

УДК 621.314.572

ВЫБОР ВЫХОДНОГО ИНВЕРТОРА ДЛЯ МИКРОГРИД***Е.Е. Миргородская, Н.П. Митяшин, И.И. Артюхов, М.Е. Мамонычев,
П.А. Ерюшев, Р.В. Кожанов****

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

E-mail: mee85@inbox.ru, mityashinnp@mail.ru, ivart54@mail.ru, mamonychev@gmail.com,
eryushev.pavel@mail.ru, ljubimch@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача выбора выходного инвертора микрогрид при неопределенности информации об условиях эксплуатации. В качестве источников неопределенностей информации об условиях эксплуатации рассматриваются такие факторы, как возможности увеличения нагрузки в местности, для которой проектируется микрогрид, перспективы ее интегрирования в локальную систему электроснабжения на основе действующих в данном регионе микрогрид, а также возможные изменения в элементной базе в связи с импортозамещением. Разработаны система критериев и методика оптимального выбора, основанная на сочетании подходов многовекторной оптимизации и метода анализа иерархий. В качестве векторных критериев выбраны критерий качества генерируемой энергии, критерий надежного функционирования в условиях неопределенности информации и критерий экономических показателей. Общее число скалярных критериев, являющихся компонентами указанных векторных критериев, равно семи. На первом этапе выбора используется алгоритм экспертной оценки важности векторных критериев и их скалярных компонентов, а также значений этих критериев для сравниваемых альтернатив по методу анализа иерархий. На втором этапе выбора производится ранжирование рассматриваемых инверторов по глобальному критерию, рассчитываемому на основании результатов первого этапа. Методика продемонстрирована на выборе между тремя известными схемами автономных инверторов: инвертором напряжения с ШИМ-формированием выходной кривой, инвертором тока с изменяемой структурой и групповым многоуровневым инвертором на основе универсального источника уровней при их эксплуатации в автономном или интегрированном в систему других микрогрид режимах. Описанная методика выбора может

* Екатерина Евгеньевна Миргородская, доцент кафедры «Системотехника и управление в технических системах», к.т.н., доцент.

Никита Петрович Митяшин, профессор кафедры «Системотехника и управление в технических системах» д.т.н., профессор.

Иван Иванович Артюхов, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника», д.т.н., профессор.

Михаил Евгеньевич Мамонычев, аспирант кафедры «Системотехника и управление в технических системах».

Павел Александрович Ерюшев, аспирант кафедры «Системотехника и управление в технических системах».

Роман Вячеславович Кожанов, аспирант кафедры «Системотехника и управление в технических системах».

быть использована при выборе других устройств преобразовательного оборудования микрогрид.

Ключевые слова: автономный инвертор, микрогрид, критерии, многовекторная оптимизация, скаляризация, метод анализа иерархий, качество электроэнергии, гибкость оборудования.

Введение

В настоящее время в качестве альтернативы традиционным источникам энергии применяют электростанции, получающие первичную энергию разной физической природы, и прежде всего на основе солнечных батарей, микротурбин и ветрогенераторов. Такие электростанции, их нагрузку и связывающие их линии электропередачи рассматривают как гибридные микрогрид (МГ) [1, 2].

Энергия, генерируемая первичными источниками МГ, не обладает стабильными параметрами. Поэтому неотъемлемой частью МГ является преобразовательное оборудование, обеспечивающее качество генерируемой энергии, требуемое государственным стандартом [3].

Постановка задачи

На сегодняшний день преобразовательное оборудование, применяемое в существующих МГ, фиксировано и в целом мало отличается для разных МГ. Однако развитие преобразовательной схемотехники, изменения в элементной базе в связи с импортозамещением не исключают разработки новых схемных решений и принципов построения преобразователей. Это связано также с развитием систем критериев выбора преобразователей и методов принятия решений. При этом существенное значение приобретает учет неопределенностей, имеющих место при проектировании и эксплуатации преобразовательного оборудования.

Конечным звеном преобразовательной цепочки МГ является выходной инвертор. Выбор его схемы является важным этапом проектирования МГ, что обусловлено определяющей ролью вида инвертора, влияющего как на качество выходной электроэнергии и выбор предшествующего ему в цепочке преобразования оборудования, так и на возможность и характер взаимодействия с нагрузкой и другими МГ.

Решению некоторых вопросов, связанных с проблемой выбора схемы инвертора для МГ, и посвящена настоящая работа.

Выбор альтернативных схем инверторов

Для выбора инвертора рассмотрим три варианта схем: инвертор напряжения с высокочастотной модуляцией (I_1) [4], двухмостовой инвертор тока на тиристорах с управляемой батареей коммутирующих конденсаторов и тиристорно-реакторным компенсатором (I_2), описанный подробно в [5], и групповой многоуровневый инвертор на основе универсального источника уровней (I_3), представленный в [6].

Такой подбор схем инверторов определен тем, что каждый из указанных преобразователей является типичным представителем одного из трех основных классов автономных инверторов: автономных инверторов напряжения, автономных инверторов тока и многоуровневых инверторов. Остальные инверторы ука-

занных классов не имеют заметных преимуществ перед выбранными представителями.

Этапы процесса выбора

Всякий выбор оборудования фактически сводится к трем этапам. На первом этапе необходимо определить множество критериев, оценивающих оборудование с точки зрения его соответствия целям операции. Сложность целей, свойств оборудования и условий его эксплуатации предопределяет многокритериальность (в другой терминологии – векторность) реальных задач выбора.

Второй этап связан с выбором метода компромисса между критериями, поскольку некоторые из них могут выставлять противоречивые требования к оборудованию. Фиксация метода компромисса фактически определяется системой предпочтений экспертов и лиц, принимающих решения. По этой причине методикой конкретного выбора целесообразно считать процедуру компромисса, фиксированного на втором этапе.

На третьем этапе производится непосредственный выбор с помощью процедур, фиксированных на втором этапе.

Выбор критериев для определения выходного инвертора МГ

Качество электроэнергии в конечном счете определяется всеми звеньями цепочки преобразователей энергии МГ, начинающейся от первичного источника энергии (солнечной батареи, ветрогенератора, дизельного генератора, аккумулятора и пр.). Конечным звеном этой цепочки является инвертор, генерирующий переменный ток, необходимый потребителю.

Множество критериев Ψ , определяющих выбор инверторов, целесообразно разделить на три подмножества. Каждое подмножество должно включать критерии, большее значение которых способствует выполнению основных требований, предъявляемых к функционированию МГ. Это требования по качеству генерируемой электроэнергии, по способности обеспечить надежную эксплуатацию в условиях неопределенности и по экономической эффективности. Такое разделение множества Ψ соответствует методологии многовекторной оптимизации [7], в соответствии с которой каждому подмножеству сопоставляется векторный критерий. Компонентами каждого векторного критерия являются критерии, входящие в соответствующие подмножества.

Целесообразность применения такого метода оптимизации следует из возникающей возможности оценки выполнения требований по каждому векторному критерию в отдельности, а затем и глобальной оценки альтернатив с учетом относительной важности векторных критериев.

В первое подмножество Φ_1 включим два критерия, являющиеся показателями качества генерируемой инвертором электроэнергии. Тогда векторный критерий Φ_1 будет иметь два скалярных компонента ϕ_{11} и ϕ_{12} .

Первый критерий ϕ_{11} соответствует требованиям к стабильности величины выходного напряжения МГ по точности и быстродействию. Стабильность напряжения определяется как внешней характеристикой выходного инвертора, так и способностями предшествующих ему в преобразовательной цепочке устройств к регулированию и стабилизации режимов передачи параметров электроэнергии.

Второй критерий рассматриваемого подмножества ϕ_{12} оценивает качество кривой генерируемого напряжения. Этот критерий в значительной степени опре-

деляется выбором типа инвертора. При этом способы получения требуемого качества кривой для большинства инверторов тесно связаны с методами регулирования величины выходного напряжения, что следует учитывать при их оценке по этим критериям.

Во второе подмножество критериев Φ_2 введем те критерии, которые оценивают способность обеспечить надежное электроснабжение при существенных изменениях условий функционирования. Таким образом, соответствующий векторный критерий имеет три скалярные компоненты φ_{21} , φ_{22} , φ_{23} .

Первый критерий этой группы φ_{21} характеризует структурную гибкость инвертора, позволяющую наращивать мощность МГ при развитии нагрузки.

Второй критерий φ_{22} оценивает способность выходного инвертора МГ к интегрированию с другими генерирующими станциями, и прежде всего с МГ того же типа.

Третий критерий группы φ_{23} характеризует надежность преобразователей МГ. Включение этого критерия связано со следующими соображениями. Особенностью надежности как критерия при выборе оборудования является то, что значения показателей, которые можно использовать для этой цели, основываются на статистических данных, получаемых в результате длительных или многочисленных испытаний, и подтверждаются многолетними практическими наблюдениями. Таким образом, использование нового вида комплектующих и оборудования всегда связано с риском их недостаточной надежности и, как следствие, со снижением качества соответствующих производственных процессов и даже возникновению аварийных ситуаций. В настоящее время в связи с необходимостью форсированного импортозамещения вынужденное применение комплектующих изделий, не прошедших достаточного апробирования, может иметь место. Таким образом, критерий φ_{23} оценивает инвертор с точки зрения критичности к применению импортозамещающихся комплектующих.

В третье подмножество критериев Φ_3 включены критерии экономического характера φ_{31} и φ_{32} , оценивающие соответственно стоимость инвертора и потери энергии в нем при преобразовании энергии.

Скаляризация как метод компромисса между критериями

Среди методик компромисса при решении многокритериальных задач выбора можно выделить большую группу процедур, сводящих многокритериальную задачу к однокритериальной, т. е. к скаляризации.

Методики этой группы сводятся к еще одному выбору, в результате которого каждому критерию присваивается некоторый коэффициент важности (или ценности) данного критерия в достижении целей операции.

Коэффициенты важности критериев выбираются из отрезка $[0, 1]$, причем более важные критерии получают большие значения. Назначения этих коэффициентов основываются на субъективной оценке экспертом степени важности соответствующего критерия.

Большинство процедур скаляризации требует нормализации критериев, т. е. перехода к новой системе критериев, в которой каждому критерию первоначального набора ставится в соответствие числовой критерий, принимающий значения от 0 до 1. При этом величина нового критерия получает тем большее значение, чем лучше оцениваемая альтернатива удовлетворяет соответствующему критерию исходного набора.

Для задач, в которых критерии исходного набора имеют числовые значения, нормализация сводится к линейному преобразованию [8].

После нормализации значений критериев для всех альтернатив и назначения коэффициентов важности составляется выражение единственного критерия φ

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot f_i(x), \quad (1)$$

где x – оцениваемая альтернатива; ρ_i – коэффициент важности i -го критерия; $f_i(x)$ – значение i -го нормализованного критерия для альтернативы x .

Нормализация требует, чтобы выполнялось следующее равенство:

$$\sum_{i=1}^n \rho_i = 1. \quad (2)$$

Таким образом, нахождение наилучшей альтернативы сводится к расчету по формуле (1) и выбору той из них, для которой результат расчета окажется максимальным.

При реализации векторной оптимизации формула (1) приобретает несколько иной вид. Вместо коэффициентов ρ_i вводятся коэффициенты двух уровней. Набор «векторного» уровня содержит коэффициенты важности векторных критериев Φ_1, Φ_2, Φ_3 , которые обозначим через w_1, w_2, w_3 соответственно. При этом для них выполняется соотношение вида (2)

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1.$$

Для каждого векторного критерия вводятся коэффициенты скалярного уровня, оценивающие относительные важности критериев, являющиеся их компонентами. Так, для компонентов векторного критерия Φ_1 получаем для критериев φ_{11} и φ_{12} их коэффициенты относительной важности w_{11} и w_{12} , причем для них снова выполняется соотношение вида (2)

$$w_{11} + w_{12} = 1.$$

Аналогично для критериев Φ_2, Φ_3 имеем соответственно

$$w_{21} + w_{22} + w_{23} = 1 \text{ и } w_{31} + w_{32} = 1.$$

Наличие этих коэффициентов позволяет ранжировать инверторы по каждому векторному критерию в отдельности. Например, для инвертора x получаем его оценку по качеству генерируемой им энергии, т. е. по векторному критерию Φ_1

$$\hat{\Phi}_1(x) = w_{11}\varphi_{11}(x) + w_{12}\varphi_{12}(x), \quad (3)$$

где $\hat{\Phi}_1(x)$ – численная оценка инвертора x .

Окончательная рандомизация представленных к выбору инверторов производится с помощью глобального критерия $\hat{\Phi}$, рассчитываемого по формуле

$$\hat{\Phi}(x) = w_1\hat{\Phi}_1(x) + w_2\hat{\Phi}_2(x) + w_3\hat{\Phi}_3(x), \quad (4)$$

т. е. с учетом оценок по всем векторным критериям и их ценностей.

Методика скаляризации Т. Саати

В задаче выбора инвертора в конечном итоге предполагается сравнение трех классов инверторов по семи критериям множества Ψ . Каждый из этих критериев может иметь числовое выражение. Например, критерий качества кривой выходного напряжения φ_{12} может характеризоваться коэффициентом искажения синусоидальности. Это значение, безусловно, необходимо обеспечить при исполь-

зовании выходного инвертора любого из рассматриваемых типов. Однако одно и то же требуемое значение этого коэффициента для разных инверторов достигается при различных тратах ресурсов (экономических, массогабаритных, энергетических и пр.). Следовательно, сравнение инверторов по этому критерию необходимо осуществлять по целому набору факторов. По этой причине соответствующий критерий целесообразно на начальном этапе выражать в порядковой шкале [9]. Это же касается и остальных шести критериев.

Оценку важности векторных критериев и их компонентов также естественно производить в порядковой шкале в соответствии с субъективными предпочтениями эксперта.

На заключительном этапе выбора осуществляется переход от порядковой шкалы оценки альтернатив к эквивалентной числовой оценке и последующей скаляризации.

Одним из наиболее широко применяемых методов скаляризации, использующих качественные оценки важности критериев и их значения на сравниваемых альтернативах, является метод анализа иерархий (МАИ), разработанный Т. Саати [10, 11]. Его преимущество состоит в том, что при переходе от качественной (нечисловой) оценки к числовой применима одна и та же процедура как при оценке ценностей критериев, так и при нормализации их значений для сравниваемых альтернатив.

Основой процедуры являются попарные сравнения оцениваемых объектов (критериев и их значений).

При попарных сравнениях используется шкала лингвистических выражений уровней важности (превосходства) критериев или их значений на конкретных альтернативах (табл. 1). Каждому такому качественному выражению в таблице приводится его числовой эквивалент, тем самым одновременно происходит оцифровка порядковой шкалы.

Таблица 1

Шкала превосходства

Лингвистическое выражение степени превосходства	Численный эквивалент
Отсутствие превосходства	1
Слабое превосходство	2
Заметное превосходство	3
Умеренное превосходство	4
Существенное превосходство	5
Сильное превосходство	6
Значительное превосходство	7
Большое превосходство	8
Подавляющее превосходство	9

Алгоритм попарного сравнения альтернатив x_i и y_j по некоторому критерию ϕ состоит в следующем.

1. Эксперт сравнивает альтернативы, и если с его точки зрения альтернатива x_i по критерию ϕ превосходит альтернативу y_j в степени, соответствующей числовому эквиваленту $r \geq 1$, то в матрицу попарного сравнения V в ячейку v_{ij} заносится число r , а в ячейку v_{ji} – число $1/r$. В соответствии с этим подходом на диагонали матрицы V будут размещены значения 1.

2. Матрица V является основанием для нахождения предварительных (ненормализованных) значений превосходства каждой альтернативы x_i над остальными альтернативами по критерию φ . Этот коэффициент рассчитывается по формуле

$$u_i = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m v_{ij}}.$$

Здесь m – число сравниваемых альтернатив.

3. Окончательное ранжирование альтернатив x_i ($i = \overline{1, m}$) относительно критерия φ производится по следующему набору нормализованных коэффициентов превосходства:

$$w_i = \frac{u_i}{w}, \quad i = \overline{1, m},$$

где $w = \sum_{i=1}^m u_i$.

Аналогичным образом производится процедура экспертного назначения нормализованных значений важности критериев. В этом случае попарное сравнение производится между каждой парой критериев φ_k и φ_s .

Иллюстрацию применения изложенной методики проведем на примере выбора выходного инвертора для двух наборов условий проектирования МГ. В первом случае предположим, что в данной местности отсутствуют уже действующие МГ и в ближайшей перспективе нет предпосылок к их созданию. Такую проектируемую МГ можно назвать изолированной. В этом случае снижается значимость критерия φ_{22} , оценивающего возможность интегрирования ее в систему местных генерирующих МГ.

Во втором случае предполагается либо существование в данной местности системы генерирующих МГ, либо планирование ее создания. Это делает возможной перспективу интегрирования проектируемой МГ в эту систему, что повышает ценность векторного критерия Φ_2 и его компоненты φ_{22} в особенности. Такую проектируемую МГ назовем интегрируемой.

Реализация рассматриваемой методики предполагает попарные сравнения векторных критериев и их компонент с целью определения значений их относительных ценностей для наилучшего выбора инвертора проектируемой МГ. При этом процесс и результаты этих сравнений должны учитывать условия проектирования. Это означает, что полученные значения ценностей критериев при проектировании изолированных и интегрируемых МГ должны быть различными.

В отличие от этого результаты попарных сравнений инверторов по каждому из семи критериев множества Ψ не зависят от условий проектирования, что следует из их определения. В связи с этим целесообразно первоначально провести именно эти сравнения, поскольку их результаты будут общими для изолированных и интегрируемых МГ.

Попарное сравнение инверторов по выделенным критериям

Применим методику Т. Саати для определения коэффициентов относительного превосходства инверторов по выделенным критериям отдельно по каждому критерию множества Ψ .

Проведем сравнение инверторов по критерию ϕ_{11} , т. е. по соответствию требованиям по обеспечению стабильности величины выходного напряжения.

Изменение выходного напряжения инвертора может возникнуть по двум причинам.

Во-первых, действующее значение выходного напряжения при других равных условиях прямо пропорционально величине постоянного напряжения питания инвертора и, следовательно, нестабильность этого напряжения приводит к соответствующему изменению выходного напряжения. Однако, ориентируясь на МГ с общей шиной постоянного тока [2], напряжение на которой жестко стабилизировано, можно исключить эту причину.

Во-вторых, изменение выходного напряжения может происходить из-за изменения величины и характера нагрузки. Зависимость выходного напряжения инвертора от величины тока нагрузки при постоянном напряжении на входе инвертора определяется его внешней характеристикой. Так, инверторы напряжения обладают жесткой внешней характеристикой, благодаря чему у этих преобразователей выходное напряжение практически не зависит от величины и характера нагрузки. Напротив, у инверторов тока внешняя характеристика мягкая, т. е. напряжение заметно зависит от нагрузки. Поэтому с целью компенсации изменения выходного напряжения в них применяют регулируемые компенсаторы реактивной мощности [12].

При сравнении инверторов I_1 и I_2 учтем, что в инверторе тока I_2 стабилизация напряжения, изменяющегося из-за изменения нагрузки, достигается регулированием компенсатора реактивной мощности. Это требует увеличения числа используемых тиристоров и установки комплекта индуктивностей, что ухудшает массогабаритные и стоимостные показатели.

Резюмируя вышесказанное, можно допустить, что с точки зрения критерия ϕ_{11} инвертор I_1 имеет в силу жесткости внешней характеристики подавляющее превосходство над инвертором I_2 , что согласно табл. 1 соответствует степени превосходства, равной 9.

Принцип действия универсального источника уровней инвертора I_3 позволяет получать величину выходного напряжения с требуемой точностью при неизменной для данного числа его уровней форме кривой. Кроме того, он позволяет стабилизировать выходное напряжение за время, равное одному такту кривой, т. е. длительности одного уровня. Например, для выходной частоты 50 Гц время компенсации для семиуровневого инвертора составит около 1,5 мс. Однако необходимо учитывать также сложность системы управления, которая у инвертора I_3 выше, чем у I_1 .

В результате можно допустить следующие качественные степени взаимного превосходства инверторов по данному критерию:

- I_1 существенно превосходит I_3 , т. е. в степени 5;
- I_3 умеренно превосходит I_2 , т. е. в степени 4.

Эти результаты отражены в табл. 2.

Таблица 2

Таблица попарных сравнений инверторов по критерию Φ_{11}

	I_1	I_2	I_3	$w_{11}(I_j)$
I_1	1	9	5	0,743
I_2	0,111	1	0,25	0,063
I_3	0,2	4	1	0,194

Подсчитаем относительные коэффициенты важности инверторов I_1 , I_2 и I_3 по критерию Φ_{11} .

Согласно методике, изложенной выше, находим компоненты вектора оценок

$$v_{11}(I_1) = \sqrt[3]{45} = 3,556; v_{11}(I_2) = \sqrt[3]{0,028} = 0,303; v_{11}(I_3) = \sqrt[3]{0,8} = 0,92.$$

Сумма компонентов вектора оценок, необходимая для нахождения относительных (нормированных) коэффициентов важности, равна

$$v_{11} = v_{11}(I_1) + v_{11}(I_2) + v_{11}(I_3) = 4,779.$$

Отсюда находим искомые относительные коэффициенты важности инверторов согласно критерию Φ_{11} :

$$w_{11}(I_1) = 0,743; w_{11}(I_2) = 0,063; w_{11}(I_3) = 0,194.$$

Эти значения указаны также в последнем столбце табл. 2.

Сравнение инверторов I_1 и I_2 по критерию Φ_{12} позволяет прийти к выводу, что в первом из них высокое качество кривой обеспечивается автоматически за счет ШИМ и, следовательно, не зависит от величины и характера нагрузки. В инверторе I_2 спектр кривой определяется естественной фильтрацией батареей конденсаторов (КБ) и нагрузкой. В результате этого форма кривой в I_2 изменяется при изменении нагрузки. Однако общий емкостной характер контура «КБ – нагрузка» обеспечивает достаточно высокое качество кривой, но не во всем диапазоне нагрузки. Таким образом, можно констатировать «существенное» превосходство инвертора I_1 над I_2 .

Сравнение инвертора I_1 с инвертором I_3 по критерию Φ_{12} показывает его «слабое» превосходство над инвертором I_3 , достигаемое за счет более простых силовой схемы и системы управления.

Превосходство I_3 над I_2 может быть выражено как «умеренное», поскольку форма кривой в инверторе I_3 , определяемая только количеством и величиной уровней, не зависит от нагрузки.

Эти результаты отражены в табл. 3. Соответствующие нормированные оценки значений критериев, полученные по описанной в п. 3 методике, приведены в последнем столбце данной таблицы.

Таблица 3

Таблица попарных сравнений инверторов по критерию Φ_{12}

	I_1	I_2	I_3	$w_{12}(I_j)$
I_1	1	5	2	0,570
I_2	1/5	1	1/4	0,097
I_3	1/2	4	1	0,333

Проведем сравнение инверторов I_1 , I_2 и I_3 по критериям второй группы φ_{21} , φ_{22} и φ_{23} .

Сравнивая указанные схемы по критерию структурной гибкости, позволяющей наращивать мощность МГ φ_{21} , следует утверждать, что инвертор I_2 «слабо» превосходит инвертор I_1 (числовой эквивалент 2). Подобный вывод обосновывается возможностью увеличивать мощность за счет параллельного подключения дополнительного инвертора или инверторов того же типа. Такое объединение неинерциальных (разрывных) выходных кривых инверторов напряжения невозможно без применения специальных фильтров.

Инверторы I_3 также допускают параллельное подключение, однако при этом необходимо увеличивать мощность выходного трансформатора. В связи с этим полагаем, что по критерию φ_{21} инвертор I_2 «заметно» превосходит инвертор I_3 (числовой эквивалент 3).

Результаты сравнения инверторов по критерию φ_{21} показаны в табл. 4. Нормированные оценки значений критериев, полученные по методике Т. Саати, приведены в последнем столбце данной таблицы.

Таблица 4

Таблица попарных сравнений инверторов по критерию φ_{21}

	I_1	I_2	I_3	$w_{21}(I_j)$
I_1	1	1/2	2	0,297
I_2	2	1	3	0,540
I_3	1/2	1/3	1	0,163

Критерий φ_{22} оценивает инверторы по степени способности выходного инвертора МГ к интегрированию с инверторами других МГ того же типа. С этой точки зрения инверторы I_2 имеет преимущество перед остальными сравниваемыми преобразователями, поскольку их структура допускает параллельную работу инверторов нескольких МГ без применения фильтров.

В связи с этими свойствами инверторов целесообразно относительно критерия φ_{22} установить превосходство I_2 над I_1 и I_3 как «слабое» (числовой эквивалент 2). Превосходство I_1 над I_3 оценивается как «слабое» из-за необходимого наличия у последнего трансформатора.

В табл. 5 приведены результаты сравнения инверторов по критерию φ_{22} . В последнем ее столбце приведены соответствующие нормированные оценки значений критериев.

Таблица 5

Таблица попарных сравнений инверторов по критерию φ_{22}

	I_1	I_2	I_3	$w_{22}(I_j)$
I_1	1	1/2	2	0,311
I_2	2	1	2	0,493
I_3	1/2	1/2	1	0,196

При сравнении инверторов по критерию надежности φ_{23} учитывалось, что применение ШИМ для генерации требуемой формы кривой связано с необходи-

мым применением мощных высокочастотных транзисторов, что в условиях форсированного импортозамещения отрицательно сказывается на надежности преобразователя. В то же время в инверторе I_2 применяются надежные низкочастотные тиристоры.

В инверторе I_3 не требуется применения высокочастотных транзисторов, однако их число значительно больше числа тиристоров в I_2 .

Указанные соображения отражены в табл. 6.

Таблица 6

Таблица попарных сравнений инверторов по критерию Φ_{23}

	I_1	I_2	I_3	$w_{23}(I_j)$
I_1	1	1/3	1/2	0,163
I_2	3	1	2	0,540
I_3	2	1/2	1	0,297

При сравнении инверторов по критериям третьей группы основаниями для качественной оценки служат число, вид и стоимость управляемых клапанов силовых схем.

Поскольку количество управляемых клапанов в инверторе I_3 значительно больше, чем в I_1 и I_2 , то числовые эквиваленты превосходства Φ_{31} по критерию этих инверторов над I_3 получают оценки, соответствующие 6 и 5 в табл. 7.

Таблица 7

Таблица попарных сравнений инверторов по критерию Φ_{31}

	I_1	I_2	I_3	$w_{31}(I_j)$
I_1	1	2	6	0,200
I_2	1/2	1	5	0,627
I_3	1/6	1/5	1	0,094

Превосходство инвертора I_1 над I_2 по данному критерию получает числовой эквивалент 2 из-за меньшего числа управляемых клапанов, однако при большей стоимости высокочастотных транзисторов инвертора напряжения по сравнению со стоимостью тиристоров инвертора тока.

Наконец, при сравнении инверторов по критерию Φ_{32} , соответствующему потерям энергии при коммутациях в клапанах, учитывались большие потери в высокочастотных транзисторах при реализации ШИМ в I_1 , а также большее превышение числа управляемых клапанов в инверторе I_3 по сравнению с I_2 .

Соответствующие результаты по критерию Φ_{32} отражены в табл. 8.

Таблица 8

Таблица попарных сравнений инверторов по критерию Φ_{32}

	I_1	I_2	I_3	$w_{32}(I_j)$
I_1	1	1/3	1/2	0,122
I_2	3	1	2	0,558
I_3	2	1/2	1	0,320

Выбор инвертора для изолированной МГ

Для выбора инвертора необходимо определить относительные значения ценностей трех введенных векторных критериев и их компонент, т. е. семи критериев, нормализованные значения которых найдены выше. Перейдем к определению этих величин для условий проектирования изолированных МГ.

При попарном сравнении векторных критериев Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 следует учесть, что выбранное разделение множества всех критериев на три подмножества подразумевалось при отсутствии специальных требований к функционированию МГ в данной местности и их относительные важности должны быть одинаковыми. Таким образом, для изолированной МГ назначаем равные нормализованные значения важности векторных критериев Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 :

$$w(\Phi_1) = 0,333; w(\Phi_2) = 0,333; w(\Phi_3) = 0,333.$$

Получим нормализованные значения важности критериев φ_{11} , φ_{12} подмножества Φ_1 .

Критерий φ_{11} , соответствующий обеспечению стабильности величины выходного напряжения МГ, примем «слабо» превосходящим по важности критерий φ_{12} , оценивающий качество кривой этого напряжения (табл. 9). Обоснованием этого суждения является тот факт, что даже кратковременное отклонение напряжения от номинального может привести к снижению производительности и качества продукции предприятия, получающего питание от МГ. Кратковременное отклонение формы кривой от синусоидальной приводит лишь к увеличению потерь энергии в некоторых видах нагрузок.

Таблица 9

Таблица сравнения важности критериев
 φ_{11} , φ_{12} подмножества Φ_1

	φ_{11}	φ_{12}
φ_{11}	1	2
φ_{12}	1/2	1

Расчеты, проведенные по данным табл. 9, приводят к следующим нормализованным значениям важности критериев φ_{11} , φ_{12} подмножества Φ_1 :

$$w(\varphi_{11}) = 0,667; w(\varphi_{12}) = 0,333.$$

В нормализованных значениях важности критериев второй группы Φ_2 с учетом отсутствия требований интегрирования с другими МГ целесообразно снизить величину у критерия φ_{22} по сравнению с критериями φ_{21} и φ_{23} , что соответствует данным табл. 10.

Таблица 10

Таблица сравнения важности критериев
 φ_{21} , φ_{22} , φ_{23} подмножества Φ_2

	φ_{21}	φ_{22}	φ_{23}
φ_{21}	1	2	1/2
φ_{22}	1/2	1	1/3
φ_{23}	2	3	1

Этому соответствуют следующие значения важности критериев:

$$w(\varphi_{21}) = 0,297; w(\varphi_{22}) = 0,163; w(\varphi_{32}) = 0,540. \quad (5)$$

При сравнении критериев подмножества Φ_3 целесообразно учесть, что затраты на строительство МГ (критерий φ_{31}) имеют единовременный характер, тогда как потери энергии в оборудовании (критерий φ_{32}) приносят экономический ущерб в течение всего времени его эксплуатации. Поэтому примем «слабое» превосходство важности критерия φ_{32} над важностью критерия φ_{31} . Проведя расчеты, получим следующие нормализованные значения важности критериев φ_{31} , φ_{32} :

$$w(\varphi_{31}) = 0,333; w(\varphi_{32}) = 0,667.$$

Знание значений критериев φ_{11} , φ_{12} , φ_{21} , φ_{22} , φ_{23} , φ_{31} , φ_{32} для каждого из сравниваемых инверторов и значений их относительных нормализованных ценностей $w(\varphi_{11})$, $w(\varphi_{12})$, $w(\varphi_{21})$, $w(\varphi_{22})$, $w(\varphi_{23})$, $w(\varphi_{31})$, $w(\varphi_{32})$ позволяет определить для них значения векторных критериев по формулам вида (3).

По первому векторному критерию

$$\hat{\Phi}_1(I_1) = w(\varphi_{11}) \cdot \varphi_{11}(I_1) + w(\varphi_{12}) \cdot \varphi_{12}(I_1) = 0,685;$$

$$\hat{\Phi}_1(I_2) = w(\varphi_{11}) \cdot \varphi_{11}(I_2) + w(\varphi_{12}) \cdot \varphi_{12}(I_2) = 0,075;$$

$$\hat{\Phi}_1(I_3) = w(\varphi_{11}) \cdot \varphi_{11}(I_3) + w(\varphi_{12}) \cdot \varphi_{12}(I_3) = 0,240.$$

Таким образом, по первому векторному критерию (качество генерируемой электроэнергии) лучшим является инвертор I_1 , худшим – I_2 .

Проранжируем инверторы по второму векторному критерию

$$\hat{\Phi}_2(I_1) = w(\varphi_{21}) \cdot \varphi_{21}(I_1) + w(\varphi_{22}) \cdot \varphi_{22}(I_1) + w(\varphi_{23}) \cdot \varphi_{23}(I_1) = 0,227;$$

$$\hat{\Phi}_2(I_2) = w(\varphi_{21}) \cdot \varphi_{21}(I_2) + w(\varphi_{22}) \cdot \varphi_{22}(I_2) + w(\varphi_{23}) \cdot \varphi_{23}(I_2) = 0,532;$$

$$\hat{\Phi}_2(I_3) = w(\varphi_{21}) \cdot \varphi_{21}(I_3) + w(\varphi_{22}) \cdot \varphi_{22}(I_3) + w(\varphi_{23}) \cdot \varphi_{23}(I_3) = 0,241.$$

По второму векторному критерию (способность обеспечить надежное электроснабжение при существенных изменениях условий функционирования) лучшим является инвертор I_2 . Инверторы I_1 и I_3 по этому критерию почти равноценны.

По третьему векторному критерию получим следующий результат:

$$\hat{\Phi}_3(I_1) = w(\varphi_{31}) \cdot \varphi_{31}(I_1) + w(\varphi_{32}) \cdot \varphi_{32}(I_1) = 0,301;$$

$$\hat{\Phi}_3(I_2) = w(\varphi_{31}) \cdot \varphi_{31}(I_2) + w(\varphi_{32}) \cdot \varphi_{32}(I_2) = 0,474;$$

$$\hat{\Phi}_3(I_3) = w(\varphi_{31}) \cdot \varphi_{31}(I_3) + w(\varphi_{32}) \cdot \varphi_{32}(I_3) = 0,225.$$

По третьему векторному критерию (экономическая оценка) лучшим вновь оказывается инвертор I_2 , худшим – I_3 .

Окончательный выбор осуществляется по глобальному критерию (4):

$$\hat{\Phi}(I_1) = w_1 \cdot \hat{\Phi}_1(I_1) + w_2 \cdot \hat{\Phi}_2(I_1) + w_3 \cdot \hat{\Phi}_3(I_1) = 0,405;$$

$$\hat{\Phi}(I_2) = w_1 \cdot \hat{\Phi}_1(I_2) + w_2 \cdot \hat{\Phi}_2(I_2) + w_3 \cdot \hat{\Phi}_3(I_2) = 0,360;$$

$$\hat{\Phi}(I_3) = w_1 \cdot \hat{\Phi}_1(I_3) + w_2 \cdot \hat{\Phi}_2(I_3) + w_3 \cdot \hat{\Phi}_3(I_3) = 0,225.$$

Таким образом, для изолированной МГ следует выбирать автономный инвертор напряжения с формированием выходной кривой с помощью высокочастотной модуляции I_1 .

Выбор инвертора для интегрируемой МГ

При выборе инвертора для интегрируемой МГ следует скорректировать приведенные выше оценки векторного критерия Φ_2 и его компоненты φ_{22} , поскольку они непосредственно относятся к возможности интегрирования МГ. В силу необходимости нормализации это вызовет изменения ценностей векторных критериев Φ_1 и Φ_3 и двух других компонент критерия Φ_2 , т. е. критериев φ_{21} и φ_{23} . Обозначения всех измененных по сравнению с предыдущими формулами величин пометим звездочкой.

В силу сказанного целесообразно минимально повысить ценность векторного критерия Φ_2 , оставив Φ_1 и Φ_3 равными. Это соответствует принятию «слабого» превосходства важности Φ_2 относительно важностей Φ_1 и Φ_3 . Таким образом, новые значения коэффициентов важности векторных критериев в данном случае равны

$$w^*(\Phi_1) = 0,25; \quad w^*(\Phi_2) = 0,5; \quad w^*(\Phi_3) = 0,25.$$

При определении относительных ценностей компонент векторного критерия Φ_2 степень превосходства компонента φ_{22} была занижена по сравнению с φ_{21} и φ_{23} в соответствии с формулой (5), поскольку для изолированной МГ параллельная работа с другими станциями исключается. В рассматриваемом случае это не исключено, в связи с чем можно поднять ценность φ_{22} , приняв отсутствие превосходства между компонентами Φ_2 :

$$w^*(\varphi_{21}) = 0,333; \quad w^*(\varphi_{22}) = 0,333; \quad w^*(\varphi_{23}) = 0,333. \quad (6)$$

Изменения значений ценностей критериев в формуле (6) по сравнению с формулой (5) приводят к изменению рейтинговых значений инверторов относительно векторного критерия Φ_2 :

$$\hat{\Phi}_2^*(I_1) = w^*(\varphi_{21}) \cdot \varphi_{21}(I_1) + w^*(\varphi_{22}) \cdot \varphi_{22}(I_1) + w^*(\varphi_{23}) \cdot \varphi_{23}(I_1) = 0,257;$$

$$\hat{\Phi}_2^*(I_2) = w^*(\varphi_{21}) \cdot \varphi_{21}(I_2) + w^*(\varphi_{22}) \cdot \varphi_{22}(I_2) + w^*(\varphi_{23}) \cdot \varphi_{23}(I_2) = 0,524;$$

$$\hat{\Phi}_2^*(I_3) = w^*(\varphi_{21}) \cdot \varphi_{21}(I_3) + w^*(\varphi_{22}) \cdot \varphi_{22}(I_3) + w^*(\varphi_{23}) \cdot \varphi_{23}(I_3) = 0,241.$$

Несмотря на изменения рейтинговых значений по второму векторному критерию (способность обеспечить надежное электроснабжение при существенных изменениях условий функционирования) лучшим остается инвертор I_2 . Инверторы I_1 и I_3 по этому критерию вновь почти равноценны.

Для выбора инвертора для интегрируемой МГ рассчитываем значения глобального критерия по формуле (4):

$$\hat{\Phi}^*(I_1) = w_1^* \hat{\Phi}_1^*(I_1) + w_2^* \hat{\Phi}_2^*(I_1) + w_3^* \hat{\Phi}_3^*(I_1) = 0,375;$$

$$\hat{\Phi}^*(I_2) = w_1^* \hat{\Phi}_1^*(I_2) + w_2^* \hat{\Phi}_2^*(I_2) + w_3^* \hat{\Phi}_3^*(I_2) = 0,399;$$

$$\hat{\Phi}^*(I_3) = w_1^* \hat{\Phi}_1^*(I_3) + w_2^* \hat{\Phi}_2^*(I_3) + w_3^* \hat{\Phi}_3^*(I_3) = 0,225.$$

Таким образом, для интегрируемой МГ следует выбирать автономный инвертор тока на тиристорах с управляемой батареей коммутирующих конденсаторов и тиристорно-реакторным компенсатором I_2 .

Выводы

Предложенная методика многокритериального выбора выходного инвертора продемонстрирована для двух наборов условий проектирования МГ. В первом случае предполагается, что станция предназначена для местности, в которой ис-

ключается возможность ее интегрирования в систему с другими МГ. Здесь показано, что оптимальным выбором является применение автономного инвертора напряжения с формированием выходной кривой с помощью высокочастотной модуляции.

В случае, когда предполагается включение проектируемой станции в действующую систему объединенных по выходам МГ, предложенная методика рекомендует использование автономного инвертора тока с управляемой батареей коммутирующих конденсаторов и тиристорно-реакторным компенсатором.

Однако в силу незначительного отличия значений глобальных критериев для указанных инверторов во втором случае окончательный выбор целесообразно проводить по результатам дополнительных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кобец Б.Б., Волкова И.О.* Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SmartGrid. М.: ИАЦ Энергия, 2010. 208 с.
2. *Shuhui L., Proano J., Dong Z.* Microgrid power flow study in grid-connected and islanding modes under different converter control strategies // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2012. Pp. 1–8.
3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2013. 10 с.
4. *Зиновьев Г.С.* Основы силовой электроники. Новосибирск: НГТУ, 2003. 664 с.
5. *Миргородская Е.Е., Митяшин Н.П., Радионова М.В.* Нейронные сети в адаптивных преобразовательных комплексах // Анализ, синтез и управление в сложных системах: сб. науч. тр. Саратов, 2008. С. 19–28.
6. *Mirgorodskaya E.E., Kolchev V.A., Mityashin N.P., Tomashevskiy Y.B., Alkaravi R.D., Golembiovsky Y.M.* Selection of inverter modules for converters in autonomous power supply systems // 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE' 2020): Conference Proceeding, Saratov, September 24–25, 2020. Saratov, 2020. Pp. 237–243.
7. *Сафронов В.В.* Основы системного анализа: методы многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования: монография. Саратов: Научная книга, 2009. 329 с.
8. *Миргородская Е.Е., Васильев Д.А., Митяшин Н.П., Томашевский Ю.Б.* Теория принятия решений в специальных организационно-технических системах: учеб. пособие. Саратов: СГТУ, 2023. 130 с.
9. *Клигер С.Л., Косолапов М.С., Толстова Ю.Н.* Шкалирование при сборе и анализе социологической информации. М.: Наука, 1978. 107 с.
10. *Саати Т.Л.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
11. *Саати Т., Кернс К.* Аналитическое планирование. Организация систем. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.
12. *Артюхов И.И., Митяшин Н.П., Серветник В.А.* Автономные инверторы тока в системах электропитания. Саратов: Сарат. политехн. ин-т, 1992. 152 с.

Статья поступила в редакцию 01 сентября 2023 г.

SELECTION OF OUTPUT INVERTER FOR MICROGRID

***E.E. Mirgorodskaya, N.P. Mityashin, I.I. Artyukhov, M.E. Mamonychev,
P.A. Eryushev, R.V. Kozhanov****

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
77, Polytechnicheskaya st., Saratov, 410054, Russian Federation

E-mail: mee85@inbox.ru, mityashinnp@mail.ru, ivart54@mail.ru, mamonychev@gmail.com,
eryushev.pavel@mail.ru, ljubimch@mail.ru

Abstract. *The paper considers the problem of a microgrid output inverter selecting, when information about operating conditions is uncertain. The following factors are considered as sources of uncertainty in information about operating conditions: the possibility of the load increasing in the area, for which the microgrid is being designed, the prospects for its integration into the local power supply system, based on the microgrid, operating in the given region, as well as possible changes in the element base due to import substitution. A system of criteria and a methodology for optimal selection have been developed, based on a combination of multi-vector optimization approaches and the hierarchy analysis method. The quality criterion of generated energy, the criterion of reliable operation in conditions of information uncertainty and the criterion of economic indicators were chosen as vector criteria. The total number of scalar criteria that are components of the specified vector criteria is seven. At the first stage of selection, an algorithm is used for expert assessment of the importance of vector criteria and their scalar components, as well as values of these criteria for compared alternatives, using of the hierarchy analysis method. At the second stage of selection, considered inverters are ranked according to a global criterion, calculated based on results of the first stage. The technique is demonstrated by choosing between three well-known schemes of autonomous inverters: a voltage inverter with PWM-shaping of the output curve, a current inverter with a variable structure and a group multilevel inverter based on a universal source of levels, when they are operating in autonomous or integrated into the system of other microgrid modes. The described selection technique can be used, when other microgrid conversion equipment devices are selecting.*

Keywords: *autonomous inverter, microgrid, criteria, multi-vector optimization, scalarization, hierarchy analysis method, power quality, equipment flexibility.*

REFERENCES

1. Kobets B.B., Volkova I.O. Innovatsionnoye razvitiye elektroenergetiki na baze kontseptsii SmartGrid [Innovative development of the electric power industry based on the SmartGrid concept]. M.: IATS Energiya, 2010. 208 p. (In Russian).
2. Shuhui L., Proano J., Dong Z. Microgrid power flow study in grid-connected and islanding modes under different converter control strategies // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2012. Pp. 1–8.
3. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya ob-

* Ekaterina E. Mirgorodskaya (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Nikita P. Mityashin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Ivan I. Artyukhov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Michael E. Mamonychev, Postgraduate Student.
Pavel A. Eryushev, Postgraduate Student.
Roman V. Kozhanov, Postgraduate Student.

- shchego naznacheniya [GOST 32144-2013. Electric Energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Quality standards for electric energy in general power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 10 p. (In Russian).
4. *Zinov'yev G.S.* Osnovy silovoy elektroniki [Power electronics fundamentals]. Novosibirsk: NGTU, 2003. 664 p. (In Russian).
 5. *Mirgorodskaya Ye.Ye., Mityashin N.P., Radionova M.V.* Neural networks in adaptive transformer complexes // *Analiz, sintez i upravleniye v slozhnykh sistemakh: sb. nauch. tr.* Saratov: 2008. Pp. 19–28 (In Russian).
 6. *Mirgorodskaya E.E., Kolchev V.A., Mityashin N.P., Tomashevskiy Y.B., Alkaravi R.D., Golembiovsky Y.M.* Selection of inverter modules for converters in autonomous power supply systems // 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE' 2020): Conference Proceeding, Saratov, September 24–25, 2020. Saratov, 2020. Pp. 237–243.
 7. *Safronov V.V.* Osnovy sistemnogo analiza: metody mnogovektornoy optimizatsii i mnogovektornogo ranzhirovaniya: monografiya [Fundamentals of system analysis: methods of multivector optimization and multivector ranking]. Saratov: Nauchnaya kniga, 2009. 329 p. (In Russian).
 8. *Mirgorodskaya Ye.Ye., Vasil'yev D.A., Mityashin N.P., Tomashevskiy Yu.B.* Teoriya prinyatiya resheniy v spetsial'nykh organizatsionno-tekhnicheskikh sistemakh: ucheb. posobiye [The theory of decision making in special organizational and technical systems]. Saratov: SGTU, 2023. 130 p. (In Russian).
 9. *Kliger S.L., Kosolapov M.S., Tolstova Yu.N.* Shkalirovaniye pri sbore i analize sotsiologicheskoy informatsii [Scaling when collecting and analyzing sociological information]. M.: Nauka, 1978. 107 p. (In Russian).
 10. *Saati T.L.* Prinyatiye resheniy. Metod analiza iyerarkhiy [Making decisions. Hierarchy analysis method]. M.: Radio i svyaz', 1993. 278 p. (In Russian).
 11. *Saati T., Kerns K.* Analiticheskoye planirovaniye. Organizatsiya system [Analytical planning. The organization of systems]. M.: Radio i svyaz', 1991. 224 p. (In Russian).
 12. *Artyukhov I.I., Mityashin N.P., Servetnik V.A.* Avtonomnyye inventory toka v sistemakh elektropitaniya [Autonomous current inverters in power supply systems]. Saratov: Sarat. politekhn. in-t, 1992. 152 p. (In Russian).