

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА



УДК 621.311

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13

СОГЛАСОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И УСТАНОВКОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ С ПРОГНОСТИЧЕСКИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПОНИЖЕННЫМ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Булатов¹ Ю.Н., Крюков^{2,3} А.В., Суслов^{2,4} К.В., Кижин¹ В.В.

¹Братский государственный университет, г. Братск, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

³Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

⁴Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

dr.souslov@yandex.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Исследование влияния согласованного управления накопителями электроэнергии и установками распределенной генерации на режимы работы сетевого кластера, представляющего собой распределительную электрическую сеть, подключенную к системе электроснабжения железной дороги переменного тока через вставку постоянного тока (ВИПТ). *МЕТОДЫ.* Исследования проводились на имитационной модели, реализованной в системе MATLAB. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Рассматривались следующие возмущающие воздействия: отключение на время 0,5 секунд основного питания сетевого кластера со стороны ВИПТ; трехфазное КЗ с длительностью в 0,5 с в конце кабельной линии 6 кВ протяженностью в два километра. Результаты моделирования показали эффективность согласованного управления накопителями электроэнергии и турбогенератором с самонастраивающимися прогностическими регуляторами. На этой основе снижаются величины перерегулирования частоты вращения ротора, и уменьшается время переходного процесса для всех параметров в различных режимах. Например, время переходного процесса для скорости ротора генератора в режиме подключения дополнительной нагрузки снижается в три раза, а для напряжения – в два раза. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* На основе компьютерного моделирования показано, что согласованное управление накопителями электроэнергии и турбогенератором с прогностическими регуляторами снижает практически до нуля величину перерегулирования скорости ротора и почти на 90 % уменьшает время переходного процесса. Целесообразно проведение дальнейших исследований по применению метода согласованного управления активными элементами, используемыми в системе электроснабжения для регулирования параметров режима.

Ключевые слова: сетевые кластеры; качество электроэнергии; установки распределенной генерации; прогностические регуляторы; вставка постоянного тока; накопители электроэнергии; моделирование.

Для цитирования: Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В., Кижин В.В. Согласованное управление накопителями электроэнергии и установкой распределенной генерации с прогностическими регуляторами в системе электроснабжения с пониженным качеством электроэнергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 6. С. 3-13. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13.

COORDINATED MANAGEMENT OF ELECTRICITY STORAGE AND DISTRIBUTED GENERATION PLANT WITH PREDICTIVE CONTROLLERS IN A POWER SUPPLY SYSTEM WITH REDUCED ELECTRICITY QUALITY

Bulatov¹ Yu.N., Kryukov^{2,3} A.V., Suslov^{3,4} K.V., Kizhin¹ V.V.

¹Bratsk State University, Bratsk, Russia

²Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

⁴ National Research University "MEI", Moscow, Russia

dr.souslov@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* A study of the influence of coordinated control of electricity storage devices and distributed generation installations on the operating modes of a network cluster, which is an electrical distribution network connected to the AC railway power supply system through a direct current insert (DCI). *METHODS.* The studies were carried out using a simulation model implemented in the MATLAB system. *RESULTS.* The following disturbing influences were considered: turning off the main power supply of the network cluster from the DCI side for 0.5 seconds; three-phase short circuit with a duration of 0.5 s at the end of a 6 kV cable line with a length of two kilometers. The simulation results showed the effectiveness of coordinated control of electricity storage devices and a turbogenerator with self-adjusting predictive controllers. On this basis, the values of overshoot of the rotor speed are reduced and the transient process time is reduced for all parameters in various modes. For example, the transient time for the generator rotor speed in the mode of connecting an additional load is reduced by three times, and for voltage - by two times. *CONCLUSION.* Based on computer modeling, it is shown that coordinated control of electricity storage devices and a turbogenerator with predictive regulators reduces the amount of rotor speed overshoot to almost zero and reduces the transient process time by almost 90%. It is advisable to conduct further research on the application of the method of coordinated control of active elements used in the power supply system to regulate the mode parameters.

Keywords: network clusters; power quality; distributed generation plants; predictive controllers; DC insertion; electricity storage devices; modeling.

For citation: Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V., Kizhin V.V. Coordinated management of electricity storages and distributed generation plant with predictive controllers in a power supply system with reduced electricity quality. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (6): 3-13. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13.

Введение. Литературный обзор (Introduction. Literature Review)

В системах электроснабжения (СЭС) нетяговых потребителей, обслуживающих электрифицированные железные дороги, существует проблема обеспечения качества электроэнергии, особенно в части показателей несимметрии и несинусоидальности питающего напряжения. Для развития таких СЭС, повышения их надежности и обеспечения возможности функционирования при тяжелых авариях в питающей сети могут применяться накопители электроэнергии (НЭ) [1–3] и установки распределённой генерации (РГ) [4–6]. Часть этих установок может работать на возобновляемых источниках энергии [7, 8]. В результате использования такого подхода возможно улучшение качества электроэнергии [9, 10]. В островных режимах работы [11] СЭС с установками РГ необходимо учитывать ограничения по балансу мощности и динамическое влияние на генерирующие установки двигательной нагрузки [12, 13]. Снизить колебания регулируемых параметров в таких режимах СЭС можно путем применения НЭ большой мощности [14] и современных технологий управления установками распределенной генерации [15–18]. Представленные в [19, 20] результаты показали высокую эффективность управления СЭС с РГ с помощью системы нечеткого логического вывода и прогностических алгоритмов.

Исследования, представленные в работах [21, 22], показали эффективность использования накопителей электроэнергии для регулирования режимов работы электроэнергетической системы. Применение НЭ в виде аккумуляторных батарей большой мощности в СЭС возможно для сглаживания колебаний мощности от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [23], снижения ее колебаний в сети [24], управления перетоками в сети [25], а также для целей противоаварийного управления [26]. Накопители электроэнергии могут применяться для оптимизации совместной работы с дизель-генераторной [27], газо-поршневой [28] установками в составе изолированной СЭС.

Ниже представлены результаты исследований режимов работы системы электроснабжения железной дороги (СЭЖД) с двигательной нагрузкой в трехфазной СЭС 6 кВ, питающей нетяговых потребителей. Изучалось влияние предлагаемого метода регулирования установок РГ и накопителей электроэнергии на режимы сетевого кластера, представляющего собой распределительную электрическую сеть, подключенную к СЭЖД через вставку постоянного тока (ВПТ) [29, 30]. Моделирование выполнялось в системе MATLAB. Цель исследования заключалась в определении влияния согласованного

управления накопителями электроэнергии и установками РГ с прогностическими регуляторами [31] на режимы работы сетевого кластера.

Научная значимость проведенного исследования состоит в получении новых результатов, позволяющих анализировать сложные процессы, протекающие в СЭС с пониженным качеством электроэнергии, оснащенных установками РГ и накопителями. Практическая значимость заключается в том, что разработанные имитационные модели и результаты моделирования могут использоваться при разработке мероприятий по повышению надежности и улучшению качества процессов управления в системах электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта, а также в СЭС других отраслей при наличии проблем с качеством электроэнергии.

Материалы и методы (Materials and methods)

Моделирование выполнялось для схемы СЭЖД с сетевым класетром 6 кВ, представленной на рисунке 1. Основное питание поступает от тяговой подстанции 110/27,5/6 кВ. Особенностью схемы является использование вставки постоянного тока для улучшения качества электроэнергии в СЭС с установками РГ, НЭ и двигательной нагрузкой. В качестве РГ использовались: турбогенераторная установка (ТГУ) мощностью 3,125 МВА с самонастраивающимися прогностическими автоматическими регуляторами возбуждения (СПАРВ) и частоты вращения (СПАРЧВ) ротора [31] и солнечная электростанция мощностью 1 МВт. Максимальная мощность двигательной нагрузки в СЭС составляла 1 МВт.

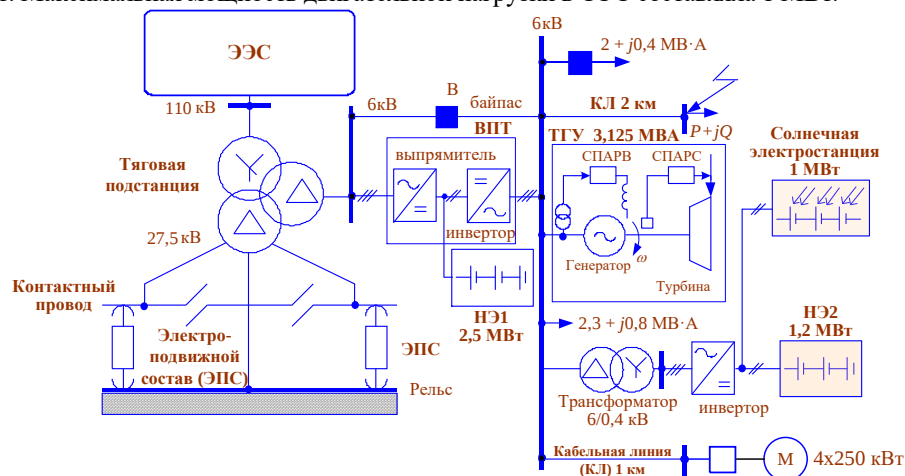


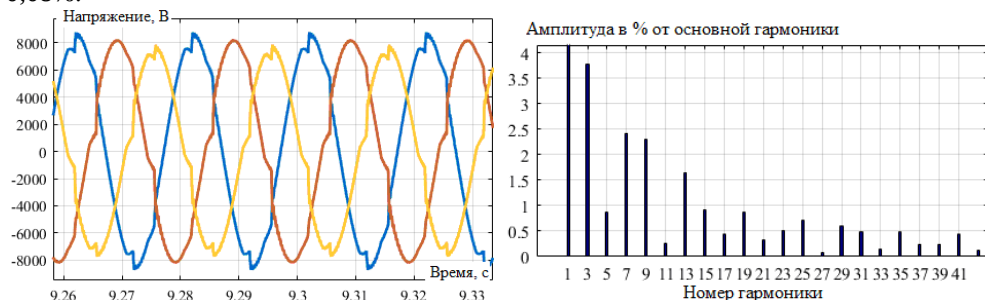
Рис. 1. Схема исследуемой СЭЖД

Fig. 1. Scheme of the railway power supply system under study

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В исследуемой СЭЖД применялся метод согласованной настройки [17], а также прогностические регуляторы [31]. Моделировались следующие процессы: переход сетевого кластера в островной режим; кратковременное трехфазное короткое замыкание (КЗ) в сети 6 кВ; подключение дополнительной нагрузки.

Форма напряжения и состав гармоник на шинах 6 кВ сетевого кластера показаны на рисунке 2 в режимах подключения через байпас и ВПТ. Анализ проводился с помощью программы FFT Tool системы MATLAB. При подключении СЭС через байпас заметно ухудшается качество электроэнергии по гармоническим искажениям с преобладанием нечетных гармоник. Кроме того, наблюдается несимметрия питающего напряжения: $K_{2U} = 5,8 \%$. Применение ВПТ позволяет решить проблему с качеством электроэнергии. Результаты моделирования такого режима показаны на рис. 2 б; в этом случае коэффициенты гармоник $K_{U(n)}$ уменьшаются до долей процентов, а K_{2U} снижается до 0,08%.



а)

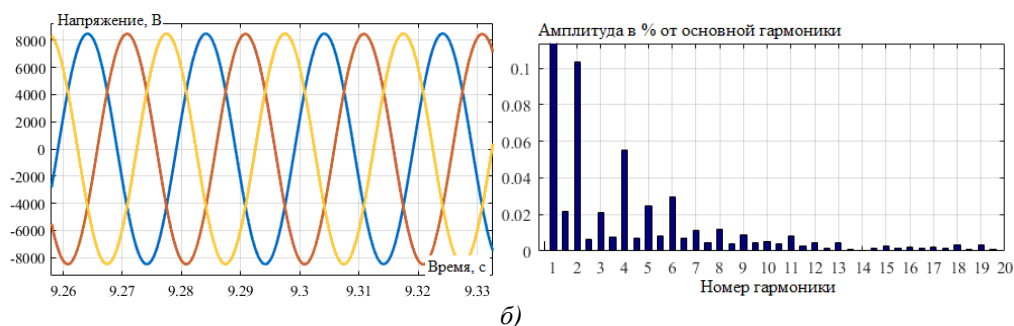


Рис. 2. Форма напряжения и состав гармоник на шинах 6 кВ СЭС. а) при подключении СЭС через байпас б) подключение кластера через ВПТ

Fig.2. Voltage shape and harmonic composition on 6 kV buses of the power supply system а) when connecting the power supply system via bypass, б) when connecting the cluster via a DC insert

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Ниже представлены результаты моделирования различных режимов при подключении исследуемой СЭС через ВПТ.

Результаты (Results)

Выполнено моделирование следующих режимов:

- временное отключение (на время 0,5 с) основного питания сетевого кластера со стороны ВПТ;
- кратковременное (длительностью 0,5 с) трехфазное КЗ в конце кабельной линии 6 кВ длиной два километра.

В данных режимах НЭ были подключены постоянно или вводились в работу при снижении напряжения.

Результаты моделирования отключения основного питания представлены на рисунках 3–6.

Анализ представленных на этих рисунках временных зависимостей позволяет сделать вывод об эффективности применения прогностических регуляторов ТГУ и накопителей электроэнергии для уменьшения провалов напряжения и частоты. Совместное использование СПАРВ, СПАРЧВ и НЭ обеспечивает лучшие параметры качества регулирования в переходных процессах: практически отсутствует колебательность, провалы, перерегулирование напряжения, частоты и скорости ротора двигателя. Таким образом, обеспечивается стабильность всех регулируемых параметров.

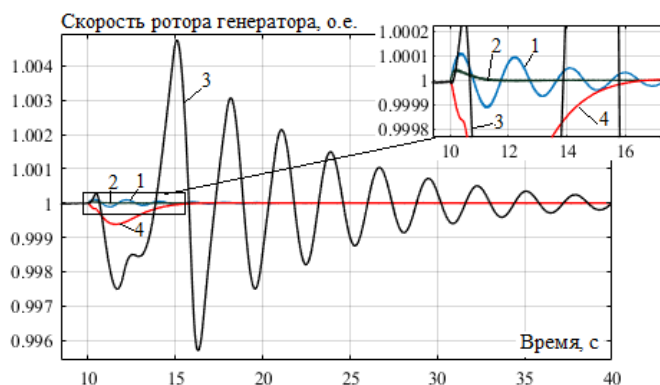


Рис. 3. Скорость вращения ротора генератора при отключении основного питания: 1 – использовались НЭ и регуляторы без прогнозирующего звена (ПЗ); 2 – использовались НЭ, СПАРВ и СПАРЧВ; 3 – без НЭ и регуляторы без ПЗ; 4 – без НЭ и с использованием СПАРВ и СПАРЧВ

Fig. 3. Generator rotor rotation speed when main power is turned off: 1 – electricity storage devices (ESD) and regulators without a predictive link (PL) were used; 2 – ESD and self-adjusting predictive automatic excitation and rotation speed controllers were used; 3 – without ESD and regulators without PL; 4 – without ESD and using self-adjusting predictive automatic excitation and rotation speed controllers

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

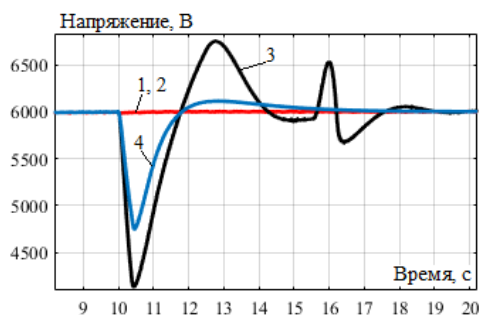


Рис. 4. Напряжение турбогенератора при отключении основного питания: обозначения 1, 2, 3 и 4 аналогичны рис.3

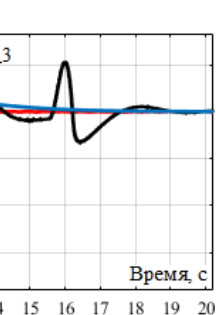


Fig. 4. Turbogenerator voltage when main power is turned off: designations 1, 2, 3 and 4 are similar to Fig. 3



Рис. 5. Изменение скорости ротора двигателя при отключении основного питания: обозначения 1, 2, 3 и 4 аналогичны рис.3

Fig. 5. Changing the motor rotor speed when the main power is turned off: designations 1, 2, 3 and 4 are similar to Fig. 3

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

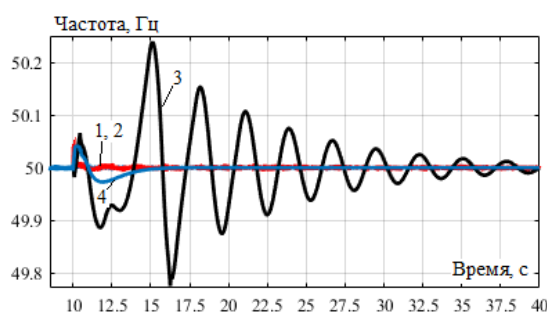


Рис.6. Изменение частоты в сети при отключении основного питания: обозначения 1, 2, 3 и 4 аналогичны рис.3

Fig.6. Changing the frequency in the network when the main power is turned off: designations 1, 2, 3 and 4 are similar to Fig. 3

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Использование СПАРВ и СПАРЧВ обеспечивает быструю стабилизацию напряжения и частоты в переходных процессах и приемлемое качество регулирования этих параметров даже без применения накопителей электроэнергии. Значения показателей качества регулирования напряжения и частоты при отключенных НЭ в сравнении с различными типами регуляторов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Сравнение показателей качества регулирования обычных и прогностических АРВ и АРЧВ при отключении основного питания

Comparison of control quality indicators for conventional and predictive ARVs and ARVs when the main power is turned off

Параметр, определяющий качество регулирования	Тип регуляторов		Улучшение показателя, %
	АРВ и АРЧВ без ПЗ	СПАРВ и СПАРЧВ	
Время переходного процесса скорости ротора турбогенератора, с	35	5	85,7
Перерегулирование скорости ротора турбогенератора σ , %	0,5	0	100
Степень затухания колебаний скорости ротора турбогенератора μ , о.е.	0,4	1	60
Время переходного процесса напряжения турбогенератора, с	9	5	44,4
Перерегулирование напряжения турбогенератора σ , %	12,5	2,5	80
Степень затухания колебаний напряжения турбогенератора μ , о.е.	0,04	1	96

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Примечание: $\sigma = \frac{h_{\max 1} - h}{h} \cdot 100$, %; $\mu = 1 - \frac{h_{\max 2}}{h_{\max 1}}$, где $h_{\max 1}$ – амплитуда первого

колебания; $h_{\max 2}$ – амплитуда второго колебания; h – установившееся значение регулируемой величины.

На рисунках 7–10 представлены результаты моделирования удаленного трехфазного КЗ и его отключения через 0,5 с.



Рис. 7. Механическая мощность на валу турбогенератора при кратковременном КЗ: 1 – регуляторы без прогнозирующего звена; 2 – СПАРВ и СПАРЧВ

Fig. 7. Mechanical power on the turbogenerator shaft during a short-term short circuit: 1 – regulators without a predictive link; 2 – self-adjusting predictive automatic excitation and speed controllers



Рис. 8. Скорость вращения ротора генератора при кратковременном КЗ: обозначения 1 и 2 соответствуют рис.7

Fig. 8. Generator rotor rotation speed during short-term short circuit: designations 1 and 2 correspond to Fig. 7

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

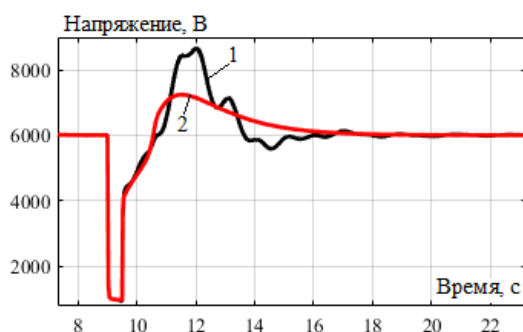


Рис. 9. Напряжение турбогенератора при кратковременном КЗ: обозначения 1 и 2 соответствуют рис.7

Fig. 9. Turbogenerator voltage during short-term short circuit: designations 1 and 2 correspond to Fig. 7

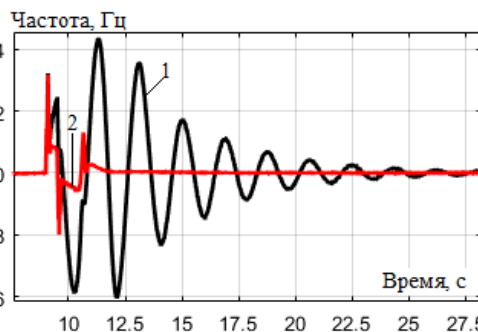


Рис.10. Изменение частоты в сети при кратковременном КЗ: обозначения 1 и 2 соответствуют рис.7

Fig. 10. Change in frequency in the network during a short-term short circuit: designations 1 and 2 correspond to Fig. 7

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Применение СПАРВ и СПАРЧВ совместно с НЭ обеспечивает быстрое демпфирование колебаний напряжения, частоты и мощности в СЭС. Таким образом, СПАРВ и СПАРЧВ позволяют обеспечить плавное регулирование и стабилизацию всех параметров рассматриваемой СЭС при кратковременном КЗ. Значения показателей качества регулирования для рассматриваемых параметров в режиме КЗ с постоянно включенными НЭ представлены в таблице 2.

Кроме того, моделировался режим подключения дополнительной мощной нагрузки. Результаты приведены на рисунках 11 и 12, откуда видно, что использование СПАРВ и СПАРЧВ обеспечивает отсутствие перерегулирования и колебательности напряжения и скорости ротора генератора; при этом значительно снижается время переходного процесса: для скорости ротора генератора в три раза (рис.11, характеристики 1 и 2); для напряжения – в два раза (рис. 12, характеристики 1 и 2). Применение НЭ позволяет разгрузить турбогенератор и дополнительно снизить провал напряжения.

Таблица 2

Table 2

Сравнение показателей качества регулирования обычных и прогностических АРВ и АРЧВ после отключения КЗ

Comparison of the quality indicators of regulation of conventional and predictive ARVs and ARCVs after switching off the short circuit

Параметр, определяющий качество регулирования	Тип регуляторов		Улучшение показателя, %
	АРВ и АРЧВ без ПЗ	СПАРВ и СПАРЧВ	
Время переходного процесса скорости ротора турбогенератора, с	16	2	87,5
Перерегулирование скорости ротора турбогенератора σ , %	1,2	0	100
Степень затухания колебаний скорости ротора турбогенератора μ , о.е.	0,16	1	84
Время переходного процесса напряжения турбогенератора, с	7,5	6,5	13,3
Перерегулирование напряжения турбогенератора σ , %	41,7	16,6	60,2
Степень затухания колебаний напряжения турбогенератора μ , о.е.	0,6	1	40

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



Рис.11. Скорость ротора генератора в режиме подключения дополнительной нагрузки: 1 – без использования НЭ и регуляторы без ПЗ; 2 – без НЭ и с использованием СПАРВ и СПАРЧВ; 3 – использовались НЭ, СПАРВ и СПАРЧВ

Fig. 11. Generator rotor speed when connecting additional load: 1 – without the use of energy storage devices (ESD) and regulators without a predictive link; 2 – without ESD and using self-adjusting predictive automatic excitation and rotation speed controllers; 3 – ESD and self-adjusting predictive automatic excitation and rotation speed controllers were used

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

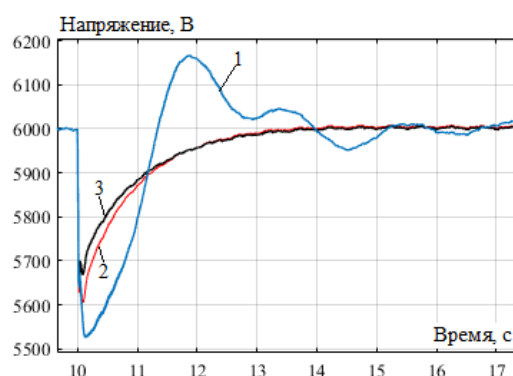


Рис. 12. Напряжение турбогенератора при подключении дополнительной нагрузки: обозначения соответствуют рис.11

Fig. 12. Turbogenerator voltage when connecting an additional load: designations correspond to Fig. 11

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Заключение (Conclusions)

Результаты имитационного моделирования рассмотренных переходных режимов в исследуемой СЭС позволяют сделать следующие выводы:

1. Постоянно подключенные накопители электроэнергии практически до нуля уменьшают глубину провала напряжения при переходе сетевого кластера в островной режим.
2. Самонастраивающиеся прогностические регуляторы турбогенераторной установки уменьшают глубину провала напряжения, снижают время переходного процесса и величины перерегулирования параметров режима СЭС.
3. Согласованное управление накопителями электроэнергии и турбогенератором с прогностическими регуляторами уменьшает практически до нуля величину перерегулирования и существенно снижает время переходного процесса регулируемых параметров при возмущениях в сетевом кластере.
4. Принимая во внимание полученные результаты, целесообразно проведение дальнейших исследований по применению метода согласованного управления активными элементами, используемыми в системе электроснабжения для регулирования параметров режима.

Литература

1. Ефремов Д.Г., Глускин И.З. Повышение динамической устойчивости электростанции с помощью накопителей энергии. *Электричество*. 2016. № 12. С. 20-27.
2. P. Lombardi, Z. A. Styczynski, T. Sokolnikova and K. Suslov, "Use of energy storage in isolated micro grids", *Power Systems Computation Conference (PSCC)*, 2014, pp. 1-6.
3. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Исследование режимов работы изолированной системы электроснабжения с управляемыми установками распределенной генерации, накопителями электроэнергии и двигательной нагрузкой. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2021; 23(5): 184-194.
4. Илюшин П.В. О свойствах энергоустановок с газопоршневыми двигателями // *Электрические станции*. 2009. № 11. С. 42-46.
5. Pilavachi P.A. Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power // *Appl. Therm. Eng.* 2002. Vol. 22. No. 18. pp. 2003–2014.
6. Albert H. Schrottenboer, Arjen A.T. Veenstra, Michiel A.J. uit het Broek, Evrim Ursavas, A Green Hydrogen Energy System: Optimal control strategies for integrated hydrogen storage and power generation with wind energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 168, 2022, 112744, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112744>
7. Voropai N.I., Stychinsky Z.A. Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics. *Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität*, 2010. – 223 p.
8. Samoylenko V.O., Ilyushin P.V., Pazderin A.V. Estimating distributed generation reliability level, *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2020. Vol. 18. pp. 70–75. <https://doi.org/10.24084/repqj18.225>
9. Sikorski T., Rezmer J. Distributed Generation and Its Impact on Power Quality in Low-Voltage Distribution Networks // *Power Quality Issues in Distributed Generation*, Dr. Jaroslaw Luszcz (Ed.), InTech. 2015. <https://doi.org/10.5772/61172>
10. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. Solving the flicker noise origin problem by optimally controlled units of distributed generation // *Proceed. of 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. 2018. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378834>
11. Lopes, J.A. Defining control strategies for microgrids islanded operation / J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, A. G. Madureira // *IEEE Trans. Power Syst.* 2006. Vol. 21. No. 2. pp. 916-924.
12. Илюшин П.В., Гуревич Ю.Е. О специальном воздействии на систему возбуждения автономно работающих генераторов при больших набросах нагрузки // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2016. № 2. С. 2-7.
13. Илюшин П.В. Анализ обоснованности уставок устройств РЗА генерирующих установок с двигателями внутреннего сгорания на объектах распределенной генерации // *Релейная защита и автоматизация*. 2015. № 3 (20). С. 24-29.
14. Илюшин П.В., Куликов А.Л., Березовский П.К. Эффективное использование накопителей электрической энергии для предотвращения отключений объектов распределенной генерации при кратковременных отклонениях частоты // *Релейная защита и автоматизация*. 2019. № 4 (37). С. 26-33.
15. Савенко А.Е., Савенко П.С. Использование и совершенствование автоматических систем для управления рассредоточенными источниками электроэнергии в локальных электрических системах. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022; 24(4):105-115. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-105-115>

16. Ran Wang, Ping Wang, Gaoxi Xiao. Intelligent Microgrid Management and EV Control Under Uncertainties in Smart Grid. Springer. 2018. – 218 p.
17. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен Ван Х. Координация настроек автоматических регуляторов паротурбинной установки распределенной генерации. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 1 (150). С. 112-122.
18. Ilyushin P., Kulikov A., Loskutov A. Application of the Wald Sequential Procedure in Automatic Network Control with Distributed Generation. In: Silhavy, R., Silhavy, P., Prokopova, Z. (eds) Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems. CoMeSySo 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 1295. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63319-6_11
19. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан З.Х. Нечеткие регуляторы для ветрогенерирующих установок. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2014; № 7-8. С. 60-69.
20. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен В.Х. Моделирование газотурбинной установки с прогностическими регуляторами напряжения и скорости. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020; 22(3): 60-67.
21. Куликов Ю.А. Накопители электроэнергии - эффективный инструмент управления режимами электроэнергетических систем / Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: материалы 9 междунар. молодеж. науч.-техн. конф., Казань, 1–5 окт. 2018 г. В 3 т. – Казань: Казан. гос. энергет. ун-т, 2018. – Т. 1. – С. 38–43.
22. Илюшин П.В., Березовский П.К. Анализ международного опыта формирования условий для эффективного применения систем накопления электроэнергии в управлении режимами // Энергетик. 2019. № 11. С. 3-8.
23. Masuta T., Gari da Silva J., Fonseca, Ootake H., Murata A. IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON) // Application of battery energy storage system to power system operation for reduction in pv curtailment based on few-hours-ahead PV forecast. Wollongong. 2016. pp. 1-6.
24. Lee S.J. Coordinated Control Algorithm for Distributed Battery Energy Storage Systems for Mitigating Voltage and Frequency Deviations // IEEE Transactions on Smart Grid, May 2016. pp. 1713-1722.
25. Reihani E., Sepasi S., Roose L.R., Matsuura M. Energy management at the distribution grid using a Battery Energy Storage System (BESS) // Electrical Power and Energy Systems, No. 77, 2016. pp. 337-344.
26. Ефремов Д.Г., Глушкин И.З. Повышение динамической устойчивости генератора с помощью управления группой накопителей энергии различного вида. // Вестник ИГЭУ, No 6, 2017. С. 5-14.
27. Зырянов В.М., Кучак С.В., Бачурин П.А., Харитонов С.А. Экспериментальные исследования и испытания совместной работы системы накопления энергии и ДГУ в составе автономной энергосистемы // Промышленная энергетика. 2018. № 10. С. 2-10.
28. Бачурин П.А., Гладков Д.С., Зырянов В.М., Пранкевич Г.А., Кучак С.В., Нестеренко Г.Б., Лебедев Д.Е., Решетников А.Н. и др. Испытания промышленного образца системы накопления энергии СНЭ-10- 1200-400 при совместной работе с ГПУ в составе экспериментальной энергосистемы + Testing of industrial design energy storage system (ESS-101200-400) and gas piston units in experimental power system // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 2 (59). С. 18-24.
29. M. S. S. Danish, H. Matayoshi, H. R. Howlader, S. Chakraborty, P. Mandal and T. Senju, "Microgrid Planning and Design: Resilience to Sustainability," 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia), Bangkok, Thailand, 2019, pp. 253-258, <https://doi.org/10.1109/GTDAAsia.2019.8716010>
30. S. M. Ferdous, F. Shahnian and G. M. Shafiullah, "Stability and robustness of a coupled microgrid cluster formed by various coupling structures," in Chinese Journal of Electrical Engineering, vol. 7, no. 4, pp. 60-77, Dec. 2021, <https://doi.org/10.23919/CJEE.2021.000038>
31. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Прогностическое управление турбогенераторной установкой на основе самонастраивающихся регуляторов. Энергетик. 2023. № 7. С. 9-13.

Авторы публикации

Булатов Юрий Николаевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой энергетики Братского государственного университета.

Крюков Андрей Васильевич – д-р техн. наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета.

Суслов Константин Витальевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии Национального исследовательского университета «МЭИ»; профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета.

Кижин Вадим Владиславович – аспирант, ассистент кафедры энергетики Братского государственного университета.

References

1. Efremov D.G., Gluskin I.Z. Povyshenie dinamicheskoi ustoichivosti elektrostantsii s pomoshch'yu nakopitelei energii. *Elektrichestvo*. 2016. № 12. S. 20-27.
2. P. Lombardi, Z. A. Styczynski, T. Sokolnikova and K. Suslov, "Use of energy storage in isolated micro grids", *Power Systems Computation Conference (PSCC)*, 2014, pp. 1-6.
3. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. Issledovanie rezhimov raboty izolirovannoi sistemy elektrosnabzheniya s upravlyaemymi ustanovkami raspredelennoi generatsii, nakopitelyami elektroenergii i dvigatel'noi nagruzkoi // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2021; 23(5): 184-194.
4. Ilyushin P.V. O svoystvakh energoustanovok s gazoporshnevymi dvigatelyami // *Elektricheskiye stantsii*. 2009. № 11. S. 42-46.
5. Pilavachi P.A. Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power // *Appl. Therm. Eng.* 2002. Vol. 22. No. 18. P. 2003–2014.
6. Albert H. Schrottenboer, Arjen A.T. Veenstra, Michiel A.J. uit het Broek, Evrim Ursavas, A Green Hydrogen Energy System: Optimal control strategies for integrated hydrogen storage and power generation with wind energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 168, 2022, 112744, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112744>
7. Voropai N.I., Stychinsky Z.A. Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010. – 223 p.
8. Samoylenko V.O., Ilyushin P.V., Pazderin A.V. Estimating distributed generation reliability level // *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2020. Vol. 18. P. 70–75. <https://doi.org/10.24084/repqj18.225>
9. Sikorski T., Rezmer J. Distributed Generation and Its Impact on Power Quality in Low-Voltage Distribution Networks // *Power Quality Issues in Distributed Generation*, Dr. Jaroslaw Luszcz (Ed.), InTech. 2015. <https://doi.org/10.5772/61172>
10. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. Solving the flicker noise origin problem by optimally controlled units of distributed generation // *Proceed. of 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. 2018. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378834>
11. Lopes, J.A. Defining control strategies for microgrids islanded operation / J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, A. G. Madureira // *IEEE Trans. Power Syst.* - 2006. -Vol. 21. - № 2. - pp. 916-924.
12. Ilyushin P.V., Gurevich Yu.E. O spetsial'nom vozdeystvii na sistemu vzbuzhdeniya avtonomno rabotayushchikh generatorov pri bol'shikh nabrosakh nagruзки // *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*. 2016. № 2. S. 2-7.
13. Ilyushin P.V. Analiz obosnovannosti ustavok ustroystv RZA generiruyushchikh ustanovok s dvigatelyami vnutrennego sgoraniya na ob'yektakh raspredelennoy generatsii // *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*. 2015. № 3 (20). S. 24-29.
14. Ilyushin P.V., Kulikov A.L., Berezovsky P.K. Effektivnoye ispol'zovaniye nakopiteley elektricheskoy energii dlya predotvrashcheniya otklyucheniy ob'yektov raspredelennoy generatsii pri kratkovremennykh otkloneniyakh chastoty // *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*. 2019. № 4 (37). S. 26-33.
15. Savenko A.E., Savenko P.S. Ispol'zovanie i sovershenstvovanie avtomaticheskikh sistem dlya upravleniya rassredotochennymi istochnikami elektroenergii v lokal'nykh elektricheskikh sistemakh // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2022; 24(4):105-115. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-105-115>
16. Ran Wang, Ping Wang, Gaoxi Xiao. Intelligent Microgrid Management and EV Control Under Uncertainties in Smart Grid. 2018. – P. 218
17. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen Van Kh. Koordinatsiya nastroeek avtomaticheskikh regulyatorov paroturbinnnoi ustanovki raspredelennoi generatsii // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020. T. 24. № 1 (150). S. 112-122.
18. Ilyushin P., Kulikov A., Loskutov A. Application of the Wald Sequential Procedure in Automatic Network Control with Distributed Generation. In: Silhavy, R., Silhavy, P., Prokopova, Z. (eds) *Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems. CoMeSySo 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1295. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63319-6_11
19. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Z.Kh. Nechetkie regulatory dlya vetrogeneriruyushchikh ustanovok // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2014; № 7-8. S. 60-69.
20. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen V.Kh. Modelirovanie gazoturbinnnoi ustanovki s prognosticheskimi regulyatorami napryazheniya i skorosti // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2020; 22(3): 60-67.
21. Kulikov Yu.A. Kulikov YU.A. Nakopiteli elektroenergii - effektivnyy instrument upravleniya rezhimami elektroenergeticheskikh sistem / *Elektroenergetika glazami molodezhi* – 2018: materialy 9 mezhdunar. molodezh. nauch.-tekhn. konf., 1–5 okt. 2018 g. V 3 t. – Kazan': Kazan. gos. energet. unt, 2018. – T. 1. – S. 38–43.

22. Ilyushin P.V., Berezovsky P.K. Analiz mezhdunarodnogo opyta formirovaniya usloviy dlya effektivnogo primeneniya sistem nakopleniya elektroenergii v upravlenii rezhimami // Energetik. 2019. № 11. S. 3-8.
23. Masuta T., Gari da Silva J., Fonseca, Ootake H., Murata A. IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON) // Application of battery energy storage system to power system operation for reduction in pv curtailment based on few-hours-ahead PV forecast. Wollongong. 2016. pp. 1-6.
24. Lee S.J. Coordinated Control Algorithm for Distributed Battery Energy Storage Systems for Mitigating Voltage and Frequency Deviations // IEEE Transactions on Smart Grid, May 2016. pp. 1713-1722.
25. Reihani E., Sepasi S., Roose L.R., Matsuura M. Energy management at the distribution grid using a Battery Energy Storage System (BESS) // Electrical Power and Energy Systems, No. 77, 2016. pp. 337-344.
26. Efremov D.G., Gluskin I.Z. Povysheniye dinamicheskoy ustoychivosti generатора s pomoshch'yu upravleniya gruppoy nakopiteley energii razlichnogo vida // Vestnik IGEU, No 6, 2017. S. 5-14.
27. Zyryanov V.M., Kuchak S.V., Bachurin P.A., Kharitonov S.A. Eksperimental'nyye issledovaniya i ispytaniya sovmestnoy raboty sistemy nakopleniya energii i DGU v sostave avtonomnoy energosistemy // Promyshlennaya energetika. 2018. № 10. S. 2-10.
28. Bachurin P.A., Gladkov D.S., Zyryanov V.M., Prankevich G.A., Kuchak S.V., Nesterenko G.B., Lebedev D.E., Reshetnikov A.N. and others. Ispytaniya promyshlennogo obraztsa sistemy nakopleniya energii SNE-10- 1200-400 pri sovmestnoy rabote s GPU v sostave eksperimental'noy energosistemy + Testing of industrial design energy storage system (ESS-101200-400) and gas piston units in experimental power system // Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye. 2020. № 2 (59). S. 18-24.
29. M. S. S. Danish, H. Matayoshi, H. R. Howlader, S. Chakraborty, P. Mandal and T. Senjyu, "Microgrid Planning and Design: Resilience to Sustainability," 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia), Bangkok, Thailand, 2019, pp. 253-258, <https://doi.org/10.1109/GTDAAsia.2019.8716010>
30. S. M. Ferdous, F. Shahnian and G. M. Shafiullah, "Stability and robustness of a coupled microgrid cluster formed by various coupling structures," in Chinese Journal of Electrical Engineering, vol. 7, no. 4, pp. 60-77, Dec. 2021, <https://doi.org/10.23919/CJEE.2021.000038>
31. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. Prognosticheskoe upravlenie turbogeneratormoi ustanovkoi na osnove samonastraivayushchikhsya regulyatorov // Energetik. 2023. № 7. S. 9-13.

Authors of the publication

Yuri N. Bulatov - Bratsk State University, Bratsk, Russia.

Andrey V. Kryukov - Irkutsk State Transport University, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Konstantin V. Suslov - National Research University "MEI", Moscow, Russia; Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Vadim V. Kizhin –Bratsk State University, Bratsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3. «Электроэнергетика»

Получено

02.11.2023 г.

Отредактировано

17.11.2023 г.

Принято

21.11.2023 г.