

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УНИФИЦИРОВАННОГО МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СТАЦИОНАРНОГО ЗАРЯДНОГО УСТРОЙСТВА НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК ГОРОДСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА

Назаров В.Е.¹, Тингаев Н.В.¹

¹ ЗАО «Межрегиональное производственное объединение технического комплектования «Технокомплект» (ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ»), (141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Школьная, д. 10А), e-mail: nazarov@techno-com.ru.

В статье освещены основные технические требования к стационарным зарядным устройствам, сформулированные законодателем в мировой зарядной инфраструктуре - ассоциацией CHAdeMO. Помимо этого, приведены уточняющие требования, обусловленные отечественными нормами и стандартами. Описаны особенности разработки унифицированного многофункционального преобразователя электроэнергии стационарного зарядного устройства, отвечающего заявленным техническим требованиям. Предложена топология схемотехнического решения преобразователя электроэнергии. Дан общий алгоритм управления системой коммутации стационарного зарядного устройства для установки различных режимов работы проектируемого преобразователя. В процессе работы рассчитаны значения номиналов элементов преобразователя, а также алгоритмы ШИМ-управления силовыми ключами, позволяющие добиться заданных технических требований. В статье приведены результаты расчётов и моделирования предложенного решения. Полученные расчетные показатели преобразователя отвечают современным отечественным и международным требованиям. Сформулированы соответствующие выводы о целесообразности использования данной топологии в зарядной инфраструктуре электромобилей.

Ключевые слова: электромобиль, зарядное устройство, преобразователь, коэффициент мощности, коррекция коэффициента мощности, система управления, широтно-импульсная модуляция, ШИМ.

DEVELOPMENT OF A UNIFIED POWER CONVERTER OF THE CHARGERS FOR EV PUBLIC TRANSPORT

Nazarov V.E.¹, Tingaev N.V.¹

¹ «TECHNOCOMPLEKT» Technical Supply Interregional Trade Association, (141980, Dubna, Moscow region, Shkolnaya st. 10A.), e-mail: nazarov@techno-com.ru.

In the article, there are technical requirements for EV chargers made by the association CHAdeMO. Additionally described Russian norms and standards. Features of the development of a unified multi-converter power for in EV charger are presented. Proposed the topology of the circuit solution for electric converter. Provide a general algorithm of the control system EV chargers for the selection of different operation modes of the electric converter. The values of the nominal inverter elements and algorithms PWM power switches, allowing to achieve the given specifications. There are results of calculation and simulation of the technical solutions. The resulting estimates of the inverter meet current national and international requirements. Formulate conclusions about the appropriateness of a given topology.

Keywords: Electric vehicle, charger, converter / inverter, power factor, power factor correction, control system, pulse-width modulation, pwm.

Введение

В настоящее время законодателем в области зарядной инфраструктуры для электромобилей является ассоциация CHAdeMO. Стандартом ассоциации продиктованы условия применения стационарных зарядных устройств, их входные и выходные параметры. В отличие от обычных зарядных станций, СЗУ стандарта CHAdeMO должны подавать на аккумуляторы электромобиля постоянный ток мощностью до 50 киловатт, напряжением до 500 В и силой

тока до 125 А. При проектировании преобразовательных устройств такой мощности необходимо принимать во внимание особенности питающих электрических сетей. Ограничения, накладываемые на потребителей при использовании бытовых и промышленных сетей, сформулированы в международных и отечественных нормах и стандартах по электромагнитной совместимости [3; 4].

Таблица 1 - Нормы эмиссии гармонических составляющих тока, создаваемые техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе) [4]

Порядок гармонической составляющей, n	Максимально допустимое значение гармонической составляющей тока, %
Нечётные гармонические составляющие:	
5	10.7
7	7.2
11	3.1
13	2

Указанные стандарты вводят требования к качеству потребляемого из сети тока, они ограничивают количество высших гармоник в форме тока. Для обеспечения коэффициента мощности, близкого к единице, форма потребляемого тока должна быть близкой к синусоидальной, ток должен быть синфазным с напряжением сети.

С целью улучшения качества потребляемого тока потребители применяют фильтры и выпрямители с коррекцией коэффициента мощности.

Для построения зарядного устройства мощностью свыше 1 кВт с учётом повышенных требований к ЭМС и конструктиву необходимо применить трёхфазный выпрямитель с активной ККМ. Концепция, отвечающая заданным требованиям по электромагнитной совместимости и массогабаритным характеристикам - активный выпрямитель, построенный на базе инвертора напряжения. Особенностью данной топологии является способность преобразователя функционировать как в инверторном, так и в обратном (выпрямительном) режимах [5].

Целью данной работы явилась разработка унифицированного многофункционального преобразователя энергии, отвечающего требованиям, продиктованным стандартом SNAdeMO, а также имеющего задел на расширение функциональных возможностей за счёт увеличения диапазона входных и выходных параметров. Структура построения разрабатываемого преобразователя должна обеспечить максимальную унификацию оборудования.

Методы исследования

Разработка УМПЭ СЗУ велась на основе имитационного моделирования выпрямительно-инверторной схемы на IGBT-транзисторах [1; 2]. Дополнительными условиями при проведении моделирования послужили требования электромагнитной совместимости, стремление к минимизации массогабаритных характеристик и максимальной унификации конечного устройства, а также климатические условия использования преобразователя.

Результаты исследования

Проектируемое СЗУ предназначено для заряда от сети аккумуляторной батареи, работающей в составе комплекта тягового электрооборудования транспортного средства. В зависимости от типа электропитания и типа выходного напряжения СЗУ, в состав которого входит разрабатываемый преобразователь, имеет четыре варианта конфигурации.

1. Электропитание – трёхфазная сеть 50 Гц 380 В переменного тока; выходное напряжение СЗУ – трёхфазное 50 Гц 100...400 В.
2. Электропитание – трёхфазная сеть 50 Гц 380 В переменного тока; выходное напряжение СЗУ – 100...750 В, 5...200 А постоянного тока.
3. Электропитание – цепь постоянного тока 600...750 В; выходное напряжение СЗУ – трёхфазное 50 Гц 100...400 В.
4. Электропитание – цепь постоянного тока 600...750 В; выходное напряжение СЗУ – трёхфазное 50 Гц 100...400 В; выходное напряжение СЗУ – 100...750 В, 5...200 А постоянного тока.

Структурная схема унифицированного многофункционального преобразователя электроэнергии, удовлетворяющая условиям данных конфигураций входных и выходных параметров, представлена на рисунке 1.

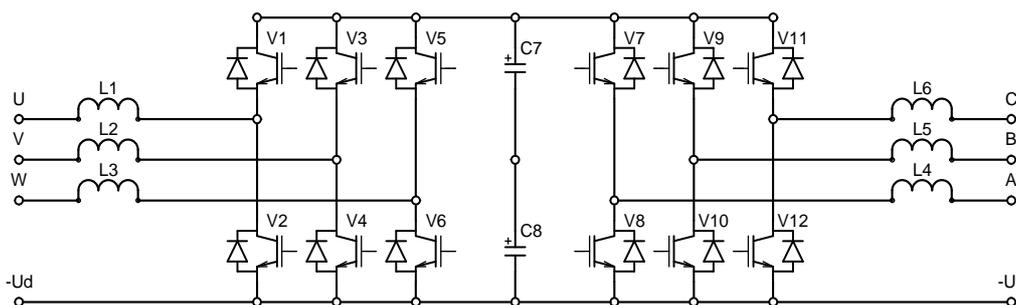


Рисунок 1 - 4Q-преобразователь

Преобразователь электроэнергии построен по топологии четырёхквadrантного преобразователя (4Q), состоящего из двух трёхфазных мостов, шести дросселей и конденсаторов в промежуточной цепи постоянного тока.

Входной каскад, состоящий из трёхфазного моста на IGBT V1...V6 и дросселей L1...L3, в зависимости от типа питающей электросети выполняет функции:

1) электропитание СЗУ от трёхфазной сети 380 В 50 Гц. Входной каскад выполняет функции активного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности. Принцип работы активного выпрямителя основан на работе повышающего преобразователя постоянного напряжения с двумя контурами обратной связи – по форме потребляемого тока и по выходному напряжению выпрямителя. Система управления формирует ШИМ-сигналы управления транзисторами V1...V6 таким образом, что коэффициент мощности преобразователя близок к единице, а выходное напряжение U_d в промежуточной цепи постоянного тока стабилизировано на уровне 750 В. Питаящая трёхфазная сеть подключена к цепям U, V и W входного каскада;

2) электропитание СЗУ производится от цепи постоянного тока напряжением 600...750 В. Система коммутации стационарного зарядного устройства в данном режиме работы замыкает между собой цепи U, V и W входного каскада и подаёт на них постоянное напряжение $+600...750$ В относительно цепи $-U_d$. Входной каскад выполняет функции повышающего преобразователя, обеспечивающего стабилизированное выходное напряжение $U_d = 750$ В в промежуточной цепи постоянного тока (рисунок 2). Объединение цепей U, V и W входного каскада и соответствующий алгоритм управления IGBT V2, V4 и V6 организуют многофазное преобразование, которое позволяет снизить токи пульсаций и тем самым снизить нагрузку на выходные ёмкости и уменьшить габариты дросселей. К тому же с данным алгоритмом управления в повышающем DC/DC-преобразователе нагрузка равномерно распределяется на три дросселя и трёхфазный мост на IGBT, используются идентичные пассивные и активные компоненты, что и в активном выпрямителе.

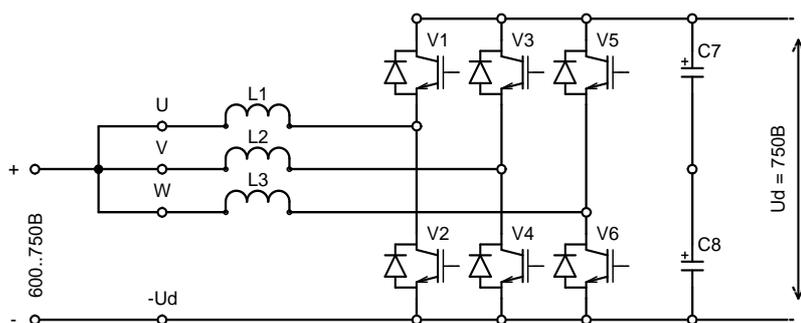


Рисунок 2 - Входной каскад УМПЭ в режиме повышающего DC/DC-преобразователя

Выходной каскад УМПЭ, состоящий из трёхфазного моста на IGBT V7...V12 и дросселей L4...L6 (рисунок 1), питается напряжением U_d промежуточного DC-звена и в зависимости от типа выходного напряжения выполняет функции:

- 1) выходное напряжение СЗУ – трёхфазное 50 Гц 100...400 В.

Выходной каскад выполняет функции трёхфазного инвертора. IGBT V7...V12 управляются системой управления. Система коммутации СЗУ в данном режиме работы подключает выходной каскад УМПЭ к трёхфазному выходу СЗУ;

2) выходное напряжение СЗУ – 100...750 В, 5...200 А постоянного тока.

Выходной каскад выполняет функции понижающего DC/DC-преобразователя, обеспечивая стабилизированный зарядный ток в аккумуляторной батарее с ограничением выходной мощности на уровне 50 кВт, а также переход из режима $I = \text{const}$ в режим $U = \text{const}$. Система коммутации СЗУ в данном режиме работы замыкает между собой цепи А, В и С выходного каскада (рисунок 1) и подключает выход данного каскада к аккумуляторной батарее относительно цепи $-U_d$. Понижающий DC/DC-преобразователь, по аналогии с входным каскадом, работает в режиме многофазного преобразования. Данный режим позволяет получить выходной ток до 200 А (с ограничением мощности до 50 кВт), используя аналогичные активные и пассивные элементы в УМПЭ, что и при работе в режиме инвертора (инвертор рассчитан на выходной ток до 66,7 А).

Наиболее тяжёлые условия эксплуатации компонентов УМПЭ возникают в следующем сочетании входных и выходных параметров:

- 1) питание УМПЭ производится от трёхфазной сети 50 Гц напряжением 380 В-15% (пониженная);
- 2) выходное напряжение УМПЭ постоянное 250 В, ток нагрузки 200 А, выходная мощность 50 кВт.

На рисунке 3 представлена модельная временная диаграмма работы входного каскада в режиме выпрямителя (ШИМ-выпрямителя) с активной коррекцией коэффициента мощности. На рисунке 4 представлена модельная временная диаграмма переходного процесса во входном каскаде в режиме выпрямителя с активной коррекцией коэффициента мощности при скачкообразном изменении нагрузки от 10 до 100%.

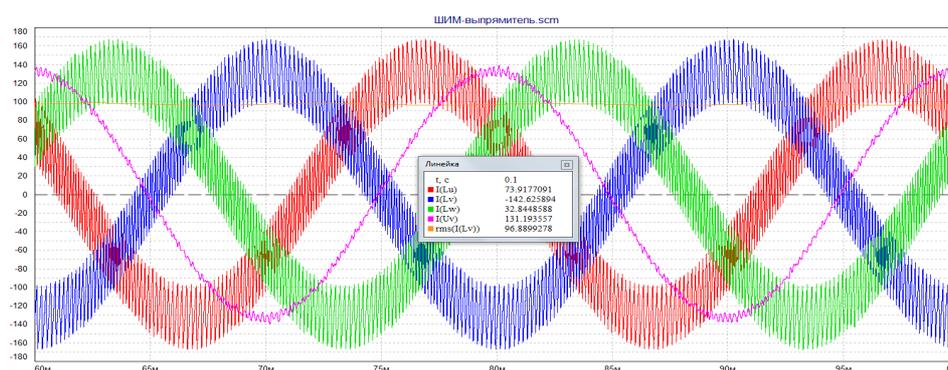


Рисунок 3 - Модельная временная диаграмма работы входного каскада УМПЭ. Режим активного выпрямителя

Результаты моделирования:

- Расчетный режим $U_d=750$ В, $I_d=68$ А, $P_d=51$ кВт.
- Красный - ток входного ВЧ-дросселя L_u .
- Синий - ток входного ВЧ-дросселя L_v .

- Зеленый - ток входного ВЧ-дросселя L_w .
- Фиолетовый - потребляемый ток фазы V.
- Желтый - действующее значение тока входного ВЧ-дросселя L_v .
- Средняя частота коммутации 7000 Гц.
- Коэффициент мощности (PF) -1,0.

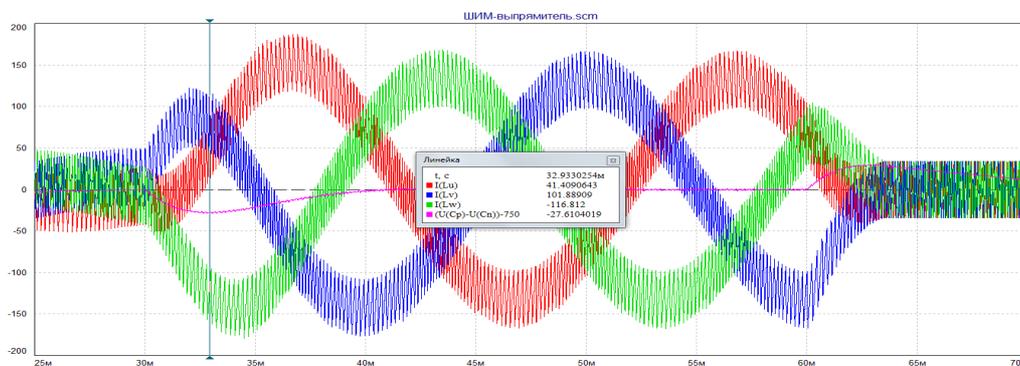


Рисунок 4 - Временная диаграмма переходного процесса в УМПЭ. Режим активного выпрямителя.

Результаты моделирования:

- 30...60 мс – «наброс» нагрузки (51 кВт=100%).
- Красный - ток входного ВЧ-дросселя L_u .
- Синий - ток входного ВЧ-дросселя L_v .
- Зеленый - ток входного ВЧ-дросселя L_w .
- Фиолетовый - разница напряжений выпрямленного и заданного.

На основе данных, полученных при имитационном моделировании режимов работы входного каскада, выбран транзисторный модуль PM450CLA120 и произведён расчёт потерь (тепловой расчёт) для данных IGBT-модулей. Температура радиатора $T_f=+80\text{ }^\circ\text{C}$, $P(\text{total})=1249\text{ Вт}$, КПД данного преобразования $\approx 97,6\%$ (без учета потерь в дросселях и конденсаторах). Температура кристаллов $T_j(\text{IGBT})$ и $T_j(\text{Diode})$ при данной температуре радиатора находятся в пределах допустимых значений. Таким образом, модуль PM450CLA120 подходит для данного режима работы.

Расчётный КПД УМПЭ при максимальной выходной мощности 50 кВт не менее 95% (без учёта потерь в системе коммутации, дросселях, конденсаторах, потерь на питание системы управления).

Заключение

Топология УМПЭ, построенного по схемотехнике четырёхквadrантного преобразователя (4Q) на основе двух трёхфазных мостов, позволяет создать СЗУ, отвечающее расширенным требованиям. Данная топология имеет ряд преимуществ.

1. Независимо от типа питающего и выходного напряжения СЗУ в преобразовании участвуют одни и те же активные и пассивные компоненты унифицированного преобразователя. Система коммутации СЗУ осуществляет необходимую для нужного режима работы коммутацию входных и выходных цепей УМПЭ.

2. Входной и выходной каскад УМПЭ практически симметричен, что позволяет разработать идентичные для входного и выходного каскада аппаратные реализации систем управления, различие появляется только на уровне программного обеспечения. Помимо этого, во входном и выходном каскаде применяются одинаковые индуктивные элементы и IGBT-модули, что позволяет сократить номенклатуру покупных и разрабатываемых сборочных единиц и получить максимальный выходной ток 200 А без применения дополнительных дросселей или трансформаторов, рассчитанных на больший ток без применения более мощных IGBT-модулей.

3. Применение активного выпрямителя позволяет потреблять качественный ток из трёхфазной сети с коэффициентом мощности, близким к 1. Этот показатель полностью соответствует отечественным требованиям по электромагнитной совместимости в части эмиссии гармонических составляющих потребляемого тока в сеть.

Расчётный КПД стационарного зарядного устройства равен: 0.95.

При использовании разработанного УМПЭ, получаемые показатели качества СЗУ отвечают современным международным требованиям.

К недостаткам данной топологии СЗУ относятся более высокие потери при двойном преобразовании энергии с промежуточным DC-звеном. Однако в некоторых случаях можно использовать одиночное преобразование электроэнергии, уменьшив при этом динамические потери в IGBT-модулях, конденсаторах и дросселях входного или выходного преобразователя. Например, при питании СЗУ от цепи постоянного тока напряжением 600 В и заряде аккумуляторной батареи с максимальным напряжением 500 В можно не управлять входным каскадом УМПЭ, а использовать лишь выходной понижающий DC/DC-преобразователь. Таким образом, повышающий преобразователь не будет задействован (отсутствие динамических потерь во входном каскаде СЗУ).

Проектирование УМПЭ проводится в рамках работы по созданию стационарного зарядного устройства накопителей электрических силовых установок городского общественного транспорта при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного контракта № 16.526.11.6013 от 10 мая 2012 г.

Список литературы

1. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 : учебное пособие. – СПб. : КОРОНА принт, 2001.
2. Герман-Галкин С.Г. Исследование активного выпрямителя в пакете SIM POWER SYSTEM // Известия вузов. Приборостроение. – 2004. - Т. 47. – № 11.
3. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Электромагнитная совместимость. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения. – М. : Госстандарт, 1998.
4. ГОСТ Р51317.3.2-99 (МЭК 61000-3-2-95) Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе). Нормы и методы испытания. – М. : Изд-во стандартов, 2000.
5. Мелешин В.И. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. – М. : Техносфера, 2011.
6. Чаплыгин Е.Е. Несимметричные режимы трёхфазного преобразователя с коррекцией коэффициента мощности // Электричество. – 2005. - № 9.

Рецензенты:

Ерохов В.И., д.т.н., профессор, Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), г. Москва.

Фомин В.М., д.т.н., профессор, Российский университет дружбы народов (РУДН), г. Москва.