

ЭНЕРГЕТИКА

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.311

DOI: 10.17673/Vestnik.2017.04.22

И.И. АРТЮХОВ
С.Ф. СТЕПАНОВ
Д.А. БОЧКАРЁВ
Г.Н. ТУЛЕПОВА
А.И. ЗЕМЦОВ

МИКРОСЕТЬ НА ОСНОВЕ ГРУППЫ АВТОНОМНО РАБОТАЮЩИХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

MICROGRID BASED ON A GROUP OF AUTONOMOUS OPERATING SYNCHRONOUS GENERATORS

Современный уровень развития силовой электроники позволяет создавать и внедрять новые технологии генерирования, передачи и распределения электроэнергии. В качестве источников энергии теперь могут быть использованы электрические машины с изменяемой скоростью вращения вала. Функции обеспечения параметров вырабатываемой электроэнергии переносятся на преобразовательные устройства. Объединение управляемых источников энергии и электроприемников в микросети позволяет снизить потери электроэнергии, повысить надежность электроснабжения. Статья посвящена вопросам построения микросети на основе нескольких автономно работающих синхронных генераторов. В качестве примера рассматривается микросеть для электроснабжения компрессорного цеха на основе генераторов собственных нужд газоперекачивающих агрегатов.

The current level of power electronics development allows creating and implementing new technologies for generation, transmission and distribution of electricity. Electric machines with variable shaft speed can be used as an energy source now. The functions of providing the parameters of the generated electric power are transferred to the converter devices. The combination of controlled energy sources and electrical receivers in microgrids allows reducing energy losses, increasing the reliability of electricity supply. The article is devoted to the constructions of a microgrid based on several autonomously operating synchronous generators. As an example, microgrid for power supply of compressor station based on own use generators of gas compressor units is considered.

Ключевые слова: микросеть, синхронный генератор, преобразование энергии, выпрямитель, инвертор

Keywords: microgrid, synchronous generator, power conversion, rectifier, inverter

Для современного этапа развития электроэнергетики характерным является интенсивный процесс создания и развития микросетей. Этим термином, автором которого считается профессор Роберт Х. Лассетер, принято называть интегрированную энергетическую систему небольшой мощности с распределенными генераторами и потребителями энергии [1]. Такая энергетическая система, как правило, располагается на небольшой площади. В настоящее время около 90 % существующих электрических микросетей занимает площадь до 1 км², а суммарная мощность генераторов энергии в одной микросети не превышает 1 МВт [2].

Целесообразность использования микросетей определяется тем, что они имеют ряд преимуществ

по сравнению с классическими способами генерирования, передачи и распределения энергии. В микросети выработанная энергия в основном используется местными потребителями, что обеспечивает снижение потерь, связанных с передачей и распределением энергии по электрическим сетям. Надежность снабжения электроэнергией в рамках микросети обеспечить существенно легче, чем в крупных энергетических системах. Потребители энергии в микросети могут участвовать в процессе балансирования мощности путем регулирования своих нагрузок, генерируя, накапливая и отдавая электроэнергию в микросеть [3].

Существуют различные варианты микросетей. Они могут работать автономно или быть соединены с

электросетью энергосистемы. Объединение отдельных локальных сетей в микросеть может осуществляться по шинам как переменного, так и постоянного тока. При этом микросети постоянного напряжения имеют ряд преимуществ [4].

В настоящее время перспективы создания микросетей рассматривают в основном в связи с возможностью интеграции возобновляемых источников энергии, таких как солнечная и ветровая энергия [5]. Однако микросети могут быть построены также на базе широко распространенных источников энергии, таких как дизель-генераторы, газотурбинные генераторы и т.п.

В качестве источников энергии наиболее часто применяют синхронные электрической машины (ЭМ), которые работают с фиксированной скоростью вращения вала для обеспечения стабильности частоты выходного напряжения. Однако работа ЭМ в таком режиме не всегда возможна, например, когда источником механической энергии является ветровая турбина. В других случаях стабилизация скорости вращения вала приводного двигателя снижает энергетическую эффективность системы генерации. В частности, при использовании дизеля в качестве первичного двигателя фактический расход топлива при работе такой системы на переменную нагрузку оказывается значительно выше заявленной величины.

С развитием силовой электроники появились новые возможности совершенствования систем генерирования электроэнергии. Основным моментом является работа ЭМ с переменной частотой вращения, причем могут быть применены как синхронные, так и асинхронные машины. При этом частота вращения вала ЭМ может устанавливаться принудительно, в соответствии с заданными настройками регулятора подачи топлива в дизель-генераторных установках [6, 7] или определяться внешними условиями работы системы генерирования электроэнергии, например, при регулировании производительности газоперекачивающих агрегатов (ГПА) за счет изменения частоты вращения вала [8]. Функции обеспечения параметров вырабатываемой электроэнергии (действующего значения, частоты и формы кривой генерируемого напряжения) в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» при переменных, в общем случае, скорости вращения вала ЭМ, а также величины и характере нагрузки переносятся на преобразовательные устройства [9].

На рис. 1 показана схема микросети, которая образована путем объединения по шине постоянного тока N автономно функционирующих модулей. Источником энергии в каждом модуле является синхронный генератор СГ с приводным двигателем ПД. Вал генератора k -го модуля вращается с частотой n_k , напряжение и частота имеют значения U_k, f_k .

С помощью выпрямителя В, регулятора постоянного напряжения РПН и сглаживающего фильтра СФ осуществляется преобразование электрической энергии переменного тока на выходе СГ в электрическую энергию постоянного тока с требуемыми параметрами. В составе модулей имеются электроприемники как постоянного, так и переменного тока промышленной частоты. Последние получают энергию от шины постоянного тока через инвертор И и выходной фильтр ВФ, обеспечивающий заданную форму напряжения.

Для анализа установившихся процессов в рассматриваемой микросети может быть использована схема замещения (рис. 2), которая изображена в предположении о бесконечно малом сопротивлении проводников, образующих шину постоянного тока. Источник энергии каждого модуля представлен в виде эквивалентного двухполюсника, имеющего ЭДС E_{dk} и внутреннее сопротивление R_{dk} . Вентильный элемент V_k отражает односторонний характер тока I_{dk1} . Нагрузка модуля по постоянному току представлена эквивалентным сопротивлением $R_{эк}$ по которому протекает ток I_{dk2} .

На основании приведенной схемы замещения выражение для напряжения на шине постоянного тока может быть записано в следующем виде:

$$U_d = \frac{\sum_{k=1}^N F_k E_{dk} R_{dk}^{-1}}{\sum_{k=1}^N (R_{dk}^{-1} + R_{эк}^{-1})}, \quad (1)$$

где F_k – логические функции, отражающие возможность протекания токов I_{dk1} только в одном направлении. Функция $F_k=1$, если источник соответствующего модуля отдает энергию в шину постоянного тока, и нулю – в противном случае.

Выходной ток k -го модуля определяется по формуле

$$I_{dk1} = \frac{F_k (E_{dk} - U_d)}{R_{dk}}. \quad (2)$$

Эквивалентные ЭДС E_{dk} источников энергии представляют собой напряжения U_{dk} на выходе РПН в режиме холостого хода. Величины этих напряжений зависят от напряжений U_{Bk} на выходе выпрямителей и сигнала управления μ_k РПН соответствующего модуля

$$E_{dk} = D(\mu_k) U_{Bk}, \quad (3)$$

где $D(\mu_k)$ – регулировочная характеристика РПН k -го модуля, вид которой определяется его конкретной реализацией.

Будем полагать, что выпрямители, подключенные к СГ, выполнены по трехфазной мостовой схеме с индуктивным фильтром на выходе. Для такого выпрямителя справедливо следующее выражение для определения среднего значения выходного напряжения:

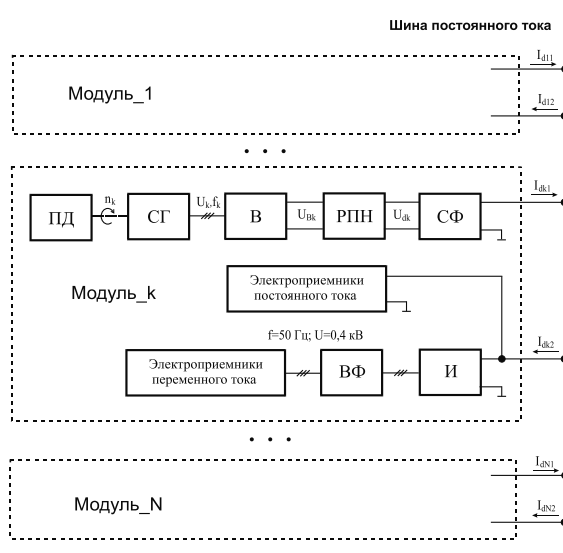


Рис. 1. Схема микросети на основе группы синхронных генераторов

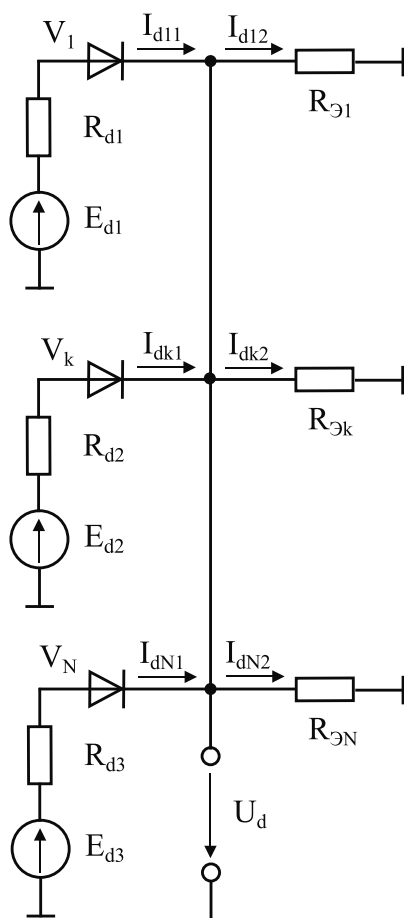


Рис. 2. Схема замещения микросети по постоянному току

$$U_{Bk} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{0k} - \Delta U_{Xk} - \Delta U_{Rk} - 2\Delta U_{d}, \quad (4)$$

где ΔU_{Xk} , ΔU_{Rk} – индуктивная и активная составляющие падения напряжения; $2\Delta U_{d}$ – падение напряжения на диодах выпрямителя; E_{0k} – ЭДС k -го генератора, которая зависит от основного магнитного потока Φ_k в воздушном зазоре и частоты вращения ротора n_k соответствующего генератора.

Величина ЭДС определяется формулой

$$E_{0k} = C_E \Phi_k n_k, \quad (5)$$

где C_E – постоянная для каждой электрической машины величина.

Если СГ имеет обмотку возбуждения, то за счет изменения ее тока можно регулировать величину магнитного потока Φ_k . В генераторах с постоянными магнитами такой возможности нет.

Индуктивное падение напряжения ΔU_{Xk} вызывается процессом коммутации и при углах коммутации $\gamma < \pi/3$ может быть рассчитано по формуле

$$\Delta U_{Xk} = \frac{3 \cdot \omega L_{0k} \cdot I_{dk}}{\pi}, \quad (6)$$

где I_{dk} – среднее значение тока на выходе k -го выпрямителя.

Напомним, что угол коммутации определяется из уравнения

$$1 - \cos \gamma_k = \frac{2 \cdot I_{dk} \cdot \omega L_{0k}}{\sqrt{6} E_k}. \quad (7)$$

Падение напряжения ΔU_R на активных сопротивлениях схемы рассчитывается по формуле

$$\Delta U_{Rk} = \frac{3}{\pi} \cdot I_{dk} \cdot R_{0k} \left(\frac{2\pi}{3} - \frac{\gamma_k}{2} \right). \quad (8)$$

Если в рабочей области угол коммутации не превышает $\pi/3$, выражение можно упростить следующим образом:

$$\Delta U_{Rk} = \frac{3 \cdot \omega L_{0k} \cdot I_{dk}}{\pi} + 2 \cdot R_{0k} \cdot I_{dk}. \quad (9)$$

Падение напряжения $2\Delta U_{d}$ на диодах выпрямителя можно считать не зависящим от тока нагрузки. Причем, если напряжение на шине постоянного тока составляет сотни вольт, то падением напряжения $2\Delta U_{d}$ можно пренебречь.

С учетом выражений (6) – (8) и принятых допущений уравнение (4) внешней характеристики выпрямителя примет вид

$$U_{Bk} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot E_{0k} - \frac{3 \cdot \omega L_{0k} \cdot I_{dk}}{\pi} - 2 \cdot R_{0k} \cdot I_{dk}. \quad (10)$$

Уравнение (10) соответствует двухполюснику, у которого ЭДС холостого хода

$$E_{zk} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot E_{0k}, \quad (11)$$

а внутреннее сопротивление

$$R_{zk} = \frac{3}{\pi} \omega L_{0k} + 2 \cdot R_{0k}. \quad (12)$$

Из выражений (1) и (2) с учетом (5) – (7), (9) – (11) следует, что для заданного набора характери-

стик электрооборудования величина напряжения на шине постоянного тока и распределение токов между модулями зависит от частот n_k , с которыми вращаются роторы СГ, и параметров нагрузки. Управляющими воздействиями являются токи возбуждения (для СГ с электромагнитным возбуждением) и сигналы μ_k управления РПН. Таким образом, за счет изменения токов возбуждения СГ и сигналов управления РПН можно обеспечить заданное распределение потоков энергии между модулями микросети.

Если модули рассматриваемой системы работают автономно, т.е. не связаны по шине постоянного тока, то для надежного электроснабжения электроприемников каждого модуля должно выполняться условие

$$P_{dk2} < P_{НОМ.k} \quad (13)$$

где P_{dk2} – мощность, потребляемая электроприемниками k -го модуля; $P_{НОМ.k}$ – номинальная мощность СГ данного модуля.

Для рассматриваемой микросистемы допустимы режимы, когда

$$P_{dk2} > P_{НОМ.k} \quad (14)$$

при этом должно выполняться условие

$$\sum_{k=1}^N P_{dk2} \leq \sum_{k=1}^N P_{НОМ.k} \quad (15)$$

Если в микросети возникает избыток мощности, то он может быть передан внешним потребителям или в систему накопления энергии.

Рассмотрим в качестве примера микросеть для электроснабжения компрессорного цеха на основе генераторов собственных нужд газоперекачивающих агрегатов.

На объектах магистрального транспорта газа находится в эксплуатации более 280 ГПА импортного производства (ГТК-10И, ГТК-25И), оснащенных генераторами собственных нужд (ГСН) [10]. Так, например, в агрегате ГТК-10И установлен ГСН мощностью 250 кВт фирмы Marelli Motori, который представляет собой синхронную машину с двумя парами полюсов. При номинальной скорости вращения вала 1500 об/мин генерируется напряжение 380 В с частотой 50 Гц.

ГСН подключается через редуктор к валу отбора мощности ГПА, который выходит от турбины высокого давления через осевой компрессор. Пуск ГПА с ГСН осуществляется при внешнем электроснабжении. После того, как вал отбора мощности ГПА достигает рабочих оборотов, в работу подключается ГСН.

Недостатком схемы электроснабжения ГПА с ГСН является необходимость стабилизации частоты вращения вала турбины, что усложняет возможность регулирования технологического режима транспорта газа.

Обязательным элементом оборудования является редуктор, который вносит потери в процесс производства электроэнергии и требует регулярного технического обслуживания. Кроме того, существующая схема электроснабжения ГПА с ГСН не

позволяет передавать избытки электрической мощности от генератора в систему электроснабжения компрессорного цеха.

В соответствии с ГОСТ Р 54404-2011 «Агрегаты газоперекачивающие с газотурбинным приводом. Общие технические условия» конструкция ГПА должна обеспечивать регулирование его производительности. При этом изменение скорости вращения турбины может находиться в пределах от 70 до 105 % от номинальной в зависимости от требуемого технологического режима работы нагнетателя. Однако необходимость стабилизации скорости вращения вала ГСН не позволяет реализовать это требование.

Выводы. Объединение ГСН группы ГПА в микросеть позволяет решить данную проблему. При этом благодаря возможности работать с регулируемой производительностью оптимизируется режим транспорта газа, что снижает расход топливного газа. Повышается энергонезависимость объекта транспорта газа (компрессорной станции) от неблагоприятных воздействий, возникающих в системе внешнего электроснабжения. Появляется возможность передавать избыток электроэнергии, вырабатываемой ГСН отдельного ГПА другим электроприемникам компрессорного цеха (компрессорной станции), что снижает затраты на покупку и передачу электроэнергии. После запуска и выхода ГПА на номинальный режим ГСН может отдать в сеть 150–300 кВт (в зависимости от номинальной мощности генератора собственных нужд). Если в работе находится N агрегатов, то суммарная избыточная мощность составляет $N \cdot (150–300)$ кВт. При определенном числе N этой мощности может оказаться вполне достаточно для обеспечения работы цеховой установки охлаждения газа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lassester R.H. MicroGrids // 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. № 02CH37309). Vol. 1. Pp. 305–308.
2. Адомавичюс В.Б., Харченко В.В. Особенности и проблемы построения микросетей // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: Тр. междунар. науч.-техн. конф. М: ГНУ ВИЭСХ, 2012. Т. 5. С. 50–56.
3. Лапшин С.А., Харченко В.В. Система электроснабжения потребителей в сетях низкого напряжения с использованием различных источников энергии и управлением генерацией электроэнергии // Вестник аграрной науки Дона. 2015. № 4(32). С. 51–57.
4. Dragicevic T., Lu X., Vasquez J.C., Guerrero J.M. DC Microgrids – Part II: A Review of Power Architectures, Applications, and Standardization Issue// IEEE Transactions on Power Electronics. 2016. Vol. 31, № 5. Pp. 3528 – 3549.
5. Wang X., Guerrero J.M., Blaabjerg F., Chen Z. A Review of Power Electronics Based Microgrids // Journal of Power Electronics. 2012. Vol. 12. №1. Pp. 181-192.

6. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Способы снижения расхода топлива дизельных электростанций // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. URL [www.science-education.ru / 108-8615](http://www.science-education.ru/108-8615).

7. Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Тарасов И.М. Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2010. Вып. 2. С. 53 – 56.

8. Артюхов И.И., Бочкарёв Д.А., Степанов С.Ф. Совершенствование системы электроснабжения газоперекачивающих агрегатов с генераторами собственных нужд // Вестник Саратовского государ-

ственного технического университета. 2015. № 1 (80). Т.3. С. 176–181.

9. Артюхов И.И., Бочкарёв Д.А. Автономная система электроснабжения на основе генератора с изменяемой частотой вращения вала // Научное обозрение. 2014. № 3. С. 178–183.

10. Зюзьков В.В., Щуровский В.А. Автономное электроснабжение модульных газотурбинных газоперекачивающих агрегатов // Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2009): сб. докл. III Междунар. науч.-техн. конф. М.: Газпром ВНИИ-ГАЗ, 2010. С. 268 – 274.

Об авторах:

АРТЮХОВ Иван Иванович

доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехнологии Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Институт энергетики и транспортных систем
410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
E-mail: ivart1954@gmail.com

СТЕПАНОВ Сергей Фёдорович

доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехнологии Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Институт энергетики и транспортных систем
410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
E-mail: stepanov460915@yandex.ru

БОЧКАРЁВ Дмитрий Александрович

аспирант кафедры электроснабжения и электротехнологии Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Институт энергетики и транспортных систем
410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
E-mail: grifeen@mail.ru

ТУЛЕПОВА Гульсим Нуржановна

аспирант кафедры электроснабжения и электротехнологии Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Институт энергетики и транспортных систем
410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
E-mail: gulsim_tulepova@list.ru

ЗЕМЦОВ Артём Иванович

кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Самарский государственный технический университет, филиал в г. Сызрани
446001, Россия, г. Сызрань, ул. Советская, 45
E-mail: artex283@mail.ru

ARTYUKHOV Ivan I.

Doctor of Engineering Science, Professor of the Power Supply and Electrotechnology Chair
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
Institute of Energy and Transport Systems
410054, Russia, Saratov, Polytechnicheskaya str., 77
E-mail: ivart1954@gmail.com

STEPANOV Sergey F.

Doctor of Engineering Science, Professor of the Power Supply and Electrotechnology Chair
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
Institute of Energy and Transport Systems
410054, Russia, Saratov, Polytechnicheskaya str., 77
E-mail: stepanov460915@ya.ru

BOCHKAREV Dmitriy A.

Postgraduate student of the Power Supply and Electrotechnology Chair
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
Institute of Energy and Transport Systems
410054, Russia, Saratov, Polytechnicheskaya str., 77
E-mail: grifeen@mail.ru

TULEPOVA Gulsim N.

Postgraduate student of the Power Supply and Electrotechnology Chair
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
Institute of Energy and Transport Systems
410054, Russia, Saratov, Polytechnicheskaya str., 77
E-mail: gulsim_tulepova@list.ru

ZEMTSOV Artem I.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Power Supply to Industrial Enterprises Chair
Branch of Samara State Technical University in Syzran
446001, Russia, Syzran, Sovetskaya str., 45
E-mail: artex283@mail.ru

Для цитирования: Артюхов И.И., Степанов С.Ф., Бочкарёв Д.А., Тулепова Г.Н., Земцов А.И. Микросеть на основе группы автономно работающих синхронных генераторов // Градостроительство и архитектура. 2017. Т.7, №4. С. 127-131. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.04.22.

For citation: Artyukhov I.I., Stepanov S.F., Bochkarev D.A., Tulepova G.N., Zemtsov A.I. Microgrid based on a group of autonomous operating synchronous generators // Urban construction and architecture. 2017. V.7, 4. Pp. 127-131. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.04.22.