

ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СТАТЬЯ

УДК 62-13:62-111.2:62-83

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-80-88>

Защита электрогенераторов объектов распределенной генерации от аварийных режимов

В.Е. Большев¹, А.В. Виноградов², С.В. Крамской³, С.И. Белов⁴^{1,2} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия^{2,3} Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина; г. Орёл, Россия^{2,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ vadimbolshev@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5787-8581>² winaleksandr@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>³ kramskois@gmail.com⁴ sbelov_@mail.ru

Аннотация. Распределенная генерация повышает надежность работы потребителя на отдаленных от источников централизованного электроснабжения территориях. Система электроснабжения с распределенной генерацией использует возобновляемые источники электроэнергии, дизель-генераторы и бензогенераторы, в том числе передвижные электростанции, оснащенные в большинстве случаев современными средствами защиты. В процессе исследований проведен анализ существующих способов и средств защиты электрогенераторов от ненормальных и аварийных режимов работы, в том числе от несимметрии напряжений, которая является одной из причин сокращения срока службы генераторов и характерна для сельских электрических сетей. В ходе анализа определены основные типы защиты генераторов от аварийных режимов работы: защита обмоток статора, защита от пониженной и повышенной частоты, защита от пониженного и повышенного напряжения, защита от несимметрии напряжений (токов). Отмечено, что основной причиной несимметрии напряжений, приводящей к механической вибрации и быстрому перегреву ротора, являются однофазные нагрузки в системе, которые неравномерно распределены по трем фазам. Проблема несимметрии напряжений решается в основном за счет перераспределения нагрузок в линиях электропередачи и/или установки компенсирующих устройств. Однако в сельских системах электроснабжения несбалансированное распределение нагрузки корректируется крайне редко. Компенсация несимметрии напряжений возможна посредством применения гибридных фильтров активной мощности последовательной компенсации и совершенствования методов управления этими фильтрами. Преобразователи напряжения, эффективные при выравнивании несимметрии напряжений в фотоэлектрических системах, могут эффективно защищать дизельные электрогенераторы малой мощности при условии достижения экономической рентабельности оснащения дополнительным оборудованием.

Ключевые слова: распределенная генерация, защита электрогенераторов, несимметрия напряжений, защита от несимметрии напряжений, методы устранения несимметрии, компенсация несимметрии, дизельные электрогенераторы, электрогенераторы малой мощности

Для цитирования: Большев В.Е., Виноградов А.В., Крамской С.В., Белов С.И. Защита электрогенераторов объектов распределенной генерации от аварийных режимов // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 3. С. 80-88. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-80-88>

REVIEW ARTICLE

Protection of electric generators of distributed generation objects against emergency modes

V.E. Bolshev¹, A.V. Vinogradov², S.V. Kramskoy³, S.I. Belov⁴^{1,2} Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia^{2,3} Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin; Orel, Russia^{2,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ vadimbolshev@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5787-8581>² winaleksandr@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>³ kramskois@gmail.com⁴ sbelov_@mail.ru

Abstract. Distributed generation is a good solution for areas remote from centralized power supply sources as it helps increase the reliability of consumer operation. Distributed generation power supply systems use renewable

sources of electricity, diesel generators and gasoline generators in the form of mobile power stations, which in most cases are not equipped with modern means of protection. This study presents an analysis of existing means of protecting electric generators from abnormal and emergency operating conditions, including voltage asymmetry, which is one of the factors reducing the service life of generators and is typical for rural electrical networks. During the analysis, the authors determined the main types of generator protection against emergency operation modes: protection of stator windings, protection against underfrequency and overfrequency, protection against undervoltage and overvoltage, protection against voltage (current) asymmetry. It is noted that the main cause of voltage asymmetry leading to mechanical vibration and rapid overheating of the rotor is single-phase loads in the system, which are unevenly distributed over three phases. The problem of voltage asymmetry is mainly solved by redistributing loads in transmission lines and/or installing compensating devices. However, in rural power supply systems, unbalanced load distribution is rarely corrected. The voltage asymmetry can be compensated through the use of hybrid active power filters of series compensation and improved control methods of these filters. Voltage converters that are effective in equalizing voltage asymmetry in PV systems can effectively protect small capacity diesel power generators provided that the use of additional equipment is economically viable.

Keywords: distributed generation, protection of electric generators, voltage asymmetry, voltage asymmetry protection, methods of asymmetry elimination, asymmetry compensation, diesel electric generators, low-power electric generators

For citation: Bolshev V.E., Vinogradov A.V., Kramskoy S.V., Belov S.I. Protection of electric generators of distributed generation objects against emergency modes. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(3):80-88. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-80-88>

Введение

Распределенная генерация в системах электропитания низкого и среднего напряжения повышает эффективность электроснабжения потребителей за счет минимизации потерь электроэнергии, обусловленных сокращением расстояния при передаче энергии от источника к потребителю. Наиболее перспективными районами для развертывания распределенной генерации являются сельские территории, отдаленные от источников централизованного снабжения, вследствие чего их электроснабжение осуществляется по очень протяженным линиям электропередачи. Использование в таких случаях только источников электроэнергии на основе возобновляемой энергии (ВИЭ), например, ветровых и солнечных установок, не позволяет достичь эффективного электроснабжения ввиду непрогнозируемых природных условий, влияющих на выработку электроэнергии. Поэтому сети с распределенной генерацией на основе ВИЭ оснащаются средствами резервирования – такими, как аккумуляторные батареи и/или дизель-генераторы, способные покрывать возникающие дефициты мощности.

В последние годы значительно чаще стало использование потребителями генераторов малой мощности, например, генераторов с дизельными установками [1, 2]. Система дизель-генераторной установки состоит из таких компонентов, как дизельный двигатель, генератор переменного тока, система управления [2-4]. Конструкция генератора переменного тока в свою очередь состоит из двух основных частей:

ротора и статора. При этом генераторы могут быть синхронными и асинхронными, явнополусными и неявнополусными [4, 5]. Кроме дизельных установок, генераторы малой мощности используются также в системах преобразования энергии ветра. При этом асинхронные генераторы считаются наиболее перспективными в составе ветряных установок ввиду их низкой стоимости, надежности и необходимости минимального обслуживания или вообще его отсутствия [6, 7]. При постоянной частоте асинхронный генератор работает в небольшом диапазоне скоростей и, следовательно, функционирует с небольшим диапазоном скольжений относительно синхронной скорости. По сравнению с синхронным генератором у асинхронного генератора механическое напряжение меньше [8-10]. Особо стоит отметить асинхронный генератор на базе машины двойного питания, позволяющей добиться высокого качества напряжения при переменной скорости вращения вала [11, 12]. Интерфейс силовой электроники такого генератора чаще всего состоит из инверторов с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ) на роторе и статоре, которые рассчитаны на работу в ограниченном диапазоне скоростей [12, 13], что требует надежной защиты от аварийных режимов работы.

В отличие от мощных генераторов, работающих на больших электростанциях, генераторы малой мощности, в том числе с дизельными установками, не оснащаются передовыми средствами защиты по причине высокой стоимости их использования. Особую проблему представляет отсутствие защиты

от несимметрии напряжений. Считается, что данный аварийный режим является проблемой сетевого уровня, которая должна решаться через правильное распределение нагрузок по фазам, хотя, как показывает практика, это не всегда так. Особенно часто это наблюдается в сельских электрических сетях, имеющих большое количество линий электропередачи с завышенной протяженностью.

Цель исследований: анализ способов и средств защиты электрогенераторов объектов распределенной генерации от несимметрии токов и напряжений, а также от других аварийных режимов.

Материалы и методы

Методология, используемая в исследованиях, представляет собой информационный поиск, включающий в себя обзор интернет-источников и источников научной литературы, посвященных способам защиты электрогенераторов объектов распределенной генерации от аварийных режимов, в том числе от несимметрии напряжений. В качестве источников информации были использованы поисковые системы Yandex и Google, научные базы данных Scopus, Web of Science и Google Scholar, научные электронные библиотеки КиберЛенинка, eLIBRARY.ru, Elsevier, Springer, IEEE Xplore.

Результаты и их обсуждение

Защита электрогенераторов от аварийных режимов работы. Рассматривая основные типы защиты генераторов от аварийных режимов работы, перспективных к использованию на объектах распределенной генерации, следует рассмотреть основные виды защиты синхронных генераторов, применяемых в энергосистеме: защиту обмоток статора; защиту от пониженной и повышенной частоты; защиту от пониженного и повышенного напряжения; защиту от несимметрии напряжений (токов)¹ [14].

Защита обмоток статора необходима от неисправностей, возникающих по причине пробоя изоляции катушек статора. Среди неисправностей обмоток статора различают однофазное замыкание на землю, междуфазное замыкание и межвитковое замыкание². В качестве основной защиты используются дифференциальная защита и различные ее модификации^{3,4}, а также защита от перегрева. В качестве защиты об-

моток статора также применяется защита от замыканий на землю, реагирующая на напряжения третьей гармоники нулевой последовательности [15, 16], предлагаются способы на основе индукционного датчика магнитного поля рассеяния [17].

Превышение частоты, возникающее в результате избыточной генерации, устраняется путем снижения выходной мощности за счет применения быстродействующих регуляторов скорости. В то же время снижение частоты происходит из-за подключения нагрузки, превышающей выдаваемую мощность генератора. В качестве защиты используется автоматическое устройство сброса нагрузки [18].

Перенапряжение, возникающее ввиду увеличения скорости первичного двигателя при внезапной потере нагрузки генератора, устраняется за счет реле повышенного напряжения (одного мгновенного действия и одного с выдержкой времени, применяемых в зависимости от величины перенапряжения) [14]. Пониженное напряжение, наоборот, возникает при внезапном отключении параллельно работающего генератора, что приводит к увеличению нагрузки, тока и, соответственно, к снижению напряжения на клеммах генератора. В качестве защиты используются реле пониженного напряжения.

Существует ряд аварийных режимов, которые могут вызвать отсутствие симметрии трехфазного тока в генераторе. Наиболее распространенными причинами являются асимметрия системы, несбалансированные нагрузки, несбалансированные неисправности системы и обрыв фаз [19]. В результате несимметрии напряжений в фазах образуются компоненты тока обратной последовательности, создающие магнитное поле обратной последовательности, которое вращается по отношению к статору с синхронной скоростью в обратном направлении, а по отношению к ротору, вращающемуся с синхронной скоростью в прямом направлении, – с удвоенной синхронной скоростью⁵. Поэтому в обмотках возбуждения и на поверхности ротора индуцируются токи с частотой, вдвое превышающей частоту питания [20]. Эти токи подвержены нелинейному скин-эффекту ввиду магнитного насыщения [21] и протекают в твердом железе, а также в стопорных кольцах, пазовых клиньях, и в меньшей степени – в обмотке возбуждения. Влияние несимметрии токов сильно зависит от конструкции генераторов, и, как показано в работе [22], анализирующей распространение токов обратной последовательности в турбогенераторе, незначительные индуцируемые токи в роторе могут вызвать недопу-

¹ Никифорова Д.Р., Писарь А.С. Защита синхронных генераторов // В сб.: Актуальные проблемы энергетики. СНТК-76. Электроснабжение. Минск: РБ, 2020. С. 83-85

² Там же.

³ Там же.

⁴ Новожилов А.Н., Акаев А.М., Новожилов Т.А., Волгина Е.М. Обзор защит от витковых замыканий в синхронных машинах // Вестник ПГУ. 2014. Т. 3. С. 262-268.

⁵ Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. СПб.: Питер, 2007. 350 с.

стимый перегрев по краям зубцов ротора. Это может привести к повреждению генератора. В качестве защиты от несимметрии токов используется фильтр обратной последовательности на основе реле максимального тока.

В случае мощных генераторов, работающих на больших электростанциях, требуется применение большого количества систем защиты, предназначенных для быстрого устранения аварийных режимов на основе измерения различных параметров [23]. Появление в системах электроснабжения генераторов малой и средней мощности затрудняет правильный выбор защитной аппаратуры. Особенно остро этот вопрос возникает в гибридных системах электроснабжения, то есть в системах с распределенной генерацией, где потребители могут питаться от энергосистемы или генераторной установки, работающей на уровнях низкого и/или среднего напряжения [24, 25]. Защитой, используемой в этих сетях, являются преимущественно аппараты в виде автоматических выключателей и плавких предохранителей [26-28], используемых для защиты обмоток статора. Для защиты генераторов напряжением 0,4 кВ и мощностью до 1 МВА созданы современные и дорогие устройства – например, расцепитель Ekip G компании ABB⁶. Такие генераторы обычно используются на микроГЭС, когенерационных установках средней мощности, установках по переработке биомассы, дизельных и газовых генераторных установках.

Использование защиты генератора от несимметрии напряжений часто считается экономически неоправданным, так как основным виновником дисбаланса токов и напряжения является несимметричная нагрузка, проблема которой должна решаться на сетевом уровне за счет перераспределения нагрузок в линиях электропередачи и/или установки компенсирующих устройств (емкостной или индуктивной составляющей переменного тока) – например, синхронных компенсаторов [29, 30]. Однако несмотря на внедрение источников распределенной генерации в отдаленных сельских районах со слабыми сетями с несбалансированными нагрузками, при установке генераторов [31, 32] не используются компенсирующие устройства [33]. Поэтому разработка новых, экономически эффективных решений проблемы несимметрии напряжений является актуальной задачей.

Защита от несимметрии напряжений в распределительных энергосистемах. Основной причиной несимметрии напряжений обычно являются

однофазные нагрузки в системе, которые неравномерно распределены по трем фазам [34]. Это особенно характерно для сельских систем электроснабжения потребителей [35]. Многие генераторные установки подключаются к таким сетям, где несбалансированное распределение нагрузки не корректируется в течение многих месяцев. Проблемы с несбалансированным напряжением также возникают и в городских энергосистемах, где на крупных промышленных объектах используются мощные однофазные нагрузки, в том числе осветительные. При этом крупное производственное предприятие может иметь хорошо сбалансированное входное напряжение, но несбалансированные токи все равно могут возникать по причине неравномерного распределения нагрузок по фазам [36].

Даже при небольшой несимметрии фазных напряжений, ввиду низкого полного сопротивления обратной последовательности асинхронного генератора, могут возникнуть большие токи обратной последовательности, способные вызвать несбалансированный нагрев (горячие точки) в обмотках машины, что потенциально может привести к выходу из строя генератора. Кроме нагрева, работа при несбалансированном напряжении создает пульсирующий крутящий момент, который вызывает пульсацию скорости, механическую вибрацию, акустический шум, тем самым сокращая срок службы редуктора и других механических устройств генераторной установки [36]. Поэтому в системах преобразования энергии ветра рекомендуется отключать асинхронные генераторы от сети, когда несимметрия междуфазного напряжения превышает 6% [10]. Международная электротехническая комиссия (МЭК) рекомендует производить отключение асинхронных генераторов при несимметрии напряжений в электрических системах в 2% [37]. При этом ГОСТ РФ 32144-2013 также устанавливает значения для несимметрии напряжений (коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности и по нулевой последовательности) не более 2% в течение 95% времени интервала в одну неделю и 4% – в течение 100% времени⁷.

Компенсация несимметрии напряжений обычно осуществляется с помощью последовательного фильтра активной мощности (статический компенсатор реактивной мощности) путем подачи напряжения обратной последовательности [38, 39], при этом

⁷ ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Дата введения: 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

⁶ Ekip G – Emax 2 (Circuit Breakers Low Voltage – ABB). URL: <https://new.abb.com/low-voltage/products/circuit-breakers/emax2/benefits/ekip-g> (дата обращения: 10.02.2024).

компенсация производится по обратной и нулевой составляющих несимметрии напряжений [40]. Фильтры активной мощности также используются для компенсации гармонического тока, регулирования напряжения на клеммах, подавления мерцаний напряжения и улучшения баланса напряжений в трехфазных системах [41].

Для уменьшения несимметрии напряжений используют параллельную компенсацию [42-44]. В этом случае несимметрия напряжений, вызванная несимметричной нагрузкой, компенсируется за счет балансировки линейных токов. Однако в случае превышения допустимых значений коэффициентов, оценивающих несимметрию нагрузки, амплитуда подаваемого активным фильтром тока может быть очень высокой и превышать номинал фильтра [45].

Наиболее распространенными являются фильтры последовательной и параллельной компенсации активной мощности, поскольку они эффективно снижают искажения тока и реактивную мощность, создаваемую нелинейными нагрузками, но, как правило, имеют высокую стоимость и эксплуатационные издержки [46, 47].

Повысить эффективность компенсации мощности при снижении стоимости фильтра можно за счет использования топологии гибридного фильтра активной мощности последовательной компенсации [48]. В данной топологии активный фильтр последовательно подключается с генератором и нелинейной нагрузкой, а пассивный фильтр – в параллель с нагрузкой. Такая топология позволяет выдерживать большие токи нагрузки [49, 50]. Эффективность компенсации мощности обеспечивается также за счет совершенствования методов управления активными и гибридными фильтрами: применения теории мгновенной реактивной мощности [51], теории баланса мощности [52], использования режекторных фильтров [53], регуляторов на основе потока [54], регуляторов скользящего режима [55], двух ПИ-регуляторов с замкнутым контуром [56].

Рассматривая системы преобразования энергии ветра с целью уменьшения влияния несбалансированной нагрузки, можно предложить подавать компенсирующий ток в ротор асинхронного генератора двойного питания, что в итоге позволяет уменьшить или полностью устранить пульсации крутящего момента [9, 10]. Основным недостатком этого метода является сохранение несимметрии токов статора, а следовательно, даже когда пульсации крутящего момента уменьшаются, выходная мощность асинхронной машины снижается, поскольку предел тока машины достигается только на одной из фаз статора. Устранить эту проблему может система управления

для компенсации дисбаланса токов статора ветрогенераторной установки, работающей как в автономном режиме работы, так и при подключении системы к сети [57]. Дополнительно для ветроэнергетических установок предлагается производить компенсацию несимметрии напряжений и токов за счет статического генератора реактивной мощности (СТАТКОМ) [58].

Методы устранения несимметрии напряжений для фотоэлектрических систем. Эффективные методы устранения несимметрии напряжений существуют для источников распределенной генерации в виде фотоэлектрических систем. Такие источники состоят из солнечных фотоэлектрических панелей (плюс система управления, аккумуляторная батарея), подключенных через преобразователи напряжения (например, инвертор в случае преобразования постоянного/переменного тока) к системе распределения электроэнергии переменного тока. Основная роль преобразователей напряжения заключается в регулировании угла фазы и амплитуды выходного напряжения для управления подачей активной и реактивной мощности. Существует несколько способов компенсации несимметрии напряжений за счет эффективных стратегий управления преобразователями напряжения [59-62].

– Методы управления [59, 60], основанные на использовании двухинверторной структуры (один из инверторов включен параллельно, другой – последовательно с сетью наподобие последовательно-параллельного фильтра активной мощности) [63]. Основная роль шунтирующего инвертора заключается в управлении потоками активной и реактивной мощности. Последовательный инвертор балансирует линейные токи и напряжения на чувствительных клеммах нагрузки несмотря на несбалансированное напряжение сети. Это делается путем подачи напряжения обратной последовательности. Таким образом, для подачи мощности и компенсации дисбаланса необходимы два инвертора, что можно рассматривать как экономически необоснованное решение.

– Метод компенсации несимметрии напряжений за счет подачи тока обратной последовательности, позволяющий линейным токам становиться уравновешенными несмотря на несимметричные нагрузки [61]. Однако в условиях серьезной несбалансированности большая часть мощности интерфейсного преобразователя будет использоваться для компенсации, что затруднит выработку активной и реактивной мощности со стороны источника фотоэлектрической системы.

– Способ, основанный на проводимости источника фотоэлектрической системы для компенсации

несимметрии напряжений в микросетях, позволяющей определять проводимость обратной последовательности на основе ее реактивной мощности [62]. После определения компенсационного опорного тока компенсационное задание (команда) отправляется на выход контура регулирования напряжения. Повысить эффективность компенсации несимметрии напряжений в микросети при данном подходе можно за счет прямого изменения опорного напряжения [64]. Однако компенсация, предложенная в данном способе, будет рассматриваться как помеха, которая должна быть устранена контуром управления напряжением. Таким образом, существует проблема выбора между эффективностью компенсации несимметрии и адекватностью регулирования напряжения.

Рассматривая способы защиты фотоэлектрических систем от несимметрии напряжений, можно отметить, что основным методом является использование преобразователей напряжения с различными вариациями стратегий его управления, которые выступают в качестве буфера между источником электроэнергии и распределительной сетью. Использование подобного рода преобразователей напряжения в качестве защиты дизельных электрогенераторов малой мощности также представляется перспективным при достижении экономической рентабельности оснащения электрогенераторов дополнительным оборудованием.

Выводы

1. Одним из опасных аварийных режимов работы генератора является работа при несбалансированной

по фазам нагрузке, приводящая к механической вибрации и быстрому перегреву ротора. Защита от этого режима не применяется ввиду экономической нецелесообразности, а решение проблемы заключается в основном за счет перераспределения нагрузок в линиях электропередачи и/или установки компенсирующих устройств. Однако несбалансированное распределение нагрузки во многих системах электропитания (например, сельских) не корректируется в течение длительного времени.

2. Компенсация несимметрии напряжений с помощью последовательного фильтра активной мощности путем подачи напряжения обратной последовательности и применения параллельной компенсации сопровождается большими издержками, снизить которые можно посредством гибридных фильтров активной мощности последовательной компенсации и совершенствования методов управления этими фильтрами.

3. Преобразователи напряжения, эффективные при выравнивании несимметрии напряжений в фотоэлектрических системах, могут быть эффективными для защиты дизельных электрогенераторов малой мощности при условии достижения экономической рентабельности оснащения дополнительным оборудованием.

4. Необходима разработка новых способов и средств защиты генераторов распределенной генерации от различных ненормальных и аварийных режимов, в том числе связанных с несимметрией токов и напряжений.

Список источников / References

1. Drozdowski P., Warzecha A. Mathematical study and control of diesel rotary uninterruptible power supply. *15th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE)*. IEEE. Zakopane, Poland, 2019. Pp. 469-475. <https://doi.org/10.1109/WZEE48932.2019.8979991>
2. Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Электростанция на базе дизель-генератора переменной частоты вращения // *Электротехника*. 2014. № 3. С. 28-32. EDN: RVCDON
3. Khvatov O.S., Daryenkov A.B. Power plant based on a variable speed diesel generator. *Elektrotehnika*. 2014;3:28-32 (In Russ.).
3. Boldea I. Electric generators handbook-two volume set. New York, USA: CRC Press, 2018. 580 p.
4. Yulisetiawan R.D., Koenhardono E.S., Sarwito S. Effect analysis of unbalanced electric load in ship at three phase synchronous generator on laboratory scale. *Jurnal Teknik ITS*. 2016;5(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.19417>
5. Boldea I. Synchronous generators. New York, USA: CRC Press, 2005. 444 p. <https://doi.org/10.1201/9781420037258>
6. Мазалов А.А. Адаптивная ветроустановка переменной частоты с асинхронным генератором // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2010. № 3. С. 250-256. EDN: LMCOZP
7. Mazalov A.A. Adaptive wind power plant of alternating current with inductor motor. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2010;3:250-256. (In Russ.).
7. Серебряков Р.А., Доржиев С.С., Базарова Е.Г. Современное состояние, проблемы и перспективы развития ветроэнергетики // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. № 1. С. 89-96. EDN: XPTXPF
8. Serebryakov R.A., Dorzhiev S.S., Bazarova E.G. State of the art, problems and prospects of wind energy development. *Vestnik VIESKH*. 2018;1:89-96. (In Russ.).
8. Muljadi E., Yildirim D., Batan T., Butterfield C.P. Understanding the unbalanced-voltage problem in wind turbine generation. *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat No99CH36370)*. IEEE, 1999. Pp. 1359-1365. <https://doi.org/10.1109/IAS.1999.801678>
9. Brekken T., Mohan N. A novel doubly-fed induction wind generator control scheme for reactive power control and torque pulsation compensation under unbalanced grid voltage conditions. *IEEE34th Annual Conference on Power Electronics Specialist*, 2003. PESC'03, Acapulco, Mexico. 2003;2:760-766. <https://doi.org/10.1109/PESC.2003.1218151>
10. Brekken T.K.A., Mohan N. Control of a doubly fed induction wind generator under unbalanced grid voltage conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2007;22(1):129-35. <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.889550>
11. Мещеряков В.Н., Муравьев А.А. Асинхронный генератор на базе машины двойного питания // *Известия СПбЭТУ (ЛЭТИ)*. 2016. № 4. С. 45-49. EDN: VWGUDH

Meshcheryakov V.N., Muravyev A.A. Asynchronous generator based on a dual power machine. *Izvestiya SPbETU (LETT)*. 2016;4:45-49. (In Russ.)

12. Степанчук Г.В., Моренко К.С. Двухроторные электрические генераторы для ветроустановок // Вестник аграрной науки Дона. 2011. № 2. С. 65-73. EDN: RDTGTF

Stepanchuk G.V., Morenko K.S. Bi-rotor electric generators for the wind sets. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2011;2:65-73. (In Russ.)

13. Амер И.А., Мирошниченко А.А., Соломин Е.В., Гордиевский Е.М., Ковалев А.А. Стратегия управления на основе отслеживания точки максимальной мощности асинхронного генератора двойного питания ветроэнергетической установки // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4. С. 56-62. EDN: YUNEQX

Amer I.A., Miroshnichenko A.A., Solomin E.V., Gordiyevskiy E.M., Kovalev A.A. Control strategy for maximum power point tracking of doubly fed induction motor for a wind turbine. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2018;4:56-62. (In Russ.)

14. Aujla R.K. Generator Stator Protection, under/over voltage, under/over frequency and unbalanced loading: Theory and applications of protective relays. London, Ontario, Canada: University of Western Ontario, 2008. 11 p.

15. Zielichowski M., Fulczyk M. Influence of load on operating conditions of third harmonic ground-fault protection system of unit connected generator. *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*. 1999;146(3):241-248. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19990249>

16. Fulczyk M., Mydlikowski R. Influence of generator load conditions on third-harmonic voltages in generator stator winding. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2005;20(1):158-165. <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.842391>

17. Полищук В.И. Построение защиты от виткового замыкания обмотки ротора синхронного генератора на основе индукционного датчика магнитного поля рассеяния // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2012. Т. 321, № 4. С. 57-61. EDN: PUTXIT

Polishchuk V.I. Designing protection against turn-to-turn short-circuit of the rotor winding of synchronous generator based on the induction sensor of magnetic field dissipation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2012;321(4):57-61. (In Russ.)

18. Anderson P.M., Henville C.F., Rifaat R., Johnson B., Meliopoulos S. Power system protection. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2022. 1424 p. <https://doi.org/10.1002/9781119513100>

19. Perdana I.N. Replacement of several single function generator protection relay at Badak LNG. *MATEC Web of Conferences. EDP Sciences*. 2019;277:03008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927703008>

20. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Влияние несимметричной нагрузки на работу турбогенераторов установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 3. С. 85-93. EDN: XQSNZJ

Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Influence of asymmetric load on turbine-generator sets in distributed generation plants. *Systems. Methods. Technologies*. 2016;3:85-93. (In Russ.)

21. Williamson A.C., Urquhart E.B. Analysis of the losses in a turbine-generator rotor caused by unbalanced loading. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1976;123(12):1325-1332. <https://doi.org/10.1049/pjee.1976.0265>

22. Williamson A.C. Measurement of rotor temperatures of a 500 MW turbine generator with unbalanced loading. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1976;123(8):795-803. <https://doi.org/10.1049/pjee.1976.0173>

23. Ciontea C.I. The use of symmetrical components in electrical protection. *2019 72nd Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. College Station, TX, USA, 2019. Pp. 1-8. <https://doi.org/10.1109/CPRE.2019.8765870>

24. Mamcarz D., Albrechtowicz P., Radwan-Pragłowska N., Rozegnał B. The analysis of the symmetrical short-circuit currents in backup power supply systems with low-power synchronous generators. *Energies*. 2020;13(17):4474. <https://doi.org/10.3390/en13174474>

25. Папков Б.В., Осокин В.Л., Куликов А.Л. Об особенностях малой и распределенной генерации в интеллектуальной электроэнергетике // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2018. Т. 22, № 4. С. 119-131. EDN: YTSNOP

Papkov B.V., Osokin V.L., Kulikov A.L. About the features of small and distributed generation in the intellectual electric power industry. *Vestnik UGATU*. 2018;22(4):119-131. (In Russ.)

26. Ludwinek K., Szczepanik J., Sułowicz M. Experimental analysis of assessing of the tripping effectiveness of miniature circuit breakers in an electrical installation fed from a synchronous generator set. *Electric Power Systems Research*. 2017. Т. 142. С. 341-350. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2016.09.028>

27. Albrechtowicz P., Szczepanik J. The analysis of the effectiveness of standard protection devices in supply systems fed from synchronous generator sets. *2018. International Symposium on Electrical Machines (SME)*. Andrychow, Poland, 2018. Pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ISEM.2018.8442774>

28. Mamcarz D., Albrechtowicz P., Radwan-Pragłowska N., Rozegnał B. The Analysis of the Symmetrical Short-Circuit Currents in Backup Power Supply Systems with Low-Power Synchronous Generators. *Energies*. 2020;13(17):4474. <https://doi.org/10.3390/en13174474>

29. Давлетов Б.Б. Особенности синхронных двигателей. Синхронные компенсаторы // Развитие и актуальные вопросы современной науки. 2017. № 7. С. 38-40. EDN: YOCEUA

Davletov B.B. Peculiarities of synchronous engines. Synchronous compensators. *Razvitie i Aktualnye Voprosy Sovremennoy Nauki*. 2017;7:38-40. (In Russ.)

30. Орлов В.С., Сидоров А.В. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях низкого напряжения // В сб.: Энергосбережение и инновационные технологии. Тюмень, 2015. С. 144-146. EDN: VIHSHX

Orlov V.S., Sidorov A.V. Compensation of reactive power in low voltage distribution networks. In: *Energoberezhnie i Innovatsionnye Tekhnologii*. Tyumen, 2015. Pp. 144-146. (In Russ.)

31. Михалев Д.С., Исмаилов А.И., Коняев Н.В. Распределенная генерация для АПК // В сб.: Наука молодых – будущее России. Курск, 2019. С. 127-130. EDN: QYHXRS

Mikhalev D.S., Ismailov A.I., Konyaev N.V. Distributed generation for the agro-industrial sector. In: *Nauka Molodykh-Budushchee Rossii*. Kursk, 2019. Pp. 127-130. (In Russ.)

32. Назаренко Ю.В., Коняев Н.В., Шкабенко А.Ю., Гиллюк А.А. Обоснование использования альтернативного электроснабжения для крестьянско-фермерских хозяйств // Региональный вестник. 2018. № 1. С. 5-7. EDN: UQXDFM

Nazarenko Yu.V., Konyaev N.V., Shkabenko A.Yu., Gilyuk A.A. Justification for the use of alternative power supply for private farms. *Regionalniy Vestnik*. 2018;1:5-7. (In Russ.)

33. Дмитриев В.Н., Милашкина О.В., Борисов И.А. Применение симметрирующих устройств для повышения качества электроэнергии автономных источников // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2009. № 3-4. С. 59-64. EDN: KUVYZJ

Dmitriev V.N., Milashkina O.V., Borisov I.A. Application symmetriry pattern for raise quality electric energy autonomous

sources nutrition. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2009;3-4:59-64. (In Russ.).

34. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Голиков И.О. Анализ работы системы накопления электрической энергии с пофазным регулированием напряжения // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2022. Т. 69, № 3. С. 26-35. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-3-26-35>

Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Golikov I.O. Operation of an electric energy storage system with phase voltage adjusting. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2022;69(3):26-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-3-26-35>

35. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Виноградова А.В. Анализ конфигурации электрических сетей 0,4 кВ Орловской области // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2023. Т. 70, № 4. С. 22-29. EDN: LHIRSK

Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Vinogradova A.V. Analysis of the configuration of 0.4 kV electrical grids of the Orel region. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2023;70(4):22-29. (In Russ.).

36. Muljadi E., Yildirim D., Batan T., Butterfield C.P. Understanding the unbalanced-voltage problem in wind turbine generation. *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat No99CH36370)*. IEEE, 1999. Pp. 1359-1365. <https://doi.org/10.1109/IAS.1999.801678>

37. IEC61000-2-2:2002. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-2: Environment – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems: 2002-03-28. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2002. 57 p.

38. Barrero F., Martínez S., Yeves F., Mur F., Martínez P.M. Universal and reconfigurable to UPS active power filter for line conditioning. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2003;18(1):283-290. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.804014>

39. Graovac D., Katić V.A., Rufer A. Power quality problems compensation with universal power quality conditioning system. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2007;22(2):968-976. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.883027>

40. Morán L., Pastorini I., Dixon J., Wallace R. Series active power filter compensates current harmonics and voltage unbalance simultaneously. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*. 2000;147(1):31-36. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20000027>

41. Singh B., Al-Haddad K., Chandra A. A review of active filters for power quality improvement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1999;46(5):960-971. <https://doi.org/10.1109/41.793345>

42. García-Cerrada A., Pinzón-Ardila O., Feliu-Batlle V., Roncero-Sánchez P., García-González P. Application of a repetitive controller for a three-phase active power filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2007;22(1):237-246. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.886609>

43. Singh B., Solanki J. An implementation of an adaptive control algorithm for a three-phase shunt active filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009;56(8):2811-2820. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2014367>

44. Luo A., Peng S., Wu C., Wu J., Shuai Z. Power electronic hybrid system for load balancing compensation and frequency-selective harmonic suppression. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012;59(2):723-732. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2161066>

45. George S., Agarwal V. A DSP based optimal algorithm for shunt active filter under nonsinusoidal supply and unbalanced load conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2007;22(2):593-601. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.890001>

46. Ali M., Laboure E., Costa F. Integrated active filter for differential-mode noise suppression. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2014;29(3):1053-1057. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2276396>

47. Ribeiro E.R., Barbi I. Harmonic voltage reduction using a series active filter under different load conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2006;21(5):1394-1402. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.880265>

48. Peng F.Z., Akagi H., Nabae A. A New approach to harmonic compensation in power systems—a combined system of shunt passive and series active filters. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1990;26(6):983-990. <https://doi.org/10.1109/28.62380>

49. Swain S.D., Ray P.K., Mohanty K.B. Voltage compensation and stability analysis of hybrid series active filter for harmonic components. *Annual IEEE India Conference, INDICON*. Mumbai, India, 2013. Pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/INDICON.2013.6726005>

50. Swain S.D., Ray P.K., Mohanty K.B. Improvement of power quality using a robust hybrid series active power filter. *IEEE Trans Power Electron*. 2017;32(5):3490-3498. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2586525>

51. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1984; IA-20(3):625-630. <https://doi.org/10.1109/TIA.1984.4504460>

52. Dixon J.W., García J.J., Morán L. Control system for three-phase active power filter which simultaneously compensates power factor and unbalanced loads. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1995;42:636-641. <https://doi.org/10.1109/41.475504>

53. Rastogi M., Mohan N., Edris A.A. Hybrid-active filtering of harmonic currents in power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1995;10(4):1994-2000. <https://doi.org/10.1109/61.473352>

54. Bhattacharya S., Veltman A., Divan D.M., Lorenz R.D. Flux-based active filter controller. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1996;32(3):491-502. <https://doi.org/10.1109/28.502159>

55. Singh B., Al-Haddad K., Chandra A. Active power filter with sliding mode control. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*. 1997;144(6):564-568. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19971431>

56. Chandra A., Singh B., Singh B.N., Al-Haddad K. An improved control algorithm of shunt active filter for voltage regulation, harmonic elimination, power-factor correction, and balancing of nonlinear loads. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2000;15(3):495-507. <https://doi.org/10.1109/63.844510>

57. Pena R., Cardenas R., Escobar E., Clare J., Wheeler P. Control strategy for a Doubly-Fed Induction Generator feeding an unbalanced grid or stand-alone load. *Electric Power Systems Research*. 2009;79(2):355-364. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.07.005>

58. Hochgraf C., Lasseter R.H. Statcom controls for operation with unbalanced voltages. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1998;13(2):538-544. <https://doi.org/10.1109/61.660926>

59. Li Y., Vilathgamuwa D.M., Loh P.C. Microgrid power quality enhancement using a three-phase four-wire grid-interfacing compensator. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2005;41(6):1707-1719. <https://doi.org/10.1109/TIA.2005.858262>

60. Li Y.W., Vilathgamuwa D.M., Loh P.C. A grid-interfacing power quality compensator for three-phase three-wire microgrid applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2006;21(4):1021-1031. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.876844>

61. Hojo M., Iwase Y., Funabashi T., Ueda Y. A method of three-phase balancing in microgrid by photovoltaic generation systems. *13th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC2008*. Poznan, Poland, 2008. Pp. 2487-2491. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2008.4635637>

62. Cheng P.T., Chen C.A., Lee T.L., Kuo S.Y. A cooperative imbalance compensation method for distributed-generation

interface converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2009;45(2):805-815. <https://doi.org/10.1109/TIA.2009.2013601>

63. Oliveira da Silva S.A., Donoso-Garcia P, Cortizo P.C., Seixas P.F. A three-phase line-interactive UPS system implementation with series-parallel active power-line conditioning capabilities. *Conference Record – IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)* (Cat. No.01CH37248). Chicago, USA, 2001;4:2389-2396. <https://doi.org/10.1109/IAS.2001.955956>

64. Savaghebi M., Jalilian A., Vasquez J.C., Guerrero J.M. Autonomous voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012;60(4):1390-1402. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2185914>

Информация об авторах

Вадим Евгеньевич Большев¹, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории электроснабжения и возобновляемой энергетики; vadimbolshev@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-5787-8581>

Александр Владимирович Виноградов², д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории электроснабжения и возобновляемой энергетики; winaleksandr@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>

Сергей Викторович Крамской³, аспирант кафедры электроснабжения; kramskois@gmail.com[✉]

Сергей Иванович Белов⁴, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника имени академика И.А. Будзко»; sbelov@mail.ru

^{1,2} Федеральное научное агроинженерное учреждение ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

^{2,3} Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина; 302019, Российская Федерация, г. Орёл, ул. Генерала Родина, 69

^{2,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

В.Е. Большев – методология, верификация данных, формальный анализ, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; А.В. Виноградов – концептуализация, методология, верификация данных, формальный анализ, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, руководство исследованием, администрирование проекта; С.В. Крамской – верификация данных, проведение исследования, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; С.И. Белов – участие в работе над окончательной версией рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 27.03.2024, после рецензирования и доработки 17.04.2024; принята к публикации 18.04.2024

Author Information

Vadim E. Bolshev¹, CSc (Eng), Senior Research Engineer, Laboratory of Electricity Supply and Renewable Energy, vadimbolshev@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-5787-8581>

Aleksandr V. Vinogradov², DSc (Eng), Associate Professor, Chief Research Engineer, Laboratory of Electricity Supply and Renewable Energy; Professor, Power Supply Department, winaleksandr@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>

Sergey V. Kramskoy³, postgraduate student, the Department of Power Supply

Sergey I. Belov, CSc (Eng), Associate Professor; Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering named after Academician I.A. Budzko, sbelov@mail.ru[✉]

^{1,2} Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky Proezd Str., bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

^{2,3} Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin; Generala Rodina Str., 69, Orel, 302019, Russian Federation

^{2,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contribution

V.E. Bolshev – methodology, data verification, formal analysis, investigation, data administration, writing – original draft preparation, finalizing (reviewing and editing) of the manuscript; A.V. Vinogradov – conceptualization, methodology, data verification, formal analysis, finalizing (reviewing and editing) of the manuscript, research supervision, project administration; S.V. Kramskoy – data verification, investigation, creating the draft manuscript, writing – original draft preparation, finalizing (reviewing and editing) of the manuscript; S.I. Belov – finalizing (reviewing and editing) of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 27.03.2024, Revised 17.04.2024, Accepted 18.04.2024