

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 004.94, 621.316, 681.51

DOI: 10.18324/2077-5415-2017-4-108-114

Устранение фликера в сетях с установками распределенной генерации на основе согласованно настроенных регуляторов

Ю.Н. Булатов^{1 a}, А.В. Крюков^{2 b}¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия²Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия^abulatovyura@yandex.ru, ^band_kryukov@mail.ru

Статья поступила 4.10.2017, принята 8.10.2017

Применение установок распределенной генерации (РГ) в электроэнергетических системах (ЭЭС) является интенсивно развивающимся направлением, позволяющим разгрузить сети, снизить потери мощности и энергии, повысить надежность и устойчивость ЭЭС. Влияние РГ на качество электроэнергии неоднозначно. С одной стороны, наличие таких установок позволяет поддерживать требуемые уровни напряжений в узлах сети. С другой — в сетях с РГ могут возникать колебания напряжения и частоты, приводящие к появлению фликера, под которым понимается ощущение неустойчивости зрительного восприятия. Процессы, протекающие в сетях с РГ при появлении фликера, недостаточно изучены, поэтому исследования вопросов возникновения и устранения этого нежелательного явления имеют несомненную актуальность. В статье представлены результаты моделирования режимов сети с установками РГ, реализованными на основе синхронных генераторов. Исследования проводились для следующих режимов: у генераторов отсутствовали регуляторы напряжения и частоты; использование согласованно и несогласованно настроенных регуляторов; применение прогностических алгоритмов для управления напряжением и частотой установок РГ. Полученные результаты показали, что при включении и отключении нагрузки в сетях с нерегулируемыми генераторами наблюдается фликер, вызванный колебаниями напряжения и частоты. К такому же эффекту может приводить и несогласованная настройка регуляторов возбуждения и частоты синхронных генераторов установок РГ. Результаты моделирования показали, что устранение фликера возможно путем применения согласованной настройки этих регуляторов; при этом использование прогностических алгоритмов, наряду с устранением фликера, позволяет повысить устойчивость и улучшить качество управления напряжением и частотой.

Ключевые слова: установки распределенной генерации; фликер; согласованная настройка регуляторов.

Elimination of flicker in networks with distributed generators on the basis of coordinated adjustment of regulators

Yu.N. Bulatov^{1 a}, A.V. Kryukov^{2 b}¹Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia²Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia^abulatovyura@yandex.ru, ^band_kryukov@mail.ru

Received 4.10.2017, accepted 8.10.2017

The use of distributed generators (DG) in electrical power systems (EPS) is an intensively developing trend that makes it possible to unload the networks, reduce power and energy losses, increase the reliability and stability of EPS. The influence of DG on quality of electricity is controversial. On the one hand, the availability of such installations allows maintaining the required voltage levels at network nodes. On the other hand, the networks equipped with DG may witness the voltage and frequency oscillations, leading to a flicker that means a sense of instability in visual perception. The processes, taking place in the networks with DG when the flicker occurs, have not been sufficiently studied. Therefore, the studies of problems related to appearance and elimination of this undesirable phenomenon are of undoubted relevance. The article covers the results of simulation of network modes with DG implemented on the basis of synchronous generators. The studies were carried out for the following modes: the generators lacked voltage and frequency regulators; application of coordinated and uncoordinated regulators; application of prognostic algorithms to control the voltage and frequency of the DG. The obtained results showed that the flicker occurs in the networks with uncontrolled generator when applying and removing the load. Such flicker is caused by voltage and frequency oscillations. The same effect can be caused by uncoordinated adjustment of field regulator and frequency regulators of synchronous distributed generators. The simulation results showed that the flicker can be eliminated by applying a coordinated adjustment of these regulators; besides, the use of prognostic algorithms, along with flicker elimination, improves stability and quality of voltage and frequency control.

Keywords: distributed generators; flicker; coordinated adjustment of regulators.

Введение

В современных электроэнергетических системах (ЭЭС) начинают внедряться установки распределенной генерации (РГ), к которым можно отнести источники электроэнергии (ЭЭ), находящиеся в непосредственной близости от потребителей:

- нетрадиционные источники ЭЭ, например, ветровые турбины, солнечные панели, топливные элементы;
- когенерационные установки малой и средней мощности, работающие на основе газотурбинных и парогазовых технологий;
- мини- и микроГЭС.

Применение установок РГ позволяет разгрузить электрическую сеть, снизить потери мощности и энергии, повысить надежность и «живучесть» ЭЭС. Кроме того, возникают новые возможности формирования рынков электроэнергии и освобождаются пропускные способности связей [1]. Однако распределенная генерация оказывает неоднозначное влияние на качество ЭЭ. С одной стороны, наличие установок РГ позволяет поддерживать уровни напряжений в узлах сети, уменьшать несимметрию и гармонические искажения [2–7]. С другой — генераторы небольшой мощности могут вызывать колебания напряжения, которые приводят к появлению неустойчивости зрительного восприятия, или фликера [1; 8; 9]. Фликер связан с взаимодействием оборудования и динамическим поведением машин. В работах [1; 9] отмечается, что возникновение фликера обычно происходит при резком снижении напряжения в узле подключения установки РГ; при этом применение регуляторов напряжения и частоты у генераторов установок РГ может значительно усложнить ситуацию, особенно если регуляторы не настроены должным образом.

При широком использовании установок РГ очень важна точная оценка их воздействия на электрическую сеть, что позволяет избежать ухудшения качества электроэнергии. Поэтому исследование вопросов возникновения и устранения фликера в электрических сетях с установками РГ имеет несомненную актуальность.

В статье представлены результаты моделирования фликера в сети с установками РГ, реализованными на основе синхронных турбогенераторов с автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ). Для анализа использовались методы спектрального анализа и вейвлет-преобразования.

Описание модели исследуемой сети и регуляторов синхронных генераторов. Исследования проводились в системе MATLAB для модели системы электроснабжения (СЭС) с установками РГ применительно к схеме, показанной на рис. 1. Схема модели исследуемой СЭС представлена на рис. 2.

Моделировалась СЭС с нагрузкой потребителей $5 + j2,4$ МВ·А, связанная с питающей ЭЭС (блок System) через трансформатор 110/35/6 кВ. В состав СЭС входила установка РГ, реализованная на основе двух турбогенераторов (блоки *Synchronous Machine*) с номинальной мощностью 3,125 МВ·А каждый и напряжени-

ем 6,3 кВ. Генераторы моделировались блоками *Synchronous Machine pu Fundamental*, входящими в состав библиотеки *SymPowerSystems*. На рис. 3 представлена структурная схема модели паровой турбины (блок *Steam turbine* на рис. 2). При моделировании использовались следующие параметры турбогенератора: $X_d = 2,34$ о.е., $E_q = 1,25$ о.е., $U_g = 1$ о.е., $T_{je} = 8,669$ с, $\delta = 46,9$ эл. град.

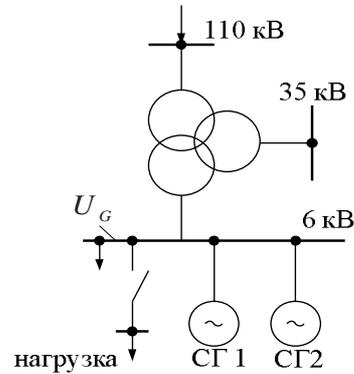


Рис. 1. Схема системы электроснабжения с установками РГ: СГ — синхронный генератор

Модели тиристорных систем возбуждения (блоки *Exciter1* и *Exciter2*) реализованы на основе уравнений, приведенных в [10]. Входные усилители моделировались аperiodическими звеньями первого порядка с коэффициентом усиления k_a и постоянной времени T_a ; при этом принято допущение о линейной характеристике этого элемента. Таким же образом осуществляется моделирование тиристорного возбудителя с коэффициентом k_e , постоянной времени T_e и блоком ограничения напряжения. В моделях использовались следующие значения параметров системы возбуждения: $k_a = 1$; $T_a = 0,001$ с; $k_e = 1$; $T_e = 0,025$ с.

Для регулирования частоты вращения ротора и напряжения генераторов использовались модели АРВ (блок MARE) и АРЧВ (блок *Automatic regulator of rotor speed*), представляющие собой пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы, описываемые следующими комплексными передаточными коэффициентами [11]:

1) блок АРВ:

$$W_{ARE} = \frac{1 + 0,5 j \omega}{0,5 j \omega} \cdot (W_{ARE}^U + W_{ARE}^\omega),$$

где $W_{ARE}^U = k_{ou} - \frac{0,02 k_{1u} j \omega}{0,06 j \omega + 1}$ — комплексный передаточный коэффициент канала АРВ по напряжению;

$W_{ARE}^\omega = \frac{2 k_{o\omega} j \omega}{(2 j \omega + 1)(0,02 j \omega + 1)} + \frac{0,05 k_{1\omega} j \omega}{0,05 j \omega + 1}$ — комплексный передаточный коэффициент канала АРВ по частоте; k_{ou} , k_{1u} , $k_{o\omega}$ и $k_{1\omega}$ — коэффициенты настройки каналов АРВ;

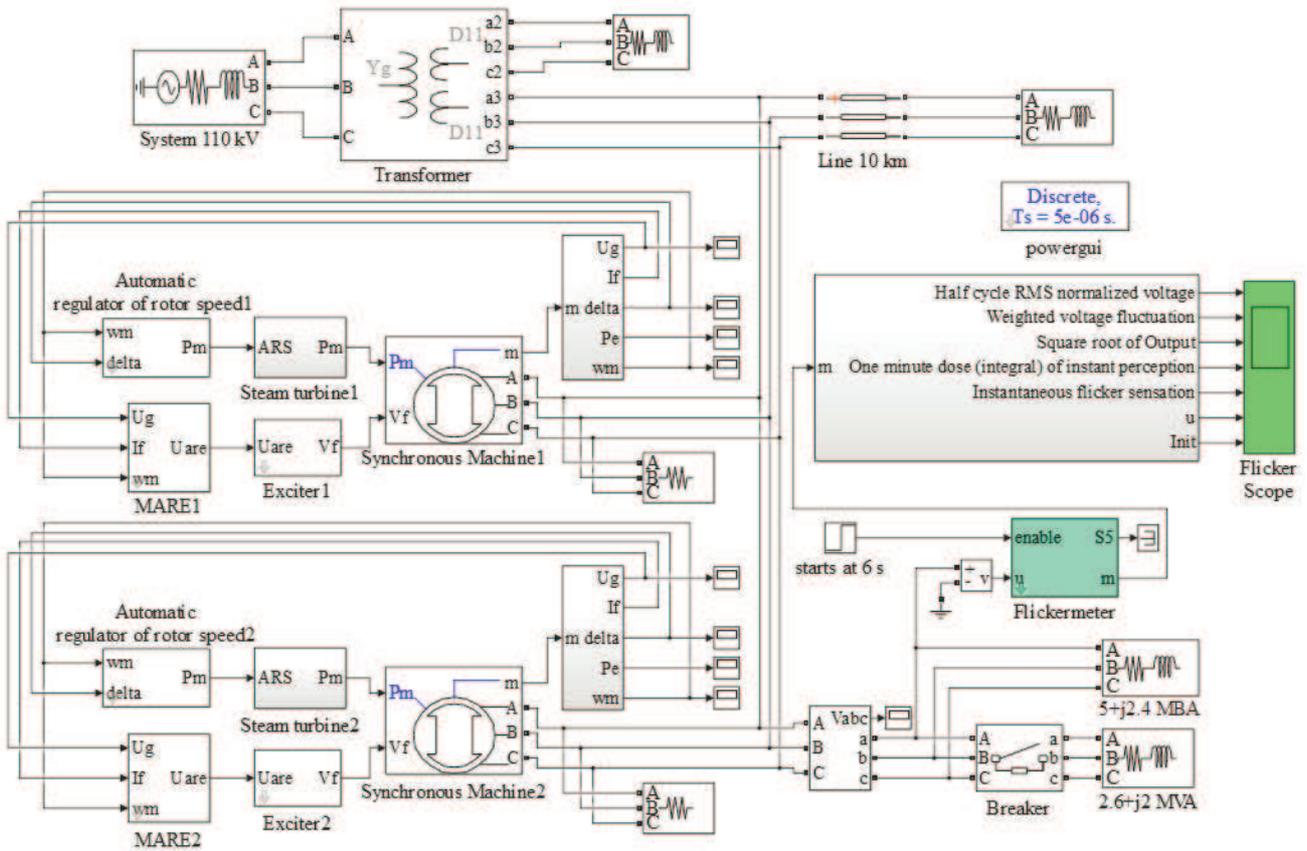


Рис. 2. Схема модели исследования в MATLAB

2) блок АРЧВ:

$$W_{ARF} = \left(k_p + \frac{k_i}{0,1j\omega} + \frac{k_d j\omega}{j\omega + 1} \right) \cdot \frac{1}{0,01j\omega + 1}$$

где k_p , k_i , k_d — искомые коэффициенты настройки АРЧВ; W_{ARF} — частотная передаточная функция АРЧВ.

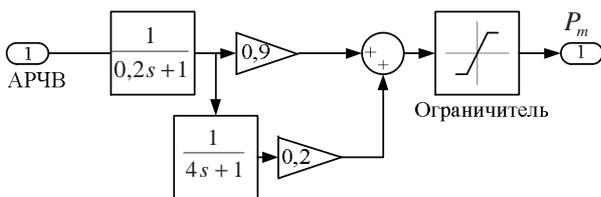


Рис. 3. Структурная схема используемой модели паровой турбины с учетом промежуточного отбора пара

В модели также использовались прогностические алгоритмы управления, описание которых приведено в [12–14].

Измерения колебаний напряжения и частоты выполнялись с помощью осциллографов. Режимы, приводящие к возникновению фликера, создавались путем подключения к узлу с установками РГ дополнительной нагрузки и ее отключения через 0,1 с.

В модели (рис. 2) также использовался стандартный блок *Flickermetr*, реализующий цифровой фликерметр в соответствии с международным стандартом МЭК

61000-4-15. Модель цифрового фликерметра позволяет измерять следующие параметры: среднеквадратическое значение напряжения для каждого полупериода; взвешенное колебание напряжения, полученное после пропускания через специальный фильтр; интегральная одномоментная доза фликера; мгновенное ощущение мерцания (мгновенная доза фликера).

Описание результатов исследования. Исследования проводились для следующих режимов работы установок РГ:

- 1) без регуляторов напряжения и частоты;
- 2) с согласованно и несогласованно настроенными АРВ и АРЧВ;
- 3) с использованием прогностических алгоритмов в АРВ и АРЧВ.

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что при отключенных АРВ и АРЧВ высока вероятность потери устойчивости и возникновения асинхронного хода при подключении дополнительной нагрузки в узле присоединения установок РГ. Такие процессы возникали при подключении в момент времени 5 с дополнительной нагрузки мощностью 6,73 МВ·А (нагрузка сравнима с мощностью двух турбогенераторов, присоединенных к узлу). В этом случае появлялись колебания частоты вращения роторов генераторов (рис. 4), что приводило к колебаниям напряжения на шинах потребителя 6 кВ (рис. 5). Эти колебания могут распространяться по всей сети.

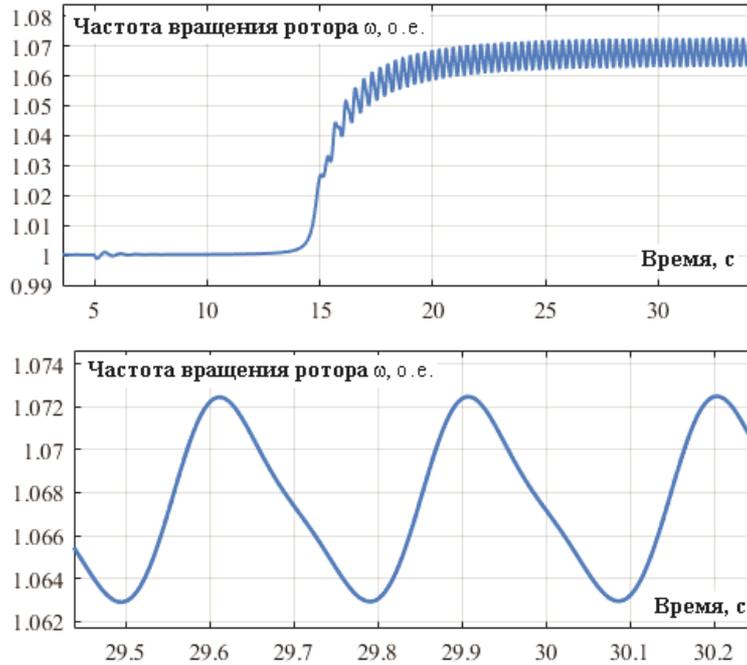


Рис. 4. Осциллограммы частоты вращения ротора турбогенератора при подключении дополнительной нагрузки в узле

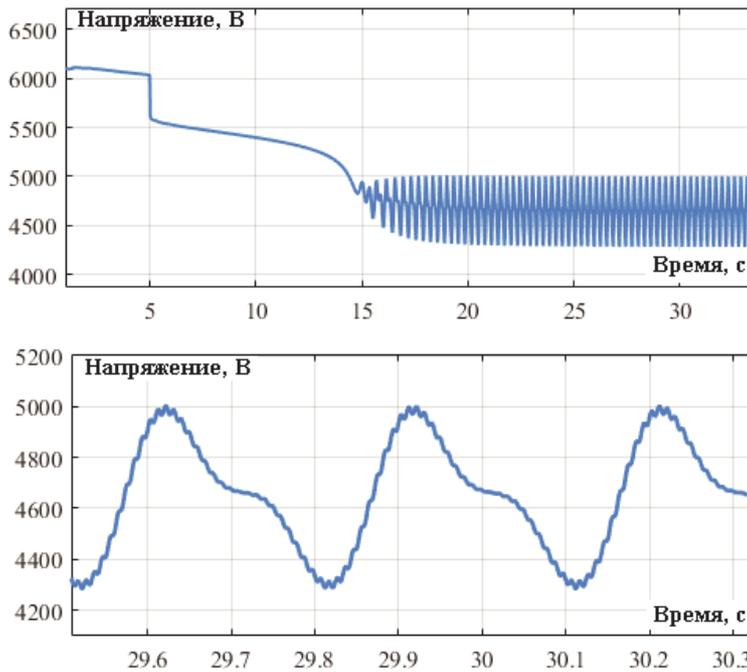


Рис. 5. Осциллограммы действующего напряжения турбогенератора при подключении дополнительной нагрузки в узле

На рис. 6 представлена зависимость мгновенной дозы фликера от времени, которая нарастает с увеличением размаха колебаний напряжения (рис. 5). Зависимость мгновенной дозы фликера от взвешенного колебания напряжения (стандартный выход модели фликерметра в MATLAB) представлена на рис. 7. Этот график показывает, что при увеличении взвешенного колебания напряжения увеличивается мгновенная доза фликера.

При работе турбогенераторов с несогласованно настроенными АРВ и АРЧВ, настройки которых выбирались из практических соображений, при включении в момент $t = 10$ с и отключении через 0,1 с мощной нагрузки также возникали колебания частоты и напряжения, приводящие к появлению фликера в узле присоединения установки РГ. Соответствующие осциллограммы и зависимости представлены на рис. 8, 9 и 10.

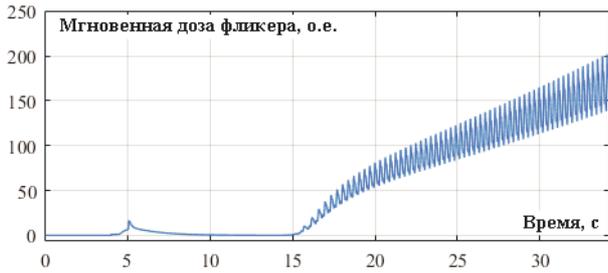


Рис. 6. Показание фликерметра

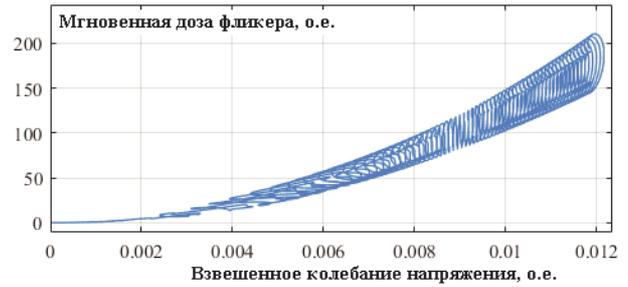
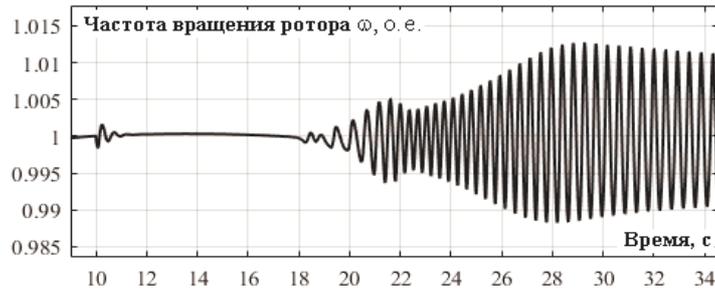
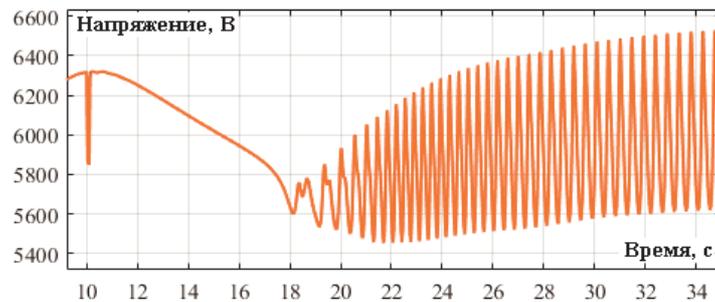


Рис. 7. Зависимость фликера от колебания напряжения



а)



б)

Рис. 8. Колебания частоты вращения ротора генератора (а) и напряжения в узле присоединения установки РГ (б)



Рис. 9. Показание фликерметра

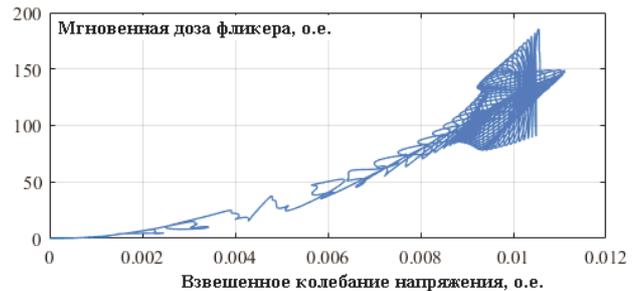


Рис. 10. Зависимость фликера от колебания напряжения

Для устранения фликера предлагается использовать методику согласованной настройки АРВ и АРЧВ [6; 7; 11] и прогностические алгоритмы [12–14].

Проведенные исследования показывают, что применение согласованно настроенных регуляторов и прогностических алгоритмов управления позволяет решить проблему возникновения фликера. Осциллограммы напряжения и частоты вращения ротора генератора при резком изменении нагрузки у потребителя и показания фликерметра, подтверждающие данные выводы, представлены на рис. 11 и 12. Из представленных осциллограмм видно, что применение согласованной настройки АРВ и

АРЧВ позволяет устранить фликер, возникающий при подключении мощной нагрузки в узле присоединения установки РГ, а прогностические алгоритмы управления частотой и возбуждением турбогенераторов обеспечивают повышение устойчивости, полностью устраняют фликер и улучшают качество управления напряжением и частотой. Положительный эффект по устранению фликера виден также из приведенной ниже таблицы: среднее и максимальные значения мгновенной дозы фликера определялись на интервале моделирования от 10 до 35 с, который учитывал скачок дозы фликера в момент возникновения возмущения.

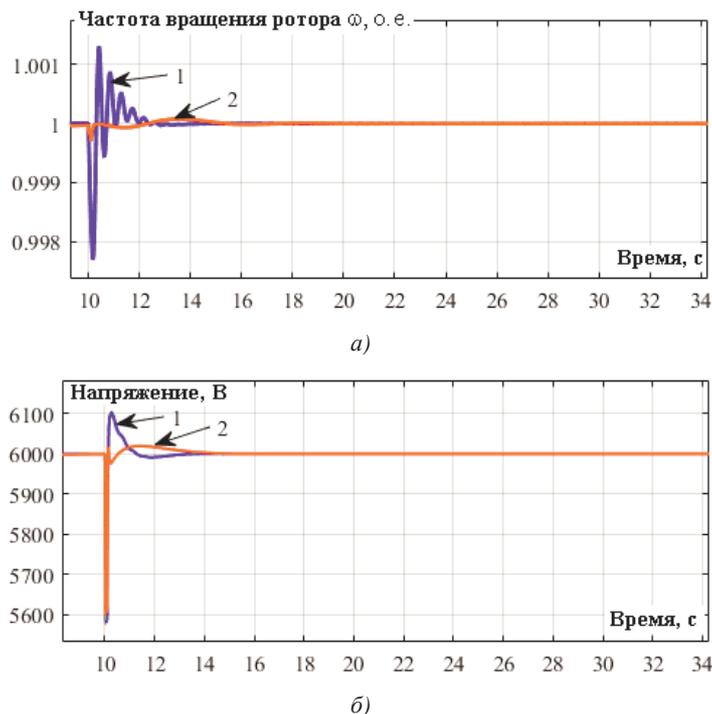


Рис. 11. Осциллограммы частоты вращения ротора генератора (а) и напряжения в узле присоединения установки РГ (б): 1 — генераторы работали с АРВ и АРЧВ при согласованной настройке; 2 — генераторы работали с использованием прогностических согласованно настроенных АРВ и АРЧВ

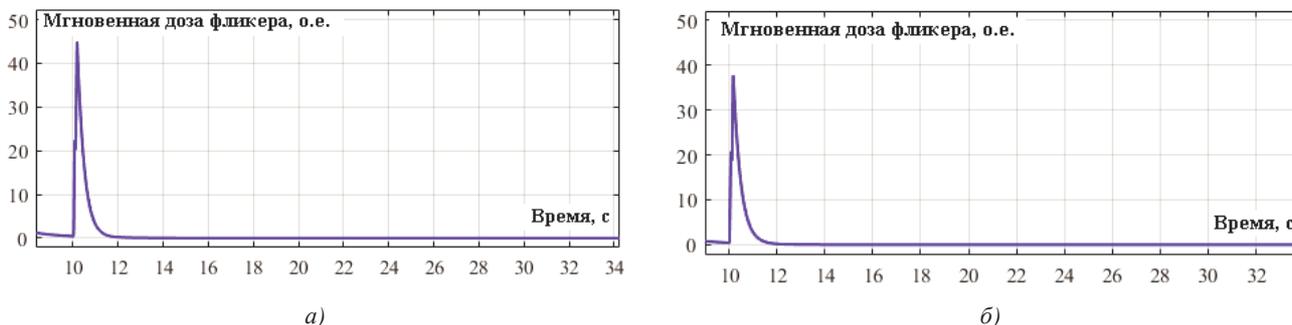


Рис. 12. Показание фликерметра (доза фликера): а — генераторы работали с АРВ и АРЧВ при согласованной настройке; б — генераторы работали с использованием прогностических согласованно настроенных АРВ и АРЧВ

Данные фликерметра при различных режимах работы установок РГ

Режимы	Среднее значение дозы фликера, о.е.	Максимальное значение дозы фликера, о.е.
1. Без регуляторов	78,6	209,4
2. С несогласованно настроенными АРВ и АРЧВ	62,3	185,2
3. С согласованно настроенными АРВ и АРЧВ	0,7	44,9
4. С прогностическими согласованно настроенными АРВ и АРЧВ	0,6	37,8

Заключение

На основе компьютерного моделирования системы электроснабжения с установками РГ можно сделать следующие выводы:

1. При резких возмущениях, вызванных включением и отключением дополнительной нагрузки, в узлах с нерегулируемыми установками РГ, реализованными на основе синхронных турбогенераторов, наблюдается фликер, сопровождающийся колебаниями напряжения и частоты.

2. Выявлено, что несогласованная настройка регуляторов установок РГ также может приводить к возникновению фликера.

3. Использование прогностических алгоритмов управления в согласованно настроенных АРВ и АРЧВ турбогенераторов установок РГ позволяет повысить устойчивость, полностью устраняет фликер и улучшает качество управления напряжением и частотой.

Литература

1. Воропай Н.И. Распределенная генерация в электроэнергетических системах [Электронный ресурс]: Тригенерация.ру: сайт. URL. <http://www.combienergy.ru/stat/983-Raspredelennaya-generaciya-v-elektroenergeticheskikh-sistemah> (дата обращения: 30.09.2017).
2. Mohsen F.N., Amin M.S., Hashim H. Application of smart power grid in developing countries, IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2013. DOI:10.1109/PEOCO.2013.6564586.
3. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p.
4. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Улучшение качества электроэнергии нетяговых потребителей путем применения автоматически управляемых установок распределенной генерации // Системы Методы Технологии. 2014. № 4 (24). С.73-79.
5. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Нечеткие регуляторы для ветрогенерирующих установок // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 7-8. С. 60-69.
6. Булатов Ю.Н. Автоматические регуляторы установок распределенной генерации в системах электроснабжения железных дорог // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. Т. 1. С. 684-689.
7. 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). IEEE Conference Publications. 2016. P. 1-6.
8. Jenkins N., Allan R., Grossley P., Kirschen D., Strbac G. Embedded Generation. London: IEE, 2000. 273 p.
9. Barker Ph. P., De Mello R.W. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems // 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, USA. 2000. July 11-15. P. 222-233.
10. Anderson P.M., Fouad A.A. Power System Control and Stability. Second Edition. IEEE Press, 2003. 688 p.
11. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Сетевые кластеры в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2015. 205 с.
12. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен В. Х. Применение прогностических регуляторов для управления режимами систем электроснабжения с установками распределенной генерации // Электроэнергетика глазами молодежи-2016: материалы VII Междунар. науч.-технической конф., 19-23 сент. 2016 г. Казань, 2016. Т. 3. С.157-160.
13. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен В.Х. Применение прогностических регуляторов в установках распределенной генерации систем электроснабжения железных дорог // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2016. Т. 1. С. 573-578.
14. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен В.Х. Автопрогностический регулятор частоты вращения ротора генератора установки распределенной генерации // Науч. вестн. Новосиб. гос. техн. ун-та. 2017. № 1 (66). С. 15-25.
15. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
16. Горбань И.И. Статистически неустойчивые процессы: связь с фликер, неравновесными, фрактальными и цветными

шумами // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2012. Т. 55, № 3. С. 3-16.

References

1. Voropai N.I. Distributed generation in electric power systems [Elektronnyi resurs]: Trigeneratsiya.ru: sait. URL. <http://www.combienergy.ru/stat/983-Raspredelennaya-generaciya-v-elektroenergeticheskikh-sistemah> (data obrashcheniya: 30.09.2017).
2. Mohsen F.N., Amin M.S., Hashim H. Application of smart power grid in developing countries, IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2013. DOI:10.1109/PEOCO.2013.6564586.
3. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski. Smart Grids - Fundamentals and Technologies in Electricity Networks // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p.
4. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Quality improvement for the electric power of non-traction power consumers by using automatically controlled installations of distributed generation // Systems Methods Technologies. 2014. № 4 (24). P. 73-79.
5. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Fuzzy regulators for wind generators // Proceedings of the higher educational institutions. Energy Sector Problems. 2014. № 7-8. P. 60-69.
6. Bulatov Yu.N. Automatic regulators of distributed generation systems in the systems of electric supply of railways // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. 2017. T. 1. P. 684-689.
7. 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). IEEE Conference Publications. 2016. P. 1-6.
8. Jenkins N., Allan R., Grossley P., Kirschen D., Strbac G. Embedded Generation. London: IEE, 2000. 273 p.
9. Barker Ph. P., De Mello R.W. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems // 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, USA. 2000. July 11-15. P. 222-233.
10. Anderson P.M., Fouad A.A. Power System Control and Stability. Second Edition. IEEE Press, 2003. 688 p.
11. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Network clusters in systems of power supply of the railroads. Irkutsk: IrGUPS, 2015. 205 p.
12. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen V. Kh. The use of predictive regulators to control the modes of power systems with distributed generation plants // Elektroenergetika glazami molo-dezhi-2016: materialy VII Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoj konf., 19-23 sent. 2016 g. Kazan', 2016. T. 3. P. 157-160.
13. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen V.Kh. Application of prognostic regulators in installations for distributed generation of power supply systems for railways // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. 2016. T. 1. P. 573-578.
14. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen V.Kh. An automatic prognostic controller of the distributed generator rotor speed // Scientific Bulletin of NSTU. 2017. № 1 (66). P. 15-25.
15. Marpl S.L. Digital spectral analysis and its applications. M.: Mir, 1990. 584 p.
16. Gorban' I.I. Statistically unstable processes: connection with flicker, nonequilibrium, fractal and color noise // Radioelectronics and Communications Systems. 2012. T. 55, № 3. P. 3-16.