



УДК 621.3
DOI: 10.25206/1813-8225-2022-181-50-54

В. В. СУШКОВ¹
Е. Е. РЕВЯКИН²

¹Нижевартовский
государственный университет,
г. Нижневартовск
²Тюменский
индустриальный университет,
г. Тюмень

СИСТЕМА СИНХРОНИЗАЦИИ ФАЗОВЫХ УГЛОВ НАПРЯЖЕНИЙ ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ ИХ ВКЛЮЧЕНИИ НА СОВМЕСТНУЮ РАБОТУ

В статье исследуется система управления угловым положением ротора синхронного генератора для решения задачи синхронизации с сетью или другими электрогенераторами. При стандартном подходе к решению задач синхронизации нарушается условие равенства частот синхронизируемых напряжений в момент включения объединяющего выключателя, что приводит к возникновению уравнивающего тока в рассматриваемой сети. Предлагаемый подход к осуществлению синхронизации позволит снизить влияние переходных процессов на сеть и оборудование, а также повысить управляемость системы синхронизации, что продемонстрировано путем имитационного моделирования.

Ключевые слова: автоматическая точная синхронизация, управление положением ротора, система управления скоростью дизельного генератора, распределенная генерация.

Введение. Развитие промышленного и сельского хозяйства в районах, удалённых от крупных энергосистем, способствует распространению электротехнических комплексов на базе автономных источников электроэнергии. Как правило, генерирующее оборудование таких комплексов работает изолированно на выделенную нагрузку.

Однако вместе с расширением хозяйства растёт доля удалённой нагрузки, что требует создания распределительной сети, которая обеспечивала бы электроэнергией дефицитные районы существующими установленными мощностями. Такая совокупность генераторов, удалённой нагрузки и линий электропередачи образует мини-энергосистему с распределенной генерацией [1, 2]. Вместе с этим появится ряд технических за-

дач, свойственных любым энергосистемам. Одной из таких задач является задача точной синхронизации распределенных генераторов друг с другом.

Тема синхронизации затрагивается в исследованиях как отечественных, так и зарубежных авторов. Системы синхронизации генераторов на основе методов автоматического управления с эталонной моделью исследуются в работе [3]. Основным направлением исследований зарубежных авторов является разработка систем синхронизации распределенных генераторов на базе инверторов [4, 5].

Постановка задачи. Синхронизация заключается в уравнивании векторов генерируемых напряжений на комплексной плоскости. Для этого необходимо, чтобы:

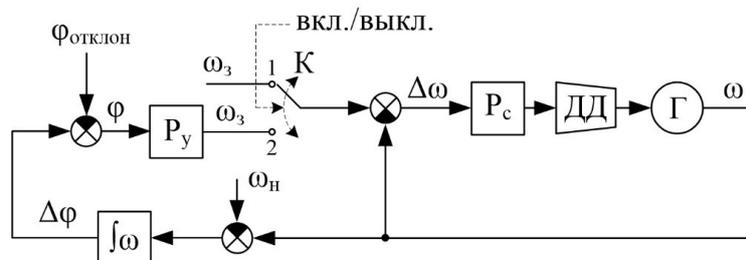


Рис. 1. Система автоматического регулирования скорости дизельного генератора с контуром отклонения по углу

1) амплитуды синхронизируемых напряжений одноимённых фаз были равны друг другу $U_1 = U_2$;

2) частоты синхронизируемых напряжений были равны друг другу $\omega_1 = \omega_2$;

3) фазовый сдвиг между синхронизируемыми напряжениями одноимённых фаз отсутствовал $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 0$.

На практике для выполнения третьего условия вектору синхронизируемого напряжения задают некоторую относительную скорость, тем самым нарушая второе условие точной синхронизации [6]. Это приводит к возникновению уравнительного тока при включении генераторов на совместную работу. И, хотя уравнительный ток при должной настройке системы синхронизации мал и не способен привести к аварии в незагруженной энергосистеме, следует заметить, что при синхронизации трёх и более генераторов их включение на совместную работу происходит поочерёдно с ожиданием окончания переходного процесса после каждого нового подключения. Следовательно, процесс объединения изолированных генераторов в единую энергосистему затягивается, а время простоя удалённой от источников электроэнергии нагрузки увеличивается. Ещё одна особенность стандартного подхода к осуществлению синхронизации заключается в том, что его реализация не подразумевает понятия регулирования угла напряжения. Это положение ограничивает возможности системы управления скоростью вращения генератора и снижает её маневренность.

Таким образом, для точного выполнения всех условий синхронизации требуется включить объединяющий выключатель при устранённом фазовом сдвиге синхронизируемых напряжений и при нулевой относительной скорости вращения роторов синхронизируемых генераторов.

Управление углом поворота ротора. Для того, чтобы уравнивать фазы синхронизируемых напряжений без нарушения условия равенства частот, необходимо дополнить контур управления скоростью генератора контуром управления положением угла ротора. Задача системы управления положением ротора генератора в контексте синхронизации заключается в том, чтобы изменить положение ротора синхронизируемого генератора на требуемый угол, равный углу между векторами синхронизируемых напряжений, и предотвращать его дальнейшее прокручивание. Функциональная схема такой системы показана

на рис. 1. Для исследования выбрана система с дизельным генератором.

Контур регулирования угла задействуется переключением ключа К в положение «2» после синхронизации амплитуды и частоты генерируемого напряжения. Угол $\varphi_{\text{отклон}}$, на который требуется повернуть ротор машины, сравнивается с величиной угла $\Delta\varphi$, на который повернулся ротор с момента переключения ключа. Сигнал ошибки сравнения φ поступает на регулятор P_φ , который формирует задающий сигнал скорости ω_φ . Задающий сигнал ω_φ сравнивается с текущей скоростью вращения ротора машины ω , и результат сравнения $\Delta\omega$ поступает на регулятор скорости P_c , который формирует управляющее воздействие на топливную систему дизельного генератора. После поворота ротора генератора на требуемый угол сигнал на входе регулятора принимает нулевое значение, система управления приходит в установившееся состояние, а ключ К переходит в положение «1». Далее синхронный генератор можно подключать к сети.

Моделирование и результаты эксперимента. Для исследования динамических переходных процессов описанной ранее системы была разработана имитационная математическая модель рассматриваемого объекта в программном комплексе MATLAB/Simulink.

Основными элементами имитационной модели, представленной на рис. 2, являются синхронный генератор и дизельный двигатель. В качестве модели синхронного генератора используется стандартная трёхконтурная модель в форме Парка из библиотеки элементов SimPowerSystems [7]. Параметры синхронной машины также взяты из имеющейся встроенной библиотеки синхронных генераторов, и их значения здесь не приводятся.

Модель дизельного двигателя описана в работе [8]. На рис. 2 блок модели дизельного двигателя раскрыт внутри выделенной пунктирной линией области. Исполнительный механизм системы подачи топлива дизельного двигателя представлен передаточной функцией:

$$W_A(s) = \frac{K(1 + T_1 s)}{s(1 + T_2 s)(1 + T_3 s)},$$

где $K = 40$, $T_1 = 0,25$ с, $T_2 = 0,009$ с, $T_3 = 0,0384$ с.

Время зажигания и время рабочего хода поршня дизельного генератора учтены звеном чистого запаздывания с постоянной времени $T_D = 0,024$ с:

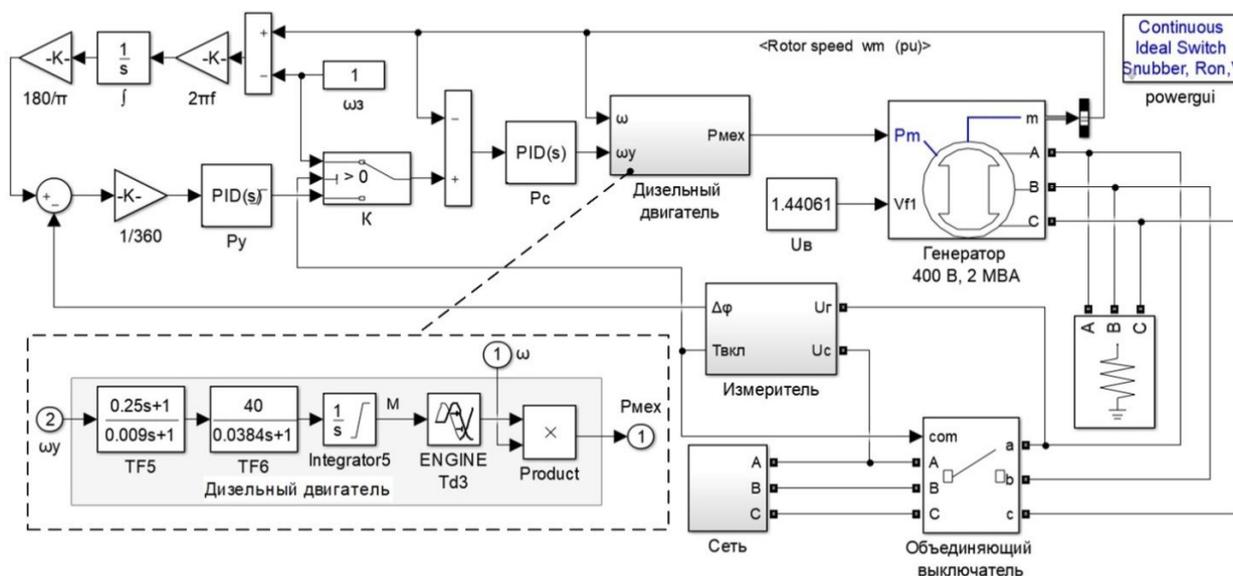


Рис. 2. Имитационная модель системы синхронизации угла напряжения дизельного генератора

$$W_D(s) = e^{-sT_D}.$$

В приведённой модели формирование закона подачи топлива для регулирования скорости осуществляется ПИД-регулятором. ПИД и ПИ-регуляторы позволяют осуществить регулирование скорости по астатическому закону, который является основным при изолированной работе генератора до его синхронизации с сетью. После синхронизации с сетью регулирование осуществляется по пропорциональному закону с фиксированным статизмом [9]. Ручная настройка регуляторов в рассматриваемой системе и подобных ей является трудоёмкой задачей и на практике выполняется во время пусконаладочных работ. Однако в составе программного комплекса Matlab имеются инструменты, позволяющие выполнить эту настройку автоматически. Полученные автоматической настройкой коэффициенты ПИД-регулятора скорости позволяют добиться наименьшего перерегулирования при максимальном быстродействии.

Для регулирования угла ротора синхронной машины и формирования закона изменения скорости также выбран ПИД-регулятор. Пропорциональный закон не удовлетворяет требованию отсутствия статической ошибки после регулирования, а ПИ-закон показал меньшее быстродействие сравнительно с ПИД-законом. Настройка коэффициентов регулятора также осуществлялась автоматически при помощи встроенного инструмента PID Tuner. Дополнительно было введено ограничение по выходному сигналу изменения скорости в пределах от 0,998 о.е. до 1,002 о.е., что соответствует ограничению частоты выходного напряжения в пределах $50 \pm 0,1$ Гц. Данное ограничение необходимо для исключения срабатывания технологических и иных защит в процессе регулирования угла и может быть принято вплоть до $50 \pm 0,4$ Гц [10].

В имитационной модели также присутствуют блоки «измеритель», «нагрузка» и «сеть». Блок

«измеритель» необходим для сравнения и преобразования в относительный угол напряжения синхронизируемого генератора и сети. Блок «сеть» представляет собой аналогичный дизельный генератор с нагрузкой. Нагрузка генератора представлена соответствующим блоком и составляет 65 % от номинальной мощности генератора. Так как по условию задачи производится синхронизация угла напряжения при уже синхронизированных частотах и модулях напряжений, то в имитационной модели не учитывается работа АРВ, а напряжение возбуждения задаётся константой.

Для оценки результатов эксперимента также рассматривается стандартная система синхронизации угла при тех же начальных условиях. Для этого в ранее описанной системе устраняется контур регулирования угла. Вместо него добавляется переключатель уставки скорости с 1 о.е. до 1.001 о.е., что соответствует изменению частоты на 0,05 Гц. Допустимое скольжение при синхронизации регламентируется стандартом IEEE 1547-2003 и для генератора рассматриваемой мощности не должно превышать 0,1 Гц [11]. При достижении углом требуемого значения выдаётся сигнал на включение объединяющего выключателя, а также сигнал на изменение уставки скорости до номинального значения.

Результаты имитационного моделирования приведены на рис. 3–5. На рис. 3 показаны зависимости изменения электрического угла напряжения фазы А генератора. На рис. 4 показаны зависимости изменения тока в процессе синхронизации. На рис. 5 показаны зависимости изменения скорости в процессе регулирования угла в предложенной двухконтурной системе и в системе, реализующей синхронизацию по стандартной методике. В соответствии с начальными условиями необходимо изменить угол фазы напряжения генератора на 50 электрических градусов, что соответствует повороту ротора машины на 0,872 радианов. Модуль напряжения и его частота считаются синхронизированными

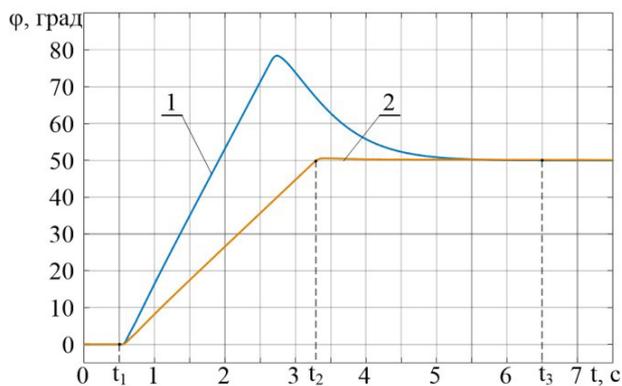


Рис. 3. Зависимости изменения угла фазы напряжения

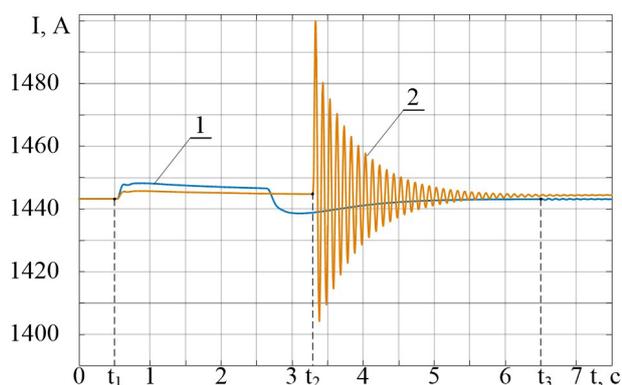


Рис. 4. Зависимости изменения тока в фазах

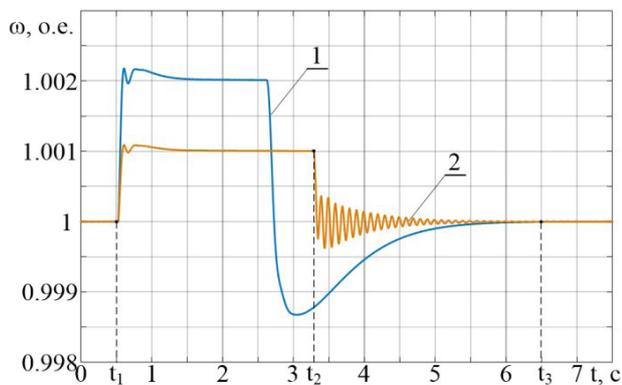


Рис. 5. Зависимости изменения скорости вращения ротора

с сетевыми к моменту начала синхронизации углов.

Сигнал на запуск синхронизации угла подаётся в момент времени t_1 . При моделировании стандартной методики синхронизации включение объединяющего выключателя происходит в момент времени $t_2 = 52,79$ с, когда угол достигает требуемого значения в 50 градусов (кривая 2 на рис. 3).

В системе регулирования положением ротора сигнал на включение объединяющего выключателя подаётся в момент времени $t_3 = 56$ с, когда система регулирования приходит

в установившееся состояние, а условия синхронизации принимают нулевое значение.

Из зависимости изменения тока (рис. 4) видно, что при синхронизации по стандартной методике, после включения объединяющего выключателя, возникает уравнивающий ток, обусловленный ненулевой разностью скоростей двух синхронизируемых генераторов в момент включения объединяющего выключателя. Напротив, в системе синхронизации с регулированием угла в момент включения объединяющего выключателя t_3 уравнивающий ток практически отсутствует, что объясняется точным выполнением всех условий синхронизации. Следует заметить, что при синхронизации стандартным способом уравнивающий ток не так велик, если сравнивать его с рабочим током рассматриваемой синхронной машины, а переходный процесс затухает за 4–6 секунд, что не является существенным временем при синхронизации двух генераторов между собой. Однако в ситуации, когда синхронный генератор работает на границе своей статической устойчивости, что вполне возможно для децентрализованной генерации, даже небольшой скачок тока, как в рассматриваемом примере, способен привести к нарушению устойчивой работы. При синхронизации предлагаемым способом такой вариант развития событий исключается.

Ещё одним очевидным достоинством предлагаемого способа является повышение манёвренности группы генераторов при синхронизации. Если мы рассматриваем энергосистему, в которой работает несколько генераторов и их требуется синхронизировать, то синхронизация стандартным способом будет осуществляться поочерёдно для каждого генератора с ожиданием завершения переходного процесса после каждого нового подключения. Это, в свою очередь, затянёт общее время синхронизации. Особенность предложенного способа заключается в возможности изменить углы фаз на требуемую величину для всех генераторов, которые необходимо синхронизировать, а после включить их на совместную работу одновременно без возникновения уравнивающих токов. Это достигается тем, что в момент включения будут соблюдены все условия синхронизации.

Заключение. Таким образом, предложенный способ синхронизации генераторов показал свою эффективность, как при синхронизации двух генераторов между собой, что выражается в практически полном снижении уравнивающих токов после включения объединяющего выключателя, так и при синхронизации группы генераторов друг с другом, что выражается в снижении времени от момента начала синхронизации до момента, когда все генераторы включены на совместную работу.

Библиографический список

1. Ackermann T., Andersson G., Soder L. Distributed generation: a definition // Electric Power Systems Research. 2001. Vol. 157. P. 195–204. DOI: 10.1016/S0378-7796(01)00101-8.
2. Ackermann T., Knyazkin V. Interaction between distributed generation and the distribution network:

operation aspects // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. 2002. Vol. 2. P. 1357–1362 DOI: 10.1109/TDC.2002.1177677.

3. Беляев Н. А. Синтез систем адаптивной синхронизации генераторов с электрической сетью на основе методов автоматического управления с эталонной моделью: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2015. 19 с.

4. Liu J., Hossain M. J., Lu J. Switching performance optimization for a hybrid AC/DC microgrid using an improved VSG control strategy // 2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT-Asia). 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2017.8378327.

5. Liu J., Hossain M. J., Lu J. Switching performance optimization for a hybrid AC/DC microgrid using an improved VSG control strategy // 2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT-Asia). 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2017.8378327.

6. Овчаренко Н. И. Автоматика энергосистем / под ред. А. Ф. Дьякова. Москва: Издат. дом МЭИ, 2016. 476 с.

7. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. Москва: ДМК Пресс, 2007. 288 с. ISBN 978-5-388-00020-0.

8. Yeager K. E., Willis J. R. Modeling of emergency diesel generators in an 800 megawatt nuclear power plant // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1993. Vol. 8, no. 3. P. 433–441. DOI: 10.1109/60.257056.

9. Гуревич Ю. Е., Илюшин П. В. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: моногр. Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018. 280 с.

10. СТО 59012820.27.100.003-2012. Стандарт организации ОАО «СО ЕЭС». Регулирование частоты и перетоков активной мощности в ЕЭС России. Нормы и требования.

Введ. 2012–12–05. Москва, 2012. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200102866> (дата обращения: 10.11.2021).

11. IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems // IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003). DOI: 10.1109/IEEESTD.2003.94285.

СУШКОВ Валерий Валентинович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры энергетики Нижневарттовского государственного университета, г. Нижневарттовск.

SPIN-код: 1060-8949

AuthorID (РИНЦ): 446636

AuthorID (SCOPUS): 55971218900

Адрес для переписки: sushkovvv@gray-nv.ru

РЕВЯКИН Егор Евгеньевич, аспирант кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета, г. Тюмень.

SPIN-код: 3627-6031

AuthorID (РИНЦ): 1097835

Адрес для переписки: revyakin.egor.ev@gmail.com

Для цитирования

Сушков В. В., Ревякин Е. Е. Система синхронизации фазовых углов напряжений генераторов при их включении на совместную работу // Омский научный вестник. 2022. № 1 (181). С. 50–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-181-50-54.

Статья поступила в редакцию 15.11.2021 г.

© В. В. Сушков, Е. Е. Ревякин