

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Панфилова Дмитрия Валерьевича

на тему «Трехфазный трехуровневый квази-импедансный инвертор для автономных систем электроснабжения»,

по специальности 05.09.12 – Силовая электроника
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Актуальность для науки и практики

Класс квази-импедансных преобразователей является относительно новым и мало освещен в русскоязычной литературе. Поскольку данные преобразователи изначально были разработаны для работы в составе систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии, исследование, проведенное автором, является актуальным в виду постоянного роста доли таких систем в мировой энергетике. Рассмотрение трехуровневой топологии квази-импедансного преобразователя в качестве базовой актуально с точки зрения использования отечественных полупроводниковых приборов, а также новых классов полупроводниковых приборов (*GaN*).

В приложении к автономным системам электроснабжения автором предложено решение проблемы работы в режиме малой нагрузки и холостого хода, характерной для большинства повышающих преобразователей.

Критическая оценка содержания диссертации

В первой главе автором проведен обзор известных топологий повышающе-понижающих *dc-ac* преобразователей. Описаны различные схемы импульсных повышающих преобразователей. Особое внимание уделено новому классу преобразователей – импедансным инверторам. Выбор квази-импедансного инвертора, в качестве перспективной топологии для автономных систем электроснабжения автор обосновывает широким диапазоном регулирования выходного напряжения, однократным преобразованием, потреблением непрерывного входного тока от источника и высокой функциональной надежностью. Существенным недостатком квази-импедансного инвертора является неконтролируемое нарастание напряжения в звене постоянного тока. Одной из задач, поставленных автором в диссертационной работе является схемотехническое решение данной проблемы.

Переход к трехуровневым схемам обоснован, прежде всего, возможностью использования силовых ключей более низкого класса по напряжению и повышенным качеством выходной энергетике, по сравнению с двухуровневыми инверторами.

Таким образом, автором поставлена актуальная для науки и промышленности цель исследования.

Вторая глава посвящена разработке математической модели предложенной автором топологии трехфазного трехуровневого КИИ. Выбор метода спектрального моделирования полностью обоснован, как позволяющий получить соотношения для токов и напряжений в компонентах и узлах схемы без необходимости решения дифференциальных уравнений высокого порядка. Выражения для токов и напряжений выводятся автором с помощью метода коммутационных функций, что оправдано в применении к анализу импульсных схем. Полученные в ходе данного анализа соотношения позволяют провести подробный анализ исследуемой топологии и сравнить ее в дальнейшем с уже существующими схемами.

Автором был получен полный набор соотношений, описывающих электрические процессы в исследуемом преобразователе, что является новизной для семейства квази-импедансных инверторов.

В третьей главе проведен анализ трехфазного трехуровневого КИИ в установившемся режиме и получены соотношения для расчета компонентов. Важно отметить, что соотношения для расчета индуктивности дросселей и емкости конденсаторов схемы были получены в том же виде, что и соотношения для параметров пассивных компонентов используемых в настоящее время преобразователей, то есть как зависимости от соотношения входного и выходного напряжений, мощности нагрузки и частоты коммутаций. Также стоит отметить, что автором были получены соотношения для расчета пассивных компонентов при номинальной мощности нагрузки и номинальном входном токе. Полученные соотношения позволяют провести инженерный расчет преобразователя с высокой точностью.

Выведенные соотношения используются автором для сравнения трехфазного трехуровневого КИИ и традиционного АИН с повышающим *dc-dc* преобразователем. Данное сравнение автор проводит с точки зрения загрузки пассивных и активных компонентов и массогабаритных показателей. Данное сравнение справедливо, поскольку оба преобразователя являются смежными по применению и функциональным возможностям. Результаты сравнения, которое автор приводит как сравнение графических зависимости параметров компонентов от коэффициента передачи и зависимости полной энергии пассивных компонентов и установленной мощности активных компонентов от коэффициента передачи, как косвенного показателя массогабаритных параметров.

Справедливость полученных аналитических соотношений была подтверждена моделированием исследуемых топологий в программной среде *Powersim*. По полученным в ходе имитационного моделирования диаграммам были построены энергетические характеристики.

В качестве основных выводов из проведенного сравнения двух преобразователей автором приводятся следующие положения:

1. Для обеспечения одинакового выходного напряжения, при одинаковом входном напряжении и одинаковых пульсациях входного тока, КИИ требуются большие по размерности пассивные компоненты. В то же время, относительные массогабаритные показатели пассивных компонентов КИИ практически соответствуют показателям АИН с *dc-dc* преобразователем в области малого коэффициента повышения напряжения (до 1,5), но в области высокого коэффициента размерности компонентов КИИ больше, чем у традиционного преобразователя.

2. КИИ не вносят значительного искажения в форму выходного напряжения по сравнению с традиционными АИН с *dc-dc* преобразователем, однако при больших коэффициентах повышения, искажения могут приводить к значительным потерям из-за соотношения длительностей активных состояний и состояния короткого замыкания.

3. КИИ не имеет значительных преимуществ перед традиционной топологией с точки зрения массогабаритных показателей и эффективности. Однако КИИ может найти применение в системах малой мощности с высокими требованиями к надежности, таких как авиационные системы электроснабжения, вспомогательные системы электроснабжения, автономные системы электроснабжения и т.д.

Данные результаты имеют ценность с точки зрения оценки практического использования КИИ и выбора сферы их применения.

Для решения ранее обозначенной проблемы перенапряжения в режиме малой нагрузки и холостого хода автором в четвертой главе предложена модификация топологии КИИ. Данная схмотехническая модификация получена путем добавления активных и пассивных компонентов в КИ-звено и реализована как для двухуровневой, так и для трехуровневой топологии КИИ. Стоит заметить, однако, что при схмотехническом подходе к решению проблемы работы при малой нагрузке, автор также модифицирует и систему управления преобразователем. Описываемая модификация базируется на схожей по идее модификации для *Z*-инвертора, однако учитываются все особенности работы квази-импедансного инвертора. По полученным расчетным соотношениям для модифицированной топологии автор привел сравнение с ранее представленным трехфазным трехуровневым КИИ. Сравнение показало, что модификация не приводит к потерям основных качеств КИИ. В конце главы автор также отмечает, что модифицированная топология позволяет работать в режиме рекуперации энергии, что для КИИ является новым режимом. Этот результат является не менее значительным, чем решение изначально поставленной задачи по реализации возможности работы КИИ в режиме малой нагрузки и холостого хода. Таким образом, предложенная автором топология модифицированного КИИ является улучшенной с точки зрения функциональной надежности и эффективности.

В пятой главе автором приведены результаты экспериментального исследования. Были разработаны физические макеты всех исследуемых преобразователей. Приведенные на фотографиях компоненты макетов показывают высокое качество исполнения.

Силовая часть макетов и система управления были реализованы на современной элементной базе, что позволило с высокой точностью провести экспериментальное исследование и сравнить результаты физического эксперимента с имитационным моделированием и теоретическим исследованием.

Для сопоставления результатов теоретического исследования и экспериментального физического исследования проводилось автором в два этапа. В первом этапе было проведено

сравнение трехфазного трехуровневого АИН с $dc-dc$ преобразователем и КИИ, во втором – исследование модифицированного КИИ в разных режимах работы.

Результаты экспериментального исследования качественно и численно совпадают с теоретическим. Стоит отметить высокую точность соответствия результатов исследований.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Автор корректно использует известные научные методы обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций.

Автор изучил и проанализировал известные достижения и положения других авторов по вопросам схемотехники и способов управления $dc-ac$ преобразователей, о чем свидетельствует список цитируемых литературных источников.

Для анализа электрических процессов в силовой схеме исследуемого преобразователя автор грамотно использует методы коммутационных функций, гармонического анализа, расчета статических процессов в электрических цепях, метод спектрального моделирования, имитационное моделирование в современном программном обеспечении.

Достоверность и новизна, полученных результатов

Основные научные результаты диссертации:

1. Разработана математическая модель трехфазного трехуровневого КИИ, позволяющая рассчитать значения напряжений и токов во всех компонентах и узлах исследуемой схемы спектральным методом без применения методов решения дифференциальных уравнений.

2. Получены численные результаты теоретического и экспериментального сравнения традиционного трехфазного трехуровневого АИН с $dc-dc$ преобразователем и КИИ по критериям величин пассивных компонентов, загрузки пассивных и активных компонентов и их массогабаритных показателей, позволяющие определить оптимальную область применения КИИ в АСЭ.

3. Разработана топология двух- и трехуровневого трехфазного КИИ, позволяющая преобразователю работать в режимах малой нагрузки и холостого хода.

Результаты теоретического исследования подтверждены имитационным моделированием в программной среде *PSIM* и физическим экспериментом. В тексте диссертации приведены численные данные о соответствии и расхождении результатов теоретического, имитационного и экспериментального исследований.

Результаты исследований были опубликованы автором в значимых научных изданиях, из которых три включены в перечень ВАК. Отдельные выводы и результаты диссертационной работы были представлены на российских и международных конференциях. На разработанную модификацию преобразователя получен патент на изобретение.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

Разработанные автором математические и программные модели исследуемых преобразователей позволяют проводить полный расчет схем с заданными входными параметрами. Полученные по единой методике соотношения для компонентов преобразователей позволяют рассчитать и сравнить схемы с точки зрения загрузки компонентов и массогабаритных показателей. Полученные результаты сравнения традиционного трехфазного трехуровневого АИН с $dc-dc$ преобразователем и квази-импедансного инвертора (КИИ) по критериям величин пассивных компонентов, загрузки пассивных и активных компонентов и массогабаритных показателей показывают преимущества и недостатки КИИ и позволяют заключить, что применение КИИ является оправданным в случаях повышенных требований к надежности. Модифицированная топология двух- и трехуровневого трехфазного КИИ, позволяет преобразователю работать в режимах малой нагрузки и холостого хода, что также повышает функциональную надежность преобразователя. Модифицированная топология КИИ может работать в режиме рекуперации энергии, что позволяет расширить область применения данного преобразователя. Практическая значимость результатов исследования подтверждена актами о внедрении полученных результатов и справкой об их использовании в учебном процессе.

Достоинство и недостатки в содержании и оформлении диссертации, влияние отмеченных недостатков на качество исследования

Оценивая содержание диссертации в целом, можно констатировать, что автор приводит информацию последовательно и методично. Выводы по основным главам исчерпывающе

отражают полученные результаты. Автор опирается в исследовании на достаточное количество актуальных источников по теме диссертации.

Среди недостатков можно отметить:

- Автором не приведен расчет потерь исследуемого преобразователя и модифицированного преобразователя, и соответственно не приведено сравнение теоретических показателей с экспериментальными.

- Приведенные в диссертации на рис. 3.8 и рис. 4.9 диаграммы не достаточно информативно отражают соотношение по требованиям к компонентам сравниваемых преобразователей.

- Автором только отмечено, что предложенная топология преобразователя позволяет ему работать в режиме рекуперации, но сам режим не исследован достаточно подробно.

- По оформлению имеется общее замечание по поводу использования наименований параметров и их обозначений, принятых в зарубежной литературе.

Высказанные замечания не подвергают сомнению достоверность и актуальность полученных результатов.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертация и автореферат соответствуют требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011. «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления» М.: Стандартинформ. – 2012.

Заключение

Диссертация Панфилова Дмитрия Валерьевича на соискание ученой степени кандидата технических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важных задач анализа нового класса полупроводниковых преобразователей, оценки применения данных преобразователей в развивающейся отрасли энергетики и разработке схемотехнических решений применительно к использованию этих преобразователей на практике, имеющей существенное значение для соответствующей отрасли знаний, а именно силовой электроники. Также, изложены научно обоснованные технические, решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны, что соответствует требованиям п. 9 «Положение о присуждении ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Официальный оппонент

Заслуженный деятель науки РФ

доктор технических наук, профессор кафедры

Теории электрических цепей и связи

Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования

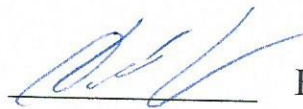
«Санкт-Петербургский государственный университет

телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

СПб, 193232, проспект большевиков, д.22 корп. 1

Телефон 8(812)305-12-35

Dmitrikov_vf@mail.ru



В. Ф. Дмитриков



Дмитриков В. Ф.
ЗАВЕРЯЮ

Исполнительный специалист по кадрам
СПбГУТ

В. Ф. Дмитриков
14.11.2016