

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы Молдахметова Саята Сайрановича «Исследование методов коммутации ступеней напряжения многоуровневого силового инвертора», представленной на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по специальности 6D071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации

Актуальность работы. Проблемы экологии, глобального потепления, истощения ископаемых природных ресурсов дают все большие импульсы развитию альтернативной энергетики. Климатические условия Республики Казахстан наиболее благоприятны для таких направлений альтернативной энергетики как ветроэнергетика и гелиоэнергетика. Поскольку полученную от альтернативных источников электроэнергию необходимо преобразовать для доступности потребителю, это ставит задачу силовой электронике, в частности разработке автономных инверторов напряжения.

Современное оборудование предъявляет высокие требования к качеству электроэнергии, которое заключается в соблюдении параметров напряжения питания в определенных рамках. Источник напряжения питания должен отвечать требованиям по мощности, амплитуде и действующему, т.е. полезному, значению напряжения, а также частоте и синусоидальности напряжения.

Многоуровневый инвертор обладает формой выходного напряжения близкой к синусоидальной. Таким образом, выходное напряжение такого инвертора имеет гораздо меньший коэффициент гармонических составляющих, что позволяет улучшить качество вырабатываемой электроэнергии.

Помимо этого многоуровневый инвертор обладает другими преимуществами. Так, например, многоуровневый инвертор имеет гораздо меньшее влияние на источники постоянного тока. Это связано с тем, что потребляемый ток в течение периода нарастает постепенно. Также многоуровневый инвертор практически не требует фильтрации выходного напряжения. Поскольку отпадает необходимость установки фильтров низких частот, это позволяет уменьшить габариты преобразовательной установки. Более того, не менее важным аспектом этого является устранение задержки по времени ввиду отсутствия фильтрующих емкостных элементов. К преимуществам многоуровневого инвертора также можно отнести и способность работать с более низкой частотой коммутации силовых ключей. Это в свою очередь позволяет сократить потери энергии на переходные процессы, а значит, обеспечивает высокий КПД всей системы.

Многоуровневый инвертор, как правило, строится из большого числа силовых элементов, в частности ключей коммутации, которыми необходимо управлять по определенному закону. Поскольку такие элементы коммутируют большие токи, то необходимо разработать систему управления, предусматривающую защиту от поражения человека электрическим током, выхода из строя. Помимо этого ввиду дороговизны силовых

полупроводниковых элементов такая система управления должна следить за состоянием преобразователя, предотвращать аварийные ситуации и режимы работы.

Таким образом, актуальным вопросом является исследование силового инвертора с микроконтроллерным управлением с формой выходного напряжения близкой к синусоидальной, который бы отличался от известных преобразователей с одной стороны меньшим количеством силовых полупроводниковых элементов, что уменьшит его себестоимость, с другой стороны обеспечивал стабильную работу, качество преобразуемой электроэнергии и наименьший коэффициент нелинейных искажений.

Для этого необходимо разработать методику расчета времени коммутации уровней напряжения инвертора, позволяющую сократить коэффициент нелинейных искажений и добиться стабильности действующего значения напряжения. Также необходимо усовершенствовать топологию конструкции многоуровневого инвертора для сокращения количества используемых силовых полупроводниковых элементов.

Разработка и исследование многоуровневых инверторов проводились отечественными учеными Исембергеновым Н.Т., Тайсариевой К.Н., Илипбаевой Л.Б., а также их зарубежными коллегами, в частности: José Rodríguez, Arvind Yadav, Zhiguo Pan, Mamatha Sandhu, Jagdish Kumar, Grain P. Adam, Ebrahim Babaei, Baoming Ge, Pablo Lezana, Byeong-Mun Song, Miguel F. Escalante, Keith A. Corzine, Giuseppe Carrara, Amit Kumar Gupta и другими.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование методов коммутации ступеней напряжения многоуровневого силового инвертора для получения синусоидального выходного напряжения, повышения качества преобразуемой электроэнергии и уменьшения коэффициента нелинейных искажений.

Цель диссертационного исследования заключается в решении следующих **задач**:

- анализ современных топологий многоуровневого силового инвертора;
- разработка и исследование методик коммутации уровней напряжения инвертора с меньшим коэффициентом нелинейных искажений выходного напряжения;
- разработка микроконтроллерной системы управления силовым инвертором, обеспечивающей стабильность выходного напряжения, точность коммутации, защиту от выхода из строя;
- разработка способа управления силовыми ключами инвертора, позволяющего управление от одного микроконтроллера и предусматривающего защиту от короткого замыкания и поражения человека электрическим током;
- разработка и исследование экспериментальной установки силового инвертора по разработанной топологии и методике коммутации уровней.

Методы исследования. Решение поставленных задач производилось с использованием методов системного анализа, математического моделирования,

компьютерного моделирования с использованием различных сред и программ, эксперимента и других методов исследования.

Объект исследования – автономный силовой инвертор с выходным напряжением близким к синусоидальному.

Предмет исследования – топология построения многоуровневого инвертора, стратегии коммутации уровней напряжения инвертора, процесс контроля качества выходного напряжения инвертора.

Новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- разработана новая методика коммутации уровней напряжения инвертора с наименьшим коэффициентом нелинейных искажений выходного напряжения;
- по предложенным оригинальным схемотехническим и программным решениям разработана микроконтроллерная система управления силовым многоуровневым инвертором и контроля зарядкой аккумуляторных батарей, отличающаяся высокой точностью коммутации ступеней напряжения;
- разработана оригинальная схема гальванической развязки для управления изолированным затвором транзистора, отличающаяся тем, что позволяет производить управление несколькими биполярными транзисторами с изолированными затворами от одной микросхемы;
- разработан и испытан опытный образец однофазного многоуровневого инвертора мощностью до 3 кВт с стабилизированным выходным напряжением близким к синусоидальному.

Практическая значимость: разработан опытный образец однофазного многоуровневого инвертора с стабилизированным выходным напряжением близким к синусоидальному. Синусоидальность напряжения при этом позволяет сократить потери, связанные с наличием гармоник переменного тока. Мощность силового инвертора по предложенной топологии и разработанной методике коммутации ограничивается лишь пропускной способностью ключей коммутации и на данный момент может достигать свыше 30 кВт. Опытный образец многоуровневого инвертора разработан по предложенным схемотехническим и программным решениям, которые предусматривают защиту от выхода из строя, поражения человека электрическим током, защиту от короткого замыкания и позволяют увеличить срок эксплуатации.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

- топология проектирования многоуровневого силового инвертора, отличающаяся использованием меньшего количества силовых полупроводниковых элементов;
- стратегия коммутации уровней напряжения инвертора, отличающаяся меньшим коэффициентом нелинейных искажений выходного напряжения, а также стратегия коммутации уровней напряжения инвертора на основе равенства площадей, позволяющая получить не только меньший коэффициент нелинейных искажений выходного

- напряжения инвертора, но и способность инвертора сохранять действующее значение напряжения на заданном уровне;
- модель многоуровневого инвертора на основе H-моста и коммутатора ступеней напряжения;
 - структура многоуровневого инвертора на основе H-моста и коммутатора ступеней напряжения с системой управления.

Апробация работы.

В результате теоретических и экспериментальных исследований получен однофазный многоуровневый инвертора мощностью 3 кВт с стабилизированным выходным напряжением близким к синусоидальному. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции «Achievement of high school - 2013» (г. София, Болгария, 2013), 10-й Международной научно-практической конференции «Strategiczne pytania swiatowej nauki - 2014» (г. Пшемьсль, Польша, 2014), Международных Сатпаевских чтениях «Роль и место молодых ученых в реализации стратегии «Казахстан-2050», посвященных 80-летию КазНТУ имени К.И. Сатпаева (г. Алматы, 2014), Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы энергосбережения и новые технологии в науке и образовании Республики Казахстан» (г. Петропавловск, 2014), Международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (г. Караганда, 2016).

Публикации.

По результатам диссертационного исследования опубликовано 19 публикаций, в том числе 7 – в научных изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК, 3 – в журнале, входящем в базу Scopus, 5 – в материалах конференций, в том числе 2 – зарубежных, 2 – инновационных патента РК на изобретение.

Личный вклад автора.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно. В печатных работах, которые написаны в соавторстве, соискателю принадлежит ведущая роль при обобщении и анализе полученных результатов.

Структура диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Работа изложена на 109 страницах, содержит 64 рисунков, 18 таблиц и список литературы из 88 наименований публикаций отечественных и зарубежных авторов.

Результаты исследования.

В результате выполнения диссертационного исследования получены теоретические и экспериментальные результаты, которые способствуют повышению качества электроэнергии, вырабатываемой автономными силовыми инверторами, за счет большей стабильности и синусоидальности выходного напряжения, а также эффективности преобразования, увеличению

мощности и надежности. Поставленные задачи выполнены в полном объеме. В качестве основных результатов исследования можно считать следующие:

Выполнен анализ существующих топологий многоуровневых силовых инверторов, опираясь на который, разработана топология автономного силового инвертора на основе многообмоточного трансформатора. В ходе анализа было выявлено, преимущество топологии многоуровневого силового инвертора на основе коммутатора уровней и мостового инвертора при условии, что выходное напряжение инвертора составляет не менее трех уровней. На основе данной топологии предложен способ реализации многоуровневого силового инвертора, в котором последовательно коммутируются напряжения от конверторов, образуя ступенчатую форму, и инвертируется мостовым инвертором. Данный принцип успешно реализован на практике в опытном образце автономного инвертора напряжения, который имеет значительное преимущество по массогабаритным показателям по сравнению с аналогами.

Разработаны компьютерная модель выходного напряжения инвертора, компьютерная модель непосредственно силового инвертора. Данные модели использовались для исследования различных стратегий коммутации ступеней напряжения многоуровневого инвертора, в том числе стратегиям на базе широтно-импульсной модуляции. Получены зависимости коэффициента нелинейных искажений выходного напряжения инвертора от стратегии, количества ступеней и других параметров. Результаты, полученные при помощи компьютерного моделирования, подтверждены результатами эксперимента.

Предложена методика на основе геометрического приближения выходного напряжения инвертора к синусоидальной форме. В отличие от других методик коммутации, разработанная методика позволяет не только снизить гармонические составляющие, но и сохранить в стабильности действующее значение напряжения.

Предложен способ гальванической развязки для управления несколькими IGBT от одного микроконтроллера, который использует оптореле и конвертор напряжения с гальванически развязанными входом и выходом. Данная схема подходит для управления большинством типов IGBT и использована для разработки многоуровневого силового инвертора, собранного на базе IGBT-модулей 2MBI200L-060 и транзисторов с изолированным затвором G7PH42UD. Особое внимание уделено разработке микроконтроллерной системы управления силовым инвертором, отличающейся высокой точностью коммутации ступеней инвертора за счет высокой частоты тактового генератора. При этом помимо управления инвертором разработанная система производит мониторинг выходного напряжения, силы тока, мощности, а также температуры подложки транзисторных модулей.

Разработан опытный образец однофазного многоуровневого инвертора с стабилизированным выходным напряжением близким к синусоидальному. Мощность силового инвертора по предложенной топологии и разработанной методике коммутации ограничивается лишь пропускной способностью ключей

коммутации и на данный момент может достигать свыше 30 кВт. Данный инвертор использовался для экспериментального исследования возможностей ключей коммутации, микроконтроллерной системы управления, стратегий коммутации и др.

Работы, опубликованные по теме диссертации.

1. Данильченко В.В., Молдахметов С.С., Якубова М.З. К вопросу о разработке системы управления многоуровневым силовым инвертором напряжения // Материалы IX международной научно-практической конференции «Достижения высшей школы – 2013», София (Болгария), 2013. – С. 64-68.

2. Анарбаев А.Е., Тайсариева К.Н., Молдахметов С.С., Исембергенов Н.Т. К вопросу о разработке системы управления силовым инвертором для индукционного нагрева // Материалы X международной научно-практической конференции «Стратегические пути развития науки», Пржемысль (Польша), 2014. – С. 43-47.

3. Анарбаев А.Е., Молдахметов С.С., Исембергенов Н.Т. Индукциялық қыздыру үшін күш инвертордың басқару жүйесі // Международные Сатпаевские чтения -2014 «Роль и место молодых ученых в реализации стратегии «Казахстан – 2050», г. Алматы, 2014. – Т.3. С. 99-103.

4. Анарбаев А.Е., Молдахметов С.С. Система слежения за параметрами солнечного модуля / Научный журнал «Вестник ПГУ. Энергетическая серия» №2, 2014. – С. 46-53.

5. Молдахметов С.С. Multilevel inverter using an H-bridge circuit // Материалы МНПК «Актуальные вопросы энергосбережения и новые технологии в науке и образовании Республики Казахстан», г. Петропавловск, 2014. – Т.1. С. 74-77.

6. Орынбаев С.А., Молдахметов С.С., Бекбаев А.Б. Однофазный автономный инвертор / Научный журнал «Известия НАН РК. Физико-математическая серия» №2, 2015. С. 18-24.

7. Орынбаев С.А., Бекбаев А.Б., Байбутанов Б.К., Молдахметов С.С. Оценка ветроэнергетического потенциала местности на примере районов южного Казахстана / Научный журнал «Вестник КазНТУ» №3, 2015. С. 80-85.

8. Sayat Moldakhmetov, Nalik Issembergenov and Abdurazak Kasymov. Multilevel inverter based on level switch and H-bridge / ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 10 (16), 2015. – P. 6884-6887.

9. Орынбаев С.А., Молдахметов С.С., Байбутанов Б.К., Ешметов М.Б., Ауесжанов Д.С. Исследование методик коммутации ступеней многоуровневого инвертора на основе широтно-импульсной модуляции / Научный журнал «Известия НАН РК. Физико-математическая серия» №2 (306), 2016. – С. 139-146.

10. Исембергенов Н.Т., Молдахметов С.С. Инсепов Д.Г., Способ реализации многоуровневого силового инвертора на базе IGBT / Научный журнал «Вестник Казахстанско-Британского технического университета» №4 (35), 2015. С. 95-100.

11. Sayat Moldakhmetov, Nalik Issembergenov, Dauren Insepov and Seitzhan Orynbayev. Implementation of multilevel power inverter / ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 11 (11), 2016. – P. 6886-6890.

12. Пат. 31425 РК. Однофазный автономный инвертор / Орынбаев С.А., Молдахметов С.С., Бекмуратов М.М., Кейкиманова М.Т.; опубл. 15.08.2016 г. Бюл. № 9. – 5 с.

13. Пат. 31804 РК. Микроконтроллерное устройство стабилизации выходного напряжения для ветроэнергетической установки / Орынбаев С.А., Молдахметов С.С., Исембергенов Н.Т., Малдыбаева Т.С.; опубл. 30.12.2016 г. Бюл. № 18. – 4 с.

14. Петров П.А., Герасимова Ю.В., Ивель В.П., Молдахметов С.С. Система вращения-подъема ЖД вагонов/ Вестник национальной академии наук РК, Vol. 6 (370), 2017. – С. 52-59.

15. Viktor Ivel, Yuliya Gerasimova, Sayat Moldakhmetov and Pavel Petrov. System of lifting and rotation of railway cars / ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 13 (2), 2018. – P. 714-717.

16. Bibigul Koshekova, Yuri Klikushin, Oleg Belosludtsev and Sayat Moldakhmetov. Search of earthquake precursors basing on FRaSH method for identification measurements of seismographic records / ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 14 (1), 2019. – P. 141-147.

17. Ивель В. П., Герасимова Ю. В., Риттер Д. В., Молдахметов С. С., Петров П. А. Методика разработки высокоточной системы управления двухдвигательным механизмом вращения железнодорожных вагонов/ Монография – М.: РУСАЙНС, 2019 г. -140 с.

18. V. P. Ivel, Y. V. Gerasimova, S. S. Moldakhmetov, P. A. Petrov, I. A. Gerasimov Wireless Holter monitoring system with a dual-core processor./ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Joint International Meeting PRIME 2020, Volume 919 (2020) 022040, October 4-9, 2020. – P.1-9. doi:10.1088/1757-899X/919/2/022040.

19. S. S. Moldakhmetov, V. P. Ivel, Y. V. Gerasimova, P. A. Petrov and N. B. Kaliaskarov. Switching strategies for a multi-level inverter./ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1155 (2021) 012094, April 2021. – P.1-9. doi:10.1088/1757-899X/1155/1/012094.