

Применение асинхронизированных генераторов в электрических сетях с пониженным качеством электроэнергии

БУЛАТОВ Ю.Н.

БрГУ, Братск, Россия

КРЮКОВ А.В.

ИрГУПС, Иркутск, Россия

ШУМАНСКИЙ Э.К.

БрГУ, Братск, Россия

Для децентрализованного производства электроэнергии могут применяться асинхронизированные генераторы малой мощности, позволяющие получить ряд положительных эффектов по сравнению с синхронными машинами: повышение пределов устойчивости; расширение диапазонов регулирования реактивной мощности; упрощение процессов синхронизации с сетью благодаря возможности управления фазой ЭДС; обеспечение синхронной работы при повреждении одной из обмоток возбуждения. Приведено описание разработанной MATLAB-модели сети, оснащенной асинхронизированными генераторами с системами автоматического регулирования возбуждения и скорости вращения ротора. Выполнено моделирование нормальных и аварийных режимов сети 35 кВ с установками распределенной генерации на базе асинхронизированных машин в условиях пониженного качества электроэнергии из-за наличия электротяговых нагрузок. Определено влияние асинхронизированных генераторов на аварийные и послеаварийные режимы, а также уровни гармонических искажений. Для сравнения проведено моделирование режимов сети с установками, реализованными на базе синхронных машин. Проанализировано влияние высших гармоник на функционирование предлагаемой системы автоматического регулирования. Проведенные исследования показали, что при наличии асинхронизированных генераторов улучшаются процессы управления и повышается качество электроэнергии, по сравнению с синхронными машинами увеличиваются пределы устойчивости и упрощаются процессы синхронизации.

К л ю ч е в ы е с л о в а: *установки распределенной генерации, асинхронизированные генераторы, качество процессов управления, гармонические искажения, моделирование*

При проектировании новых или развитии существующих распределительных сетей и систем электроснабжения (СЭС) целесообразно применять установки распределенной генерации (РГ) [1–5], управление которыми осуществляется на основе адаптивных систем, использующих интеллектуальные технологии. Это позволит обеспечить переход к активно-адаптивным электрическим сетям, повысить живучесть и надежность СЭС. Установки РГ могут быть реализованы на базе различных электромеханических агрегатов: синхронных (СГ), асинхронных (АГ), асинхронизированных генераторов (АСГ) и др. [6]. Асинхронизированные машины могут работать в режимах выдачи и значительного потребления реактивной мощности [6–8], что позволяет повысить устойчивость и управляемость электроэнергетических систем (ЭЭС). Кроме этого, АСГ обладают рядом адаптационных свойств, обеспечивающих следующие положительные результаты [6–9]: повышение устойчивости параллельной

работы; расширение пределов регулирования реактивной мощности; улучшение процессов синхронизации с сетью и др.

Асинхронизированные генераторы, представляющие собой разновидность машин двойного питания [10], могут применяться на тепловых и гидравлических электростанциях (ГЭС) большой и средней мощности, для ветроэнергетических установок, малых ГЭС [11], гидроаккумулирующих и приливных электростанций [12], а также в электромеханических преобразователях частоты [13]. Основное отличие АСГ от синхронного генератора заключается в наличии нескольких обмоток возбуждения, подключенных к источнику переменного тока [14].

Авторами разработана MATLAB-модель АСГ, оснащенного системой автоматического регулирования возбуждения (АРВ) на IGBT-транзисторах и пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) регулятором скорости вращения ротора. Выполнено моде-

лирование нормальных и аварийных режимов в СЭС с установками распределенной генерации на базе АСГ и СГ. Определено влияние АСГ на процессы управления, а также на уровни гармонических искажений в СЭС. Рассматривалась сеть с пониженным качеством электроэнергии, что было вызвано наличием электротяговых нагрузок в питающей ЭЭС. Проанализировано влияние высших гармоник (ВГ) на функционирование предлагаемой системы автоматического регулирования.

Описание модели СЭС с АСГ. Исследования проводились для схемы СЭС с двумя установками РГ на базе турбоагрегатов с СГ или АСГ (рис. 1). Исследуемая СЭС отличалась пониженным качеством электроэнергии по критерию синусоидальности кривых напряжения и тока. В исходном режиме предусматривалась параллельная работа установок РГ через трансформаторы (Т1 и Т2) и воздушные линии (ВЛ1–ВЛ3) с сетью 35 кВ. В качестве аварийного возмущения рассматривалось трехфазное короткое замыкание (КЗ) на ВЛ1, послеаварийный режим возникал после ее отключения с двух сторон через 0,1 с.

Модель СЭС с АСГ, позволяющая анализировать режимы работы и качество электроэнергии, была реализована в среде *MATLAB*. Ее основными элементами являлись блоки, отвечающие следующим элементам СЭС: асинхронным машинам с фазным ротором мощностью 1000 кВт; системам возбуждения; паровым турбинам; регуляторам напряжения и скорости; активно-индуктивным нагрузкам; эквиваленту ЭЭС большой мощности; линиям электропередачи 35 кВ; силовым трансформаторам; измерительным устройствам и осциллографам, источникам и фильтрам высших гармоник.

Для учета электротяговых нагрузок в узле подключения ЭЭС моделировалось генерирование 3-й и 5-й гармоник. Временные зависимости напряжения на шинах 35 кВ ЭЭС и его гармонический состав для исходного режима показаны на рис. 2.

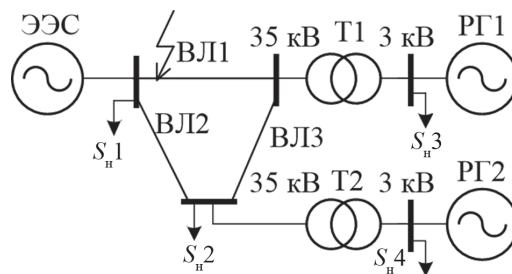


Рис.1. Схема СЭС с установками РГ

Fig.1. Diagram of the power supply system with distributed generation plants

В качестве системы возбуждения АСГ использовался управляемый инвертор, получающий питание от источника постоянного напряжения. За счет *IGBT*-транзисторов обеспечивалось синусоидальное напряжение частотой 12 Гц, которое поступало на трехфазную обмотку ротора АСГ.

Напряжение на обмотке статора АСГ, вычисленное на основе продольной и поперечной составляющих, сравнивалось с заданным значением, а отклонение поступало на вход ПИД-регулятора. Затем с помощью специальных блоков формировались синусоидальные напряжения, которые подавались через усилитель на генератор управляющих сигналов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Для управления частотой инвертора использовался сигнал отклонения частоты сети Δf , который складывался с заданной опорной частотой 12 Гц [9]. Полученное таким образом значение являлось задающим для генератора сигналов с ШИМ, который формировал управляющие импульсы на *IGBT*-транзисторы инвертора. Сформированное инвертором трехфазное напряжение поступало на *LC*-фильтр и затем подавалось на обмотку ротора АСГ.

Стабилизация скорости вращения ротора осуществлялась ПИД-регулятором, который управлял подачей пара в турбину. При моделировании задавались следующие параметры: номинальная мощность АСГ $P_n = 1000$ кВт;

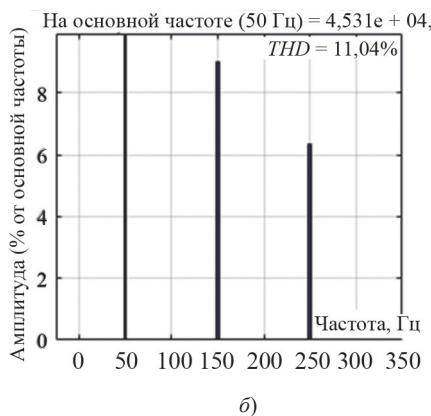
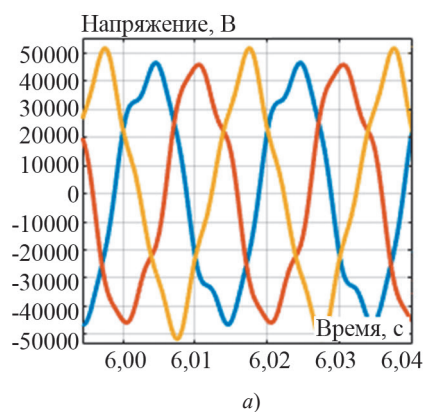


Рис.2. Временные зависимости напряжения в узле ЭЭС 35 кВ (а) и состав гармоник напряжения в исследуемой СЭС (б)

Fig.2. Time dependences of voltage in the EES node 35 kV (a) and the composition of voltage harmonics in the investigated power supply system (b)

синхронная частота вращения $n_0 = 1000$ об/мин; коэффициент полезного действия $\eta = 95,5$ %; $\cos\varphi = 0,858$; номинальное напряжение $U = 3$ кВ; номинальный ток $I = 118$ А; кратность пускового тока 6,3; кратность пускового момента 1,2; число пар полюсов $p = 3$.

Результаты моделирования и основные выводы. Моделировались следующие режимы: нормальный установившийся, аварийный и послеаварийный. В качестве возмущения рассматривались возникновение трехфазного КЗ в момент времени 10 с и последующее отключение ВЛ1 (рис. 1); при этом выполнялось сравнение процессов в СЭС с СГ и АСГ, анализировались переходные процессы и показатели качества электроэнергии (ПКЭ). Для сравнения использовалась модель синхронной машины из пакета *SimPowerSystems* с параметрами, аналогичными АСГ. Для СГ применялись

АРВ и автоматический регулятор скорости (АРС), работающие по ПИД-закону [15,16]. Настройка АРВ и АРС выполнялась с использованием программы настройки ПИД-регулятора из пакета *Simulink Control Design* системы *MATLAB*.

Результаты моделирования показали, что использование АСГ в СЭС позволяет улучшить качество электроэнергии в нормальном и послеаварийном режимах. Коэффициенты гармоник напряжения в различных режимах работы СЭС представлены в табл. 1.

Временные зависимости напряжения на шинах установки РГ1 в аварийном и послеаварийном режимах показаны на рис. 3. Аналогичные зависимости для скорости вращения ротора и напряжения представлены на рис. 4. Для установки РГ2 указанные временные зависимости имели аналогичный характер.

Таблица 1

ПКЭ в исследуемой электрической сети на шинах 3 кВ
Power Quality Indicators of Electricity in the Investigated Electrical Network on 3 kV Buses

Режим работы электрической сети	Коэффициенты гармоник напряжения, %		
	k_{Ua}	k_{Ub}	k_{Uc}
Без установок РГ	11,02	11,02	11,02
С установками РГ на базе СГ	9,27	9,27	9,27
С установками РГ на базе АСГ	6,58	6,58	6,58

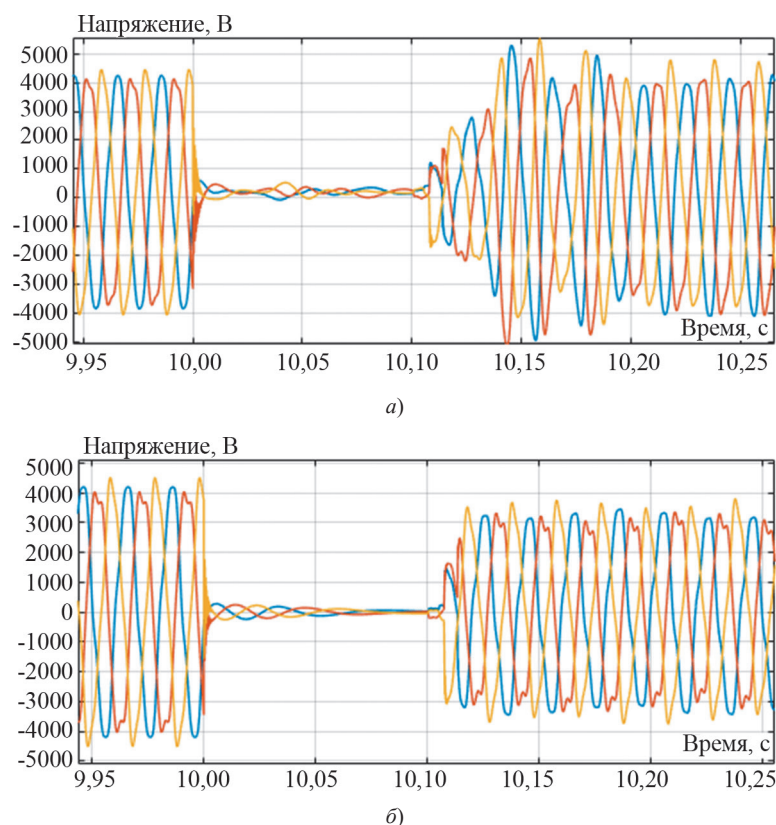


Рис. 3. Временные зависимости напряжения генератора РГ1: *a* – СЭС с АСГ; *б* – СЭС с СГ

Fig. 3. Time dependences of the voltage of the generator DG1: *a* – power supply system (PSS) with an asynchronous generators; *б* – PSS with a synchronous generators

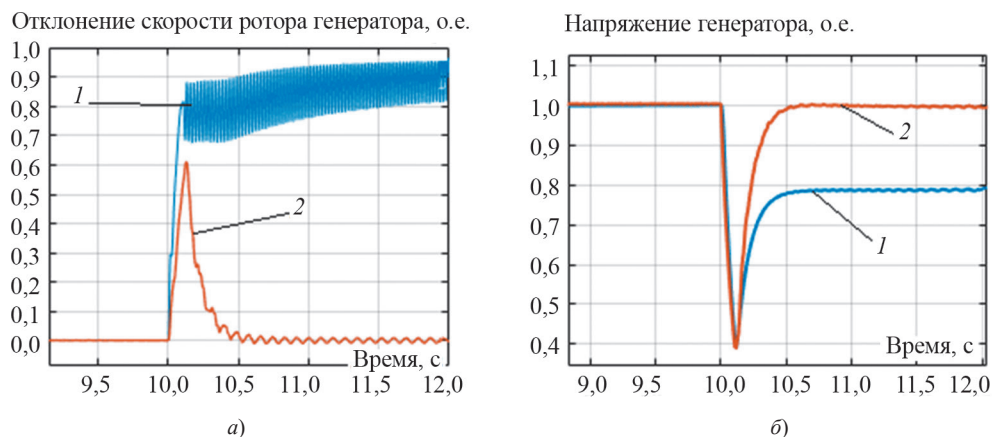


Рис. 4. Временные зависимости отклонения от номинального значения скорости вращения ротора (*а*) и напряжения генератора (*б*) установки РГ при КЗ на линии и ее отключении защитой: 1 – СЭС с СГ; 2 – СЭС с АСГ

Fig. 4. Time dependences of the deviation from the nominal value of the rotor speed (*a*) and the generator voltage (*b*) of the DG plant in case of short circuit on the line and its shutdown by protection: 1 – PSS with synchronous generators; 2 – PSS with asynchronous generators

При использовании синхронных генераторов наблюдались значительные падения напряжения (рис. 3,б), отклонения скорости вращения ротора (рис. 4,а) и частоты (рис. 5,а), приводящие к асинхронному ходу. Применение АСГ с предлагаемой системой АРВ позволяло обеспечить устойчивость параллельной работы и поддержание на заданных уровнях напряжение и частоту (рис. 4 и 5) во всех рассматриваемых режимах. Имело место увеличение пределов устойчивости в СЭС с асинхронизированными генераторами.

Также было проведено исследование влияния уровня гармонических искажений на работу предлагаемой системы АРВ АСГ. С помощью программируемого источника изменялись амплитуды генерируемых гармоник. Результаты моделирования, представленные в табл. 2 и на рис. 6 и 7, показали значительное влияние ВГ на работу АРВ, которое заключалось в искажении тока и напряжения в обмотках ротора АСГ. Это вызывало искажение кривых напряжения на шинах генератора. Переходные процессы изменения скорости

вращения и уровня напряжения АСГ также зависели от наличия ВГ (рис. 6). С увеличением искажений возрастало напряжение в обмотке ротора АСГ в послеаварийном режиме, а также наблюдался рост токов КЗ, посылаемых асинхронизированными генераторами (табл.2). Для снижения указанных негативных последствий и повышения адекватности функционирования регуляторов в условиях пониженного качества электроэнергии необходимо использовать входные фильтры для сигналов напряжения и частоты, эффективность которых показана в табл. 2 и на рис. 7.

Использование фильтров первого порядка позволило устранить негативные последствия гармонических искажений и обеспечить правильную работу регуляторов в условиях пониженного качества электроэнергии; при этом гармонические искажения в напряжении, подаваемом на обмотки ротора АСГ, не наблюдались (рис. 7,б).

Была рассмотрена эффективность использования сигнала отклонения частоты для ее регулирования на

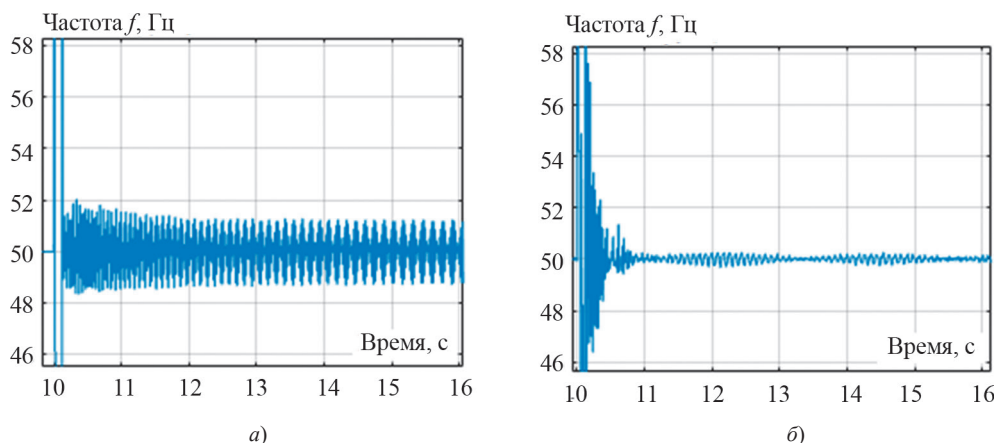


Рис. 5. Временные зависимости частоты в СЭС при КЗ на линии и ее отключении защитой: *а* – СЭС с АСГ; *б* – СЭС с СГ

Fig. 5. Time dependences of the frequency in the power supply system with a short circuit on the line and its shutdown by protection: *a* – PSS with asynchronous generators; *b* – PSS with synchronous generators

Таблица 2

Результаты моделирования искажений тока и напряжения
Current and Voltage Distortion Simulation Results

Амплитуды гармоник		Наличие фильтра ВГ	Коэффициенты гармоник напряжения, %			Max U_f , отн. ед.	Токи КЗ, А	
3	5		k_{Uab}	k_{Ubc}	k_{Uca}		от АСГ1	от АСГ2
0,01	0,005	–	0,22	0,23	0,22	0,98	1440	1664
0,1	0,05	–	1,70	1,69	1,71	1,06	1457	1710
0,3	0,15	–	5,17	5,16	5,14	1,09	1593	1723
0,4	0,2	–	7,16	7,23	7,36	1,20	1606	1811
0,5	0,5	Нет	9,06	9,67	15,62	1,34	1658	1865
0,5	0,5	Есть	8,67	8,67	8,62	0,99	1616	1814

Примечание: Max U_f – наибольшее действующее напряжение в обмотке ротора в послеаварийном режиме.
 Note: Max U_f – the highest effective voltage in the rotor winding in the post-accident mode

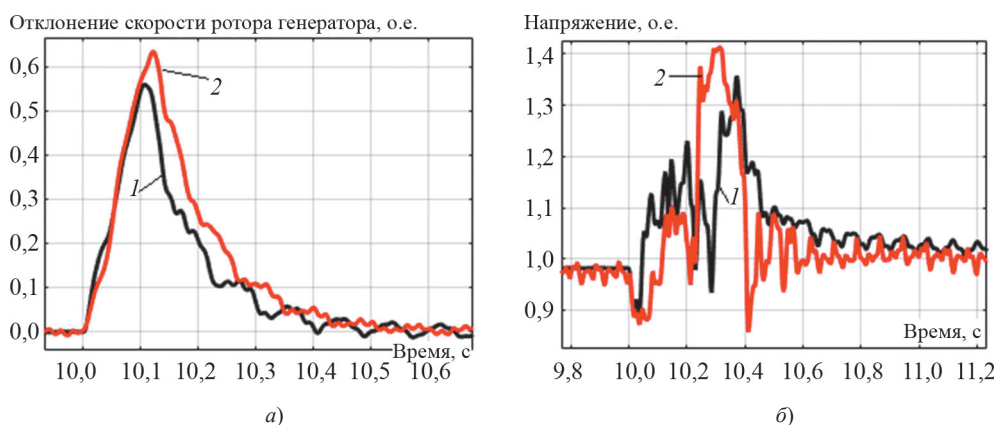


Рис. 6. Временные зависимости отклонения скорости ротора (а) и напряжения генератора (б) установки РГ1 при КЗ на линии и ее отключении защитой: 1 – максимум $k_U = 0,23\%$; 2 – максимум $k_U = 15,62\%$

Fig. 6. Time dependences of the rotor speed deviation (a) and the generator voltage (б) of the DG1 plant with a short circuit on the line and its shutdown by protection: 1 – maximum $k_U = 0.23\%$; 2 – maximum $k_U = 15.62\%$

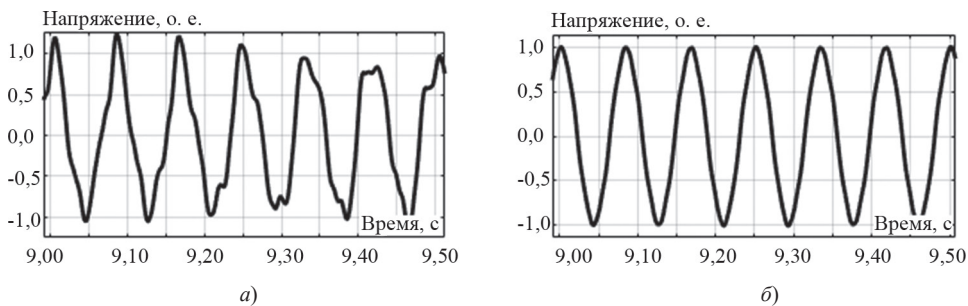


Рис. 7. Временные зависимости напряжения на обмотке ротора АСГ: а – без фильтров входных сигналов АРВ; б – с фильтрами входных сигналов АРВ

Fig. 7. Time dependences of the voltage on the ACG rotor winding: а – without filters of the automatic excitation regulator (AER) input signals; б – with filters of the AER input signals

обмотке ротора в режиме подключения АСГ2 к сети методом самосинхронизации (рис. 8). Максимальное отклонение скорости ротора от номинального значения снижалось на 4 %, а провал напряжения – на 2 %. Уменьшались колебательность и время переходного процесса для напряжения и частоты. В аварийном и послеаварийном режимах использование сигнала изменения частоты напряжения на обмотке ротора

давало аналогичный эффект. Для примера, на рис. 9 представлены временные зависимости отклонения скорости вращения ротора АСГ в аварийном режиме. Использование сигнала отклонения частоты в системе АРВ позволило снизить максимальное отклонение скорости вращения ротора генератора на 14 %.

Результаты моделирования показали, что при использовании АСГ и предлагаемой системы АРВ с

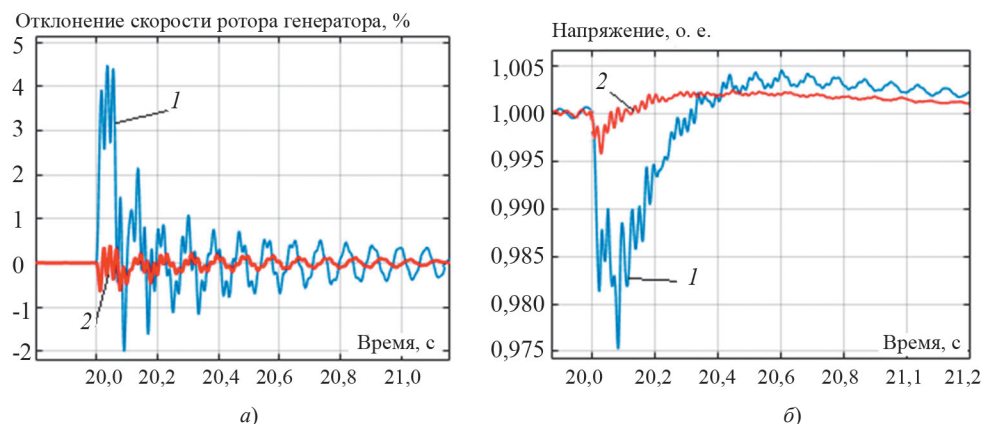


Рис. 8. Временные зависимости скорости ротора (а) и напряжения (б) для АСГ2 при его подключении методом самосинхронизации: 1 – без изменения частоты на обмотке ротора; 2 – частота на обмотке ротора изменялась автоматически

Fig. 8. Time dependences of the rotor speed (а) and voltage (б) for ASG2 when it is connected by the self-synchronization method: 1 – without changing the frequency on the rotor winding; 2 – the frequency on the rotor winding changed automatically



Рис. 9. Временные зависимости отклонения скорости ротора АСГ при КЗ на линии и ее отключении защитой: 1 – без изменения частоты на обмотке ротора; 2 – автоматическое регулирование частоты на обмотке ротора

Fig. 9. Time dependences of the deviation rotor speed of the ASG with a short circuit on the line and its shutdown by protection: 1 – without changing the frequency on the rotor winding; 2 – automatic frequency control on the rotor winding

возможностью регулирования частоты напряжения на обмотке ротора обеспечивают плавное изменение режимных параметров, значительно уменьшаются колебания напряжения и частоты. Необходимо отметить, что оптимальная настройка [15] параметров предлагаемой системы АРВ и АРС позволит получить дополнительный эффект по повышению устойчивости и качества регулирования параметров режима СЭС.

Выводы. Использование асинхронизированных генераторов в установках РГ улучшает качество электроэнергии в нормальном и послеаварийном режимах работы электрической сети.

Сравнение режимов работы СЭС с асинхронизированными и синхронными генераторами при пониженном качестве электроэнергии показало более высокие пределы устойчивости у АСГ.

Применение фильтров первого порядка для входных сигналов предлагаемой системы АРВ позволяет уstra-

нить негативные последствия гармонических искажений и обеспечивает правильную работу регуляторов.

Использование сигнала Δf для изменения частоты напряжения, подаваемого с инвертора на обмотку ротора АСГ, повышает эффективность управления напряжением и скоростью вращения ротора АСГ при включении его в сеть методом самосинхронизации: максимальное отклонение скорости от номинального значения снижается на 4 %, а провал напряжения уменьшается на 2 %. В аварийном и послеаварийном режимах наблюдается аналогичный эффект при изменении частоты напряжения на обмотке ротора.

Асинхронизированные генераторы могут эффективно использоваться в установках РГ. Оптимизация настроек параметров предлагаемой системы АРВ и АРС асинхронизированного генератора позволит получить дополнительный эффект по повышению устойчивости и качества регулирования параметров режима электрической сети с установками РГ на базе АСГ.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования России (проект № 0667-2020-0039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Barker Ph.P., De Mello R.W.** Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1. Radial Distribution Systems. – IEEE PES Summer Meeting, Seattle, USA, 2000, vol. 11, pp.222–233, DOI:10.1109/PESM.2000.868775.
2. **Voropai N.I., Stychinsky Z.A.** Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010, 223 p.
3. **Mahmoud M.S., AL-Sunni F.M.** Control and Optimization of Distributed Generation Systems, 2015, 578 p., DOI:10.1007/978-3-319-16910-1.
4. **Shen X., Zhu Sh., Zheng J., Han Y., et all.** Active distribution network expansion planning integrated with centralized and distributed Energy Storage System. – IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015, pp. 1–5, DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286069.
5. **Martínez Ceseña E.A., Capuder T., Mancarella P.** Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty. – IEEE Transaction on Smart Grid, 2016, vol. 7, pp. 348–357.

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

7. **Дмитриева Г.А., Макаровский С.Н., Поздняков А.Ю. и др.** Перспективы применения асинхронизированных турбогенераторов в европейской зоне «ЕЭС России». – Электрические станции, 1997, № 8, с. 35–43.

8. **Шакарян Ю.Г., Лабунец И.А., Сокур П.В.** Целесообразность и перспективы оснащения электростанций асинхронизированными турбо- и гидрогенераторами. – Сборник «Электросила», СПб, 2003, вып. 42, с. 35–43.

9. **Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Шуманский Э.К.** Управление режимами систем электроснабжения с установками распределенной генерации, сформированными на основе асинхронизированных машин. – Научный вестник НГТУ, 2020, № 1 (78), с. 175–188.

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

11. **Голоднов Ю.М., Пиковский А.В.** Итоги науки и техники. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Генераторы для ветровых, малых гидравлических и приливных электростанций. М.: ВИНТИ, 2012, 98 с.

12. **Bocquel A., Janning J.** Analysis of a 300 MW Variable Speed Drive for Pump-Storage Plant Applications. – Power Electronics and Applications, 2005, DOI:10.1109/EPE.2005.219434.

13. **Цгоев Р.С.** Несинхронная параллельная работа ОЭС Сибири и Востока. – Электро, 2004, № 1, с. 4–6.

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

15. **Bulatov Yu.N., Kryukov A.V.** Optimization of automatic regulator settings of the distributed generation plants on the basis of genetic algorithm. – 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2016, pp. 1–6, DOI:10.1109/ICIEAM.2016.7911456.

16. **Kryukov A.V., Kargapol'cev S.K., Bulatov Yu.N., et al.** 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.

[18.04.2021]



Авторы: Булатов Юрий Николаевич – кандидат техн. наук, заведующий кафедрой электроэнергетики и электротехники Братского государственного университета.



Крюков Андрей Васильевич – доктор техн. наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения.



Шуманский Эдуард Константинович – ассистент кафедры электроэнергетики и электротехники Братского государственного университета.

Application of Asynchronized Generators in Electric Networks with Degraded Electric Power Quality

BULATOV Yury N. (*Bratsk State University, Bratsk, Russia*) – Head of the Power Industry and Electrical Dept., Cand. Sci. (Eng.).

KRYUKOV Andrey V. (*Irkutsk State University of Railways, Irkutsk, Russia*) – Professor of the Transport Electric Engineering Dept., Dr. Sci. (Eng.).

SHUMANSKY Edward K. (*Bratsk State University, Bratsk, Russia*) – Assistant of the Electric Power and Electrical Engineering Dept.

For decentralized power generation, small-capacity asynchronized generators (AGs) can be used, which are able to yield a number of positive effects in comparison with conventional synchronous machines: higher stability limits, wider reactive power adjustment ranges, simpler synchronization with the grid due to the ability to control the EMF phase, and the possibility to maintain synchronous operation in case of failure in one of the field windings. The article describes the model of a grid equipped with asynchronized generators with automatic excitation and rotor speed control systems, which is developed in the MATLAB software package environment. Normal and emergency operation modes of a 35 kV grid with distributed generation plants based on asynchronized machines under the conditions of degraded electric power quality due to the presence of electric traction loads are simulated. The influence of AGs on emergency and post-emergency modes are determined, and the harmonic distortion levels are estimated. For comparison, the grid operation modes are simulated for the case of using synchronous machines as generation sources. The influence of

higher harmonic components on the performance of the proposed automatic control system is analyzed. The obtained study results have shown that with using asynchronous generators, better control processes and better quality of electric power are obtained in comparison with those in a grid equipped with synchronous machines; in addition, the stability limits are increased, and the synchronization processes are simplified.

К е у о р д с: distributed generation plants, asynchronous generators, quality of control processes, harmonic distortions, modeling

REFERENCES

1. **Barker Ph.P., De Mello R.W.** Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1. Radial Distribution Systems. – IEEE PES Summer Meeting, Seattle, USA, 2000, vol. 11, pp. 222–233, DOI:10.1109/PSS.2000.868775.
2. **Voropai N.I., Stychinsky Z.A.** Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010, 223 p.
3. **Mahmoud M.S., AL-Sunni F.M.** Control and Optimization of Distributed Generation Systems, 2015, 578 p., DOI:10.1007/978-3-319-16910-1.
4. **Shen X., Zhu Sh., Zheng J., Han Y., et al.** Active distribution network expansion planning integrated with centralized and distributed Energy Storage System. – IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015, pp. 1–5, DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286069.
5. **Martinez Ceseña E.A., Capuder T., Mancarella P.** Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty. – IEEE Transaction on Smart Grid, 2016, vol. 7, pp. 348–357.
6. **Labunets I.A.** *Asinhronizirovannye turbogeneratory. Noveye tekhnologii v energetike* (Asynchronous turbogenerators. New technologies in the energy sector). M.: Izd-vo RAO «EES Rossii», 2002, pp. 139–144.
7. **Dmitrieva G.A., Makarovskiy S.N., Pozdnyakov A.Yu. et al.** *Elektricheskie stancii – in Russ. (Power stations)*, 1997, No. 8, pp. 35–43.
8. **Shakaryan Yu.G., Labunets I.A., Sokur P.V.** *Sbornik «Elektrosila» – in Russ. (Collection "Electrosila")*, SPb, 2003, iss. 42, pp. 35–43.
9. **Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Shumanskiy E.K.** *Nauchnyy vestnik NGTU – in Russ. (Scientific Bulletin of NSTU)*, 2020, No. 1 (78), pp. 175–188.
10. **Shakaryan Yu.G.** *Asinhronizirovannaya sinhronnaya mashina* (Asynchronous synchronous machine). M.: Energoatomizdat, 1984, 192 p.
11. **Golodnov Yu.M., Pikovsky A.B.** *Itogi nauki i tekhniki. Netradicionnye i vozobnovlyаемые istochniki energii. Generatory dlya vetrovyh, malyh gidravlicheskih i prilivnyh elektrostancij* (Results of science and technology. Unconventional and renewable energy sources. Generators for wind, small hydraulic and tidal power plants). M.: VINITI, 2012, 98 p.
12. **Bocquel A., Janning J.** Analysis of a 300 MW Variable Speed Drive for Pump-Storage Plant Applications. – Power Electronics and Applications, 2005, DOI:10.1109/EPE.2005.219434.
13. **Tsgoev R.S.** *Elektro – in Russ. (Electro)*, 2004, No. 1, pp. 4–6.
14. **Garaev Yu.N., Lokhanin E.K., Rossovskiy E.L.** *Izvestiya NTC Edinoj energeticheskoy sistemy – in Russ. (News of the STC of the Unified Energy System)*, 2015, No. 2 (73), pp. 88–96.
15. **Bulatov Yu.N., Kryukov A.V.** Optimization of automatic regulator settings of the distributed generation plants on the basis of genetic algorithm. – 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2016, pp. 1–6, DOI:10.1109/ICIEAM.2016.7911456.
16. **Kryukov A.V., Kargapol'cev S.K., Bulatov Yu.N., et al.** 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.

[18.04.2021]