

Управление режимами систем электроснабжения с установками распределенной генерации, сформированными на основе асинхронизированных машин*

Ю.Н. БУЛАТОВ^{1,a}, А.В. КРЮКОВ^{2,b}, Э.К. ШУМАНСКИЙ^{1,c}

¹ 665709, РФ, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Братский государственный университет

² 664074, РФ, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Иркутский государственный университет путей сообщения; РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет

^a bulatovyura@yandex.ru ^b and kryukov@mail.ru ^c shumanskij@yandex.ru

Применение в установках распределенной генерации асинхронизированных генераторов (АСГ) позволяет получить следующие положительные результаты: повысить пределы устойчивости; расширить диапазоны регулирования реактивной мощности; упростить процессы синхронизации с сетью благодаря возможности управления частотой и фазой ЭДС; обеспечить работу агрегата в синхронном режиме при повреждении в одной из обмоток возбуждения.

В статье приводится описание разработанных компьютерных моделей высоковольтного и низковольтного АСГ, оснащенных системами автоматического регулирования возбуждения на IGBT-транзисторах, позволяющих изменять амплитуду и частоту напряжения. Исследования проводились в системе MATLAB с применением пакетов Simulink и SimPowerSystems. Исследованы режимы автономной работы АСГ при подключении и сбросе нагрузки, представлены результаты сравнения режимов работы электрической сети с установкой распределенной генерации, работающей на базе синхронных генераторов (СГ) и АСГ, а также описаны процессы синхронизации АСГ с сетью. Результаты моделирования автономно работающего асинхронизированного генератора показали, что использование сигнала отклонения частоты позволяет уменьшить отклонения регулируемых параметров в режимах подключения и отключения нагрузки, а также при включении АСГ в сеть методом самосинхронизации. При работе АСГ параллельно с сетью асинхронные генераторы устойчиво работают при достаточно больших возмущениях; в аналогичных условиях динамическая устойчивость системы с синхронными машинами не обеспечивается. Разработанная система автоматического регулирования возбуждения, а также пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор скорости вращения ротора асинхронизированного генератора плавно регулируют заданные параметры, значительно уменьшая колебания напряжения и частоты.

Ключевые слова: установки распределенной генерации, асинхронизированный генератор, автоматические регуляторы возбуждения и частоты, системы электроснабжения, режимы работы, синхронизация, моделирование

* Статья получена 18 октября 2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной электроэнергетики привело к необходимости использования распределенной генерации (РГ) и построения адаптивных систем на основе технологий искусственного интеллекта при управлении режимами работы систем электроснабжения (СЭС) с установками РГ [1–4]. Для реализации технологий РГ могут использоваться синхронные (СГ) и асинхронизированные генераторы (АСГ) [5] с устройствами автоматического регулирования возбуждения (АРВ). В отличие от СГ асинхронизированные машины могут работать в режимах не только выдачи, но и значительного потребления реактивной мощности [5–7], что позволяет обеспечить повышение устойчивости и живучести СЭС. Кроме этого, АСГ обладают адаптационными свойствами, обеспечивающими получение следующих положительных эффектов [5–7]:

- повышение эффективности установок РГ малой мощности;
- увеличение запасов устойчивости;
- расширение пределов регулирования реактивной мощности;
- обеспечение синхронной работы при повреждении в одной из обмоток возбуждения;
- упрощение процесса синхронизации с сетью из-за возможности управления частотой и фазой ЭДС независимо от частоты вращения ротора.

Применение АСГ может быть экономически и технически целесообразно не только для традиционных тепловых и гидравлических электростанций (ГЭС) большой и средней мощности, но и для ветроэнергетических установок и малых ГЭС [8]. Асинхронизированные машины можно эффективно применять для работы в генераторном и двигательном режимах для обратимых агрегатов гидроаккумулирующих [9] и приливных электростанций, а также в электромеханических преобразователях частоты [10].

В статье приводится описание разработанных компьютерных моделей высоковольтного и низковольтного АСГ с системой автоматического регулирования возбуждения на IGBT-транзисторах и пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) регулятором скорости вращения ротора. Для АСГ использовалась модель асинхронной машины с фазным ротором. Исследования проводились в системе MATLAB с применением пакетов Simulink и SimPowerSystems. Были исследованы режимы автономной работы АСГ при подключении и сбросе нагрузки. Кроме того, представлены результаты сравнения режимов работы СЭС с установкой РГ, работающей на базе СГ и АСГ, а также результаты моделирования процессов синхронизации АСГ с сетью.

1. ОПИСАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ АСГ

Асинхронизированный генератор является разновидностью машины двойного питания [11]. Основное отличие АСГ от обычного синхронного генератора состоит в наличии нескольких обмоток возбуждения, сдвинутых друг относительно друга и подключенных к источнику переменного тока [12]. На рис. 1 представлена схема модели, разработанная в системе MATLAB для исследования режимов работы АСГ. В ее состав входили моде-

ли следующих элементов: асинхронной машины, системы возбуждения, турбины, регуляторов напряжения и скорости, нагрузки, эквивалента электроэнергетической системы (ЭЭС) большой мощности.

Система возбуждения АСГ (блок Excitation system for ASG на рис. 1) моделировалась управляемым инвертором, получающим питание от источника постоянного напряжения. Инвертор, построенный на IGBT-транзисторах, выдавал переменное синусоидальное напряжение частотой 12 Гц, которое поступало на трехфазную обмотку ротора АСГ. Схема модели системы возбуждения АСГ с регуляторами, построенная в системе MATLAB, представлена на рис. 2. Напряжение на обмотке статора АСГ, вычисленное на основе продольной и поперечной составляющих, сравнивалось с заданной уставкой, и отклонение подавалось на ПИД-регулятор (блок PID Controller на рис. 2). Затем с помощью специальных блоков (Discrete Virtual PLL, dq0 to abc на рис. 2) формировались синусоидальные напряжения, которые подавались на генератор управляющих сигналов с широтно-импульсной модуляцией (PWM Generator). С целью управления частотой вырабатываемого инвертором напряжения использовался сигнал отклонения частоты, который складывался с опорной частотой 12 Гц блока Discrete Virtual PLL. Вычисленная таким образом частота являлась задающей для генератора управляющих сигналов. После этого генератор формировал управляющие импульсы на IGBT-транзисторы инвертора (IGBT Inverter). Трехфазное напряжение с инвертора после LC-фильтра подавалось на обмотку ротора АСГ.

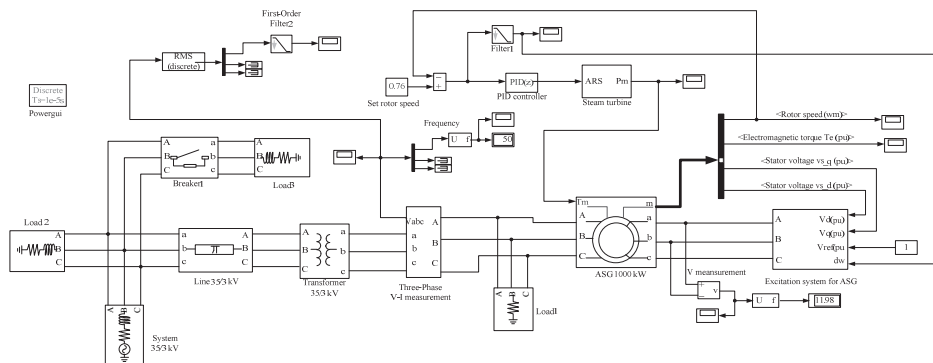


Рис. 1. Схема испытания модели АСГ в MATLAB

Fig. 1. Test scheme of the ASG model in MATLAB

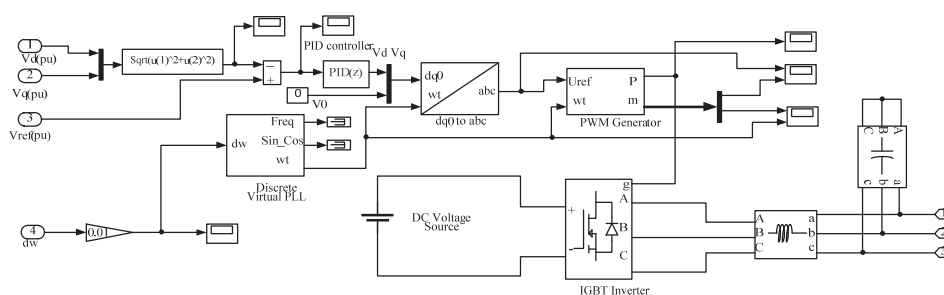


Рис. 2. Схема модели системы возбуждения АСГ в MATLAB

Fig. 2. Diagram of the model of the ASG excitation system in MATLAB

Для поддержания заданной скорости вращения ротора генератора применялся ПИД-регулятор (блок PID Controller на рис. 1), который воздействовал на турбину.

Представленная компьютерная модель может использоваться для исследования режимов работы низковольтного и высоковольтного АСГ. Параметры низковольтной и высоковольтной машин, применяемых для моделирования АСГ, представлены в таблице.

Паспортные данные асинхронных машин, используемых для моделей АСГ

Passport data of asynchronous machines used for ASG models

Параметры машины	Значения параметров машины	
	Высоковольтная машина	Низковольтная машина
Номинальная мощность $P_{ном}$, кВт	1000	15
Синхронная частота вращения n_0 , об/мин	1000	1000
Коэффициент полезного действия η , %	95,8	89
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,858	0,85
Номинальное напряжение, В	3000	380
Номинальный ток, А	118	31
Кратность пускового тока	6,3	7
Кратность пускового момента	1,2	2,3
Число пар полюсов p	3	3

Для вращения высоковольтного АСГ предполагалось использование паровой турбины, математическая модель которой характеризовалась следующей передаточной функцией [13, 14]:

$$W_T(s) = \frac{P_T}{\mu} = \frac{1}{T_T s + 1}, \quad (1)$$

где P_T – мощность турбины; μ – открытие регулирующего органа; T_T – постоянная времени турбины, определяемая запаздыванием в преобразовании энергии (принималась равной 0,2 с); s – комплексная переменная.

В качестве первичного двигателя для низковольтного АСГ предполагалось применение гидротурбины. Схема ее модели состояла из главного сервомотора, управляющего открытием направляющего аппарата, и собственно гидравлической турбины (рис. 3). Математическая модель главного сервомотора с регулятором представлена следующей передаточной функцией [15]:

$$W(s) = \frac{T_i s + 1}{(T_i s + 1)(T_s s + 1) + n_i T_i s}, \quad (2)$$

где n_i – коэффициент усиления изодромного регулятора (при моделировании принимался равным 10 о.е.); T_i – постоянная времени регулятора (принималась равной 0,1 с); T_s – постоянная времени сервомотора (принималась равной 0,25 с).

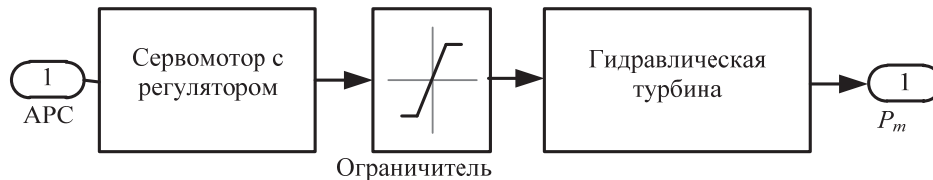


Рис. 3. Структурная схема модели гидротурбины:

АПС – автоматический регулятор скорости; P_m – механическая мощность на валу гидротурбины

Fig. 3. The structural diagram of the model of a hydraulic turbine:

ASR is an automatic speed regulator; P_m is mechanical power on the turbine shaft

Гидравлическая турбина моделировалась передаточной функцией, учитывающей гидроудар [16]:

$$W_G(s) = \frac{1 - a \cdot T_G s}{1 + 0,5a \cdot T_G s}, \quad (3)$$

где T_G – постоянная времени гидротурбины (при моделировании принималась равной 0,344 с); a – положение открытия направляющего аппарата (принималось в диапазоне 0...1).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На первом этапе моделировались режимы высоковольтного и низковольтного АСГ, работающих на выделенную нагрузку. Для высоковольтного АСГ в качестве возмущения рассматривалось подключение дополнительной нагрузки, вызывающей снижение частоты и напряжения на обмотке статора. Результаты моделирования показали, что при подключении дополнительной нагрузки регуляторы правильно воздействуют на АСГ, выравнивая заданную скорость вращения ротора и напряжение на обмотке статора (рис. 4).

При исследовании автономно работающего низковольтного АСГ рассматривался режим резкой разгрузки, приводящий к скачку частоты в сети и перенапряжению на обмотке статора. Необходимо отметить, что использование сигнала отклонения частоты для ее регулирования на обмотке ротора АСГ позволило снизить на 15 % повышение частоты и уменьшить на 14 % возникающее перенапряжение (рис. 5).

Для сравнения работы классического синхронного генератора с АСГ было выполнено моделирование ЭЭС, схема которой представлена на рис. 6. Рассматривался режим подключения достаточно большой для данной сети дополнительной нагрузки мощностью $20 + j6$ МВ·А на напряжении 35 кВ.

Результаты моделирования показали, что при таком возмущении система с СГ теряет устойчивость в отличие от системы с АСГ. Соответствующие осциллограммы напряжения и отклонения скорости вращения ротора генераторов представлены на рис. 7 и 8. Сравнение режимов работы АСГ и СГ показало более высокие пределы динамической устойчивости у АСГ.

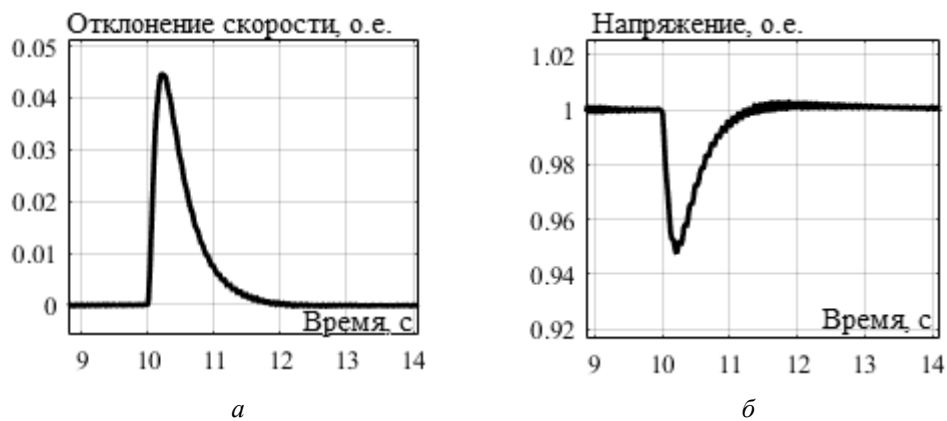


Рис. 4. Осциллограммы отклонения скорости (а) и напряжения (б) при подключении к автономно работающему АСГ дополнительной нагрузки

Fig. 4. Oscillograms of speed (a) and voltage (b) deviation when connecting an additional load to the autonomously operating ASG

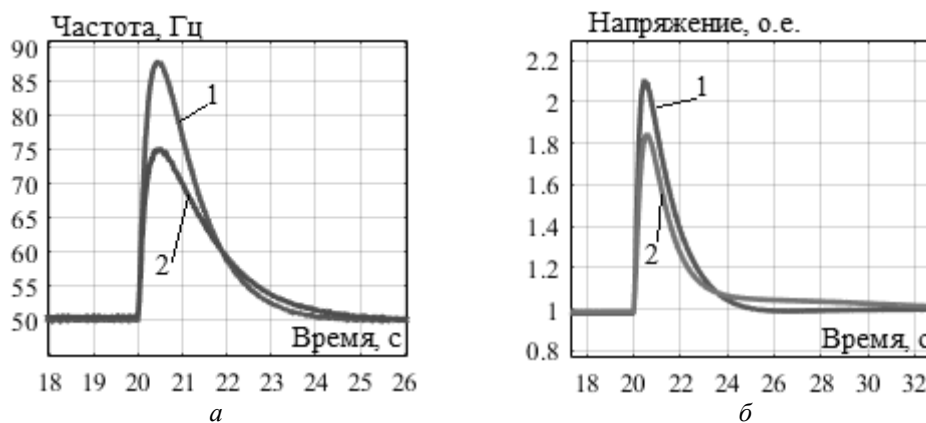


Рис. 5. Осциллограммы частоты (а) и напряжения (б) генератора при разгрузке:

1 – без изменения частоты напряжения на обмотке ротора; 2 – частота напряжения на обмотке ротора изменялась автоматически

Fig. 5. Oscillograms of frequency (a) and voltage (b) of the generator during unloading:

1 is without changing the frequency of the voltage on the rotor winding; 2 is voltage frequency on the rotor winding changed automatically

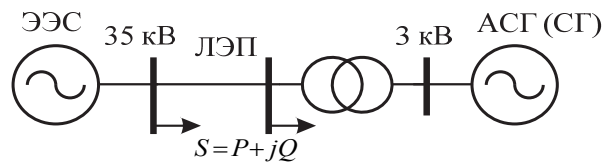


Рис. 6. Схема исследуемой ЭЭС с высоковольтным генератором

Fig. 6. Scheme of the investigated EPS with a high-voltage generator

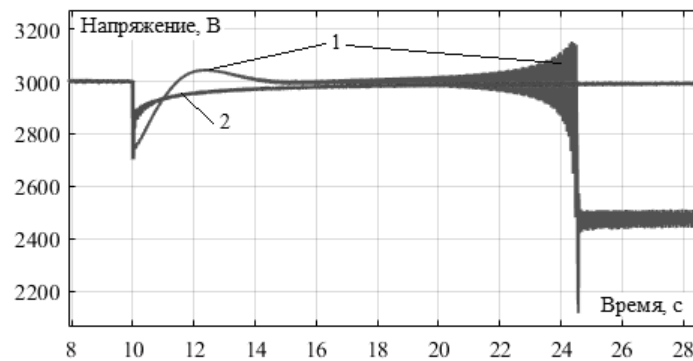


Рис. 7. Осциллограммы напряжения генератора при подключении мощной активно-индуктивной нагрузки:

1 – СГ; 2 – АСГ

Fig. 7. Oscillograms of the generator voltage when connecting a powerful active-inductive load:

1 is SG; 2 is ASG

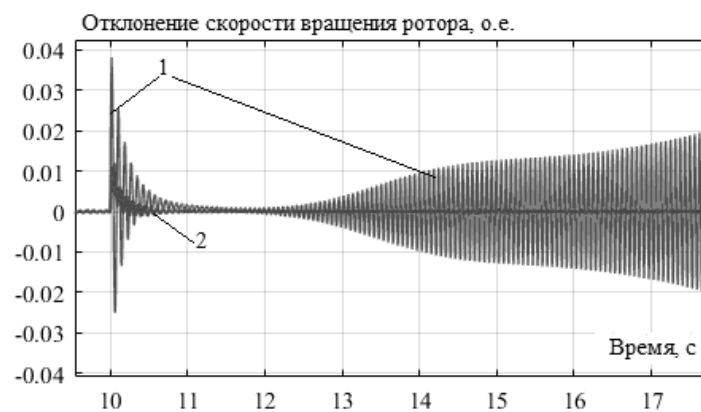


Рис. 8. Осциллограммы отклонения скорости вращения ротора генератора при подключении мощной активно-индуктивной нагрузки:

1 – СГ; 2 – АСГ

Fig. 8. Oscillograms of generator rotor speed deviation when connecting a powerful active-inductive load:

1 is SG; 2 is ASG

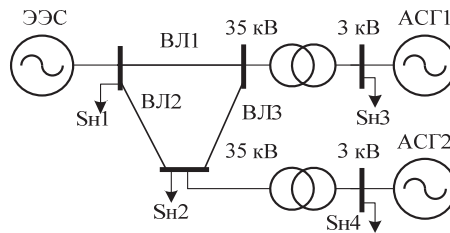


Рис. 9. Схема для исследования режимов синхронизации АСГ с сетью

Fig. 9. The diagram for the study of the ASG network synchronization modes

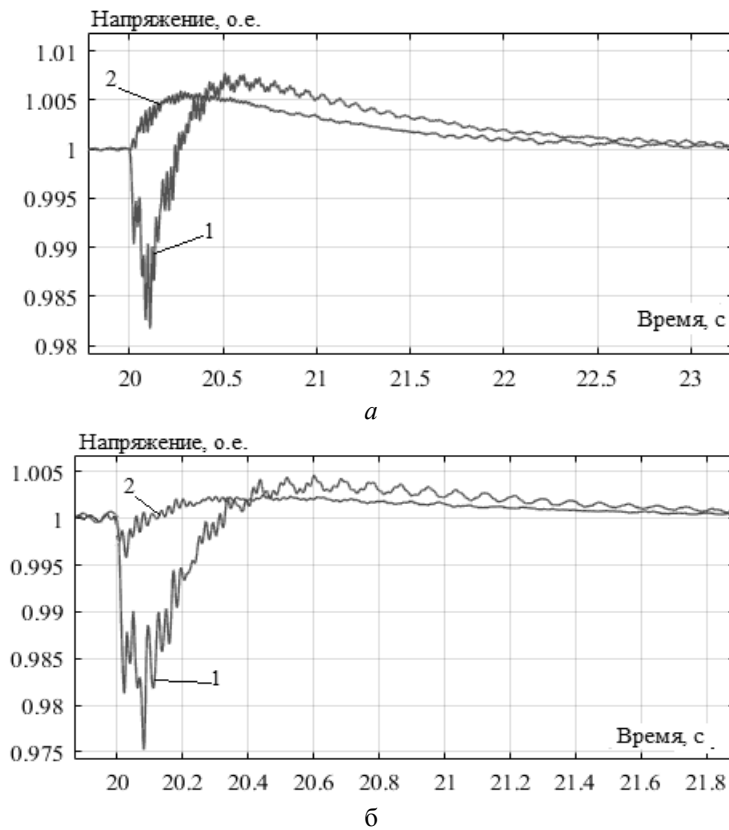


Рис. 10. Осциллограммы напряжений:

a – напряжение генератора, находящегося под нагрузкой (АСГ1);
б – напряжение генератора, включаемого на параллельную работу (АСГ2); *1* – без изменения частоты напряжения на обмотке ротора;
2 – частота напряжения на обмотке ротора изменялась автоматически

Fig. 10. Oscillograms of voltages:

a is voltage of the generator under load (ASG1); *b* is voltage of the generator, included in parallel operation (ASG2); *1* is without changing the frequency of the voltage on the rotor winding; *2* is voltage frequency on the rotor winding changed automatically

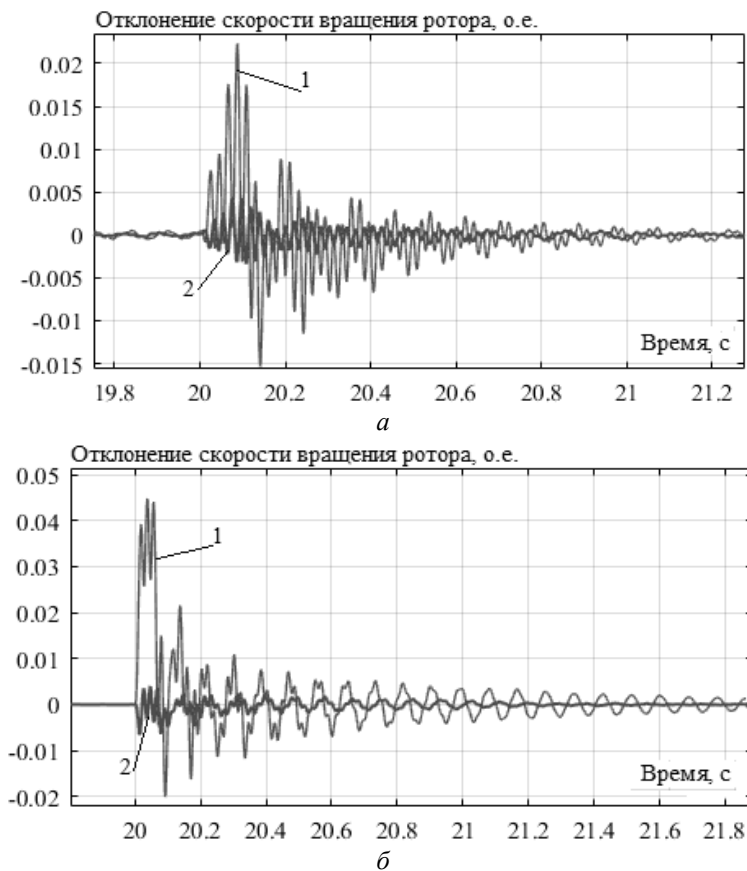


Рис. 11. Осциллограммы отклонения скорости вращения ротора генератора:

a – отклонение скорости у генератора, находящегося под нагрузкой (АСГ1); b – отклонение скорости у генератора, включаемого на параллельную работу (АСГ2); 1 – без изменения частоты напряжения на обмотке ротора; 2 – частота напряжения на обмотке ротора изменялась автоматически

Fig. 11. Oscillograms of the deviation rotor speed generator:

a is speed deviation of the generator under load (ASG1); b is deviation of the generator speed included in parallel operation (ASG2); 1 is without changing the frequency of the voltage on the rotor winding; 2 is voltage frequency on the rotor winding changed automatically

Схема параллельной работы высоковольтных АСГ при подключении к трехфазной сети представлена на рис. 9. В качестве исходного режима была принята параллельная работа АСГ1 через трансформатор и воздушные линии (ВЛ) с ЭЭС 35 кВ. Моделировалось подключение высоковольтного АСГ2 методом самосинхронизации. На рис. 10 и 11 представлены осциллограммы напряжения и отклонения скорости вращения ротора генераторов. При подключении дополнительного АСГ возникают колебания напряжения и частоты в сети и на шинах АСГ. Однако автоматические регуляторы реагируют на данное возмущение и восстанавливают частоту и напряжение до номинального уровня.

Необходимо отметить, что использование сигнала отклонения частоты в сети позволяет повысить эффективность управления напряжением статора и скоростью вращения ротора АСГ при включении его методом самосинхронизации; при этом значительно снижаются провалы напряжения и частоты, уменьшается время переходного процесса, снижается величина перерегулирования (см. рис. 10, 11).

В целом результаты моделирования показали, что при изменении режимов работы рассматриваемых СЭС предлагаемая система автоматического регулирования возбуждения на IGBT-транзисторах, а также ПИД-регулятор скорости вращения ротора АСГ обеспечивают плавное изменение заданных параметров, значительно уменьшая возможные колебания напряжения и частоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны компьютерные модели асинхронизированных генераторов, оснащенных системой автоматического регулирования возбуждения на IGBT-транзисторах. Результаты моделирования позволили сделать следующие выводы.

1. Исследования режимов автономно работающего АСГ показали, что использование сигнала отклонения частоты в системе возбуждения позволяет уменьшить возникающие в этих режимах отклонения частоты и напряжения от заданных значений.

2. При подключении дополнительной мощной нагрузки в ЭЭС система с установкой РГ на базе синхронного генератора теряет устойчивость в отличие от системы с АСГ, что говорит о более высоких пределах устойчивости у асинхронизированного турбогенератора.

3. Использование сигнала отклонения частоты в сети для изменения частоты на выходе инвертора позволяет повысить эффективность управления напряжением и скоростью вращения ротора АСГ при включении его в сеть методом самосинхронизации: значительно снижаются колебания напряжения и частоты, уменьшается время переходного процесса и величина перерегулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mahmoud M.S., Al-Sunni F.M.* Control and optimization of distributed generation systems. – Cham: Springer, 2015. – 578 p.
2. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation / A.V. Kryukov, S.K. Kargapol'cev, Yu.N. Bulatov, O.N. Skrypnik, B.F. Kuznetsov // Far East Journal of Electronics and Communications. – 2017. – Vol. 17, N 5. – P. 1127–1140.
3. *Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V.* Multi-agent technologies for control of distributed generation plants in the isolated power systems // Far East Journal of Electronics and Communications. – 2017. – Vol. 17, N 5. – P. 1197–1212.

4. *Buchholz V.M., Styczynski Z.A.* Smart grids: fundamentals and technologies in electricity networks. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – 396 p.

5. *Лабунец И.А.* Асинхронизированные турбогенераторы. Новые технологии в энергетике. – М.: Изд-во РАО «ЕЭС России», 2002. – С. 139–144.

6. Перспективы применения асинхронизированных турбогенераторов в европейской зоне «ЕЭС России» / Г.А. Дмитриева, С.Н. Макаровский, А.Ю. Поздняков, З.Г. Хвошинская, И.А. Лабунец, А.П. Лохматов, Ю.Г. Шакарян // *Электрические станции.* – 1997. – № 8. – С. 35–43.

7. *Шакарян Ю.Г., Лабунец И.А., Сокур П.В.* Целесообразность и перспективы оснащения электростанций асинхронизированными турбо- и гидрогенераторами // *Электросила: сборник.* – СПб., 2003. – Вып. 42. – С. 35–43.

8. *Голоднов Ю.М., Пиковский А.В.* Генераторы для ветровых, малых гидравлических и приливных электростанций. – М.: ВИНТИ, 1992. – 98 с. – (Итоги науки и техники. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии; т. 3).

9. *Vocquel A., Janning J.* Analysis of a 300 MW variable speed drive for pump-storage plant applications // 2005 European Conference on Power Electronics and Applications. – Dresden, Germany, 2005. – P. 1–10. – DOI: 10.1109/epe.2005.219434.

10. *Цгоев Р.С.* Несинхронная параллельная работа ОЭС Сибири и Востока // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность.* – 2004. – № 1. – С. 4–6.

11. *Шакарян Ю.Г.* Асинхронизированная синхронная машина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 192 с.

12. *Гараев Ю.Н., Лоханин Е.К., Россковский Е.Л.* Отличия синхронных машин продольно-поперечного возбуждения от асинхронизированных синхронных машин // *Известия НТЦ Единой энергетической системы.* – 2015. – № 2 (73). – С. 88–96.

13. *Булатов Ю.Н., Крюков А.В.* Влияние несимметричной нагрузки на работу турбогенераторов установок распределенной генерации // *Системы. Методы. Технологии.* – 2016. – № 3 (31). – С. 85–93.

14. *Булатов Ю.Н., Крюков А.В.* Влияние нелинейной нагрузки на работу турбогенераторов установок распределенной генерации // *Системы. Методы. Технологии.* – 2016. – № 4 (32). – С. 95–100.

15. *Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Arsentiev G.O.* Use of power routers and renewable energy resources in smart power supply systems // 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon). – Chelyabinsk, 2018. – P. 143–148. – DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544289.

16. *Anderson P.M., Fouad A.A.* Power system control and stability. – Piscataway, NJ: IEEE Press; Wiley-Interscience, 2003. – 688 p.

Булатов Юрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики и электротехники Братского государственного университета. Основное направление научных исследований – моделирование и управление режимами электроэнергетических систем. Имеет более 150 публикаций. E-mail: bulatovyu@yandex.ru.

Крюков Андрей Васильевич, доктор технических наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета. Основное направление научных исследований – моделирование и управление режимами электроэнергетических систем и систем электроснабжения железных дорог. Имеет более 600 публикаций. E-mail: and_kryukov@mail.ru.

Шуманский Эдуард Константинович, аспирант Братского государственного университета. Основное направление научных исследований – моделирование и управление режимами электроэнергетических систем. Имеет более 10 публикаций. E-mail: shumanskiy@yandex.ru

Bulatov Yuri N., PhD (Eng.), associate professor, head of the department of electric power and electrical engineering of Bratsk State University. The main direction of scientific research is modeling and control of the modes of electric power systems. He has over 150 publications. E-mail: bulatovyura@yandex.ru.

Kryukov Andrey V., D.Sc. (Eng.), professor, Irkutsk State University of Railway Engineering, Irkutsk National Research Technical University. The main direction of scientific research is modeling and control of the regimes of electric power systems and railway power supply systems. He has over 600 publications. E-mail: and_kryukov@mail.ru.

Shumanskiy Eduard K., graduate student at Bratsk State University. The main direction of his scientific research is modeling and control of the modes of electric power systems. He has more than 10 publications. E-mail: shumanskiy@yandex.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-175-188

Control of power supply system modes with distributed generation plants based on asynchronous machines*

YU.N. BULATOV^{1,a}, A.V. KRYUKOV^{2,b}, E.K. SHUMANSKY^{1,c}

¹ *Bratsk State University, 40 Makarenko Street, Bratsk, 665709, Russian Federation*

² *Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk State Transport University, 15 Chernishevskiy Street, Irkutsk, 664074, Russian Federation*

^a *bulatovyura@yandex.ru* ^b *and_kryukov@mail.ru* ^c *shumanskiy@yandex.ru*

Abstract

The use of asynchronous generators (ASG) in distributed generation plants allows obtaining the following positive results: increasing stability limits; expanding the ranges of reactive power regulation; simplifying synchronization processes with the network due to the ability to control the frequency and phase of the EMF; and ensuring the operation of the unit in the synchronous mode in case of one of the field windings damage.

The article describes the developed computer models of high-voltage and low-voltage ASG equipped with automatic excitation control systems on IGBT transistors allowing you to change the amplitude and frequency of the voltage. The studies were conducted in the MATLAB system using the Simulink and Sim Power Systems packages. The ASG autonomous operation modes were studied during load connection and load shedding. The results of comparing the operation of the electric network with a distributed generation unit operating on the basis of synchronous generators and ASG are presented, and the processes of synchronizing the ASG with the network are described. The simulation results of a stand-alone asynchronous generator showed that the use of a frequency deviation signal can reduce the deviations of the adjustable parameters in the load connection and disconnection modes, as well as when the ASG is turned on in the network by the self-synchronization method. When the ASG operates in parallel with the network, asynchronous generators operate stably with sufficiently large disturbances; in similar conditions, the dynamic stability of a system with synchronous machines is not provided. The developed system of automatic control of the excitation, as well as the proportional-integral-differential (PID) speed controller of the rotor of the asynchronous generator, smoothly adjust the set parameters, significantly reducing voltage and frequency fluctuations.

Keywords: distributed generation plants, asynchronous generator, automatic excitation and frequency controllers, power supply systems, operating modes, synchronization, modeling

* *Received 18 October 2019.*

REFERENCES

1. Mahmoud M.S., Al-Sunni F.M. *Control and optimization of distributed generation systems*. Cham, 2015. 578 p.
2. Kryukov A.V., Kargapol'cev S.K., Bulatov Yu.N., Skrypnik O.N., Kuznetsov B.F. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation. *Far East Journal of Electronics and Communications*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 1127–1140.
3. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. Multi-agent technologies for control of distributed generation plants in the isolated power systems. *Far East Journal of Electronics and Communications*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 1197–1212.
4. Buchholz B.M., Styczynski Z.A. *Smart grids: fundamentals and technologies in electricity networks*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 396 p.
5. Labunets I.A. *Asinkhronizirovannyye turbogeneratory. Novyye tekhnologii v energetike* [Asynchronous turbogenerators. New technologies in the energy sector]. Moscow, RAO "UES of Russia" Publ., 2002, pp. 139–144. (In Russian).
6. Dmitrieva G.A., Makarovskii S.N., Pozdnyakov A.Yu., Khvoshchinskaya Z.G., Labunets I.A., Lokhmatov A.P., Shakaryan Yu.G. Perspektivy primeneniya asinkhronizirovannykh turbogeneratorov v evropeiskoi zone "EES Rossii" [Prospects for the use of asynchronous turbogenerators in the European zone "UES of Russia"]. *Elektricheskie stantsii = Power Plants*, 1997, no. 8, pp. 35–43. (In Russian).
7. Shakaryan Yu.G., Labunets I.A., Sokur P.V. Tselesoobraznost' i perspektivy osnashcheniya elektrostantsii asinkhronizirovannymi turbo- i gidrogeneratorami [Expediency and prospects of equipping power plants with asynchronous turbo and hydro generators]. *Elektrosila: sbornik [Power]*. St. Petersburg, 2003, vol. 42, pp. 35–43.
8. Golodnov Yu.M., Pikovskii A.B. *Generatory dlya vetrovykh, malykh gidravlicheskiykh i prilivnykh elektrostantsii* [Generators for wind, small hydraulic and tidal power plants]. Moscow, VINITI Publ., 1992. 98 p.
9. Bocquel A., Janning J. Analysis of a 300 MW variable speed drive for pump-storage plant applications. *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*, Dresden, Germany, 2005, pp. 1–10. DOI: 10.1109/epe.2005.219434.
10. Tsogoev R.S. Nesinkhronnaya parallel'naya rabota OES Sibiri i Vostoka [Non-synchronous parallel operation of the OES of Siberia and the East]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost' = Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*, 2004, no. 1, pp. 4–6.
11. Shakaryan Yu.G. *Asinkhronizirovannaya sinkhronnaya mashina* [Asynchronous synchronous machine]. Moscow, Energoatomizdat, 1984. 192 p.
12. Garaev Yu.N., Lokhanin E.K., Rossovskii E.L. Otlichiya sinkhronnykh mashin prodol'nopoperechnogo vzbuzhdeniya ot asinkhronizirovannykh sinkhronnykh mashin [Differences between synchronous machines of longitudinal-transverse excitation from asynchronous synchronous machines]. *Izvestiya NTC Edinoi energeticheskoi sistemy = STC of Unified Power System Proceedings*, 2015, no. 2 (73), pp. 88–96. (In Russian).
13. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Vliyanie nesimmetrichnoi nagruzki na rabotu turbogeneratorov ustanovok raspredelennoi generatsii [Influence of asymmetric load on turbine distributed generation plant operation]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods Technology*, 2016, no. 3 (31), pp. 85–93.
14. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Vliyanie nelineinoy nagruzki na rabotu turbogeneratorov ustanovok raspredelennoi generatsii [Influence of nonlinear loads on the operation of turbo generators distributed generation plant]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods Technology*, 2016, no. 4 (32), pp. 95–100.
15. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Arsentiev G.O. Use of power routers and renewable energy resources in smart power supply systems. *2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon)*, Chelyabinsk, 2018, pp. 143–148. DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544289.
16. Anderson P.M., Fouad A.A. *Power system control and stability*. Piscataway, NJ, IEEE Press, Wiley-Interscience, 2003. 688 p.

Для цитирования:

Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Шуманский Э.К. Управление режимами систем электро-снабжения с установками распределенной генерации, сформированными на основе асинхронизированных машин // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 1 (78). – С. 175–188. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-175-188.

For citation:

Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Shumansky E.K. Upravlenie rezhimami sistem elektrosnabzheniya s ustanovkami raspredelennoi generatsii, sformirovannymi na osnove asinkhronizirovannykh mashin [Control of power supply system modes with distributed generation plants based on asyn-chronized machines]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universi-teta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 1 (78), pp. 175–188. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-175-188.