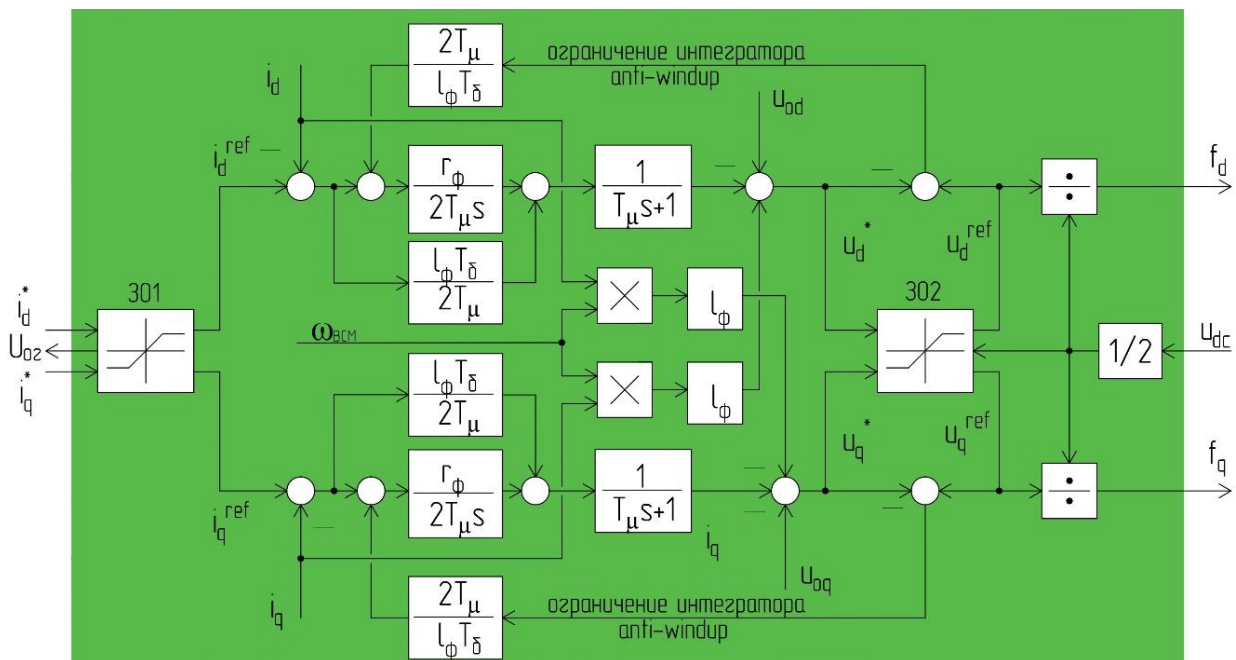


Рис. 2. Структурная схема внутреннего контура управления токами ВСМ: 301, 302 – звено ограничения
Fig. 2. VSM inner current control loop block diagram: 301, 302 – the link of limitation

Крайне важно учитывать физические ограничения преобразователя [16]. Значение выходного напряжения не может превышать 1 о.е. (при наличии предмодуляции 1,15 о.е.). При этом необходимо ограничивать именно длину вектора выходного напряжения, учитывая поправку на амплитуду опорного сигнала ШИМ и уровень напряжения на звене постоянного тока. Данную функцию выполняет блок ЗО2. Обратные, так называемые «anti-windup», связи предотвращают накопление ошибки интеграторов регуляторов тока при выходе ЗО2 на ограничение. Метод расчета коэффициента «anti-windup» связи приведен в [18].

Звено ограничения ЗО1 вводится для предотвращения протекания недопустимо больших токов через ключи преобразователя. В этом случае также ограничивается значение модуля вектора. Значение поправки для «anti-windup» связи формируется как разница неограниченного и ограниченного значения вектора тока. Предельным значением является максимально допустимый мгновенный выходной ток, значение которого в данном случае установлено 1 о.е. Стоит отметить, что данные ограничения не учитываются в преобразователях типа синхронвертер и виртуальный синхронный генератор, что является их существенным недостатком.

Внешний контур управления ВСМ

В литературе известны несколько вариантов реализации внешнего контура ВСМ, среди которых: контур вычисления выходной мощности, регуляторы проекций dq напряжения на конденсаторах фильтра с добавлением виртуального импеданса [19], а также модель обмотки статора СМ с регулятором амплитуды напряжения [20]. Первый вариант не обеспечивает поддержание уровня выходного напряжения. Согласно анализу [21] последний вариант имеет наибольший запас устойчивости, причём регулятор амплитуды напряжения выполняется без мультипликативных связей вместо двух регуляторов управления проекциями вектора напряжения $dq0$. По этим причинам в дальнейшем будет рассматриваться именно последний вариант реализации системы управления.

Модель электрической части СМ состоит из управляемого источника напряжения u_s^* , представляющего ЭДС машины, и последовательной RL цепи, представляющей виртуальные обмотки статора. Амплитуда выходного напряжения u_o LC-фильтра используется в качестве обратной связи для модели СМ. Выходными переменными блока является ток виртуальной обмотки статора i_s .

Таким образом, в пространственно-векторной записи электрическая часть модели СМ может быть выражена следующим образом:

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{1}{l_s} u_s^* - \frac{1}{l_s} u_o + \left(\frac{r_s}{l_s} + j\omega_{\text{ВСМ}} \right) i_s. \quad (5)$$

Исследование [20] показало, что динамическая модель электрической части СМ нуждается в достаточно больших значениях сопротивления обмотки статора во избежание слабо затухающих синхронных качаний, эквивалентных слабозатухающим компонентам постоянного тока в стационарной системе отсчета. Более предпочтительно в этом случае использование квазистационарной электрической модели (КСЭМ) СМ, которая значительно менее склонна к синхронным качаниям при изменении параметров ВСМ.

Чтобы получить уравнение КСЭМ СМ приравняем к нулю производную тока статора i_s в выражении (5):

$$i_s = \frac{u_s^* - u_o}{r_s + j\omega_{\text{ВСМ}} l_s}. \quad (6)$$

Для устранения колебаний, ведущих к неустойчивой работе ВСМ, в канал обратной связи по напряжению u_o следует установить фильтр низких частот. Структура КСЭМ СМ в проекциях на оси координат $dq0$, полученная на основе выражения (6), представлена на рис. 3.

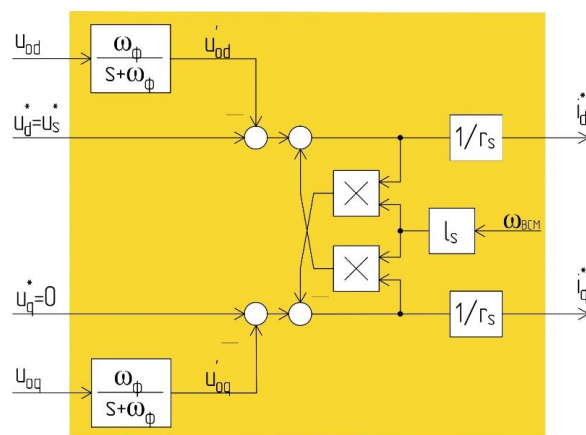


Рис. 3. Структурная схема квазистационарной модели электрической части СМ

Fig. 3. Block diagram of the SM electrical part quasi-stationary model

Требуемое напряжение статора u_s^* формирует регулятор амплитуды выходного напряжения. При этом реальным объектом управления в данном случае выступает емкость выходного фильтра C_f . Синтез пропорционально-интегрального регулятора напряжения также проведен по типовой методике [17].

Задание для регулятора напряжения формируется из желаемого напряжения на фильтре и выхода пропорционального регулятора реактивной мощности. При этом для стабильной работы системы в канал обратной связи реактивной мощности также следует установить фильтр низких частот с частотой среза ω_{fq} .

Управление реактивной мощностью осуществляется согласно уравнениям (7), (8):

$$u_r^* = u_r - k_q(q^* - q_\phi), \quad (7)$$

$$\frac{q_\phi}{dt} = \omega_{q\phi} q_o - \omega_{q\phi} q_\phi, \quad (8)$$

где k_q – коэффициент контура управления реактивной мощностью, $\omega_{q\phi}$ – частота среза фильтра.

Регулятор напряжения и реактивной мощности приведен на рис. 4.

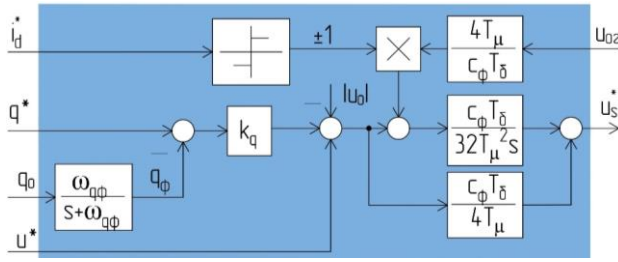


Рис. 4. Структурная схема регулятора реактивной мощности и выходного напряжения ВСМ

Fig. 4. Block diagram of the reactive power regulator and VSM output voltage regulator

Ввиду того, что в процессе работы возможен кратковременный переход ВСМ в двигательный режим знак «anti-windup» связи корректируется в зависимости от направления тока статора с помощью умножения на выходной сигнал релейного звена. Коэффициент связи рассчитан согласно методике [18].

Имитация инерции ВСМ

Главным отличием системы управления ВСМ от СИН является наличие блока имитации инерции на базе линеаризованного уравнения движения электрической машины, приведенного в выражении (9):

$$\frac{d\omega_{\text{ВСМ}}}{dt} T_j = p_{\text{оп}}^* - k_d(\omega_{\text{ВСМ}} - \omega_{\text{сети}}), \quad (9)$$

где T_j – механическая постоянная времени виртуальной машины, k_d – коэффициент демпфирующей силы, обусловленной разницей угловых частот ВСМ и сети, $\omega_{\text{сети}}$ – угловая частота сети, вычисляемая ФАПЧ или блоком ориентации, $p_{\text{оп}}^*$ – опорное значение активной мощности ВСМ.

Реальная СМ будет демонстрировать демпфирующий момент, пропорциональный разнице между частотой сети и частотой вращения машины. Опорное $p_{\text{оп}}^*$ значение активной мощности является эквивалентом крутящего момента приводного двигателя.

Регулятор частоты ВСМ играет роль идеального приводного двигателя для СМ, мгновенно обеспечивающего заданную выходную мощность и частоту

вращения. Измеренное p_o значение выходной активной мощности является эквивалентом момента сопротивления в уравнении движения традиционной машины. Опорное значение выходной мощности ВСМ $p_{\text{оп}}^*$ формируется из желаемого p^* значения выходной активной мощности и выхода регулятора частоты вращения ВСМ, согласно выражению (10):

$$p_{\text{оп}}^* = k_p(p^* - p_o) + k_\omega(\omega^* - \omega_{\text{ВСМ}}), \quad (10)$$

где k_ω – коэффициент усиления «droop» контроллера частоты, ω^* – желаемое значение выходной частоты ВСМ, k_p – коэффициент контура активной мощности, принимающий значения 1 или 0, p^* – желаемое значение выходной активной мощности ВСМ, p_o – измеренное значение выходной активной мощности ВСМ.

Угол виртуальной машины, необходимый для ориентации прямоугольной вращающейся системы координат $dq0$, определяется согласно выражению (11):

$$\frac{d\theta_{\text{ВСМ}}}{dt} = \omega_{\text{ВСМ}} \omega_b, \quad (11)$$

где $\omega_b = 2\pi f_b$ – базовая угловая частота.

Полученная структура регулятора частоты и электромеханической модели СМ представлена на рис. 5.

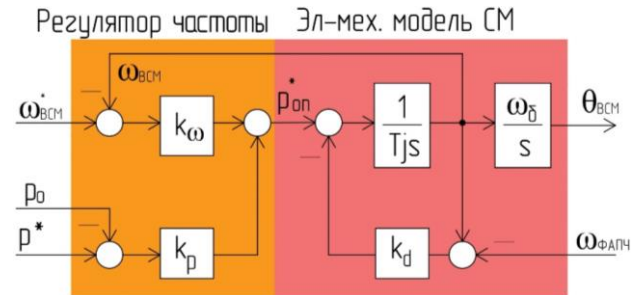


Рис. 5. Структурная схема регулятора частоты и электромеханической модели СМ

Fig. 5. Block diagram of the frequency controller and SM electromechanical model

Результаты математического моделирования

Математическое моделирование для апробации спроектированной системы управления ВСМ проведено с использованием программного пакета Matlab/Simulink и библиотеки элементов силовой части Simscape. Схема моделирования совпадает со схемой силовой части, приведенной на рис. 1. В нагрузке ГКС присутствует как статическая, так и динамическая часть, представленная электродвигателями вентиляторов воздушного охлаждения газа, насосами масла уплотнения и смазки ГПА. Параметры системы управления ВСМ, элементов силовой части, а также начальные условия моделирования приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры системы управления и элементов силовой части при моделировании

Table 1. Parameters of the control system and elements of the power unit during simulation

Параметр/Parameter	Значение Value
Активное сопротивление фильтра R_{ϕ} , мОм Filter active resistance R_{ϕ} , mOhm	0,1
Индуктивность фильтра L_{ϕ} , мГн/Filter inductance L_{ϕ} , mH	0,5
Емкость фильтра C_{ϕ} , мкФ/Filter capacitance C_{ϕ} , μ F	100
Некомпенсируемая постоянная времени T_{μ} , мс Uncompensated time constant T_{μ} , ms	0,4
Номинальная частота напряжения нагрузки f_N , Гц Rated frequency of load voltage f_N , Hz	50
Номинальное фазное напряжение нагрузки U_N , В Rated phase voltage of load U_N , V	230
Частота коммутации ШИМ f_{PWM} , Гц Switching frequency PWM f_{PWM} , Hz	4950
Номинальная мощность генератора P_G , кВт Rated power of a generator P_G , kW	350
Номинальное линейное напряжение генератора U_{NG} , В Rated line voltage of a generator U_{NG} , V	600
Номинальная мощность питающего трансформатора S_{TI} , МВА Rated supply transformer power S_{TI} , MVA	2
Мощность нагрузки ГКС $P_{ГКС}$, МВт/Power of load $P_{ГКС}$, MW	1,05
Коэффициент мощности нагрузки ГКС $\cos\varphi$, ое Load power factor $\cos\varphi$, pu	0,8
Постоянная времени виртуальной инерции T_i , с Virtual inertia time constant T_i , s	2
Индуктивность обмотки ВСМ l_s , о.е./VSM Inductance l_s , pu	0,4
Активное сопротивление обмотки ВСМ r_s , о.е. VSM active resistance r_s , pu	0,01
Коэффициент контура управления активной мощностью k_p , о.е. Active power control circuit gain k_p , pu	1
Коэффициент контура управления реактивной мощностью k_q , о.е. Reactive power control circuit gain k_q , pu	0,1
Коэффициент регулятора частоты k_{ω} , о.е. Droop gain k_{ω} , pu	40
Демпфирующий коэффициент ВСМ k_d , о.е. VSM damping coefficient k_d , pu	40
Задание на выходную активную мощность ВСМ p^* , о.е. Reference of VSM output active power p^* , pu	0,5
Максимальное значение амплитуды выходного тока преобразователя i_{max} , о.е. Maximum value of the converter output current amplitude i_{max} , pu	1
Максимальное значение напряжения на выходе преобразователя u_{max} , о.е. Maximum value of the converter output voltage u_{max} , pu	1

Для наглядности полученных результатов моделирование проводилось как для СИН, так и для ВСМ. В дальнейшем переменные для этих случаев обозначаются индексами 1 и 2 соответственно.

На первом этапе исследовалась реакция системы на коммутацию мощной нагрузки и типовые провалы напряжения, обусловленные короткими замыканиями в сети: 0,1 сек с провалом на 100 %, 0,5 с с провалом на 75 % и 1–2 с с провалом 50 %. Снижение напряжения моделировалось как уменьшение задания идеального источника напряжения на стороне высокого напряжения. Исчезновение

напряжения моделировалось размыканием линии между первичной обмоткой трансформатора и идеальным источником напряжения. Начальными условиями для первого этапа являлось наличие напряжения внешней сети и подключение к энергосистеме всей штатной нагрузки ГКС.

На рис. 6 представлены графики частоты напряжения, вычисленные с помощью ФАПЧ в точке присоединения нагрузки для двух вышеуказанных случаев.

Из полученных результатов видно, что при использовании СИН амплитуда колебаний и скорость изменения частоты напряжения сети больше в каждом из рассмотренных сценариев, чем при использовании ВСМ. Принимая во внимание тот факт, что системы электроснабжения в обоих случаях идентичны, можно сделать вывод, что использование классического СИН снижает общую инерционность сети, по сравнению с использованием ВСМ. Наибольшее отклонение частоты наблюдалось при пропадании напряжения (рис. 1, А). В первом случае, при использовании СИН, отклонение частоты составило 47 Гц, приблизившись к нижней границе диапазона уставок срабатывания АЧР-1. Это значит, что для данной конфигурации системы уставка АЧР-1 должна находиться в диапазоне 46,5–47 Гц, чтобы исключить ошибочное отключение нагрузки при пропадании напряжения сети. В случае использования ВСМ возможен выбор уставки в диапазоне 46,5–48 Гц.

В то же время при появлении напряжения сети в системе электроснабжения с СИН амплитуда колебания частоты превышает уставку защиты максимальной скорости вращения электродвигателей выше 55 Гц.

Стоит отметить, что данные результаты получены при соотношении 1 к 8 мощностей источника распределённой (преобразователя) и традиционной генерации (питающего трансформатора). С появлением в энергосистеме большого количества преобразователей типа СИН будет наблюдаться стремительное ухудшение ситуации ввиду дальнейшего снижения общей инерции энергосистемы и увеличения амплитуды колебаний частоты во всех переходных процессах. Преобразователи типа ВСМ не снижают общую инерцию энергосистемы, поэтому дальнейшее увеличение их количества не повлияет на размах колебаний частоты. Таким образом, результаты проведенного моделирования для ВСМ справедливы для любого количества преобразователей в системе электроснабжения.

Второй этап моделирования заключался в исследовании процессов в системе при переходе в автономный режим работы после исчезновения напряжения на питающем трансформаторе.

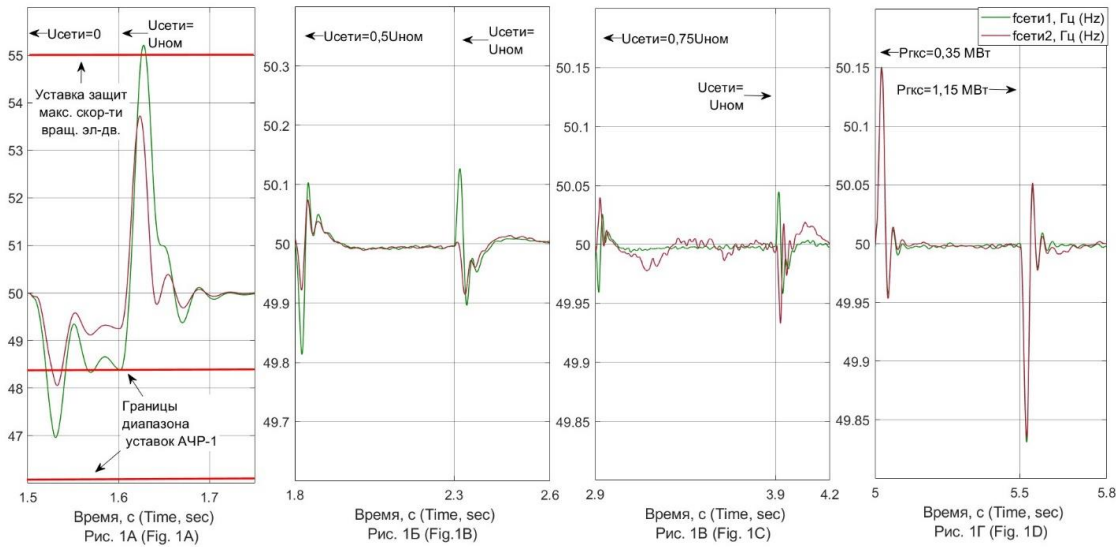


Рис. 6. Частота напряжения в точке присоединения нагрузки при типовых 100 % (А), 50 % (Б), 25 % (В) провалах напряжения и коммутации 1 МВА нагрузки ГКС (Г) для вариантов СИН (1) и ВСМ (2) системы управления преобразователем

Fig. 6. Voltage frequency at the point of connection of the load at typical 100% (A), 50% (B), 25% (B) voltage and switching failures 1 MVA of the GCS (Г) load for voltage source inverter (VSI) (1) and VSM (2) options of the converter control system

Структура управления классического СИН, использованного в текущей реализации на предприятии, не позволяет реализовать режим, при котором инвертор является единственным источником генерации в системе, поэтому для второго этапа будет использована модифицированная структура системы управления СИН [7]. В такой структуре по сигналу перехода в автономный режим включается регулятор выходного напряжения, отключается ФАПЧ, и работа продолжается в режиме «ведущего» источника напряжения с опорой на внутренний генерируемый угол. Начальные условия моделирования при-

ведены в табл. 1. Для снижения объема машинных вычислений принято допущение об отсутствии резервного ввода питания и резервной электростанции на территории ГКС. Таким образом, в случае пропадания напряжения внешней сети единственным источником электроэнергии остается преобразователь. После пропадания напряжения сети происходит ступенчатое отключение избыточной нагрузки до стабилизации напряжения в системе. Затем происходит снижение частоты вращения синхронного генератора до 90 % от номинальной. Полученные результаты моделирования представлены на рис. 7.

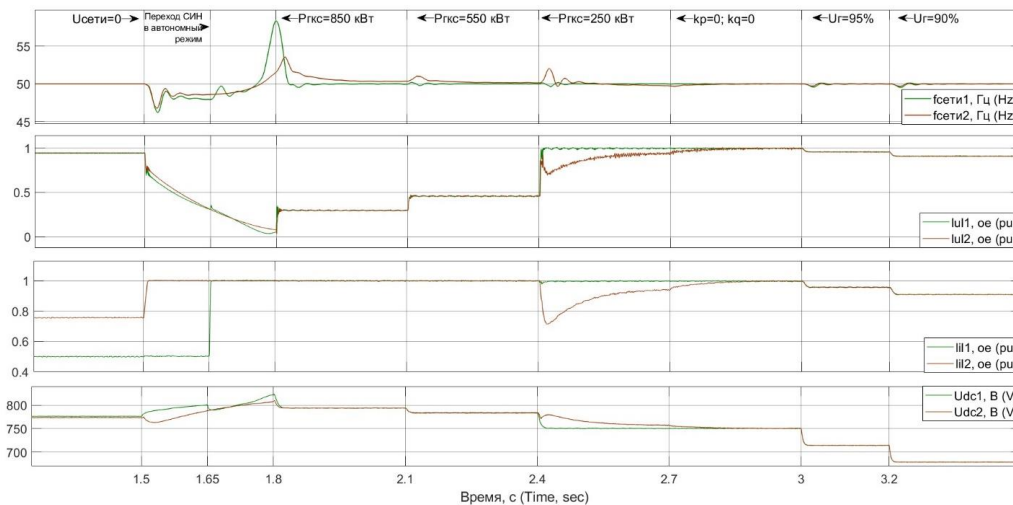


Рис. 7. Поведение системы при пропадании питающего напряжения (сверху вниз – частота напряжения, модули векторов напряжения и тока преобразователя, напряжение на звене постоянного тока)

Fig. 7. Behavior of the system when the supply voltage is lost (from top to bottom – voltage frequency, voltage and current modules vectors, DC link voltage of the converter)

Из результатов моделирования видно более быстрое снижение частоты и амплитуды напряжения в системе с СИН при пропадании питающего напряжения ввиду более низкой инерции энергосистемы, а также видно наличие переходного процесса, обусловленного дискретностью перехода преобразователя в автономный режим. Вместе с тем в случае с ВСМ переход в автономный режим осуществляется плавно, без дополнительных переходных процессов. Увеличение выходного тока ВСМ для поддержания уровня напряжения происходит сразу, в отличие от СИН, где реакция наблюдается только после включения регулятора напряжения. Отсутствие реакции выходных токов на первые две ступени сброса нагрузки объясняется тем, что преобразователь работает на ограничении, так как нагрузка превышает максимально допустимое значение. В первом случае отсутствует реакция по частоте при сбросе нагрузки ввиду того, что у СИН в автономном режиме отсутствует обратная связь по частоте.

Стоит отметить наличие небольшой статической ошибки ВСМ по амплитуде и частоте выходного напряжения, привносимой контурами управления активной и реактивной мощности. Можно заметить, как нивелируется ошибка при отключении контуров в 2,7 с ($k_p=0$, $k_q=0$). Хотя в данном случае ошибка не является критичной и показатели качества выходной электроэнергии находятся в пределах нормы, при стабильном режиме работы в автономном режиме можно считать предпочтительным отсутствие управления выходной мощностью.

Снижение частоты вращения генератора до 95 % не влияет на качество выходной электроэнергии ВСМ, несмотря на снижение уровня напряжения на

звене постоянного тока до 715 В. Однако снижение частоты вращения до 90 % вызвало падение уровня напряжения на звене постоянного тока до 675 В, что ниже минимально допустимого для преобразователя при данных параметрах силовой цепи. Это, в свою очередь, привело к неспособности ВСМ обеспечить заданный ток и поддержать напряжение на нагрузке на требуемом уровне. Теоретический минимум значения напряжения на звене постоянного тока для активных выпрямителей при отсутствии предмодулирующего сигнала – 650 В, или $2U_6$ [16]. Для расширения диапазона работы необходима замена неуправляемого выпрямителя активным выпрямителем напряжения или установка DC/DC повышающего преобразователя в звено постоянного тока. Второй способ используется в текущей реализации преобразователя в составе серийно-выпускаемого СИН. Однако и в этом случае, при отсутствии принудительного охлаждения машины, вслед за снижением частоты вращения генератора необходимо снижать выходную мощность преобразователя во избежание перегрева.

Резюмируя результаты первого и второго этапов, можно сказать, что в динамических режимах поведение ВСМ более предпочтительно, чем СИН. Выходные фазные напряжения и токи ВСМ приведены на рис. 8.

Однако, обратившись к статическому режиму, можно заметить, что при одинаковых параметрах выходного фильтра и частоте ШИМ гармонический состав выходных напряжений и токов СИН лучше, чем ВСМ. Коэффициенты нелинейных искажений (КНИ) напряжений и токов СИН и ВСМ в установившихся режимах, полученные при разложении сигналов в ряд Фурье, приведены в табл. 2.

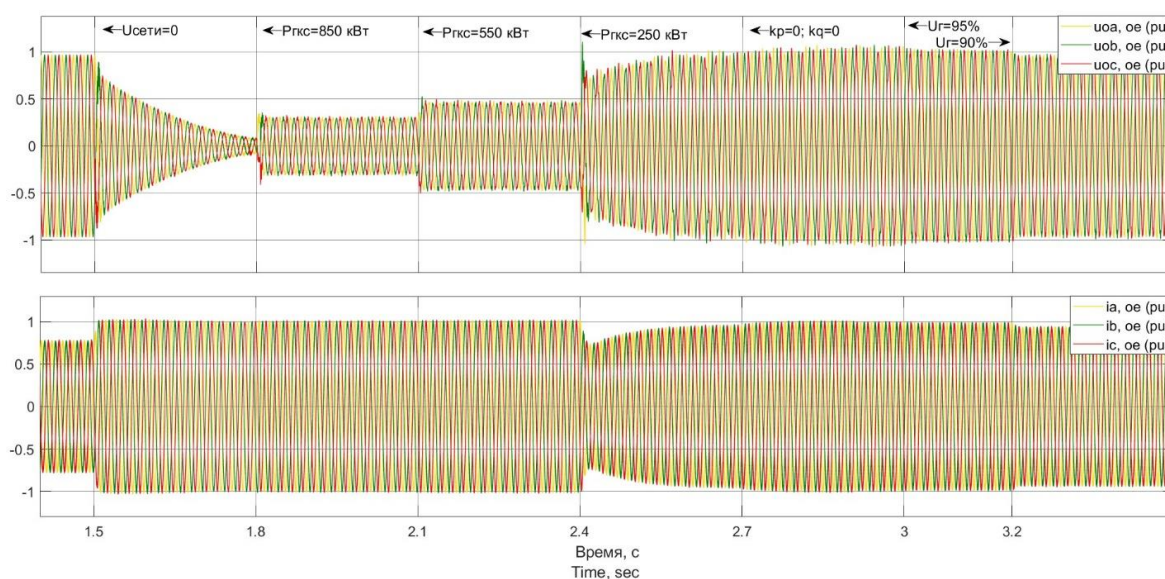


Рис. 8. Выходные фазные напряжения и токи ВСМ
Fig. 8. VSM phase output voltages and currents

Таблица 2. Значения КГИ выходных токов и напряжения ВСМ и СИН, полученные при математическом моделировании

Table 2. VSM and VSI output voltage and current THD during simulation

Критерий сравнения Comparison criteria	КГИ ВСМ/VSM THD, %		КГИ СИН/VSI THD, %	
Режим работы Operating mode	Выходное напряжение Output voltage	Выходной ток Output current	Выходное напряжение Output voltage	Выходной ток Output current
Сетевой Grid-connected	1,72	6,53	1,5	4,48
Автономный Island	5,07	3,51	2,78	3,57

Лучшее качество выходной электроэнергии СИН можно объяснить тем, что частота вращения его системы координат жестко связана с частотой сети с помощью ПИ-регулятора ФАПЧ. В то время как частота ВСМ подстраивается под частоту сети с помощью демпфирующей связи, имеющей коэффициент k_d с конечным значением. При этом свое влияние вносит П-регулятор частоты и в случае, если его задание не равно текущей частоте сети, наблюдается разница частоты ВСМ и частоты напряжения сети, что и ведет к ухудшению качества выходной электроэнергии. Аналогичное взаимодействие наблюдается и в случае регуляторов напряжения и реактивной мощности. Соответствующая настройка коэффициентов k_ω , k_d и k_q может уменьшить эту разницу и увеличить КГИ выходных напряжений и токов, однако полностью исключить погрешность невозможно. При этом необходимо помнить, что изменение коэффициентов ВСМ влияет также на устойчивость и динамические показатели преобразователя.

Заключение

Рассмотрено применение в СЭС ГКС нового типа преобразователей, имитирующих поведение СМ с целью устранения недостатков СИН. На основе квазистационарной электрической модели и уравнения движения СМ с применением теории подчиненного регулирования спроектирована гибридная система управления ВСМ, которая сочетает в себе преимущества СМ и СИН. Апробация системы с помощью компьютерного моделирования в программном пакете Matlab/Simulink подтвердила заявленные тезисы:

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Создание системы автономного электроснабжения компрессорного цеха, оснащенного источниками распределенной генерации с мультиагентным принципом управления / А.А. Шаповало, В.И. Зиберт, М.А. Кияшко, А.Ю. Перевозчиков, В.Б. Филипп // Газовая промышленность. – 2023. – Спецвыпуск 3.2023. – С. 58–74.

- способность системы вносить больший вклад в инерцию энергосистемы, чем классический СИН, что проявляется в уменьшении максимального отклонения и скорости изменения частоты напряжения сети (на 30–50 % в зависимости от возмущающего воздействия);
- способность работать в режиме «ведущий» вне зависимости от наличия напряжения внешней сети (увеличение выходной мощности при снижении амплитуды и частоты питающей сети);
- осуществлять плавный переход на режим работы в автономной сети (отсутствие дополнительных переходных процессов после отключения сети).

Несмотря на преимущества ВСМ в динамических режимах, по результатам компьютерного моделирования в установившемся режиме отмечено ухудшение КГИ выходного тока на 2,05 % в сетевом режиме и КГИ выходного напряжения на 2,29 % в автономном режиме работы по сравнению с СИН, а также наличие статической ошибки по частоте ($\Delta f=1,6$ %) и амплитуде ($\Delta |u|=2,4$ %) выходного напряжения в автономном режиме работы, обусловленное взаимодействием сигналов регулятора частоты, демпфирующей связи, обратной связи активной и реактивной мощности при расчете угла и ЭДС ВСМ. Выявлено, что статические ошибки могут быть исключены с помощью отключения контуров активной и реактивной мощности ($k_p=0$, $k_q=0$) при переходе в автономный режим работы.

Подтверждение теоретических положений, полученных с помощью компьютерного моделирования, позволяет сделать вывод о целесообразности реализации маломощного лабораторного образца для отработки алгоритмов ВСМ в аппаратной части с целью последующего применения ВСМ при построении распределенных сетей электроснабжения производственных объектов транспорта газа вместо классического СИН.

Направление дальнейших теоретических исследований по совершенствованию преобразователей для распределенных сетей КС может быть связано с созданием ВСМ с самонастройкой параметров в процессе работы для более точного регулирования и лучших динамических показателей, а также с применением «скользящего» управления взамен традиционных ПИ-регуляторов тока для улучшения качества регулирования и КГИ в статических режимах работы.

2. Анализ влияния возобновляемых источников энергии с силовыми преобразователями на процессы в современных энергосистемах / Н.Ю. Рубан, А.Б. Аскаров, М.В. Андреев, А.В. Киевец, В.Е. Рудник // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 36. – С. 7–30.
3. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
4. Елаев М.В., Халысмаа А.И., Самойленко В.О. Проблема подсинхронного резонанса в ветроэнергетических установках и системах // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2020. – Т. 12. – № 3 (47). – С. 57–71.
5. Power and voltage control in a grid-connected microgrid system with a back-to-back converter / H. Sekhavatmanesh, H. Mokhtari, M. Hamzeh, A. Asbafkan // The 6th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC2015). – Tehran, Iran, 2015. – P. 468–473.
6. Pustokhin P., Ziuzev A., Kostylev A. B2B-VSC 3-phase 4-leg output voltage stabilization in stand-alone microgrid // 2023 XIX International Scientific Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). – Ekaterinburg, 2023. – P. 1–5.
7. Beck H.-P., Hesse R. Virtual synchronous machine // 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. – Barcelona, Spain, 2007. – P. 1–6.
8. Grid tied converter with virtual kinetic storage / M. van Wessenbeeck, S. de Haan, P. Varela, K. Visscher // 2009 IEEE Bucharest PowerTech. – Bucharest, Romania, 2009. – P. 1–7.
9. Effects of swing equation-based inertial response (SEBIR) control on penetration limits of non-synchronous generation in the GB power system / M. Yu, A. Dy'sko, A. Roscoe, C. Booth, R. Ierna, H. Urdal, J. Zhu // International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015). – Beijing, China, 2015. – P. 1–6.
10. Ruizhu W. Improve the flexibility of power distribution network by using back-to-back voltage source converter: PhD thesis. – Warwick, England, 2018. – 168 p.
11. Modeling and initialization of a virtual synchronous machine for power system fundamental frequency simulations / B. Barać, M. Krpan, T. Capuder, I. Kuzle // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 160116–160134.
12. Pustokhin P., Jassim H.M., Zyuzev A. VSM for microgrid on the compressor stations // 2023 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). – Magnitogorsk, 2023. – P. 155–159.
13. Ревякин Е.Е., Сушков В.В., Хамитов Р.Н. Исследование совместной работы автономной газотурбинной электростанции и генерирующего узла с возобновляемыми источниками электроэнергии // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – Т. 19. – № 1. – С. 14–23.
14. Suul J.A., D'Arco S., Guidi G. Virtual synchronous machine-based control of a single-phase bi-directional battery charger for providing vehicle-to-grid services // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2016. – Vol. 52. – № 4. – P. 3234–3244.
15. Kundur P. Power system stability and control. – New York: McGraw-Hill, 1994. – 979 p.
16. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. – М.: Изд-во НГТИ, 2001. – 250 с.
17. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. Ч. 1. Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат – М.: Изд-во УГППУ, 1997. – 277 с.
18. Lechat Sanjuan S. Voltage oriented control of three-phase boost PWM converters. Design, simulation and implementation of a 3-phase boost battery charger: master's thesis. – Göteborg, Sweden, 2010. – 105 p.
19. D'Arco S., Suul J.A., Fosso O.B. Small-signal modelling and parametric sensitivity of a Virtual Synchronous Machine // 2014 Power Systems Computation Conference. – Wroclaw, Poland, 2014. – P. 1–9.
20. Mo O., D'Arco S., Suul J.A. Evaluation of virtual synchronous machines with dynamic or quasi-stationary machine models // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2017. – Vol. 64. – № 7. – P. 5952–5962.
21. Comparative eigenvalue analysis of synchronous machine emulations and synchronous machines / E. Unamuno, J.A. Suul, M. Molinas, J.A. Barrena // 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Lisbon, Portugal, 2019. – P. 3863–3870.

Информация об авторах

Павел Юрьевич Пустохин, инженер Инженерно-технического центра ООО «Газпром трансгаз Югорск», Россия, 628260, г. Югорск, ул. Мира, 15; аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; ppy12@mail.ru

Анатолий Михайлович Зюзов, доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. a.m.zyuzev@urfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>.

Крюков Олег Викторович, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе ООО «ТСН-Электро», Россия, 603062, г. Нижний Новгород, ул. Горная, 11, к. 2, кв. 72. o.v.kryukov@mail.ru

Поступила в редакцию: 18.07.2024

Поступила после рецензирования: 14.10.2024

Принята к публикации: 08.04.2025

REFERENCES

1. Shapovalov A.A., Zibert V.I., Kiyashko M.A., Perevozchikov A.Yu., Philipp V.B. Development of an autonomous power supply system for compressor workshop equipped with distributed generation sources based on a multi-agent control approach. *Gas Industry*, 2023, no. Special Iss. 3.2023, pp. 58–74. (In Russ.)
2. Ruban N.Yu., Askarov A.B., Andreev M.V., Kievets A.V., Rudnik V.E. Analysis of impact of renewable energy sources with power converters on the processes in modern electric power systems. *Bulletin of PNRPU. Electrical engineering, information technology, control systems*, 2020, no. 36, pp. 7–30. (In Russ.)
3. SS 32144-2013 *Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards of quality of electric energy in general-purpose power supply systems*. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 10 p. (In Russ.)
4. Elaev M.V., Khalyasmaa A.I., Samoylenko V.O. The problem of subsynchronous resonance in wind power plants and systems. *Bulletin of the Kazan State Energy University*, 2020, vol. 12, no. 3 (47), pp. 57–71. (In Russ.)
5. Sekhavatmanesh H., Mokhtari H., Hamzeh M., Asbafkan A. Power and voltage control in a grid-connected microgrid system with a back-to-back converter. *The 6th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC2015)*. Tehran, Iran, IEEE Publ., 2015. pp. 468–473.
6. Pustokhin P., Ziuzev A., Kostylev A. B2B-VSC 3-phase 4-leg output voltage stabilization in stand-alone microgrid. *2023 XIX International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED)*. Ekaterinburg IEEE Publ., 2023. pp. 1–5.
7. Beck H.-P., Hesse R. Virtual synchronous machine. *9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*. Barcelona, Spain, IEEE Publ., 2007. pp. 1–6.
8. Van Wessenbeeck M., De Haan S., Varela P., Visscher K., Grid tied converter with virtual kinetic storage. *2009 IEEE Bucharest PowerTech*. Bucharest, Romania, IEEE Publ., 2009. pp. 1–7.
9. Yu M., Dy'sko A., Roscoe A., Booth C., Ierna R., Urdal H., Zhu J. Effects of swing equation-based inertial response (SEBIR) control on penetration limits of non-synchronous generation in the GB power system. *International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015)*. Beijing, China, IEEE Publ., 2015. pp. 1–6.
10. Ruizhu W. *Improve the flexibility of power distribution network by using back-to-back voltage source converter*. PhD thesis. Warwick, England, 2018. 168 p.
11. Barac B., Krpan M., Capuder T., Kuzle I. *Modeling and initialization of a virtual synchronous machine for power system fundamental frequency simulations*. IEEE Publ., 2021. vol. 9, pp. 160116–160134.
12. Pustokhin P., Jassim H.M., Zyuzev A. VSM for microgrid on the compressor stations. *2023 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)*. Magnitogorsk, IEEE Publ., 2023. pp. 155–159.
13. Revyakin E.E., Sushkov V.V., Khamitov R.N. Research on cooperative working of isolated gas-turbine power plant and renewable energy sources generation node. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, vol. 19, no. 1, pp. 14–23. (In Russ.)
14. Suul J.A., D'Arco S., Guidi G. Virtual synchronous machine-based control of a single-phase bi-directional battery charger for providing vehicle-to-grid services. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, vol. 52, no. 4, pp. 3234–3244.
15. Kundur P. *Power system stability and control*. New York, McGraw-Hill Publ., 1994. 979 p.
16. Efimov A.A., Schreiner R.T. *Active converters in regulated AC drives*. Novouralsk, NSTU Publ. house, 2001. 250 p. (In Russ.)
17. Shrejner R.T. *Systems of subordinate regulation of electric drives: a textbook for universities. Part 1. DC electric drives with subordinate coordinate regulation*. Ekaterinburg, USVPU Publ. house, 1997. 277 p. (In Russ.)
18. Lechat Sanjuan S. *Voltage oriented control of three-phase boost PWM converters. Design, simulation and implementation of a 3-phase boost battery charger*. Master's thesis. Göteborg, Sweden, 2010. 105 p.
19. D'Arco S., Suul J.A., Fosso O.B. Small-signal modelling and parametric sensitivity of a Virtual Synchronous Machine. *2014 Power Systems Computation Conference*. Wroclaw, Poland IEEE Publ., 2014. pp. 1–9.
20. Mo O., D'Arco S., Suul J.A. Evaluation of virtual synchronous machines with dynamic or quasi-stationary machine models. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, vol. 64, no. 7, pp. 5952–5962.
21. Unamuno E., Suul J.A., Molinas M., Barrera J.A. Comparative eigenvalue analysis of synchronous machine emulations and synchronous machines. *45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Lisbon, Portugal, IEEE Publ., 2019. pp. 3863–3870.

Information about the authors

Pavel Yu. Pustokhin, Engineer, Engineering and Technical Center «Gazprom transgaz Yugorsk» LLC, 15, Mira street, Yugorsk, 628260, Russian Federation; Postgraduate Student, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, 19, Mira street, Yekaterinburg, 620002, Russian Federation. ppy12@mail.ru

Anatolii M. Ziuzev, Dr. Sc., Associate Professor, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, 19, Mira street, Yekaterinburg, 620002, Russian Federation. a.m.zyuzev@urfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>.

Oleg V. Kryukov, Dr. Sc., Deputy Director, Research of «TSN-electro» LLC, 11, bld. 2, apt. 72, Gornaya street, Nizhny Novgorod, 603062, Russian Federation. o.v.kryukov@mail.ru

Received: 18.07.2024

Revised: 14.10.2024

Accepted: 08.04.2025