



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Факултет по електронна техника и технологии

Катедра „Микроелектроника“

маг. инж. Мирослав Красимиров Андреев

**ПРОЕКТИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЗАРЯДНА СИСТЕМА
ЗА ЕЛЕКТРОМОБИЛИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2 Електротехника, електроника и автоматика

Научна специалност: Микроелектроника

**Научни ръководители: Проф. д-р Георги Василев Ангелов
Доц. д-р Николай Любославов Хинов**

СОФИЯ, 2024 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Микроелектроника“ към Факултет по електронна техника и технологии на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 10.01.2024 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 22.04.2024 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед №ОЖ-5.2-08 / 19.01.2024 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Доц. д-р Ивелина Николаева Рускова – председател
2. Проф. д-р Георги Василев Ангелов – научен секретар
3. Проф. д-р Елисавета Димитрова Гаджева
4. Проф. д-р Никола Петров Михайлов
5. Проф. д-р Анатолий Трифонов Александров

Рецензенти:

1. Проф. д-р Елисавета Димитрова Гаджева
2. Проф. д-р Анатолий Трифонов Александров

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет по електронна техника и технологии на ТУ-София, блок №1, кабинет №1355.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Микроелектроника“ на Факултет по електронна техника и технологии. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора.

Автор: маг. инж. Мирослав Андреев

Заглавие: Проектиране и изследване на зарядна система за електромобили

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Иновативните технологии за зареждане на електромобили стават все по-утвърдени в редица проучвания, насочени към укрепване на приемането на електромобилите. Увеличаващият се парк от електрическа мобилност изисква усъвършенствани системи за зареждане за подобряване на ефективността на зареждането и поддръжката на електрическата мрежа. Зарядните системи изискват специална топология на силовите електронни устройства, стратегия за управление и международни стандарти за зареждане, както и взаимно свързване на мрежата, за да се осигури оптимална работа и да се подобри поддръжката на мрежата. Зарядните системи, които са базирани на микрогазови турбини, са представени и изследвани, за да идентифицират задвижването на модерните зарядни станции. Бързото развитие на електрическите превозни средства (*Electric vehicle, EV*) увеличава търсенето на енергия, което води до допълнително натоварване на обществената електрическа мрежа и увеличаване на колебанията върху товара, което от друга страна, води до възпрепятстване на мащабното разпространение на електромобили. Развитието на технологиите при производството на батерии, както и редица икономически и екологични фактори, водят през изминалото десетилетие до сериозно засилване на интереса към електрическите автомобили. Освен това за осигуряване на режимите на заряд често се налага преобразувателят да има поведение на регулируем източник на ток с широк диапазон на регулиране на изходната величина.

Всичко това определя актуалността на изследвания проблем, целта и задачите на дисертационния труд както от научнаприложна, така и от приложна гледни точки.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

В дисертационния труд са дефинирани задачи за изпълнение, свързани с изследване на схемни решения за реализация на топологии на силови преобразуватели, суперкондензатори и хибридни системи за съхранение на енергия, както и анализ на процесите за управление на зарядна система за електромобили, проектиране, изследване и реализиране на постояннотоков преобразувател с комутация при нулево напрежение, разработване на симулационни модели за верификация от резултатите от теоретични анализ на преобразувателя, предложение на метод за проектиране и управление на изследваните преобразуватели, изследване и моделиране на зарядни системи за бърз заряд на батериите на електромобили. Друг аспект на изследването е работата на зарядни системи при различни товарни цикли и режими на зареждане на товара и взаимните влияния между тях. Използвани са утвърдени методи за теоретично изследване на процесите в преобразувателите и в зарядните системи. Получените аналитични

зависимости са използвани за реализирането на модели, посредством които са построени основни характеристики на отделните модули от зарядната система. Всичко това определя актуалността на изследвания проблем, целта и задачите на дисертационния труд както от научна-приложна, така и от приложна гледни точки.

Научна новост

В дисертационния труд е представено симулационно и експериментално изследване на автономна зарядна система за електромобили. Разработен е моделно-ориентиран дизайн на автономна зарядна станция за електромобили, базирана на микрогазова турбина и суперкондензатор, осигуряващ оптимални резултати по отношение на зададени диапазони на параметри.

Използването на суперкондензатор във внедрената система води до осигуряване на необходимия ток през товара и помага да се компенсира или недостигът, или излишъкът от генерираната от MGT енергия по време на процеса на зареждане на електромобила. Установена е процедура по оптимизация за намирането на най-малката стойност на суперкондензатора. Моделът на преобразувателя в зарядната система използва осреднени стойности на параметрите и наличието на филтърни елементи, отчитани чрез поставяне на сегменти с времезакъснение. Този метод на реализация позволява извършването на числени експерименти с ограничена изчислителна мощност и голяма продължителност. Разработен е моделно-ориентиран дизайн на автономна зарядна станция за електромобили, базирана на микрогазова турбина и суперкондензатор, осигуряващ оптимални резултати по отношение на зададени диапазони на параметри.

Практическа приложимост

Проведените симулационни и експериментални изследвания на проектираните модели и схеми имат своята практическа приложимост в зарядни станции за бърз заряд, микромрежи, като разработената система е обещаваща автономна опция за захранване за изолирана работа на зарядна станция за електрически превозни средства. Използването на предложения подход за внедряване в зарядни станции е оправдано в редица практически случаи.

Апробация

Резултатите от дисертационния труд, са апробирани в пет научни публикации. Забелязани са общо 22 цитирания без автоцитирания, всички от които от чуждестранни автори.

Благодарности

Авторът би искал да изкаже своите най-искрени благодарности на своите научни ръководители проф. д-р Георги Ангелов и доц. д-р Николай Хинов за подкрепата и ценните съвети по време на съвместната и ползотворна работа.

Публикации

Отпечатани са 5 публикации, 4 от които индексирани в SCOPUS и Web of Science, в това число 4 статии в списания и 3 в сборници на IEEE конференции. Докторантът има една самостоятелна статия в списание. Една от публикациите е в списание с импакт фактор (3,252). В допълнение, резултатите са представени на една национална конференция, три международни конференции, две от които в България и една в чужбина.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 162 страници, като включва увод, 4 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 153 литературни източници, като (148) са на латиница, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 72 фигури и 16 таблици.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

1.1. Текущо състояние на технологията за зареждане и основни изисквания към зарядните станции

В днешно време превозните средства се считат за жизненоважни в ежедневието на хората за лична мобилност, транспортиране на стоки и извършване на услуги, което се отразява на непрекъснатото търсене на петрол. Електрифицирането на транспорта набира скорост в съвременната индустрия поради множеството фактори, включително: чисти екологични концепции, изчерпване на изкопаеми горива, достъпност, увеличаване на инфраструктурата за зареждане и стратегии за интелигентен контрол за задвижване. Американската организация за научно-технически изследвания и стандартизация – дружество на автомобилните инженери (*Society of Automotive Engineers, SAE*) класифицира зарядните станции основно на три нива – ниво 1, 2 и 3 (*Level 1, Level 2* и *Level 3*). Първите две нива зарядни станции условно се наричат станции за конвенционален и ускорен заряд. При тях няма преобразуване на променливо напрежение в постоянно напрежение. Условно станциите от *Level 1* са предназначени за домашна употреба, докато зарядните станции от *Level 2* са за обща обществена употреба и при тях вече може да имат както адаптация на електрическите параметри на захранващата електрическа мрежа към конструктивни и електрически параметри на електромобили, така и допълнителни функции. Станциите от ниво 3 са предназначени за бързо зареждане. Времетраенето е от порядъка на 10 до 30 минути. Основното различие между *Level 2* и *Level 3* е, че *Level 3* осигурява постоянно напрежение за презареждане на батерията на електромобила, както и това, че преобразувателите на напрежение и ток са вградени в самите станции, и се намират извън електромобила.

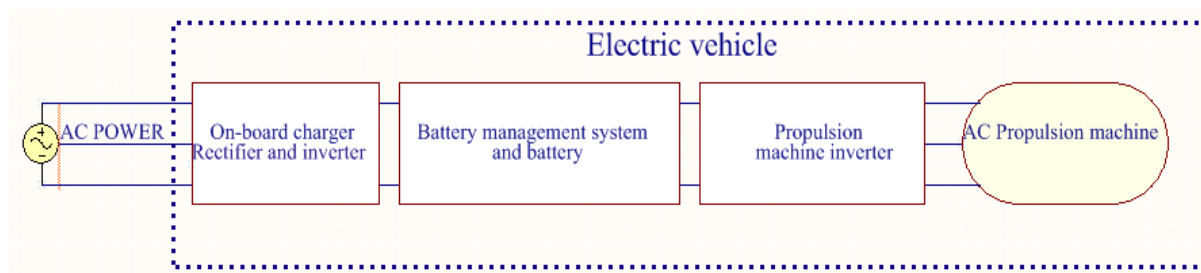
1.3.1. Зарядна станция Level 1

Този тип зарядни станции се използват за малки по размери и капацитет батерии. Позволяват конектора на електромобила да се свърже към обикновен контакт. Времето за зареждане на батерията е приблизително от 8 до 10 часа в зависимост от капацитета на батерията. Зареждането се осъществява само с променлив ток от захранващата мрежа. Зарядното устройство е вградено в електромобила (*on-board charger*). В европейските държави се използва монофазно захранване 230 VAC с предпазител – 10 или 16 А, докато в Съединените американски щати се използва монофазно напрежение 120 VAC и максимален ток 16 А. Зареждането при *Level 1* е твърде бавно. Международният стандарт IEC 62196 дефинира изискванията към конектори и крайници за контактно зареждане на електромобили с

променлив ток до 250 А. Стандарт SAE J1772 покрива необходимата мощност за зареждане до 1.92 kW [19-23].

1.3.2. Зарядна станция Level 2

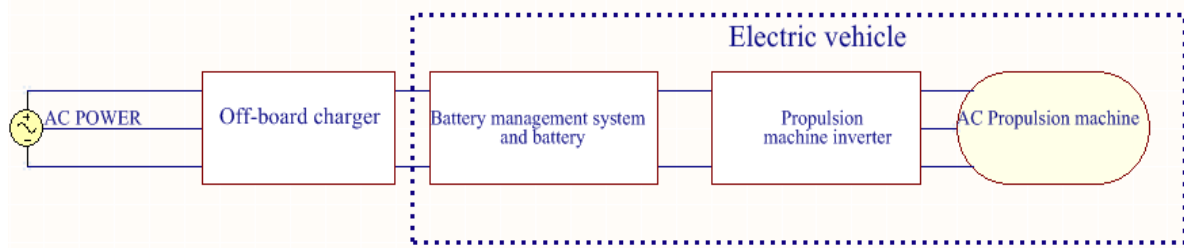
Зарядните станции от това ниво разполагат с оборудване за захранване на електромобила (*Electric vehicle supply equipment, EVSE*) и окабеляване, способно да достави по-високо напрежение в зависимост от изискванията за вида на електромобила – хибриден или изцяло електрически. Захранващото оборудване за електромобилите при зарядни станции *Level 2* използва същия конектор за електромобила, както при *Level 1* зарядна станция. Зареждането е по-бързо спрямо *Level 1*, защото може да достави по-високо напрежение и ток. *Level 2* станцията използва същия конектор, както при *Level 1*. Зарядните станции от второ ниво за захранване с променлив ток са с мощност до 20 kW и позволяват зареждане на батерията от три до седем пъти по-бързо в сравнение със зареждането през обикновен шуко контакт [24-25].



Фиг. 1.2. Блок схема на зарядна станция Level 2.

1.3.3. Зарядна станция Level 3

DC зарядни станции от *Level 3* осигуряват бързо зареждане и са предназначени за публично ползване с поемане на големи потоци от потребители. Те заменят от 8 до 20 станции от ниво 2. Такова зареждане е ефективно, ако батерията разрежена под 80%. Необходимата мощност за захранване на такава станция е от 50 до 350 kW в зависимост от електрическата архитектура - едноабонатна или многоабонатна. Това осигуряване обаче, не може да се осигури от наличната електропреносна мрежа и изграждането на този вид станции е съпроводено с ново проектиране и строителство. Зарядните станции от ниво 3 се оборудват с буферни акумулаторни батерии за поемане на пикови натоварвания. За осигуряване на допълнителна енергия и намаляване на потреблението от захранващата мрежа към тези зарядни станции работят и системи за доставка от възобновяеми енергийни източници.



Фиг. 1.3. Блок схема на зарядна станция Level 3.

1.3.4. Зарядна станция за свръхбързо зареждане

Зарядните системи за свръхбързо зареждане (*Extreme fast charging, XFC*) притежават повече от 350 kW мощност и 800 VDC вътрешно напрежение на DC шината като времето за презареждане на батерията е приблизително 5 мин. *XFC* станциите са проектирани с силови електронни компоненти, насочени към *solid-state* трансформатори (*solid-state transformers, SST*), изолирани DC-DC преобразуватели и предни AC-DC преобразувателни стъпала и контролери. Станцията за свръхбърз заряд може да бъде проектирана от комбиниране на няколко *XFC* системи, за да се осигури понижаване на оперативните и капиталовите разходи, което ще направи инвестицията икономически възвръщаема и осъществима. Проводимото зареждане (*conductive charging*) включва електрическа връзка между входа за зареждане и превозното средство, което е класифицирано в три нива на зареждане като *Level 1*, *Level 2* и *Level 3*, в зависимост от нивото на мощност, както е показано в обобщение в таблица 1.3.[24-30].

Таблица 1.3. Сравнение на различните нива на зареждане на електромобили.

Спецификация	Level 1	Level 2	Level 3 (DC fast charging)	Свръх бърз заряд (Ultra/extreme fast charging)
Мощност на зареждане	1.44 kW – 1.92kW	3.1kW – 19.2kW	20kW – 350kW	>350kW
Тип на зарядното устройство	Вграбавно зареждане	Вградно бързо зареждане	Извънбордово зарядно устройство – бързо зареждане	Извънбордово зарядно устройство – свръх бързо зареждане
Място за зареждане	Жилищен	Частен и Комерсиален	Комерсиален	Комерсиален
Време за зареждане	200км: +/- 20 часа	200км: +/- 5 часа	80% от 200км: +/- 30 минути	Приблизително 5 минути

				висока енергийна плътност
Захранване	120/230VAC, 12A-16A, еднофазен	208/240 VAC, 12A-80A, еднофазен	300/800 VDC, 250A-500A, трифазен	1000VD C, 400A и по-висок - многофазен
Захранващ интерфейс и тип защита	Конт акт; Прекъсвач	Специализирано захранващо оборудване за електромобили (прекъсвач и пилотна функция)	Специализирано захранващо оборудване за електромобили (комуникация и наблюдение на събитие между електромобила и зарядната станция)	Специализирано захранващо оборудване за електромобили (комуникация и наблюдение на събитие между електромобила и зарядната станция)
Стандарт и	SAE J1772, IEC 62196-2, IEC 61851-22/23, GB/T 20234-2	IEC 61851-23/24	IEC 62196-3	IEC 62196 SAE J2836/2 и J2847/2

1.11. Заключение

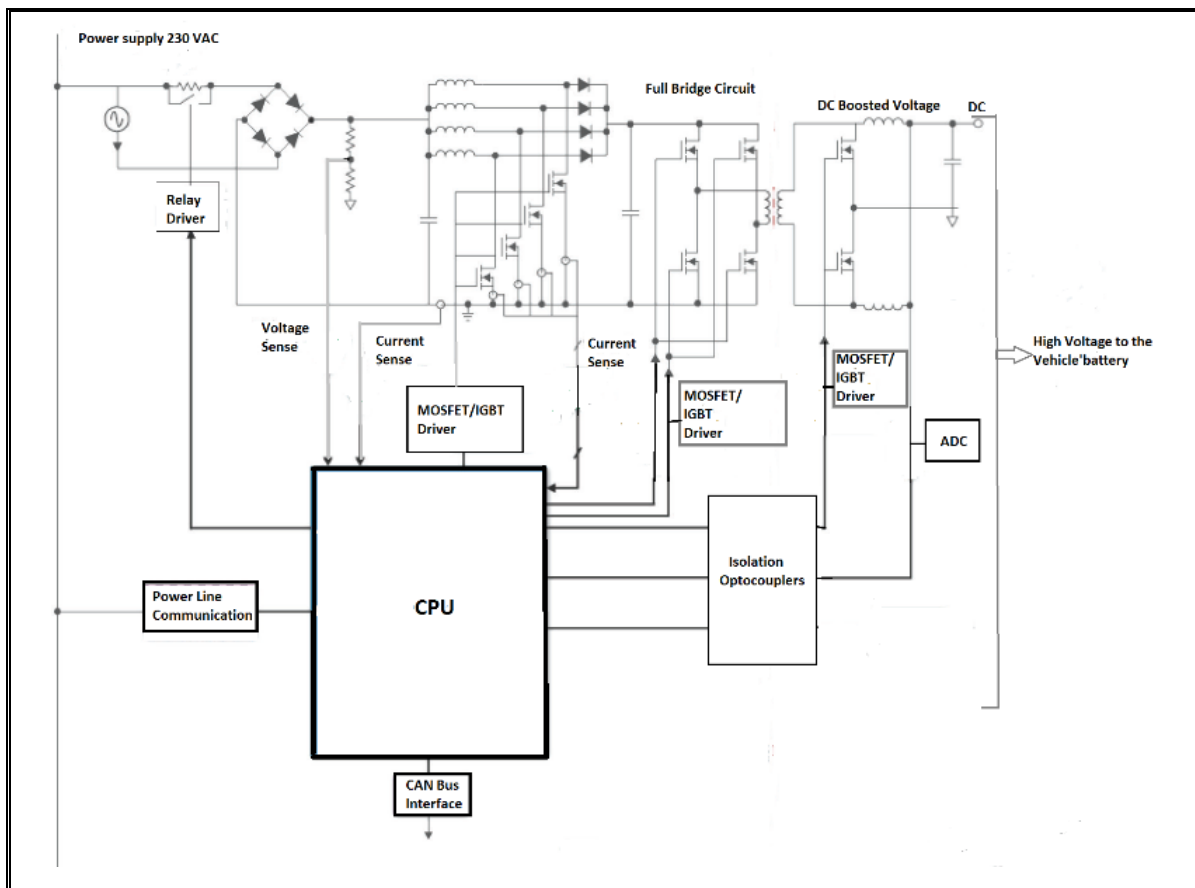
Представени са типовете електромобили и батерии, предимствата и перспективите за развитие на електромобилите, представена е архитектура на станциите за зареждане на електромобили, базирани на зарядни станции за бърз и свръхбърз заряд. Изложеното дава основание да се достигне до заключението, че изучаването на управлението на станции за зареждане на електромобили, е необходима предпоставка за последващи научни изследвания. Стандартизирането на изискванията за зареждане, интелигентни стратегии за контрол и непрекъснатото подобряване на технологиите на батериите са от съществено значение за успешното приемане на електромобили. Производителността на батерията зависи не само от дизайна и типа, но и от характеристиките на зарядното устройство, циклите на зареждане и разреждане, а и от метода за оценка на състоянието на зареждане на батерията (SoC). Оценката на нововъзникващите технологии, стратегии за контрол и бъдещите тенденции в зарядните системи за електромобили са от изключителна важност за проучване на стойностите при намирането на нови решения и подобрения.

ГЛАВА 2. ИЗСЛЕДВАНЕ, ПРОЕКТИРАНЕ И АНАЛИЗ НА СХЕМНИ РЕШЕНИЯ И ТОПОЛОГИИ НА ЗАРЯДНИ УСТРОЙСТВА И СУПЕРКОНДЕНЗАТОРИ КАТО ЧАСТ ОТ ХИБРИДНА СИСТЕМА ЗА СЪХРАНЕНИЕ НА ЕНЕРГИЯ. ИЗСЛЕДВАНЕ И МОДЕЛИРАНЕ НА ЗАРЯДНА СИСТЕМА ЗА НОРМАЛНО И УСКОРЕНО ЗАРЕЖДАНЕ.

Целта на тази глава е изследването и анализът на съществуващи схемни решения и топологии на зарядни устройства, интегрирани в зарядни станции. Също така, в тази глава са представени разработен модел на зарядна система и получените симулационни резултати. Изследвани и анализирани са суперкондензаторите (Supercapacitors, SC) като решение за бързо зареждане за кратко време, както и хибридни системи за съхранение на енергия (Hybrid Energy Storage Systems, HESS). Разработен е модел на зарядна система, позволяваща нормален и ускорен заряд. Получените симулационни резултати верифицират работоспособността на модела.

2.1.1. Архитектура и блок-схеми на зарядна система за електромобили

На Фиг. 2.2. е представена архитектурата на зарядната станция с отделните компоненти. От страна на входа може да има или монофазно или трифазно АС захранване, които са свързани към токоизправителя на системата. Този блок преобразува входящото променливо напрежение във фиксирано постоянно токово напрежение от около 800 V. Това напрежение служи като вход към DC/DC преобразувател, който обработва мощността, стабилизира напрежението и осигурява взаимодействие директно с батерията на електрическото превозно средство. Към етапа на захранването на входа и на изхода на двата етапа присъстват блокове за наблюдение на тока и напрежението. Те служат за контрол, наблюдение и защита. При този етап има контролер, който отговаря за обработката на аналоговите сигнали и осигурява голямо бързодействие. Освен това има различни блокове за контрол на температурата, интерфейс за CAN комуникация, Етернет, серийно комуникация RS485, изолирани и неизолирани DC/DC преобразуватели, захранващи допълнителни спомогателни вериги като вентилатори за охлаждане на радиатори, усилватели и т.н. Изборът на топология за токоизправителя и постоянно токовия преобразувател е от съществено значение на етап идеен проект и последващите етапи при моделиране, разработка и реализация на зарядна система. По-долу ще бъдат представени различни топологии на променливотокови и постоянно токови преобразуватели, използвани за реализация на зарядни системи.

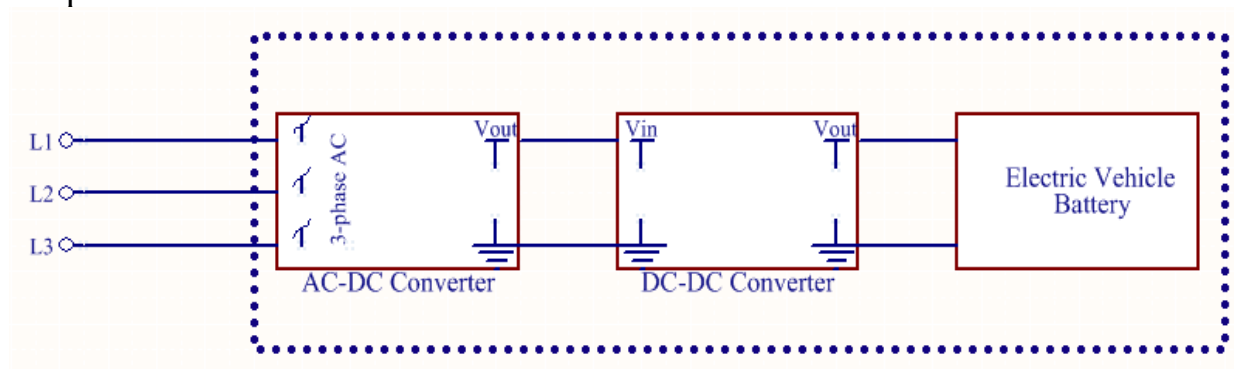


Фиг. 2.2. Архитектурна на зарядна система за електромобили.

Съществуват различни концепции и топологии при реализацията на зарядни системи за бърз заряд на електромобили. Зарядните системи за бърз заряд изискват високомощни преобразуватели, които са способни да зареждат батерията на 80% *SoC* (*State of Charge*) за по-малко от 30 минути. Докато за изграждането на зарядните станции *om Level 1* и *2* се изисква единичен преобразувател за осигуряването на необходимата мощност (при *Level 1* до 2 kW максимална мощност, а при *Level 2* от 3.1 kW до ~20 kW), то при DC зарядните станции за бърз заряд основният принцип при изграждането им е на база модулна структура като модулните преобразуватели са подредени (стиковани) и са поставени извън превозното средство, защото са твърде обемисти, за да бъдат инсталирани в превозното средство. Независимо от избрания подход, захранваните от мрежата модулни структури, интегрирани в зарядната станция, работят при променливо входно и постоянно изходно напрежение. Ето защо те най-често се състоят от токоизправителен блок и високочестотен постояннотоков преобразувател.

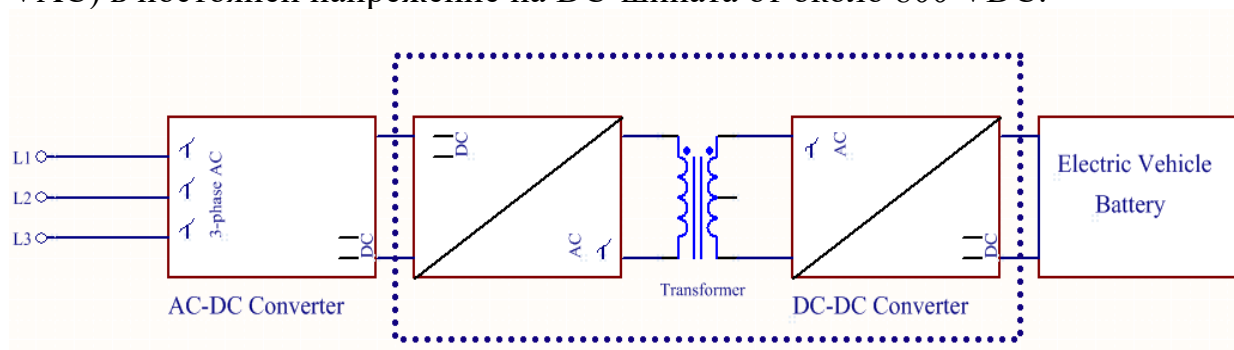
Всеки преобразувател е свързан с неговото звено, състоящо се от силови прибори като MOSFET, IGBT, SiC транзистори, драйвери за управление на гейтовете на транзисторите, схема за следене и управление на тока и напрежението, както и контролер. Първото звено в AC/DC частта регулира параметрите на зарядното устройство по отношение на захранващата мрежа, а второто звено в DC/DC частта управлява режимите на заряд на батериите. Най-важните параметри са плътността, както и нейната

ефективност. По-високата ефективност на системата води до по-ниски загуби, намалява топлинния стрес върху приборите и допринася за по-дълга продължителност на работата на компонентите и т.н. И двата преобразувателя могат да имат различни топологии и да бъдат подредени заедно по различни начини с и без изолация между тях. На следващата Фиг. 2.3. са показани основните топологии на AC-DC преобразуватели, използвани за изправяне на променливото напрежение в постоянно напрежение.



Фиг. 2.3. Опростена блокова схема на зарядна система с трифазен AC-DC токоизправител и постояннотоков DC-DC преобразувател.

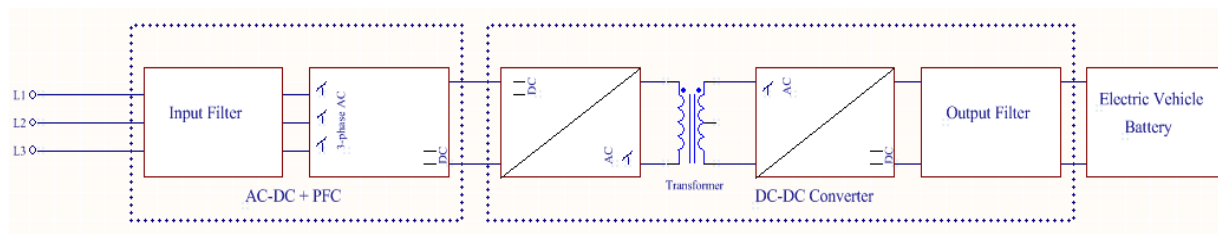
Когато е необходимо галванично разделяне, то се реализира посредством високочестотен разделителен трансформатор и в рамките на постояннотоковия преобразувател, поради значително по-високата работна честота и поради оптимизирания размер и цена на трансформатора. Преобразуването на променливия ток в постоянен е първото ниво на преобразуване на мощността в зарядната станция за електромобили. Този етап преобразува входното променливо напрежение от мрежата (380-415 VAC) в постоянен напрежение на DC-шината от около 800 VDC.



Фиг. 2.4. Блокова схема на зарядна система, изградена от токоизправител и постояннотоков DC-DC преобразувател с галванично разделяне.

Към представената на Фиг. 2.4. блокова схема могат да бъдат добавени допълнителни звена в зависимост от изискванията към функционалността и характеристиките на системата. По отношение на входния токоизправител, от съществено значение е постигането на висок фактор на мощността, посредством *PFC* (*Power Factor Corrector*, *PFC*) стъпало, като целта му е да

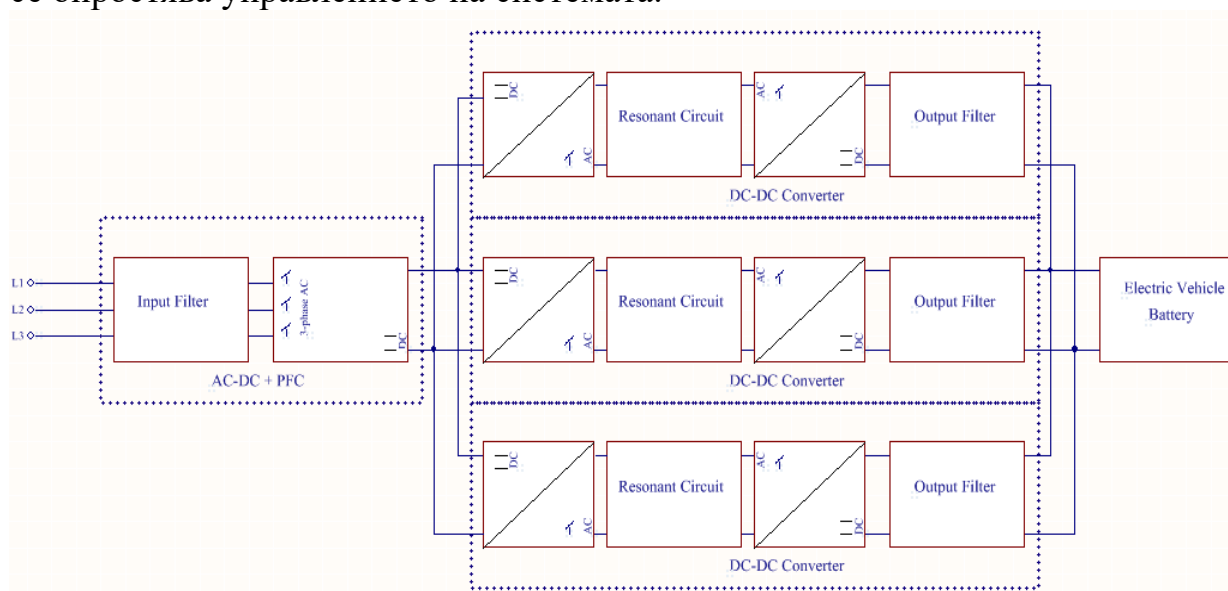
държи тока близо до синусоидалната форма от електрическата мрежа. Входният ток на *PFC* е във фаза с входното захранващо напрежение. Важна особеност на *PFC* управлението е сензора за напрежение, който измерва напрежението върху товара, както и токовият сензор, който измерва тока на бобината на DC-DC преобразувателя. Разширената по този начин блокова схема на зарядна станция е представена на Фиг. 2.5.



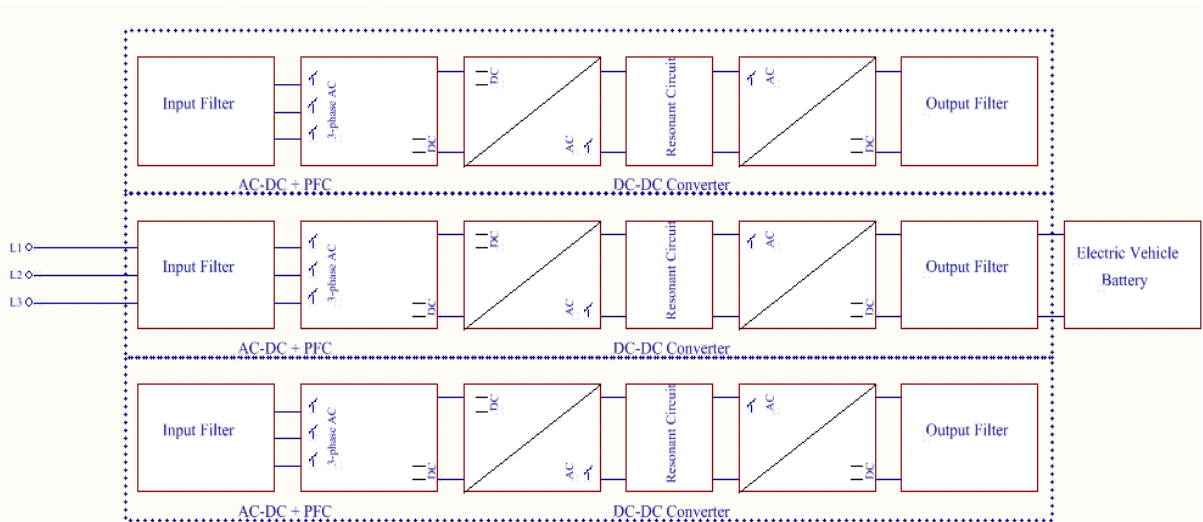
Фиг. 2.5. Разширена блокова схема на зарядна станция.

Реализация на модулен принцип може да бъде осъществена както по отношение на целия преобразувател, така и само на отделни звена от него.

На Фиг. 2.6. е представена примерна блокова схема на зарядна станция, постоянноковият преобразувател на която е реализиран на модулен принцип. Избирането на подход с модулно изграждане на част от системата позволява използване на филтрови или други блокове като общи за отделните модули. Това често води до възможност за по-евтина реализация на системата, а когато общите звена са активни преобразуватели, значително се опростява управлението на системата.



Фиг. 2.6. Блокова схема на зарядна станция с реализация на DC-DC преобразувателя на модулен принцип.



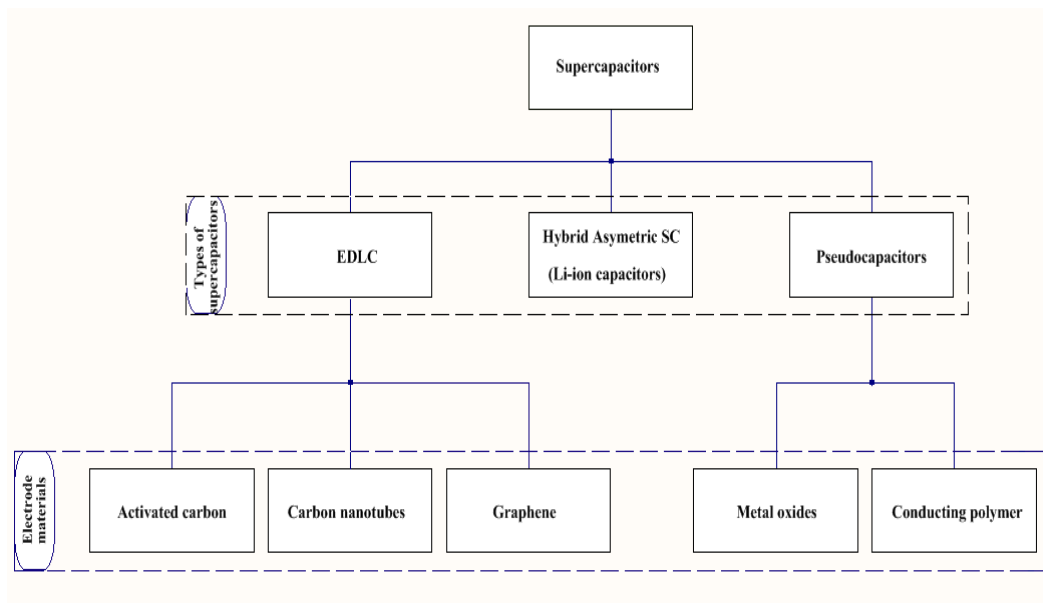
Фиг. 2.7. Блок схема на зарядна станция за бърз заряд, реализирана изцяло на модулен принцип.

Подходът, който ще бъде избран за реализация на модулна система за бърз заряд, от една страна, и изборът на блокова схема, от друга страна, е строго индивидуален и зависи от анализа и специфичните изисквания за конкретното приложение.

2.5. Суперкондензатори като източник на енергия в хибридните системи за съхранение на енергия.

Суперкондензаторите са подходящо решение, когато е необходимо бързо зареждане, за да се осигури енергия за кратко време, докато батериите често се избират, за да осигуряват енергия за дълго време и тъй като могат да се зареждат много бързо. Освен това те са подходящи и по-ефективни за преодоляване на пропуски в мощността, продължаващи от няколко секунди до няколко минути. Те могат да бъдат класифицирани и разграничени главно в три вида, в зависимост от конфигурацията на клетката или системата за съхранение на енергия: електрически двуслойни кондензатори (*electrical double layer capacitors, EDLS*), хибридни асиметрични кондензатори и псевдокондензатори. Класификацията на суперкондензаторите е показана на Фиг. 2.27. По отношение на EDLC, съхранението на електрическа енергия се постига чрез разделяне на заряда в двоен слой на Хелмхолц, действащ като граница между проводящия електрод и електролита. Псевдокондензаторите имат полимерни проводящи електроди или метален оксид базирана на електроди, съчетаващи електростатичния и псевдокапацитивния процес на съхранение на заряда. Хибридните кондензатори имат асиметрични електроди, съставени от двуслоен кондензаторен електрод и псевдокапацитивен електрод, като по този начин включват най-добрите характеристики на двете технологии. Литиево-йонните кондензатори използват един електростатичен електрод и един електрохимичен електрод, което позволява по-добра енергийна плътност и характеристика на

саморазреждане, в сравнение с EDLC кондензаторите, повече цикли на зареждане-разреждане, отколкото литиево-йонна батерия.



Фиг. 2.27. Класификация на различни типове суперкондензатори.

2.5.1. Изследване, анализ и сравнение на различни топологии на хибридни системи за съхранение на енергия (*hybrid energy storage system, HESS*).

От съществено значение за проектирането и изграждането на системите е да се използват и внедряват качествени компоненти за съхранение на електрическа енергия по отношение на техния живот, енергийна плътност, плътност на мощността, ефективност на цикъла, размер, за да се постигне по-висока производителност на съхранение. Комбинирането на двата компонента – батерия и суперкондензатор – за образуване на хибридна система за съхранение на енергия (HESS) може да повиши цялостната ефективност на електрическите превозни средства чрез съхраняване на енергията от възможностите за ускоряване до забавяне на превозното средство. Известно е, че в конвенционалните HESS системи, батерията е директно свързана към DC шината, докато в полумостовия DC-DC преобразувател батерията е поставена между суперкондензатора и DC шината. Основното предимство на суперкондензаторите е способността за непрекъснато зареждане и разреждане, и способност за работа с висока мощност в сравнение с батериите. При този подход, за да се осигури съхранение на енергия за електрически превозни средства е включването на суперкондензатори в комбинация с батерии. В енергийна система батерия-кондензатор, галваничната батерия служи като източник на енергия за дълъг пробег, докато суперкондензаторът се използва като източник на пикова мощност, осигуряващ подобрения в живота на батерията, мощност за ускорение и възможност за пълно регенериране на енергия по време на

спиране, което подобрява енергийна ефективност и оползотворяване на електрическата енергия. Цялостната производителност на суперкондензаторите зависи от избраните материали за електрода, електролита, сепаратора и токовия колектор. Електролитите на суперкондензаторите трябва да бъдат внимателно подбрани, за да се намали тяхното вътрешно съпротивление.

Известни са много топологии на HESS системи като суперкондензатор/батерия, батерия/суперкондензатор, полумостова (*half bridge*), мостова (*full bridge*) и топологии с множество входни преобразуватели, които са били изследвани, разработени, проектирани и изследвани през последните години. Както бе споменато по-горе, комбинацията от батерия и суперкондензатор образува HESS система. Има няколко основни предимства от използването на хибридна система за съхранение на енергия, които могат да бъдат постигнати: 1) удължаване на живота на батерията, 2) повишаване на общата ефективност на задвижването, 3) увеличаване на мощността на задвижването.

2.6. Заключение

В тази част от дисертацията се разглеждат и анализират подробно различни видове суперкондензатори и батерии и техните характеристики. Извършени са общ преглед и изследване на различните топологии на HESS, техните фундаментални основи и характеристики при проектиране. Анализът на текущите конфигурации на топологията на HESS системите, технологиите за батерии и съвременните иновации в областта на суперкондензаторите разкрива предимствата, които те предоставят на електрическите превозни средства по отношение на размер, тегло и голямо увеличение на скоростта. В подробно анализираните конфигурации, суперкондензаторите биха могли да изгледат тока от и към батерията. Като се имат предвид техните възможности за цикъл на зареждане/разреждане, висока плътност на мощността, способност за работа при високи температури, суперкондензаторите могат да увеличат цялостната производителност на системата и да удължат живота на батерията. Освен това, суперкондензаторите могат да предложат алтернативен подход за посрещане на нарастващите изисквания на електронните устройства и хибридните системи за съхранение на енергия.

ГЛАВА 3. ПРОЕКТИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЮОЯ ПОНИЖАВАЩ DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ С РЕЖИМ НА УПРАВЛЕНИЕ НА ПРЕДСКАЗВАЩ ПИКОВ ТОК. МОДЕЛИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЗАРЯДНА СИСТЕМА ЗА БЪРЗ

Целта на изследването, представено в тази глава, е проектиране и изследване на ZVS понижаващ преобразувател на постоянен ток в режим на управление на предсказващ пиков ток. Предложеният подход напълно доказва високата ефективност и прецизно управление на преобразувателя, видно и от получените резултати при проведените симулации на модела. Микропроцесорите от най-ново поколение включват ефективни DC/DC импулсни захранващи устройства (SMPS), които трябва да могат да доставят регулирани 1,5 V или по-ниски захранващи напрежения, високи токове до 100 A при много големи преходни процеси на натоварване (di/dt). Известни са две разновидности на меката комутации в преобразувателните устройства: комутация при нулево напрежение (*Zero Voltage Switching, ZVS*) и комутация при нулев ток (*Zero Current Switching*), които решават до голяма степен съществуващи проблеми на конвенционалните твърди превключващи преобразуватели. В хода на комутационните преходи тези техники осигуряват нулево превключване на напрежението или тока, което намалява загубите при превключване и подобрява надеждността на захранващите устройства. За да се повиши ефективността на електрическата енергия на DC/DC преобразувателите, е необходимо да се намалят загубите при превключване в силовите полупроводникови елементи. Най-популярното решение за такова приложение е понижаващ (*Buck*) ZVS преобразувател. За преобразуватели за ниско напрежение, базирани на мощни MOSFET, се използва техника за комутация с нулево напрежение, за да се позволи работа с висока честота и да се минимизират както шумът, така и загубите при превключване. Регулирането на DC-DC преобразувател с нулево напрежение се извършва чрез превключване на транзистори за определен работен цикъл. Изходното напрежение се регулира чрез коригиране на ефективния работен цикъл в дизайна на ZVS. Последното се извършва чрез промяна на честотата на преобразуване и чрез промяна на ефективното време на работа. Честотата на превключване е независима от загубите при превключване, следователно честотата може да се увеличи до много високи стойности.

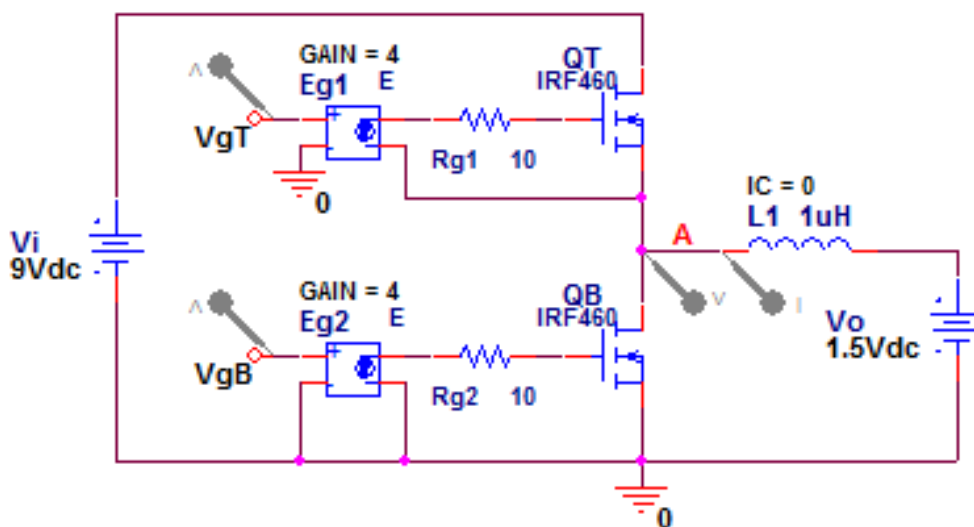
3.1. Моделиране на ZVS DC-DC Buck преобразувател с режим на управление на предсказващ пиков ток (predictive peak current mode control)

При определен начин на управление и оразмеряване на резонансните преобразуватели е възможно постигане на мека комутация и при отпушване и при запусване на транзисторните ключове. Това се постига обикновено чрез допълнителни пасивни елементи и по-сложен алгоритъм на управление на схемата. За да се осигури регулиране на изходното напрежение в целия

диапазон на товара при поддържане на условията за мека комутация и при запусване и при отпушване на транзисторни ключове, в някои схеми се налага и добавянето на допълнителни транзисторни ключове. В DC-DC преобразувателите индукторният ток има триъгълна форма, следователно е възможно да се регенерира. Фактът, че токът на индуктивния елемент е строго контролиран, води до по-опростена динамика на преобразувателя и позволява стабилно широкочестотна управление при приложения с DC-DC преобразуватели. Освен това при режимът на управление на пиков ток има бърза защита на превключване от свръх ток.

Предвид факта, че токът на транзистора или индуктивния елемент е с бързо променяща се форма на вълната при високи честоти, в диапазон от стотици kHz до MHz, то имплементирането на аналогово програмирано управление на тока в цифрово е изключително трудоемко по отношение на хардуерната реализация. Реализираната предсказваща цифрова техника за управление е въз основа на формата на вълната на тока на индуктора, предсказана от минималната стойност и максималната стойност на тока на индуктивния елемент и изходното напрежение.

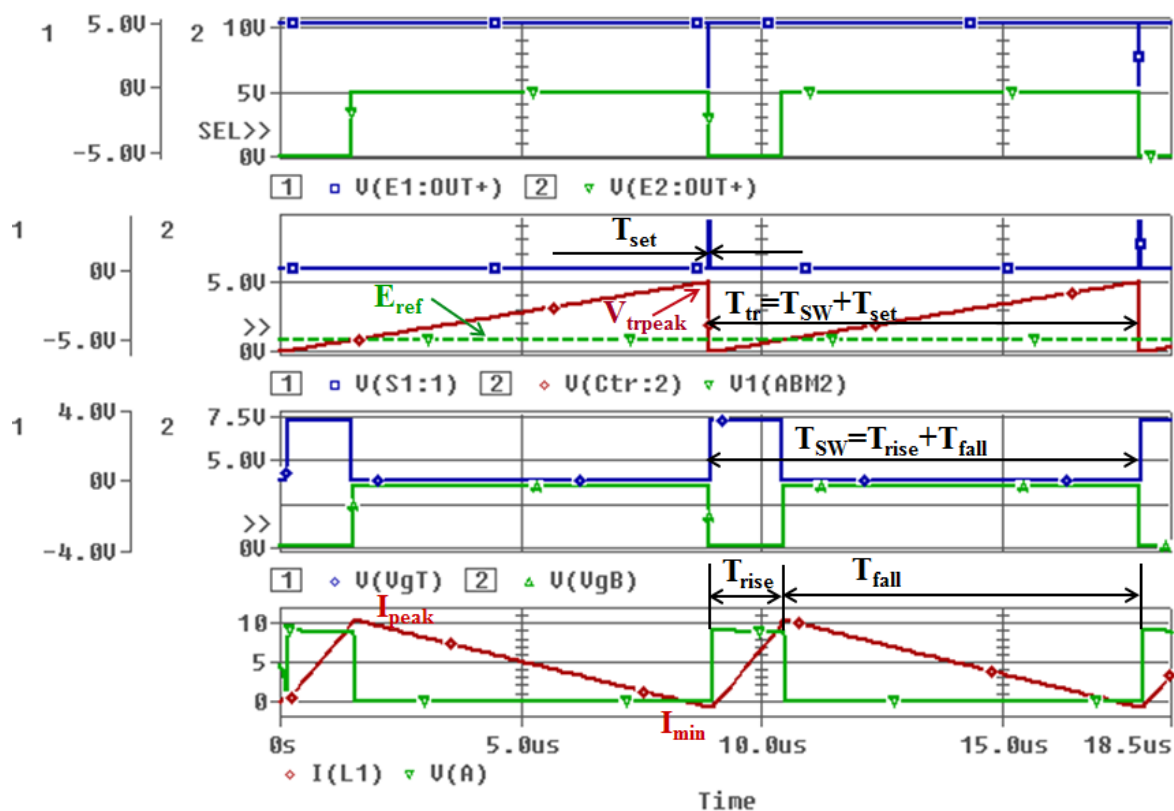
Следващата Фиг. 3.2. илюстрира принципната схема на изследвания ZVS понижаващ преобразувател.



Фиг. 3.2. Принципна схема на изследвания ZVS Buck понижаващ преобразувател.

Понижаващият DC-DC преобразувател трябва да доставя контролирано постоянно токово изходно напрежение при различни условия на натоварване и входно напрежение. Проектираният и симулиран ZVS Buck преобразувател е с входно напрежение от 9 VDC и изходното напрежение е 1,5 VDC. На Фиг. 3.3 времедиagramите, получени при симулациите на модела с програмния симулатор на *Cadence PSpice*. Свойствата на предсказващия режим на пиковия ток са разгледани при модулация на задния фронт. Времедиagramата на тока на индуктора съответства на работа в стационарно състояние, като в този случай целта е пиковия ток да следва референтния. Следващият

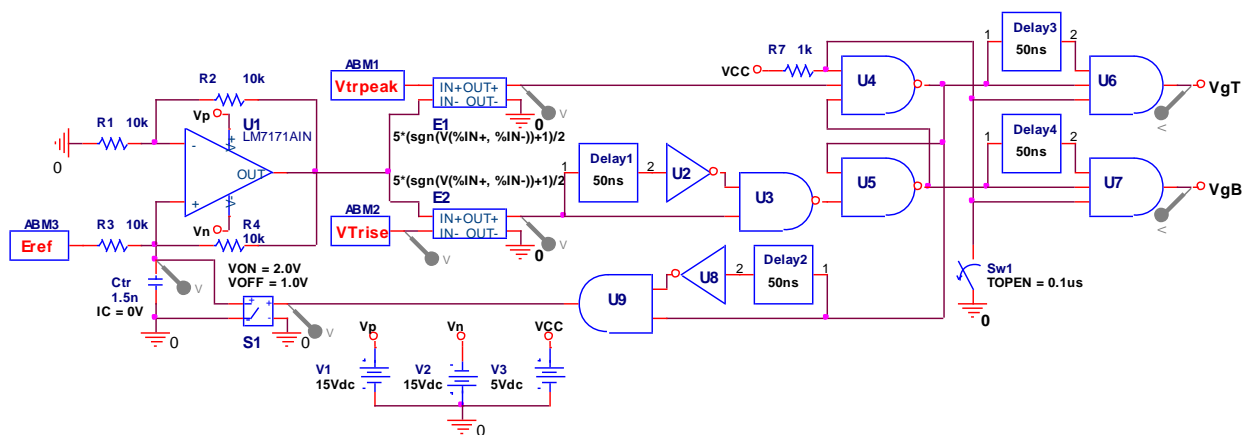
коэффициент на запълване се изчислява така, че пиковият ток във всеки следващ цикъл да е равен на референтната стойност.



Фиг. 3.3. Времедиаграми, илюстриращи връзката между T_{sw} and T_{tr} .

Периодът на превключване на преобразувателя T_{sw} се формира от два времеви интервала: а) T_{rise} – интервалът, през който горният транзистор (QT) е отпушен и при който токът на бобината нараства до стойността на I_{peak} , и б) T_{fall} – интервалът, през който долният транзистор (QB) е отпушен и токът на бобината намалява до стойността I_{min} .

На следващата Фиг. 3.6. е представена реализирана логическа система за управление контролер) на гейтовете на транзисторите. В изследваната схема $E1$ и $E2$ са елементи на идеализиран модел на компаратор. Времедиаграмите са представени на Фиг. 3.4. Използването на идеализирани компаратори допринася за повишаване на производителността на симулираната верига.

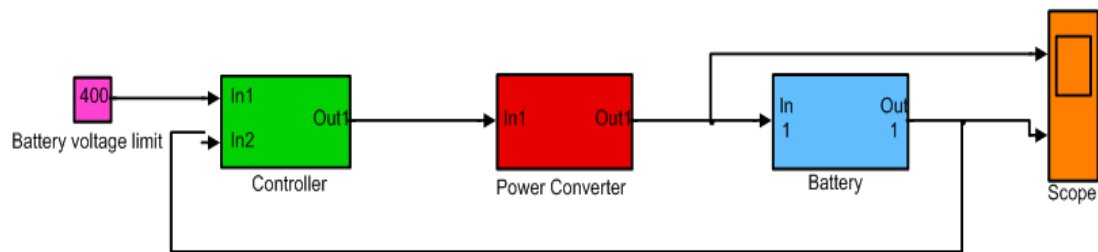


Фиг. 3.6. Логическа схема за управление (драйвер) на транзисторите на проектирания понижаващ ZVS преобразувател в режим на управление на предсказващ пиков ток.

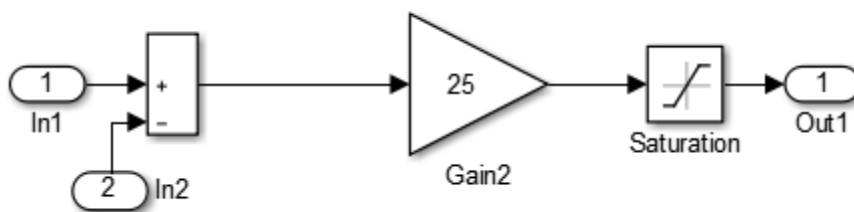
Компараторът $E1$ задава RS тригера в състояние $U4 = 1$ и $U5 = 0$, когато изходният ток има стойност I_{min} , където $VgT = 1$ и транзисторът QT е отпушен. Когато изходният ток достигне стойността I_{peak} , компараторът $U1$ променя състоянието на тригера RS ($U4 = 0$ и $U5 = 1$). Транзисторът QT е запушен, а транзисторът QB се отпушва.

3.2. Моделиране на зарядна система за бърз заряд за батерии на електромобили

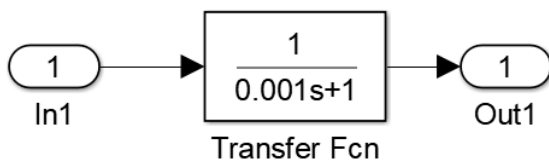
Има няколко топологии на преобразуватели, които могат да се използват за приложения за зареждане на батерии. Системата за зареждане на батерии за електромобили се състои от AC-DC токоизправител, последван от DC-DC преобразувател, който трябва да генерира постоянно напрежение, необходимо за батерията. На първо място, в AC-DC преобразувателите има различни опции за избор, вариращи от еднофазни до трифазни. От друга страна, трифазните преобразуватели могат също да бъдат с меко или твърдо превключване. На фиг. 3.8. е представен опростен модел на зарядната система, имплементиран в MATLAB/Simulink. Моделът на зарядната система се състои от три основни блока – батерия, силов преобразувател и регулатор (контролер). Моделът на преобразувателя на фиг. 3.11. е представен с предавателна характеристика и инерционно звено, с което се отчитат закъснението заради наличието на филтрови елементи, което се отчита чрез поставяне на сегменти с времезакъснение. Моделът описва основните зависимости при бавен и ускорен заряд на батерията и ограничение 400V, за да не се зарежда батерията над тази стойност. Моделът на регулатора на фиг. 3.10. включва пропорционален P-регулатор с коефициент 25. Моделът на зарядната станция за батерии е симулиран чрез MATLAB/Simulink.



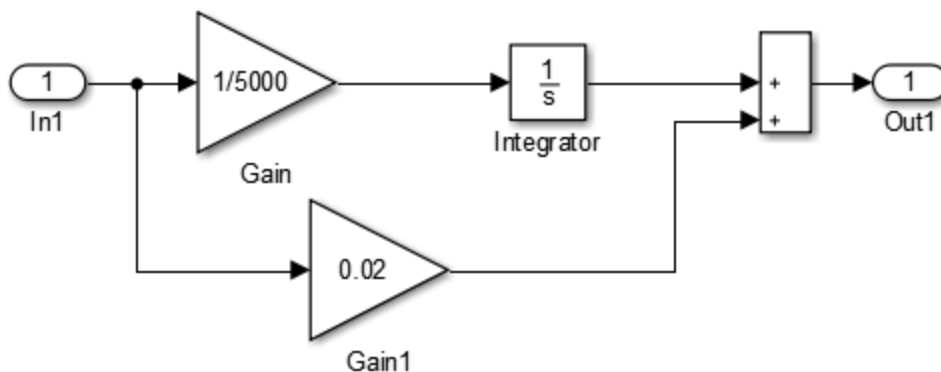
Фиг. 3.8. Модел на зарядната система, реализирана в средата на MATLAB/Simulink.



Фиг. 3.9. Модел на регулатора контролера).



Фиг. 3.10. Модел на преобразувател.

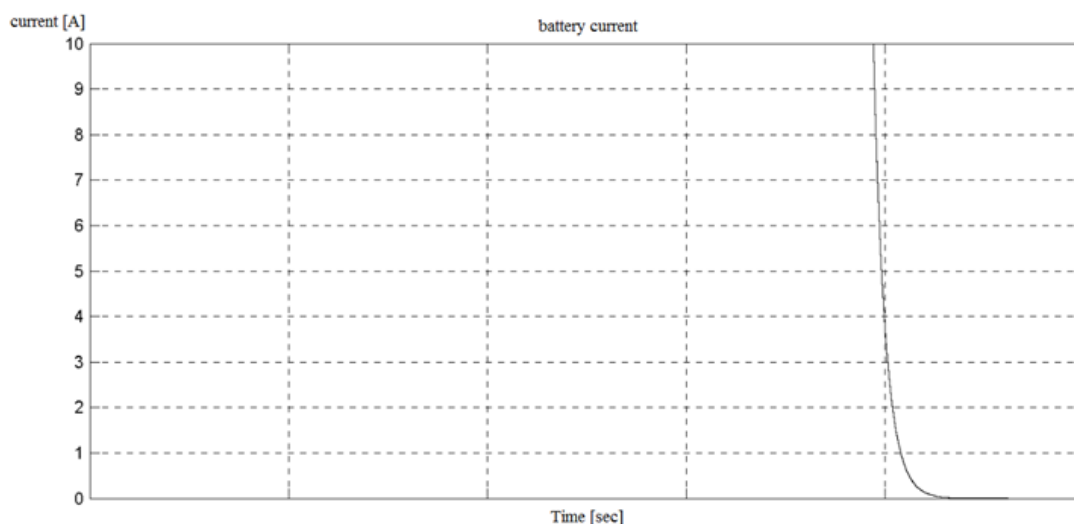


Фиг. 3.11. Модел на батерията.

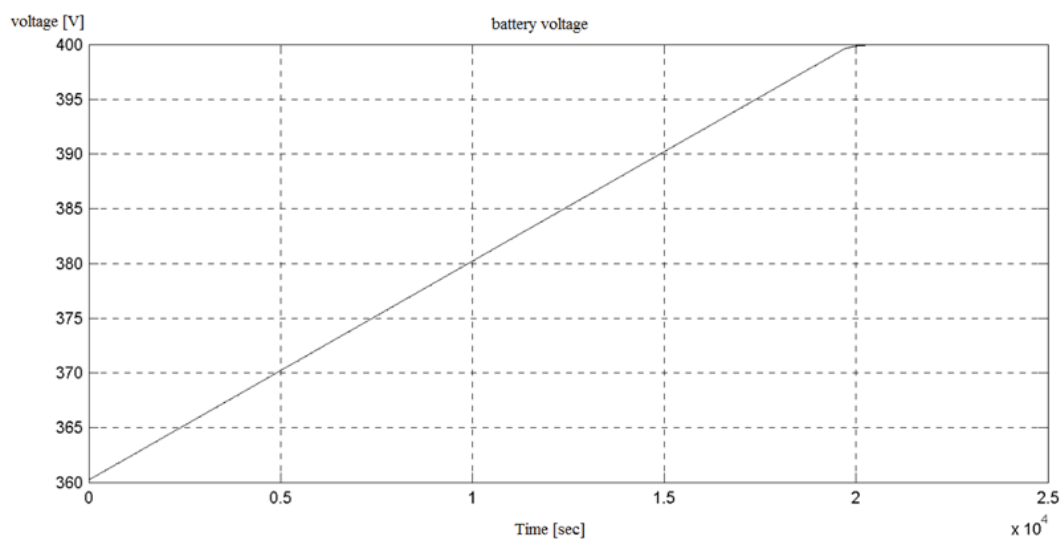
За да се симулират характеристиките на батерията, са предложени различни модели на батерията, като термичен модел, модел на еквивалентна схема и електрохимичен модел. Обикновено моделите на еквивалентна схема се използват за симулиране на динамичното поведение на батерията.

3.2.1. Анализ на симулационните резултати

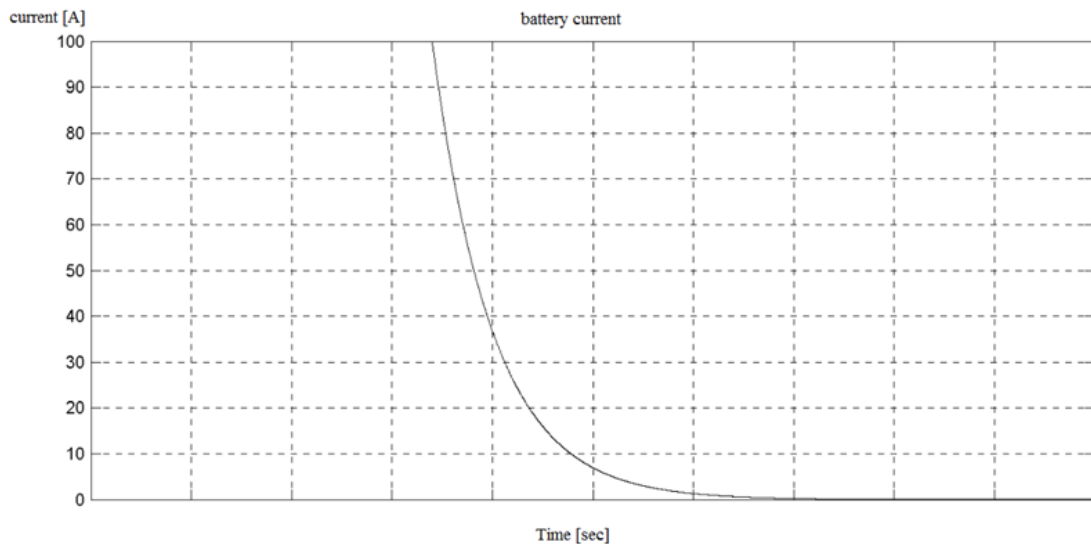
Графичните резултати на Фиг. 3.13. до Фиг. 3.16. представляват резултатите от симулацията на зарядната станция при нормално зареждане - при ток на зареждане 10А и ускорено зареждане при ток на зареждане 100А. Напреженията на елемента за съхранение на енергия са дадени, както следва: за случая на нормален заряд (Фиг. 3.14.) и за случая на ускорен заряд (Фиг. 3.16.). От резултатите от симулацията може да се види, че зарядната система успешно обработва заданието и работи както при ускорен процес на зареждане, така и по време на нормален процес на зареждане.



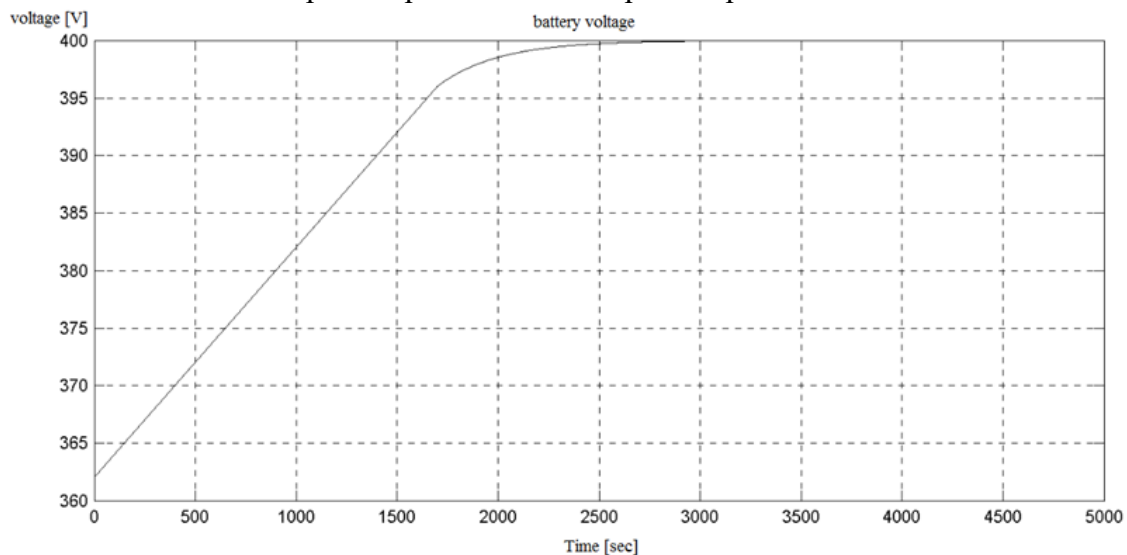
Фиг. 3.13. Нормално зареждане на батерията при постоянен ток 10 А.



Фиг. 3.14. Константно напрежение на батерията.



Фиг. 3.15. Ускорено зареждане на батерията при постоянен ток 100 А.



Фиг. 3.16. Константно напрежение на батерията.

3.3. Заключение

Проектираният понижаващ DC-DC преобразувател с комутация при нулево напрежение с режим на управление на предсказващ пиков ток беше успешно реализиран и симулиран в средата на PSpice. Понижаващият преобразувател с комутация при нулево напрежение може да работи при висока честота на превключване с висока ефективност при правилно оразмерени стойности на компонентите. В допълнение, управлението на меката комутация спомага да се намали разсейването на мощността на транзисторите. Изчислени са триъгълното напрежение и изходния ток с различни амплитуди. Получените резултати от симулацията потвърждават валидността на предложения модел. Получените уравнения са потвърдени с точност. Предложеният метод за управление на понижаващ ZVS п DC-DC преобразувател с режим на управление на предсказващ пиков ток и моделът

на логическата схема за управление могат да бъдат имплементирани и реализирани в интегрална схема.

Изследваната зарядна система представлява опростен модел на система за зареждане, симулирана в нормален и ускорен режим на зареждане.

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЗАРЯДНА СИСТЕМА, БАЗИРАНА НА МИКРОГАЗОВА ТУРБИНА И СУПЕРКОНДЕНЗАТОР

Целта на работата, представена в тази глава, е реализирането и изследването на зарядна система за бърз заряд на електромобили. За постигането на тази цел са проектирани и реализирани и модели на микрогазова едновалова турбина, двупосочен DC-DC преобразувател, суперкондензатор, имплементирани в цялостния модел на зарядна система. Реализиран и изследван е цялостният модел на зарядната система при различни цикли на зареждане. Представени са симулационни резултати, верифициращи работоспособността на модела.

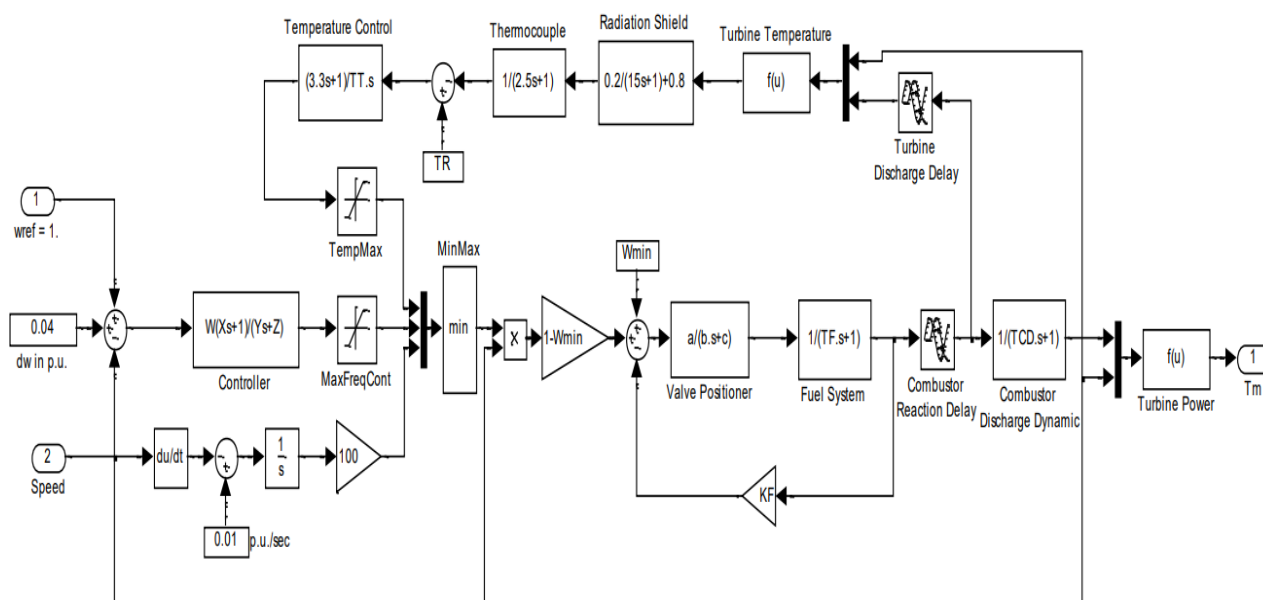
Газовите турбини представляват топлинни двигатели, които намират широко приложение в продължение на вече 40-50 години в системите за едновременно производство на топлинна и електрическа енергия. Варирането им в широк диапазон от мощности, от няколко киловата до над 300 MW, позволява използването им както в локални когенерационни системи, така и в големи топлоелектрически централи. Също така могат да бъдат използвани като основен или резервен източник на енергия.

4.1. Класификация и принцип на действие на микрогазовите турбини.

Микрогазовите турбини (*Micro gas turbine, MGT*) стават все по-популярни в днешно време в разпределените и когенерационни системи. Те имат множество предимства, сред които компактен размер, високоскоростни турбогенератори, ниско ниво на шум, характеристики с ниски емисии и висока ефективност чрез използването на рекуператор с много по-бърза реакция от конвенционалните турбини. Като високоефективни газови турбини, в съвременните системи за електроснабдяване се използват и газови микротурбини. Предимства на микротурбините се явяват вградената възможност за когенерация и тригенерация, пълната автономност на системата, големият избор на възможни горива, високият КПД (85%), производството на електроенергия с високо качество и компактни размери. Множество компании разработват газови турбини, които се използват предимно за задвижвания в различни индустрии или за голямо производство на енергия от десетки до стотици MW. Като цяло, газовите турбини са най-чистите устройства за изгаряне, които могат да се адаптират към различни горива, като по този начин създават нетна въглеродна неутрална екосистема с помощта на биогорива. Микротурбините предлагат няколко потенциални предимства в сравнение с други технологии за производство на енергия в малки количества, включително - малко на брой движещи се части, компактни размери, ниско тегло, по-добра ефективност, по-ниски емисии, по-

ниски електрически разходи и възможност за оползотворяване на отпадни горива.

Моделираната и изследвана микрогазова генерираща система е едновалова, като е реализиран на базата на модел на Роуен (Rowen's model). Моделът е имплементиран в средата на MATLAB/Simulink. На следващата Фиг. 4.3. е показан моделът на микрогазова турбина за зарядна станция, реализирана в MATLAB/Simulink. Вземайки предвид изложениия преглед на литературата, може да се установи и да направи заключение, че моделът на Роуен дава висока точност при използване на относително малко изчислителни ресурси, но обикновено тези модели отчитат само някои специфични процеси в турбината или са по-сложни, като по този начин не позволяват постигането на големи времена за симулация (стотици или хиляди секунди), използвайки стандартни компютърни архитектури, като тези, налични в университети и изследователски центрове.

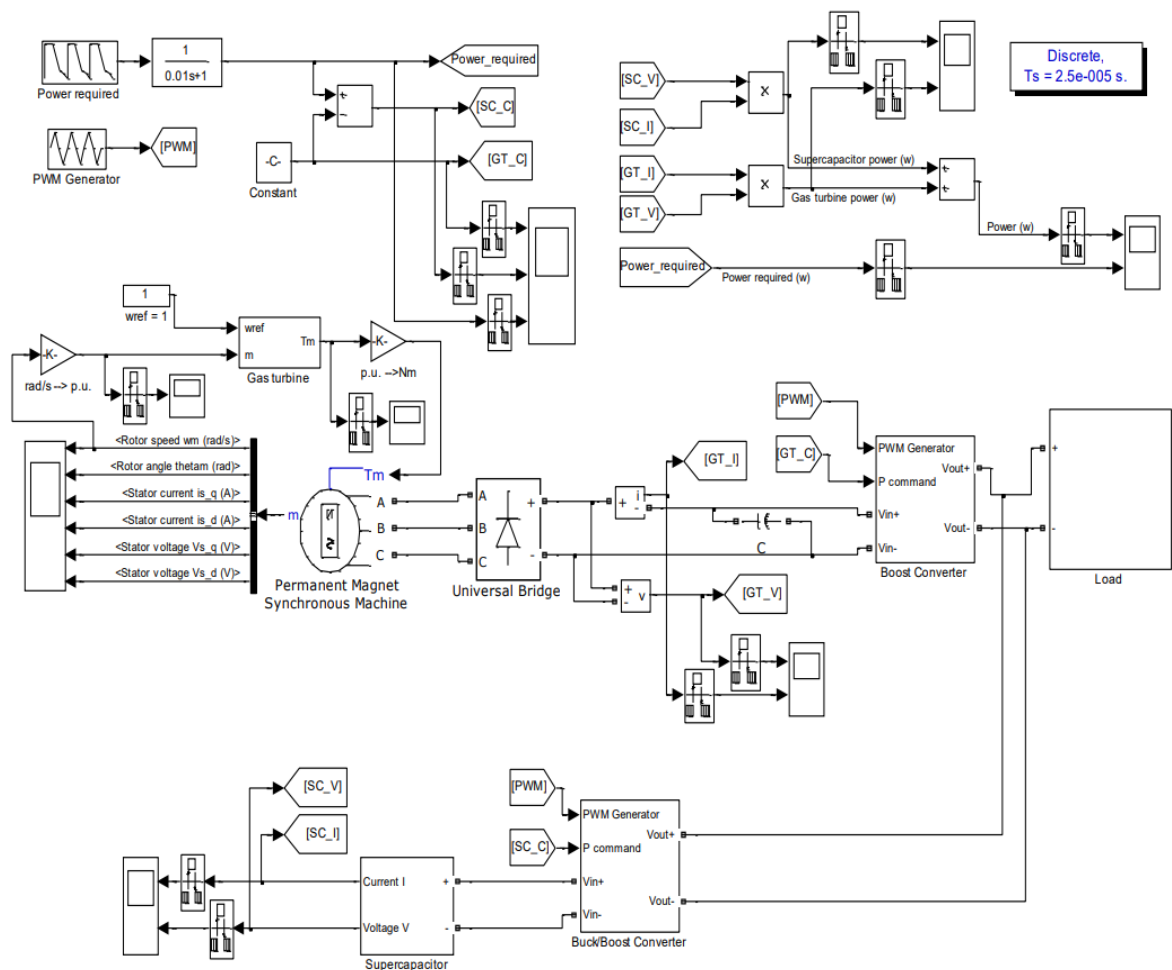


Фиг. 4.3. Simulink модел представящ реализацията на опростена едновалова микрогазова турбина.

По правило, моделът на газовата турбина, базирана на Роуен, използва метода р.у. (*per unit*), с изключение на температурите. Затова, когато този модел е добавен към модела на цялата система, два усилващи блока са добавени преди и след него, което преобразува от SI към р.у. във входа и от р.у. към SI в изхода. Актуалните еквиваленти на единичните стойности за машини са различни.

Микрогазовата турбина се свързва с товара чрез AC-DC токоизправител и повишаващ (*Boost*) DC/DC преобразувател. Представени са различни профили на натоварване (цикли на зареждане) на електрическия автомобил *Nissan Leaf* на Фиг. 4.5. Товарен режим 2 е реализиран в блока „Load“ в

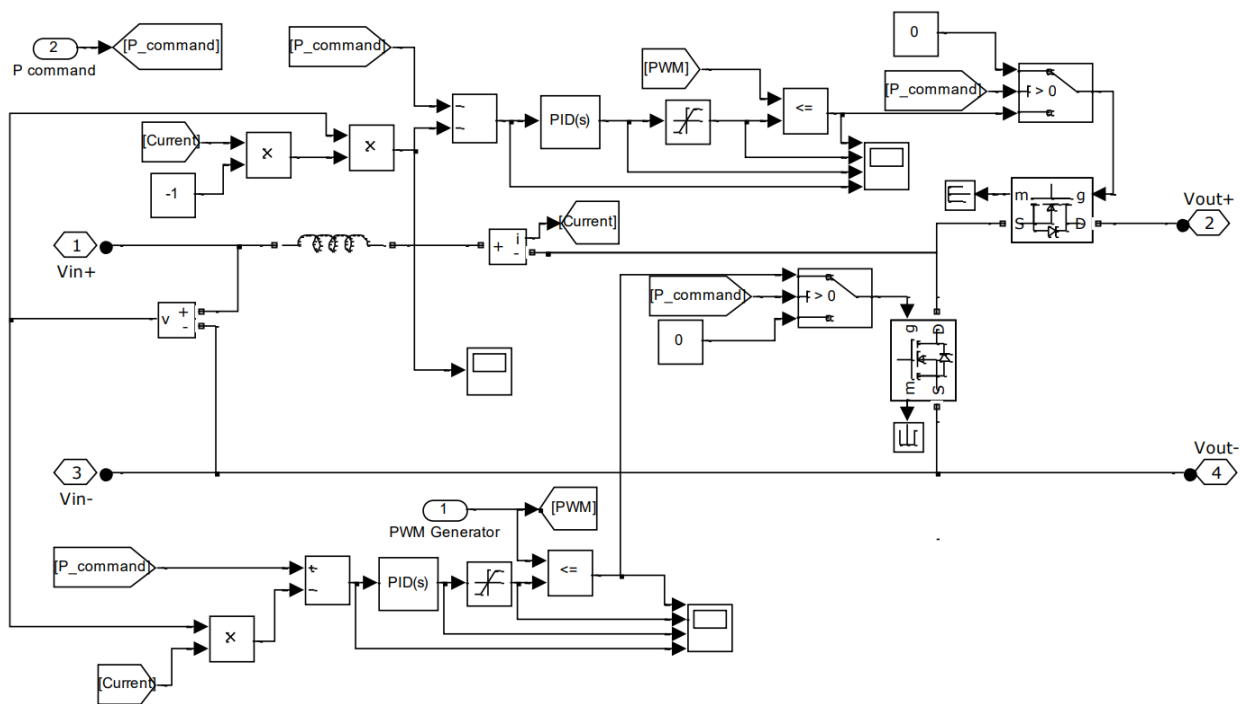
модела. Референтната стойност на скоростта на газовата турбина е зададена на 1 р.у. в целия процес на симулация.



Фиг. 4.4. Модел на цялостната зарядна система на електрически превозни средства, базирана на микрогазова турбина и суперкондензатор.

Стратегията на системата за управление е да поддържа работата на микрогазовата турбина близо до номиналната мощност и с помощта на суперкондензатор (SC) да компенсира недостига/излишъка на енергия по време на процеса на зареждане.

Реализацията на MATLAB/Simulink модела на двупосочния DC-DC преобразувател е показана на Фиг. 4.6. Класическа силова схема с два транзистора и съответно - при моделирането са използвани обратни диоди. Системата за управление е необходима за обръщане на посока на енергията от DC шината към суперкондензатора и обратно, в зависимост от енергийни нужди на товара. Това се изпълнява по следния начин:



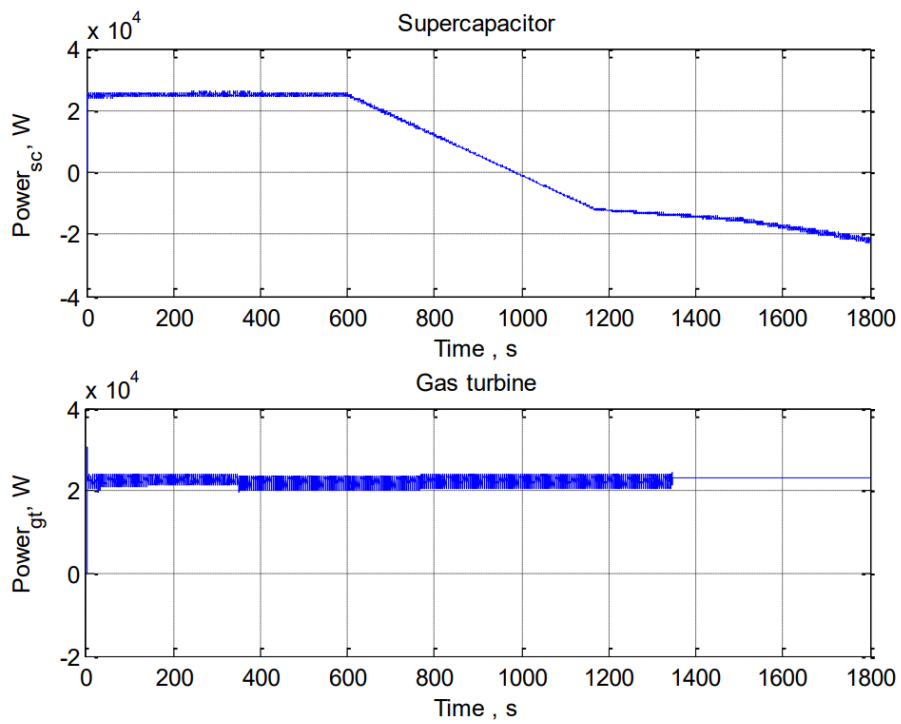
Фиг. 4.6. Модел на двупосочния DC/DC преобразувател.

Референтната мощност (график на натоварване), която системата трябва да осигури чрез използване на математически функции, е разделена на две части: първо, постоянна мощност, близка до номиналната, тази която PMSM машината генерира, и второ, мощността, получена чрез изваждане на тази константа мощност от референтната. Първият компонент на задачата (осигуряване на постоянно захранване на товара) се подава като еталон към повишаващия DC-DC преобразувател (Фиг. 4.6). Вторият компонент на задачата (съответстваща на променливия компонент на мощността) се подава към управляващия вход на двупосочния DC-DC преобразувател (Фиг. 4.5).

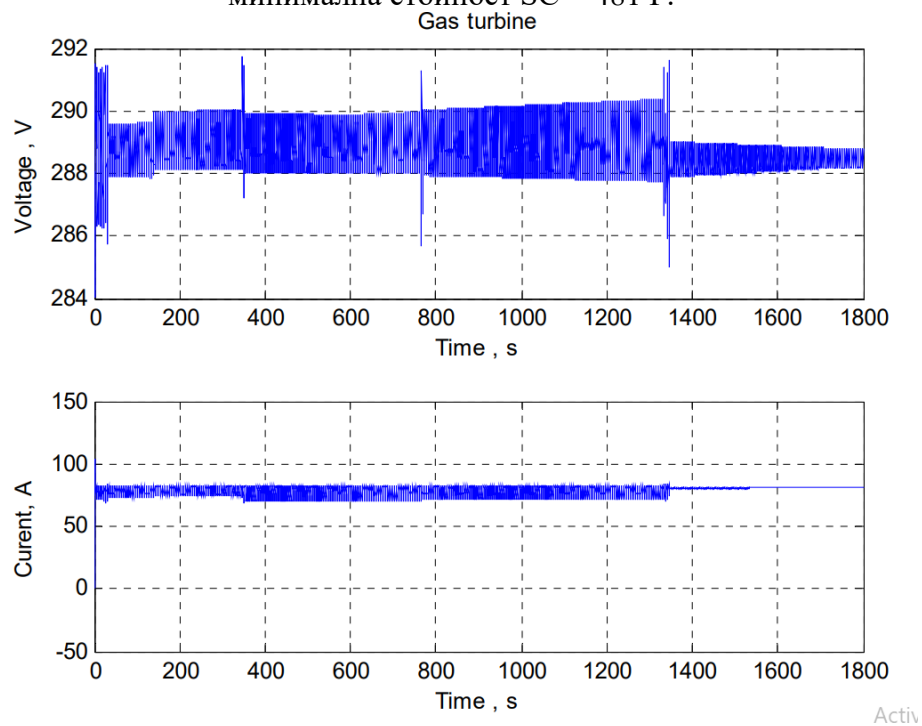
4.3. Симулационни резултати и намиране на оптималната стойност на суперкондензатора

В проведените експерименти с модела, токът на натоварване е избран според режим 2 цикъл на зареждане, 6,6 kW при първоначално състояние на зареждане (State of Charge, SOC) от 30%. Суперкондензаторът (на практика това е стек от отделни елементи) е скъп елемент, целта на тези експерименти са за определяне на минималната му стойност, която гарантира работоспособността на системата. Тази стойност се намира чрез провеждане на серия от симулации с модела.

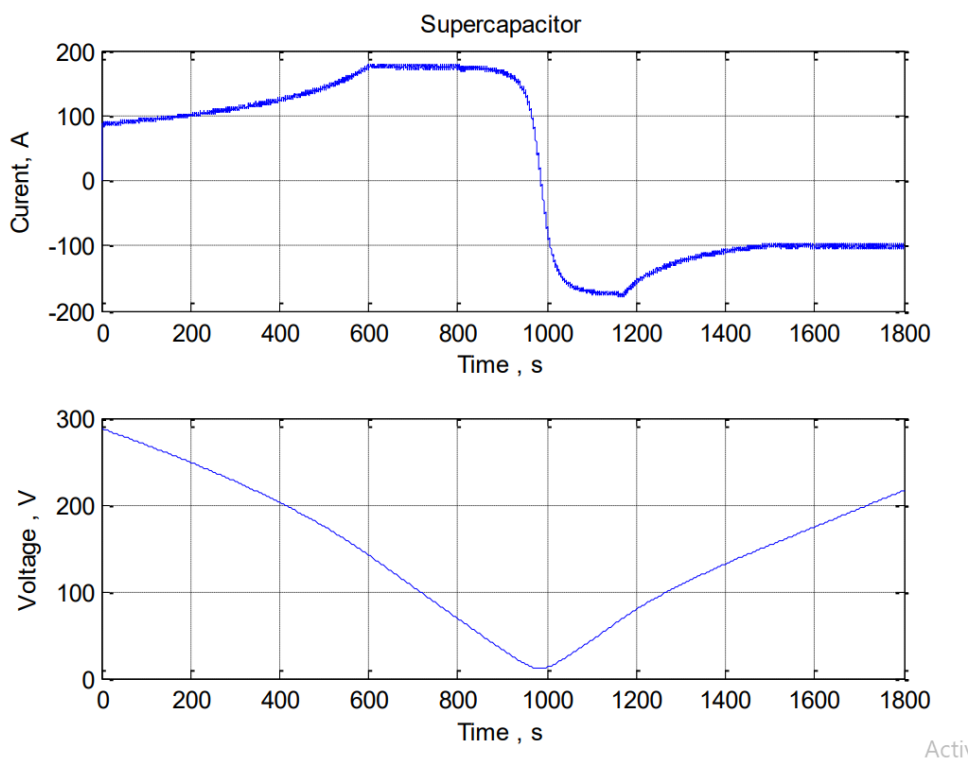
След това, по метода на разполовяването (bisection), минималната възможна стойност на суперкондензатор, за която е реализирана и референтната мощност, остават много близки. Тази стойност е $C = 481F$ (Фиг. 4.9). С тази оптимална стойност, резултатите от следващите фигури (Фиг. 4.10–4.12) са симулирани и представени в графичен вид.



Фиг. 4.9. Реализирана мощност на суперкондензатор и газова турбина при минимална стойност SC = 481 F.



Фиг. 4.10. Напрежение и ток на газовата турбина.



Фиг. 4.11. Напрежение и ток на суперкондензатора.

Резултатите, показани на Фиг. 4.9, дават разпределението на мощностите, доставени на товара, установявайки, че MGT генерира постоянния компонент на мощността, а SC - променливия. По този начин се реализира желаният товарен график при бързо зареждане.

4.4. Заключение

В тази глава на дисертационния труд е представен моделно-ориентиран дизайн на автономна зарядна станция за електромобили, базирана на MGT и суперкондензатор и неговата система за контрол на потока на енергия. Използването на суперкондензатор във внедрената система води до осигуряване на необходимия ток през товара и помага да се компенсира или недостигът, или излишъкът от генерираната от MGT енергия по време на процеса на зареждане на електромобила. Поради ниското ESR на суперкондензаторите, те могат да доставят или съхраняват пикова мощност по време на процесите на ускоряване и забавяне на заряда, което води до намаление на системни загуби и повишена обща ефективност. Системата за управление, която регулира енергията на газовата турбина и суперкондензатора, гарантира осигуряването на синтезиран цикъл на зареждане. Използването на елемент за съхранение на енергия спомага за поддържането на работата на микрогазовата турбина близо до номиналната мощност, където е най-ефективен. Използването на моделно-ориентиран дизайн осигурява оптимални резултати по отношение на зададени диапазони на входно напрежение, изходно напрежение, работна честота, пулсации на тока на натоварване и пулсации на изходното напрежение.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Настоящият дисертационен труд има следните научноприложни и приложни приноси:

1. Изследван е модел на ZVS Buck DC-DC преобразувател с режим на управление на предсказващ пиков ток и зарядна система за бърз заряд в средата на OrCAD/PSpice и MATLAB/Simulink, като са получени функционалните зависимости между основните величини в схемите в зависимост от режима на работа и основните характеристики на параметрите на преобразувателя.
2. Установен е принцип и метод на управление на понижаващия DC-DC преобразувател с комутация при нулево напрежение.
3. Разработен е модел на зарядна станция за бърз заряд и са изследвани резултатите от симулациите при два режима на зареждане.
4. Разработени, изследвани и анализирани са модели на микрогазов турбина, DC-DC преобразувател и PMSM генератор.
5. Изследвани и проектирани са конфигурации и модели на зарядна система, базирана на микрогазова турбина и суперкондензатор. Въз основа на извършения анализ и получени симулационни резултати е посочена методология за проектиране и на зарядна станция, базирана на микрогазова турбина и суперкондензатор при различни товарни профили. Установена е процедура по оптимизация за намирането на най-малката стойност на суперкондензатора.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Публикации, индексирани в реферирано списание:

1. G. Angelov, **M. Andreev**, N. Hinov, “A Review of DC-DC Power Converters for Electric Vehicle Charger Applications”, Proc. Forum Electronica 2017, Sofia, Bulgaria, pp. 140-144 (2017). ISSN 1313-3985.

Публикации, индексирани в SCOPUS:

2. G. Angelov, **M. Andreev**, N. Hinov, “Modelling of Electric Vehicle Charging Station for DC Fast Charging”, 2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), pp. 1-5 (2018) | Electronic ISBN: 978-1-5386-5731-7 | Electronic ISSN: 2161-2536 DOI: 10.1109/ISSE.2018.8443663.
3. G. Angelov, **M. Andreev**, G. Kunov, “Zero Voltage Switching DC-DC Buck Converter with Predictive High Current Mode Control”, 2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET), pp. 1-4 (2019) | Electronic ISBN: 978-1-7281-2574-9 DOI: 10.1109/ET.2019.8878562.
4. **M. Andreev**, “An Overview of Supercapacitors as New Energy Power Sources in Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicles”, 11th National Conference with International Participation “Electronica 2020”, Sofia Bulgaria, 23-24 July 2020, ISBN:978-1-7281-7532 DOI: 10.1109/ELECTRONICA50406.2020.9305104.

Публикации, индексирани в SCOPUS и Web of Science:

5. B. Gilev, **M. Andreev**, G. Angelov, N. Hinov, "Modelling and Simulation of a Low-Cost Fast Charging Station Based on a Micro Gas Turbine and a Supercapacitor", *Energies*, 2022, Vol. 15, No. 21, Art. 8020, pp. 1-15. ISSN: 1996-1073 DOI: <https://doi.org/10.3390/en15218020>.

СПИСЪК НА ИЗПОЛЗВАНАТА В АВТОРЕФЕРАТА ЛИТЕРАТУРА

- [19] Daniel Andersson, David Carlsson, "Measurement of ABB's Prototype Fast Charging Station for Electric Vehicles, Department of Energy and Environment Calmers university of Technology, Master of Science, 2012.
- [20] Hangseok Choi, "Design Considerations for Asymmetric Half-Bridge Converters", Fairchild Semiconductor Power Seminar 2008-2009.
- [21] STMicroelectronics, "Application Note AN-2450: LLC resonant half-bridge converter design guideline", Rev5, 10/2007.
- [22] Jim Francfort, Electric Vehicle Charging Levels and Requirements Overview, Clean Cities December 2010 Webinar.
- [23] T. Ninomiya, N. Matsumoto, M. Nakahara, and K. Harada, "Static and Dynamic analysis of Zero-Voltage-Switched Half-Bridge Converter with PWM Control," IEEE PESC, 1991.
- [24] Gary H.Fox, "Getting Ready for Electric Vehicle Charging Stations", IEEE 2011.
- [25] J. Zhang, C.Y. Lin, X. Zhuang, K. Rinne, D. Sable, G. Hua and F.C. Lee, "Design of A 4kw On-Board Battery Charger for Electric Vehicle," Annual VPEC Seminar, September 1995.
- [26] W. Zhang, K. Spence, R. Shao, and L. Chang, "Grid PowerSmoothing Performance Improvement for PV and Electric Vehicle (EV) Systems," in 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 23-27 Sept. 2018 2018, pp. 1051-1057, doi: 10.1109/ECCE.2018.8557954.
- [27] A. Mahmoudzadeh Andwari, A. Pesiridis, S. Rajoo, R. MartinezBotas, and V. Esfahanian, "A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 414-430, 2017/10/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.138>.
- [28] M. Safayatullah, M. T. Elrais, S. Ghosh, R. Rezaii, and I. Batarseh, "A Comprehensive Review of Power Converter Topologies and Control Methods for Electric Vehicle Fast Charging Applications," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 40753-40793, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3166935.
- [29] S. International, "SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler J1772_201710," 2017. [Online]. Available: SAE Electric Vehicle and Plug-In Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler, SAE Standard J1772, 2010.
- [30] IEC. Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets -Conductive charging of electric vehicles - Part [Online] Available: <https://webstore.iec.ch/publication/6582>.

SUMMARY

Design and research of a charging system for electric vehicles

Miroslav Krasimirov Andreev

The thesis is dedicated to the new concepts and technologies regarding fast charging systems for electric vehicles and batteries. New configuration, topologies and design methods for AC-DC and DC-DC converters have been proposed. The simulation results of the model-based design of the autonomous charging station for electric vehicles have been studied and analysed. The energy crisis will be accelerating the transformation of the traditional energy sources based on fossil fuels energy to clean and low-carbon modern energy. The distributed energy will play a key role in the power system because is more efficient and environmentally friendly than the traditional energy.

Chapter one provides a comprehensive overview of types of electric vehicles and their charging requirements. Charging levels and modes, as well as international standards play an important role in the implementation and development of technologies related to electric vehicles are examined and analysed.

Chapter two presents research and analysis of types of EV charging technologies, power converter configurations for EV charging systems. A methodology for implementing topologies of hybrid energy storage systems is defined. An analysis of battery technologies for electric vehicles has been carried out.

Chapter three presents the research results and modelling of zero-voltage switching DC-DC BUCK converter with a predictive peak current mode control via realized control system of the converter whose principle of operation can be implemented in a chip layout. In this part of the thesis a charging system for fast charging is investigated and modelled. The converter's model is used averaged parameter values and the presence of filter elements are accounted by placing time-delayed segments. This implementation method allows numerical experiments to be performed with limited computing power. The model describes the main dependencies and includes a controller implemented as a proportional P-regulator with a limiting factor of 25 and 400 V for the battery voltage limit.

In chapter four, a model-based design of an autonomous EV charging station based on MGT and a supercapacitor and its power flow control system are presented. The use of a supercapacitor in the implemented system results in providing the necessary current through the load and helps to compensate for either the shortage or excess of the MGT-generated energy during the EV charging process.