

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО УТЯЖЕЛЕНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ИСТОЧНИКОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

О.В. Газизова

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия*

Одним из основных этапов при проектировании источников распределенной генерации, а также в процессе их эксплуатации является обеспечение достаточного запаса статической устойчивости в различных эксплуатационных режимах. К таким режимам относятся прежде всего нормальные и утяжеленные при параллельной работе с энергосистемой. В точках связи с энергосистемой у заводских электростанций обычно предусматривается противоаварийная автоматика, обеспечивающая в аварийных режимах выход генераторов с нагрузкой на раздельную с энергосистемой работу. В таких послеаварийных режимах должен быть обеспечен нормируемый запас статической устойчивости. С целью анализа статической устойчивости синхронных генераторов и двигательной нагрузки предлагается использование сочетания методов последовательного эквивалентирования и последовательного утяжеления. Однако использование метода последовательного утяжеления имеет особенности при анализе статической устойчивости при параллельной и раздельной работе генераторов с энергосистемой. Кроме того, при его применении возникает необходимость использования ряда ограничений, связанных в том числе с особенностями функционирования заводских электростанций. Разработан единый алгоритм анализа статической устойчивости генераторов и нагрузки при параллельной и раздельной работе применительно к заводским электростанциям, учитывающий ограничения по работе систем возбуждения. Алгоритм реализован в программном комплексе «КАТРАН». Проведен вычислительный эксперимент применительно к системе электроснабжения, имеющей источники распределенной генерации и разнородную двигательную нагрузку. Сформулированы особенности подобных исследований.

Ключевые слова: синхронный генератор, синхронная и асинхронная нагрузка, статическая устойчивость, параллельная и раздельная работа, делительная автоматика, метод последовательного утяжеления.

Введение

Одной из основных задач на этапе планирования и в процессе эксплуатации электростанций является обеспечение статической устойчивости синхронных генераторов. Анализ статической устойчивости нагрузки производится по мере необходимости в электрически удаленных от источников питания узлах.

В настоящее время существует значительное количество работ, посвященных оценке статической устойчивости генераторов, прежде всего для электростанций районного назначения [1–3]. Также особое внимание уделяется определению запаса статической устойчивости и математическому моделированию протяженных линий электропередачи [1, 4]. Это связано с тем, что довольно продолжительное время основным источником энергии для городской и промышленной нагрузки были удаленные районные электростанции, соединенные с узлами нагрузки через протяженные линии. Следовательно, основные методы анализа статической устойчивости ориентированы на них.

В наши дни структура энергосистем существенно видоизменилась за счет распространения прежде всего в сетях промышленного назначения источников распределенной генерации [5–8]. Данные генераторы весьма разнообразны. В частности, они имеют различные первичные двигатели, широко изменяющуюся установленную мощность и имеют различные точки подключения в сложной сети, зачастую обусловленные историческим развитием данного предприятия. Также имеет ряд особенностей противоаварийная автоматика, позволяющая сохранять электроснабжение ответственных потребителей при различных условиях, в том числе и при выходе на раздельную работу [9–12]. Все эти факторы делают актуальными вопросы исследования статической устойчивости синхронных генераторов заводских электростанций.

Методам анализа статической устойчивости посвящено значительное количество работ [13–16]. Как правило, их подразделяют на классический метод малых колебаний со всеми сопутствующими критериями, а также группу практических методов, основанных на сходимости установившихся

режимов [17–19]. В обоих случаях для исследования статической устойчивости может быть применен метод последовательного утяжеления. Однако зачастую его использование производится без учета ограничений, которые зависят от специфики как самих источников распределенной генерации и конфигурации сети, так и питающейся нагрузки.

Целью данной работы является формулирование совокупности ограничений при применении метода последовательного утяжеления с целью анализа устойчивости промышленных генераторов и двигательной нагрузки. Особую актуальность задача учета ограничений приобретает в условиях повышенной загрузки генераторов по активной мощности, что обусловлено экономическими выгодами предприятия, наложением плановых и аварийных ремонтов оборудования или невыполнением плана по выработке электроэнергии. Результаты исследований позволят более точно определять запас статической устойчивости заводских электростанций в различных эксплуатационных режимах, в том числе нормальных при параллельной работе, утяжеленных и автономных, которые могут продолжаться десятки минут.

Основное содержание

С целью анализа статической устойчивости генераторов промышленных электростанций в различных эксплуатационных режимах был разработан усовершенствованный алгоритм (рис. 1). Данный алгоритм использует сочетание метода последовательного эквивалентирования для расчета установившихся режимов параллельной и раздельной работы и метода последовательного утяжеления непосредственно для анализа статической устойчивости [11, 20–23]. Математическому моделированию синхронных генераторов посвящено достаточное число работ [24–28]. В алгоритме для расчета установившихся режимов использована традиционная математическая модель синхронной машины, представляющая синхронный генератор как ЭДС по поперечной оси за углом ротора δ .

При параллельной работе с энергосистемой данные параметры определяются из заданных активной и реактивной мощностей, а при раздельной в результате определения потокораспределения – в соответствии с имеющейся нагрузкой. Математические модели синхронных и асинхронных двигателей представлены в трудах [9, 29]. Синхронный двигатель представляется аналогично синхронному генератору, а асинхронный – в соответствии с Т-образной схемой замещения, представленной в работе [29].

При исследовании режимов параллельной работы с энергосистемой к возможным путям утяжеления режима относятся следующие. Для анализа статической устойчивости источников распределенной генерации в качестве утяжеляемого пара-

метра используется угол ротора синхронного генератора относительно точки связи с системой бесконечной мощности и определяется идеальный предел выдаваемой мощности. Это связано с тем, что любая дополнительная нагрузка ляжет на шины бесконечной мощности. Поэтому для местных генераторов, работающих по электрическому графику нагрузки, как правило, задают величину выдаваемой активной мощности. В случае многомашиной системы имеет смысл производить одновременное увеличение углов роторов участвующих в схеме генераторов.

Другим способом утяжеления в подобных режимах является повышение выдаваемой генераторами активной мощности в соответствии со статическими характеристиками нагрузки регуляторов скорости.

В обоих случаях расчет режима ведется через определение ЭДС генератора, которая зависит как от активной, так и реактивной мощности и в упрощенных расчетах принимается неизменной. Однако для повышения точности расчета необходимо осуществлять в зависимости от выбранного пути утяжеления коррекцию реактивной мощности и, следовательно, величину ЭДС. При этом необходимо руководствоваться следующими факторами. Прежде всего это диаграмма мощностей, позволяющая определять диапазон реактивных мощностей с соответствии с текущими активными. Использование диаграммы мощностей в свою очередь определяется действующим законом регулирования возбуждения. Кроме того, необходимо учесть несовершенство систем охлаждения возбуждателей, которое может максимальный ток возбуждения снижать до 10 %. Применение данных ограничений приведет к существенному повышению точности производимых вычислений.

При раздельной работе с энергосистемой в качестве утяжеляемого параметра имеет смысл применять нагрузку. В таких расчетах речь идет об определении действительного предела выдаваемой мощности. При этом в ряде случаев возникает задача выбора точки присоединения нагрузки, поскольку существующие промышленные электростанции могут иметь сложную конфигурацию. Одним из способов утяжеления может быть одновременное пошаговое увеличение мощности сразу в нескольких точках. Другим фактором, требующим особого внимания, является выбор соотношения активной и реактивной мощности в процессе утяжеления. Повышение реактивной нагрузки вызовет дополнительное изменение падений напряжения и рост ЭДС синхронных генераторов. Поэтому имеет смысл производить утяжеление режима при определенном фиксированном коэффициенте мощности нагрузки.

Исследованию статической устойчивости синхронной и асинхронной нагрузки также посвящено большое количество трудов [9, 30]. В настоящее

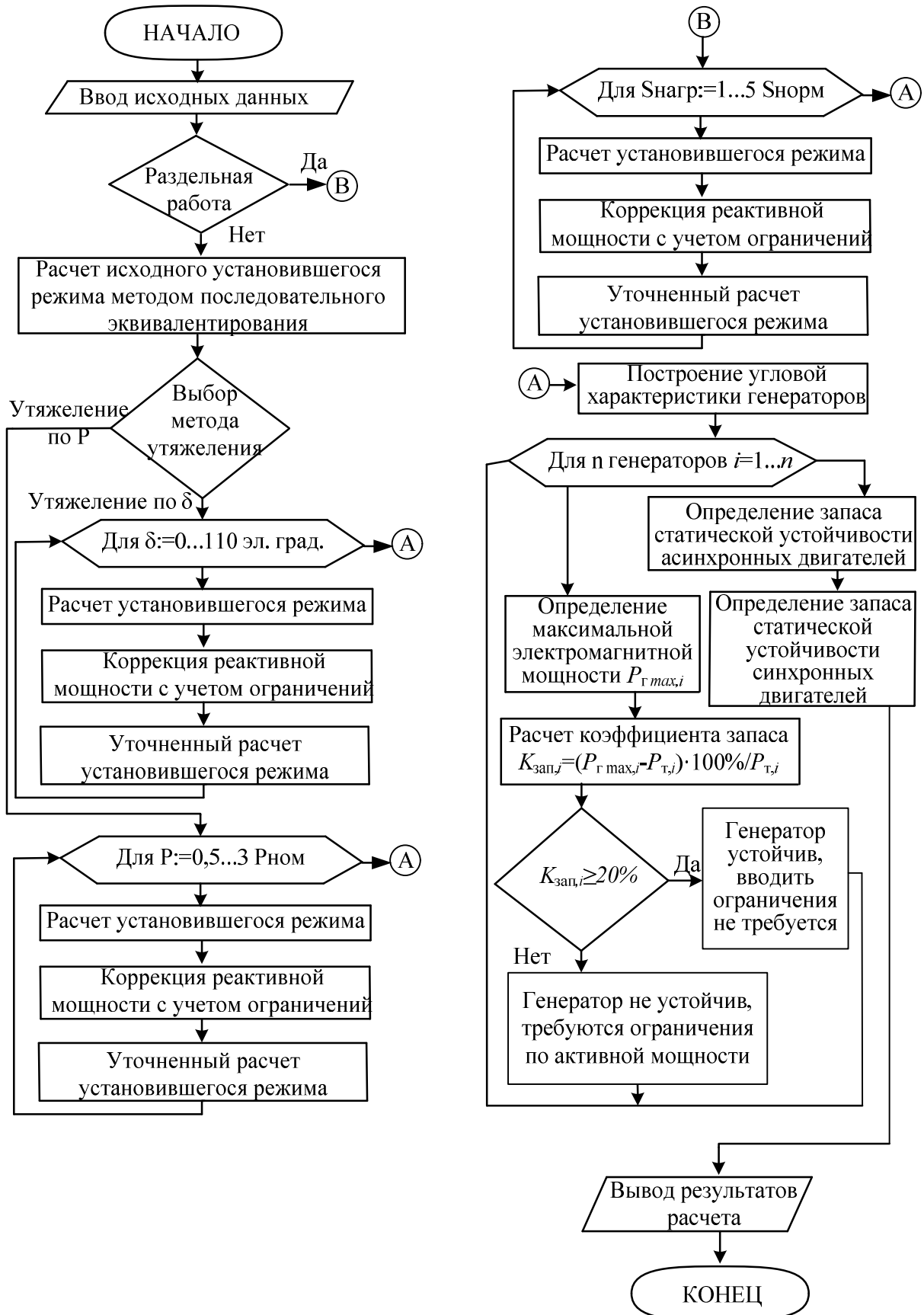


Рис. 1. Алгоритм анализа статической устойчивости с использованием метода последовательного утяжеления

время на металлургических предприятиях имеет место переход к питанию двигателей от частотных преобразователей. В таких условиях, с одной стороны, статическая устойчивость повышается, поскольку отсутствует задача параллельной работы с энергосистемой и другими машинами переменного тока. С другой стороны, отклонения напряжения свыше 10 % могут вызвать отключение преобразователя, при этом будет невозможно применение самозапуска, на которое рассчитано большинство потребителей собственных нужд. Поэтому значительная часть заводских двигателей продолжает питание напрямую от сети. Способ утяжеления при анализе устойчивости двигательной нагрузки не зависит от того, раздельная работа или параллельная. У асинхронных двигателей основным параметром утяжеления является активная мощность, а у синхронных необходимо учитывать возможное сочетание активной и реактивной и выбрать наиболее негативное сочетание. При этом в соответствии с [9, 30] определяются коэффициенты запаса статической устойчивости по напряжению и активной мощности.

На рис. 1 приведен усовершенствованный алгоритм анализа статической устойчивости генераторов и двигательной нагрузки промышленных

электростанций при параллельной и раздельной работе с энергосистемой. На первом этапе в рамках данного алгоритма выполняется расчет исходного установившегося режима в соответствии с действительными нагрузками, конфигурацией электрической сети и составом подключенного генерирующего оборудования. Подробно методика расчета методом последовательного эквивалентирования изложена в [20]. Далее в зависимости от условий расчета в соответствии с приведенными ранее положениями выполняется анализ статической устойчивости собственных генераторов. Указанный алгоритм был использован при разработке программного комплекса «КАТРАН». Помимо анализа статической устойчивости генераторов с его помощью при необходимости может быть определен запас устойчивости синхронных и асинхронных двигателей. Как показали расчеты, в целом асинхронные двигатели при выходе на раздельную работу имеют более высокий коэффициент запаса по сравнению с синхронными.

Расчет режимов осуществлялся с помощью программного комплекса «КАТРАН», разработанного на кафедре ЭПП МГТУ им. Г.И. Носова [30]. Расчеты проводились на примере промышленной электростанции, показанной на рис. 2, в состав

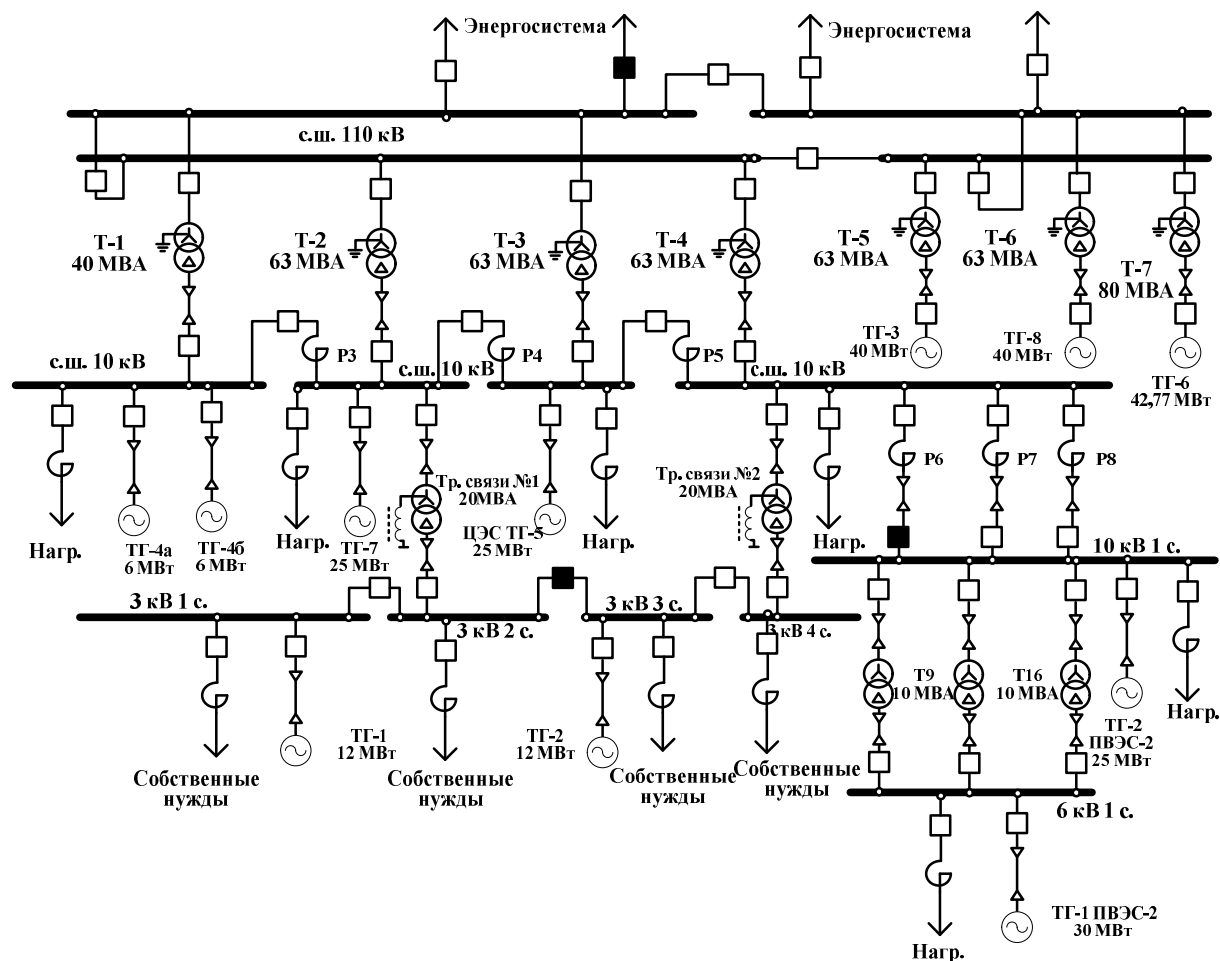


Рис. 2. Принципиальная однолинейная схема электрических соединений промышленной электростанции

которой входят генераторы различной установленной мощности.

Питание потребителей собственных нужд осуществляется с шин 3 кВ и 6 кВ. Механизмы собственных нужд в основном приводятся синхронными и асинхронными двигателями мощностью до 1 МВт и в среднем имеют коэффициент загрузки до 50 % от номинальной мощности.

На рис. 3. на примере генератора ТГ-1 установленной мощностью 12 МВт приведены результаты определения идеального предела выдаваемой мощности при параллельной работе с энергосистемой без учета (рис. 3а) и с учетом (рис. 3б) ограничений по выдаваемой реактивной мощности за счет несовершенства системы возбуждения. При этом в качестве параметра утяжеления выбран угол ротора генератора. При текущей нагрузке 12 МВт в первом случае коэффициент запаса статической устойчивости составил 72 %, а во втором случае – 60 %, то есть снизился на 12 %.

На рис. 4 на примере турбогенератора ТГ-1 ПВЭС-2 установленной мощностью 30 МВт показаны результаты анализа действительного предела выдаваемой мощности при раздельной работе с энергосистемой без учета (рис. 4а) и с учетом (рис. 4б) ограничений по току возбуждения. Как отмечалось

выше, в качестве параметра утяжеления выбрана нагрузка на шинах связи с энергосистемой 110 кВ с фиксированным коэффициентом мощности. При раздельной работе узел избыточный, и на генератор ложится мощность 20 МВт. При этом коэффициент запаса статической устойчивости составит в первом случае 75 %, а во втором – 70 %, то есть снизится на 5 %. В случае дефицитного узла данные ограничения могут оказывать более высокое влияние в силу загрузки генератора по активной мощности больше номинального значения и, как следствие, перехода в режим ограничения выдаваемой реактивной мощности по нагрузочной диаграмме.

Таким образом, учет ограничений по выдаваемой реактивной мощности при использовании метода последовательного утяжеления может существенно уточнить результат.

Аналогичные ограничения необходимо учитывать при анализе статической устойчивости синхронных двигателей, работающих без частотных преобразователей. Их особенностью является то, что автоматическое регулирование возбуждения может отсутствовать или могут применяться наиболее простые законы регулирования, например, на постоянство угла нагрузки. В этом случае

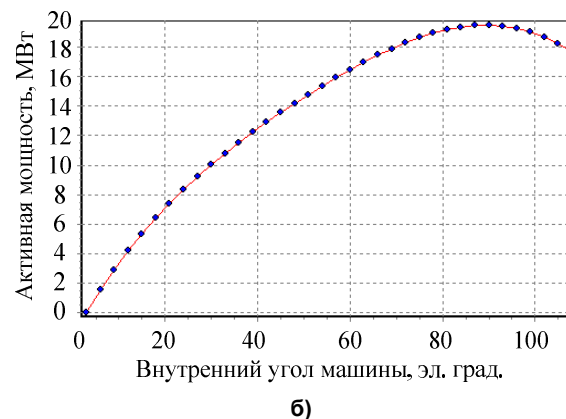
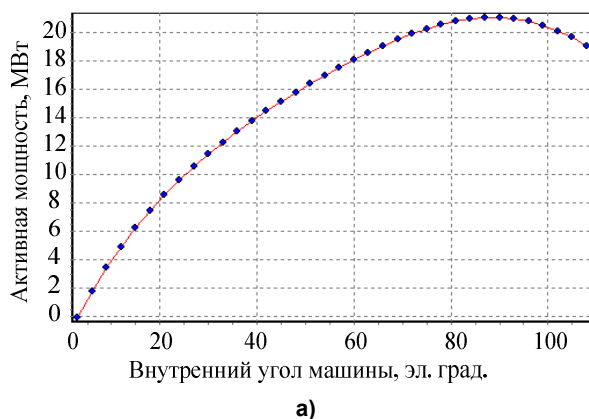


Рис. 3. Угловые характеристики генератора ТГ-1 установленной мощностью 12 МВт: а – без учета ограничений; б – с учетом ограничений

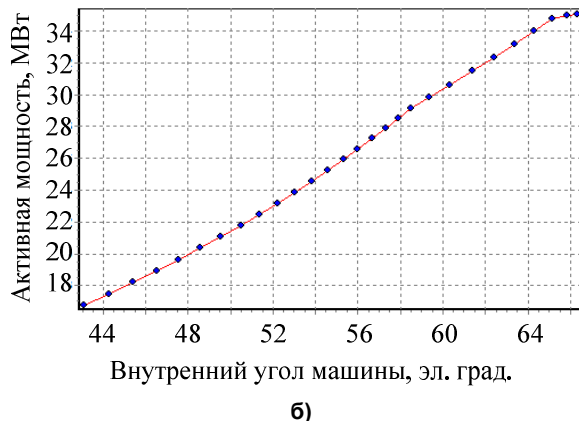
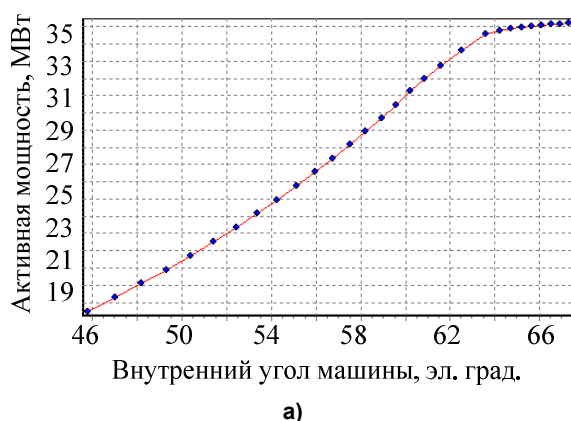


Рис. 4. Угловые характеристики турбогенератора ТГ-1 ПВЭС-2 установленной мощностью 30 МВт: а – без учета ограничений; б – с учетом ограничений

ограничение можно производить упрощенно, учитывая максимальную величину выдаваемой реактивной мощности в соответствии с текущей активной.

Как показали расчеты, коэффициент запаса статической устойчивости двигательной нагрузки в случае избыточного узла не существенно отличается при параллельной и раздельной работе при прочих равных параметрах. При коэффициенте загрузки двигателей до 50–60 % он существенно превышает норматив 20 %.

Заключение

Рассмотрены особенности применения метода последовательного утяжеления для анализа статической устойчивости применительно к заводским электростанциям при параллельной и раздельной работе с энергосистемой.

Перечислены возможные причины ограничения по реактивной мощности при использовании метода последовательного утяжеления. Прежде всего к ним отнесены закон регулирования возбуждения, связанная с ним диаграмма мощностей и несовершенство систем охлаждения обмоток возбуждения.

Разработан усовершенствованный алгоритм анализа статической устойчивости синхронных генераторов и нагрузки промышленной электростанции, учитывающий особенности возможных эксплуатационных режимов работы промышленных электростанций, имеющих сложную конфигурацию.

Полученные рекомендации могут быть учтены при планировании нормальных и аварийных режимов с целью обеспечения статической устойчивости электростанции вне зависимости от состава узла.

Литература

1. Жданов, П.С. *Вопросы устойчивости энергетических систем* / П.С. Жданов; под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
2. Мелешкин, Г.А. *Устойчивость энергосистем: моногр. Кн. 1* / Г.А. Мелешкин, Г.В. Меркурьев. – СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 369 с.
3. Кимбарк, Э. *Синхронные машины и устойчивость электрических систем* / Э. Кимбарк. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 392 с.
4. Kornilov, G.P. *The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models* / G.P. Kornilov, E.A. Panova, A.V. Varganova // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 129. – P. 951–955. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.142
5. Ачитаев, А.А. *Повышение запаса регулировочной способности генераторов в энергетических системах с распределенной генерацией* / А.А. Ачитаев, С.Н. Удалов, М.С. Юманов // *Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф. молодых ученых.* – Новосибирск: НГТУ, 2015. – С. 8–10.
6. *Повышение качества электроснабжения современного ГОКа* / Г.П. Корнилов, И.Р. Абдулвелеев, Ю.Н. Кондрашова и др. // *Горный журнал.* – 2020. – № 12. – С. 82–86. DOI: 10.17580/gzh.2020.12.19
7. Варганова, А.В. *Алгоритм внутростанционной оптимизации режимов работы котлоагрегатов и турбогенераторов промышленных электростанций* / А.В. Варганова // *Промышленная энергетика.* – 2018. – № 1. – С. 17–22.
8. *Mathematical Modeling of Synchronous Generators in Out-of-balance Conditions in the Task of Electric Power Supply Systems Optimization* / A.V. Varganova, E.A. Panova, N.A. Kurilova, A.T. Nasibullin // *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. – 2015. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414907
9. Гуревич, Ю.Е. *Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах* / Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова, А.А. Окин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
10. *Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems* / Yosra Welhazi, Tawfik Guesmi, Imen Ben Jaoued, Hsan Hadj Abdallah // *J. Electrical Systems.* – 2014. – No. 10-3. – P. 276–291.
11. *Некоторые вопросы устойчивости промышленных электротехнических систем с генераторами собственных нужд* / М.С. Еришов, А.В. Егоров, А.А. Трифонов и др. // *Промышленная энергетика.* – 2006. – № 8. – С. 21 – 25.
12. *Анализ интенсивности отказов частотно-регулируемых электроприводов районных тепловых станций при нарушениях электроснабжения* / В.Р. Храмин, К.Э. Одинцов, А.Р. Губайдуллин и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика».* – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 68–79.
13. *Некоторые вопросы анализа статической устойчивости электроэнергетических систем* / Е.К. Лоханин, Е.Л. Россковский, Ю.Н. Гараев и др. // *Электричество.* – 2013. – № 9. – С. 2–6.
14. Shi Xiufeng. *Research on Measures to Improve Stability of the Power System* / Shi Xiufeng, Mu Shiguang // *Applied Mechanics and Materials.* – 2015. – Vol. 742. – P. 648–652. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.742.648
15. Kothari, D.P. *Power System Engineering, Second Edition* / D.P. Kothari, I.J. Nagrath. – New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.

16. Филиппова, Н.Г. Автоматизированный поиск предельных режимов ЭЭС по условиям статической устойчивости / Н.Г. Филиппова, Е.Г. Бердник // *Электричество*. – 2002. – № 9. – С. 9–15.
17. Тарасов, В.И. Теоретические основы анализа установившихся режимов электроэнергетических систем / В.И. Тарасов. – Новосибирск: Наука, 2002. – 344 с.
18. Малафеев, А.В. Оценка статической устойчивости генераторов заводских электростанций при параллельной и раздельной с энергосистемой работе / А.В. Малафеев, О.В. Газизова // *Изв. вузов. Проблемы энергетики*. – 2010. – № 9-10. – С. 81–91.
19. Газизова, О.В. Повышение эффективности управления режимами электростанций промышленного энергоузла за счет прогнозирования статической и динамической устойчивости при изменении конфигурации сети / О.В. Газизова, Ю.Н. Кондрашова, А.В. Малафеев // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2016. – № 3 (32). – С. 27–38. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-27-38
20. Ротанова, Ю.Н. Повышение устойчивости системы электроснабжения промышленного предприятия с собственными электростанциями при коротких замыканиях: дис. ... канд. техн. наук / Ю.Н. Ротанова. – Магнитогорск, 2008.
21. Gazizova, O.V. Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management / O.V. Gazizova, A.V. Malafeyev, Y.N. Kondrashova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015*. – 2016. – P. 012056. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012056
22. Kondrashova, Y.N. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability / Y.N. Kondrashova, O.V. Gazizova, A.V. Malafeyev // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 128. – P. 759–763. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.100
23. Газизова, О.В. Определение предельных параметров режимов для обеспечения успешной ресинхронизации объектов распределенной генерации в условиях предприятия черной металлургии / О.В. Газизова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Кондрашова // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 12–22. DOI: 10.14529/power160402
24. Кавалеров, Б.В. Построение статических моделей синхронного генератора по экспериментальным данным / Б.В. Кавалеров, И.Р. Зиятдинов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Серия «Электротехника, информационные технологии, системы управления»*. – 2020. – № 34. – С. 186–197. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.2.11
25. Satheesh, A. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN / A. Satheesh, T. Manigandan // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2013. – Vol. 49, iss. 1. – P. 38–47.
26. Sokolov, A.P. Study of the Transients with the Loss of Field of the Synchronous Generator in the Industrial Electric Power Station / A.P. Sokolov, O.V. Gazizova, Y.N. Kondrashova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019*. – 2019. – P. 012033. DOI: 10.1088/1757-899X/666/1/012033
27. Gazizova, O.V. Research of the Effectiveness of Existing Laws of Automatic Regulation of Excitation of Synchronous Generators of Industrial Power Plants Under Various Conditions of Connection to the Electric Power System / O.V. Gazizova, A.P. Sokolov // *Proceedings – 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice, PEAMI 2020*. – 2020. – P. 50–55. DOI: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234362
28. Sokolov, A.P. Improving the Accuracy Mathematical Modeling of Transients Emergency Mode Industrial Facilities Distributed Generation / A.P. Sokolov, O.V. Gazizova // *2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation, RPA 2018*. – 2018. – P. 8537190. DOI: 10.1109/RPA.2018.8537190
29. Гуревич, Ю.Е. Устойчивость нагрузки электрических систем / Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова, Э.А. Хачатрян. – М.: Энергоиздат, 1981. – 208 с.
30. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2019610251. Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 10.0 / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, Е.А. Панова и др.; заявитель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; заявл. 29.10.2018, опубл. 09.01.2019.

Газизова Ольга Викторовна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; logan_b_7@mail.ru.

Поступила в редакцию 20 августа 2021 г.

SPECIFICS OF GRADUAL TRANSITION TO POST-EMERGENCY PARAMETERS FOR STATIC STABILITY TESTING OF DISTRIBUTED GENERATION FACILITIES

O.V. Gazizova, logan_b_7@mail.ru

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Design and operation of distributed generation facilities needs to provide for sufficient margin of static stability in a variety of operating situations, including normal and post-emergency operation in parallel with the outer grid (the power system). Power system protections are often placed where the on-site power plants connect to the power system; these protections enable the loaded generators to become islanded in case of emergency; rated margin of static stability must be available in such post-emergency operation. To analyze static stability of synchronous generators and motor loads, we propose combining gradual equalization and gradual transition to post-emergency parameters. However, the latter method has different quirks when applied to static stability testing of generators, depending on whether they are running in parallel or islanded. Besides, application of this method requires multiple constraints pertaining to the functioning of on-site power plants, among other things. The authors hereof have developed a single algorithm for static stability testing of generators and loads that applies well to on-site power plants whether they are islanded on running in parallel to the grid. The algorithm adjusts for constraints on excitation systems and is implemented in KATRAN software. A computational experiment is described herein that concerns an electricity delivery system that is powered by distributed generation facilities and carries heterogeneous motor loads. Specific features of such studies are additionally described.

Keywords: synchronous generator, synchronous and asynchronous load, static stability, parallel and islanded operation, islanding systems, gradual transition to post-emergency parameters.

References

1. Zhdanov P.S. *Voprosy ustoychivosti energeticheskikh sistem* [Questions of stability of power systems]. Moscow, Energiya Publ., 1979. 456 p.
2. Meleshkin G.A., Merkur'yev G.V. *Ustoychivost' energosistem: monogr. Kn. 1* [Stability of power systems]. Book 1. St. Petersburg, Center for training of energy personnel Publ., 2006. 369 p.
3. Kimbark E.I. *Sinkhronnyye mashiny i ustoychivost' elektricheskikh sistem* [The synchronous machines and stability of electrical systems]. Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat, Publ., 1960. 392 p.
4. Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 951–955. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.142
5. Aчитayev A.A., Udalov S.N., Yumanov M.S. [Increase of an inventory of adjusting ability of generators in power systems with distributed Generation]. *Elektrotehnika. Elektrotehnologiya. Energetika: sb. nauch. tr. VII Mezhdunar. nauch. konf. molodykh uchenykh* [Electrical engineering. Electrotechnology. Power engineering collection of scientific works of the VII International scientific conference of young scientists]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2015, pp. 8–10. (in Russ.).
6. Kornilov G.P., Abdulvelev I.R., Kondrashova Yu.N., Odintsov K.E. [Improving the quality of the power supply of modern GOK]. *Gornyi Zhurnal* [Mining Journal], 2020, no. 12, pp. 82–86. (in Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2020.12.19
7. Varganova A.V. [Algorithm of intention optimization of modes of operation of boilers and turbogenerators of industrial power plants]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2018, no. 1, pp. 17–22. (in Russ.).
8. Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. Mathematical Modeling of Synchronous Generators in Out-of-balance Conditions in the Task of Electric Power Supply Systems Optimization. *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*, 2015. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414907
9. Gurevich Yu.E., Libova L.E., Okin A.A. *Raschety ustoychivosti i protivovariyной avtomatiki v energosistemakh* [Calculations of stability and emergency response automation in power systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 390 p.
10. Yosra Welhazi, Tawfik Guesmi, Imen Ben Jaoued, Hsan Hadj Abdallah. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems. *J. Electrical Systems*, 2014, no. 10-3, pp. 276–291.

11. Ershov M.S., Egorov A.V., Trifonov A.A., Rudina E.I. [Some questions of the sustainability of industrial electrical systems with self-needs generators]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2006, no. 8, pp. 21–25. (in Russ.)
12. Khrumshin V.R., Odintsov K.E., Gubajdullin A.R., Karandaeva O.I., Kondrashova Yu.N. Fault Rate Analysis of Variable-Frequency Electric Drives in District Heating Stations under Power Supply Violations. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 68–79. (in Russ.)
13. Lokhanin E.K., Rossovskiy E.L., Garayev Yu.N., Moroshkin Yu.V., Glagolev V.A. [Some issues of analyzing the static stability of electric power systems]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2013, no. 9, pp. 2–6. (in Russ.)
14. Shi Xiufeng, Mu Shiguang. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 742, pp 648–652. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.742.648
15. Kothari D.P., Nagrath I.J. *Power System Engineering*. Second Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
16. Filippova N.G., Berdnik E.G. [Automated search for limit modes of electric power systems under the conditions of static stability]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2002, no. 9, pp. 9–15. (in Russ.)
17. Tarasov V.I. *Teoreticheskiye osnovy analiza ustanovivshikhsya rezhimov elektroenergeticheskikh sistem* [Theoretical foundations of analyzing the established modes of electric power systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2002. 344 p.
18. Malafeyev A.V., Gazizova O.V. [Evaluation of the static sustainability of generators of factory power plants with parallel and separate with the energy system]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki* [Power engineering: research, equipment, technology], 2010, no. 9-10, pp. 81–91. (in Russ.)
19. Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Malafeyev A.V. [Increase of Effective Management of Modes of Electric Power Plants Due to Forecasting of Static and Dynamic Stability at Change of Network Configuration]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 3 (32), pp. 27–38. (in Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-27-38
20. Rotanova Yu.N. *Povysheniye ustoychivosti sistemy elektrosnabzheniya promyshlennogo predpriyatiya s sobstvennymi elektrostantsiyami pri korotkikh замыkaniyakh: dis. kand. tekhn. nauk* [Increasing the sustainability of the power supply system of an industrial enterprise with its own power plants with short circuits. Kand. Diss.]. Magnitogorsk, 2008.
21. Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Y.N. Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015*, 2016, p. 012056. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012056
22. Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Malafeyev A.V. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 128, pp. 759–763. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.1003
23. Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Yu.N., Determination of limit mode parameters to ensure successful resynchronization of distributed generation units at iron and steel works. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 12–22. (in Russ.). DOI: 10.14529/power160402
24. Kavalero B.V., Ziydinov I.R. [Construction of static models of a synchronous generator according to experimental data]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Seriya "Elektrotehnika, informatsionnyye tekhnologii, sistemy upravleniya"* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, management systems], 2020, no. 34, pp. 186–197. (in Russ.) DOI: 10.15593/2224-9397/2020.2.11
25. Satheesh A., Manigandan T. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2013, vol. 49, iss. 1, pp. 38–47.
26. Sokolov A.P., Gazizova O.V., Kondrashova Y.N. Study of the Transients with the Loss of Field of the Synchronous Generator in the Industrial Electric Power Station. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019*, 2019, p. 012033. DOI: 10.1088/1757-899X/666/1/012033
27. Gazizova O.V., Sokolov A.P. Research of the Effectiveness of Existing Laws of Automatic Regulation of Excitation of Synchronous Generators of Industrial Power Plants Under Various Conditions of Connection to the Electric Power System. *Proceedings - 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice, PEAMI 2020*, 2020, pp. 50–55. DOI: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234362
28. Sokolov A.P., Gazizova O.V. Improving the Accuracy Mathematical Modeling of Transients Emergency Mode Industrial Facilities Distributed Generation. *2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation, RPA 2018*, 2018, p. 8537190. DOI: 10.1109/RPA.2018.8537190

29. Gurevich Yu.E., Libova L.E., Khachatryan E.A. *Ustoychivost' nagruzki elektricheskikh sistem* [Stability of the load of electrical systems]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 208 p.

30. Iguumeshev V.A., Malafeev A.V., Panova E.A., Varganova A.V., Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Zinoviev V.V., Yuldasheva A.I., Krubtsova A.A., Anisimova N.A., Nasibullin A.T., Tremasov MA, Shcherbakova V.S., Bogush V.K. *Kompleks avtomatizirovannogo rezhimnogo analiza KATRAN 10.0* [Complex of the automated regime analysis KATRAN 10.0]. Computer program RF, no. RU 2019610251, 2019.

Received 20 August 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Газизова, О.В. Особенности применения метода последовательного утяжеления при анализе статической устойчивости источников распределенной генерации / О.В. Газизова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 31–40. DOI: 10.14529/power210304

FOR CITATION

Gazizova O.V. Specifics of Gradual Transition to Post-Emergency Parameters for Static Stability Testing of Distributed Generation Facilities. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 31–40. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210304