



**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ
СОФИЯ**



Електротехнически факултет

Катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”

Маг. инж. Атанас Тодоров Захов

ИНТЕЛИГЕНТНИТЕ МРЕЖИ И СЪВРЕМЕННИЯТ ГРАД

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: Електроснабдяване и електрообзавеждане на
промишлеността

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Николай Стефанов Матанов

СОФИЯ, 2024 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Разширен катедрен съвет на катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” към Електротехнически факултет на Технически университет – София, проведен на 15.07.2024 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 05.11.2024 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-65 / 19.07.2024 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Доц. д-р инж. Светлана Георгиева Цветкова – председател
2. Доц. д-р инж. Ива Чавдарова Петринска – научен секретар
3. Проф. д-р Васил Димитров Димитров
4. Проф. д-р Ивайло Стефанов Стоянов
5. Доц. д-р Орлин Любомиров Петров

Рецензенти:

1. Проф. д-р Васил Димитров Димитров
2. Доц. д-р инж. Светлана Георгиева Цветкова

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Електротехнически факултет при Технически университет – София, блок 12, кабинет 12427.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” на Електротехнически факултет. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора.

Автор: маг. инж. Атанас Захов

Заглавие: Интелигентните мрежи и съвременният град

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Тенденциите за преход от конвенционални мрежи към интелигентни мрежи е обхванала целия свят. Енергийните системи са в процес на преход от централизирани към системи с разпределени източници на енергия. Това създава проблеми при използването на съществуващите преносни и разпределителни мрежи. Потреблението на електрическа енергия е в тенденция на постоянно нарастване, затова е необходимо да се търсят оптимизационни решения за използването на електрическата енергия и електрическите мрежи. В тази насока е и преминаването към интелигентни мрежи, което е дълъг и скъп процес, преминаващ през различни етапи. Тъй като в градовете са съсредоточени голяма част от потребителите на електрическа енергия, съответно там има и потенциал за търсене на решения за повишаване на ефективността на използването ѝ. В същото време през последните години се появиха електрическите автомобили, чийто брой постоянно нараства с променливи темпове. Заедно с тях се увеличава и броя на зарядни станции, които поради високата си мощност са голям електрически потребител, който основно е съсредоточен в градските райони и създава проблеми на техните разпределителни мрежи. Другият голям потребител на електрическа енергия, който не е обхванат масово от управление са жилищните сгради в градовете.

Възможността за управление на електрическите товари на домовете и зарядните станции в силно урбанизираните райони, чрез предимствата, които предоставят интелигентните мрежи, ще доведат до повишаване на ефективността на използване на разпределителните мрежи при електроснабдяването на градовете.

Цел на дисертационния труд и основни задачи

Целта на дисертацията е повишаване на ефективността на разпределителните мрежи, охранващи силно урбанизирани райони, чрез прилагане на интелигентни мрежи и управление на електрическите товари. С оглед постигане на поставената цел, като се отчитат направените по-горе изводи, в дисертацията ще бъдат решени следните основни задачи:

1. Разработване на математически модели и програми за изследване на работата на зарядните станции на електрическите автомобили;
2. Съставяне на алгоритъм и симулация за управление на работата на група зарядни станции;
3. Съставяне на структура и методика за управление на електрическите товари в жилищни сгради;

4. Оптимизиране на потреблението на електрическа енергия в жилищните сгради.

Методи на изследване

Основните методи на работа, използвани при решаването на поставените цели и задачи са: теоретичен анализ и синтез, математическо моделиране и оптимизация.

Практическа приложимост

Разработените модели могат да се използват при предпроектните проучвания и проектирането на зарядната инфраструктура за електрически автомобили, както и при автоматизацията и изграждането на SCADA системи за управление на паркинги и система от зарядни станции. Резултатите от изследванията се използват в учебния процес при обучаването на студенти и докторанти по специалността „Електроенергетика и електрообзавеждане“.

Апробация

Резултатите от дисертационния труд са докладвани и обсъждани на международните конференции БулЕФ 2019, БулЕФ 2020, БулЕФ 2021, БулЕФ 2022 и БулЕФ 2023 и резултатите са публикувани в Scopus.

Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 5 броя научни публикации, индексирани в международната база SCOPUS. Публикациите имат 48 цитирания.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 124 страници, като включва увод, четири глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 107 литературни източници, всички са на латиница и 10 от тях са интернет адреси. Работата включва общо 50 фигури и 14 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. СЪВРЕМЕННИ ТЕНДЕНЦИИ ЗА РАЗВИТИЕ И ПРОБЛЕМИ В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИТЕ МРЕЖИ НА ГРАДОВЕТЕ

Направен е литературен преглед на еволюционния процес и текущото състояние на електрическата мрежа. Направено е сравнение между традиционната електрическа мрежа и интелигентната мрежа, като са разгледани характеристиките, ползите и технологиите на интелигентната мрежа.

Проучен е потенциалът на инфраструктурата за интелигентно измерване и възможностите за изготвяне на товарови графици, както и двупосочна

комуникационна система позволяваща наблюдаването, анализирането и управлението на електрическите товари в Home area network.

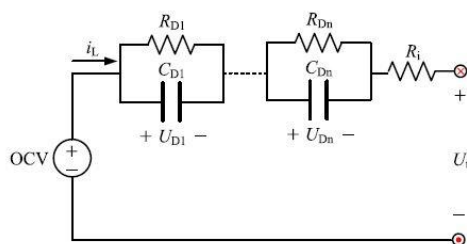
Направено е проучване за стандартите, видовете и мощностите на зареждане на зарядните станции за електрически автомобили. За придобиване на обща представа е разгледан ръста на електрическите автомобили и зарядните станции по света.

За повишаване на енергийната ефективност са разгледани системите за енергиен мениджмънт в домовете и сградите.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРАНЕ РАБОТАТА НА ЗАРЯДНИТЕ СТАНЦИИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ АВТОМОБИЛИ

2.1 Видове и структура на зарядните станции

На сегашния етап в електрическите автомобили (EV) основно се използват литиево-йонни батерии. При изследване на електрическите процеси се е наложила еквивалентна заместваща схема на Li-ion батерия от Фиг. II-1 [90, 91].



Фиг. II-1 Еквивалентен електрически модел на Li-ion батерия

Процесите в схемата от Фиг. II-1 могат да се опишат чрез следните уравнения

$$\begin{cases} \dot{U}_{Di} = -\frac{1}{R_{Di}C_{Di}}U_{Di} + \frac{1}{C_{Di}}I_L \\ U_t = U_{oc} - I_L R_i - \sum_{i=1}^n U_{Di} \end{cases} \quad (\text{II-1})$$

Зарядните станции, които се използват в Европа, могат да се разделят на пет групи:

- до 7,2 kW, 1-Phase 230V AC;
- 22 kW, 3-Phase 400V AC;
- 24 kW DC ;
- 50 kW DC (Fast Charger);
- 150 – 400 kW DC (High Power/Super Fast Charger).

Типичната блокова схема на една бърза зарядна станция и свързването ѝ към мрежата е дадена на Фиг. II-2.

Дадената блокова схема показва двата етапа на процеса на зареждане на батериите на EV. Първо, променливата електрическа енергия се преобразува в постояннотокова със стабилизирани параметри - DC Link и второ, постояннотоков регулатор (DC/DC converter) преобразува напрежението в подходящо за батерията и поддържа зададен ток [92].



Фиг. II-2 Блокова схема на DC бърза зарядна станция

За намаляване влиянието на токоизправителя върху захранващата мрежа и за повишаване фактора на мощност може да има и допълнителни компоненти като филтри (LCL) и PFC (*power factor correction*) схеми.

2.2 Моделиране работата на зарядна станция

От концепцията за V2X (електрическо превозно средство към всичко) ще се разглеждат режимите G2V (мрежа към превозно средство) и V2G (превозно средство към мрежа).

Зареждането на батерията се представя чрез формула [93,94] :

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (\text{II-2})$$

а разреждането чрез

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (\text{II-3})$$

където:

it е извлеченият капацитет, в Ah;

i^* - динамиката на нискочестотния ток, в A;

i – тока на батерията, в A;

E_0 – константно напрежение, в V;

K – поляризационната константа във V/Ah или поляризационното съпротивление в Ω ;

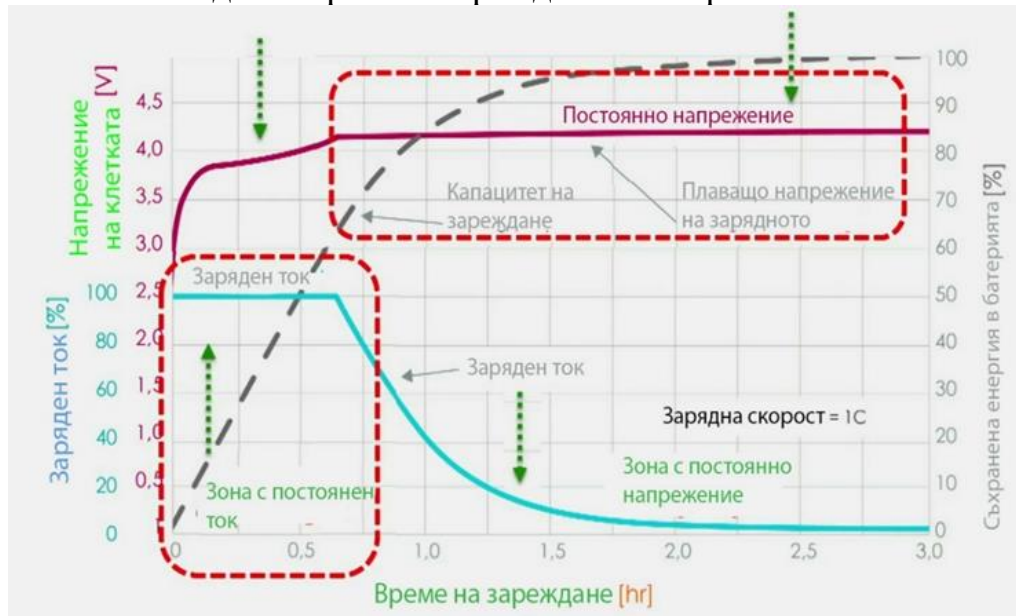
Q – максимален капацитет на батерията, в Ah;

A – експоненциално напрежение, в V;

B – експоненциален капацитет, в Ah^{-1} .

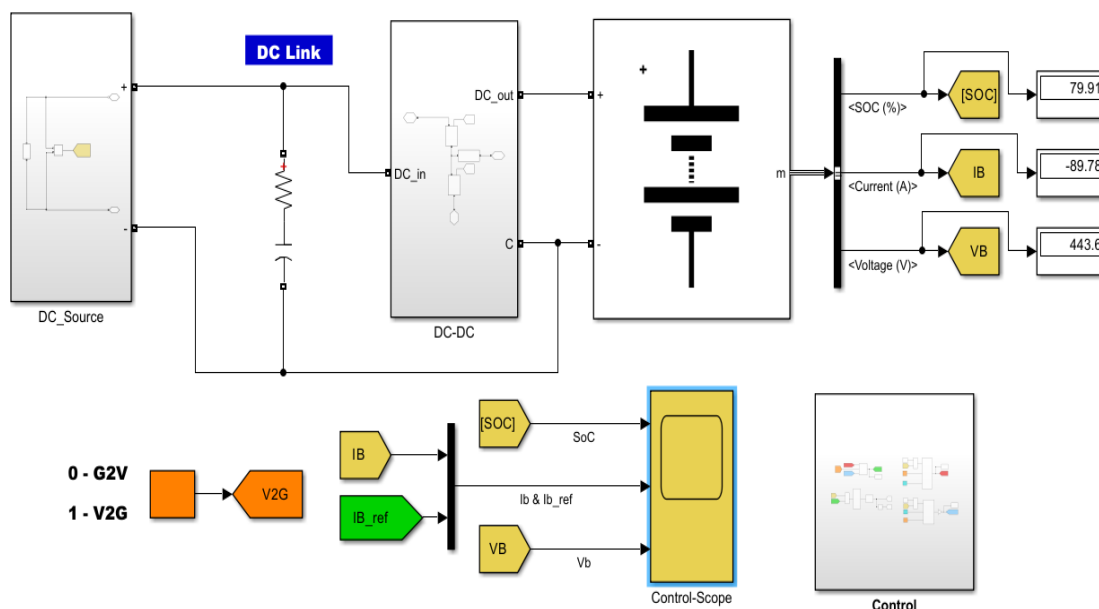
На Фиг. II-3 се разглежда процесът на зареждане на батерията, по който се разработват принципно управленията за зареждане на електрическия автомобил наречени BMS (*Battery Management Systems*).

Когато зареждането започне, обикновено се зарежда с постоянен ток, равен или по-малък от номиналния ток на батерията. През този период, напрежението на батерията се увеличава докато батерията се зареди и това е показано като зона на зареждане с постоянен ток. Когато напрежението достигне максималната зададена точка приблизително около 80%, зареждането се променя към зона с постоянно напрежение, но напрежението се поддържа докато тока постепенно намалява до 0. Зареждането в тази зона обикновено отнема доста време и зареждането спира когато тока е близо до 0.



Фиг. II-3 Процес на зареждане на Li-ion батерия

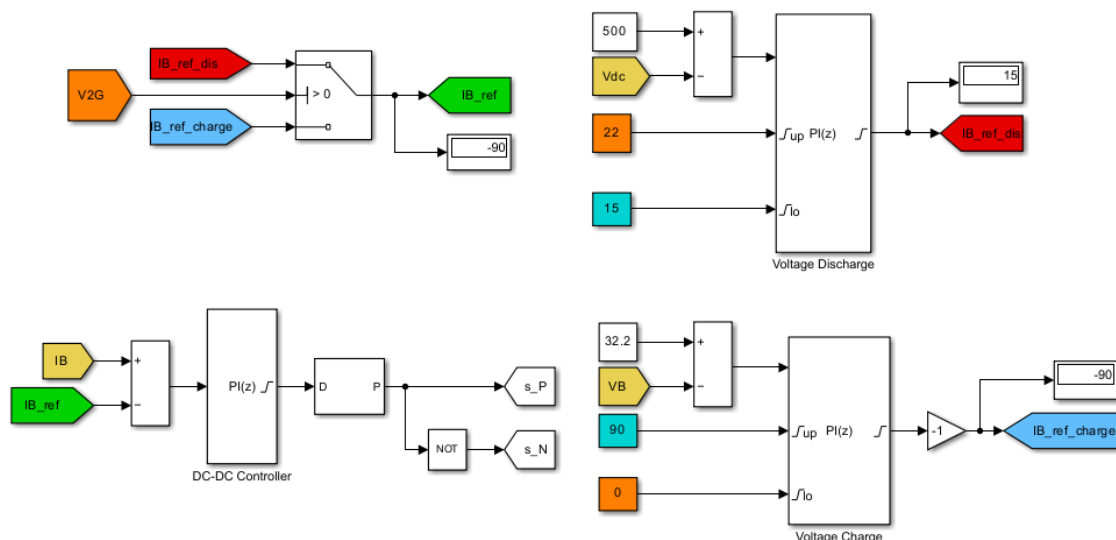
Разработен е модел на зареждане и разреждане на Li-ion батерия в средата на Matlab/Simulink, като общия вид на модела е даден на Фиг. II-4.



Фиг. II-4 Модел за зареждане/разреждане на Li-ion батерия

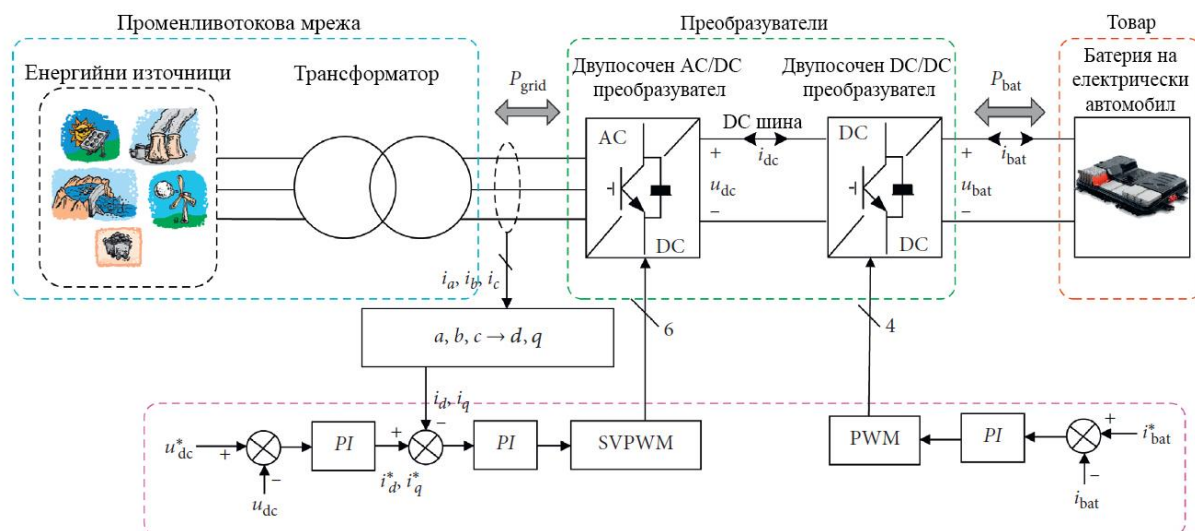
Елементи на системата от Фиг. II-2 са заменени с идеален източник на напрежение, който захранва DC/DC преобразувателя. Към DC/DC преобразувателя е свързана Li-ion батерия 48 kWh (120Ah/400V).

Управляващата подсистема (Control) е показана на Фиг. II-5 и съдържа три PI регулатора. Един за управление на DC/DC регулатора, един за режима на заряд и един за режима на разряд на батерията. Към управлението се подават следните параметри: напрежение на захранващия източник, напрежение и ток на батерията, задания за подържаните токове през батерията в режимите на заряд и разряд.



Фиг. II-5 Управляваща подсистема на модела DC-V2G-G2V

Целта на изграждането на модела е да е налична коректно работеща система DC/DC преобразувател – батерия.



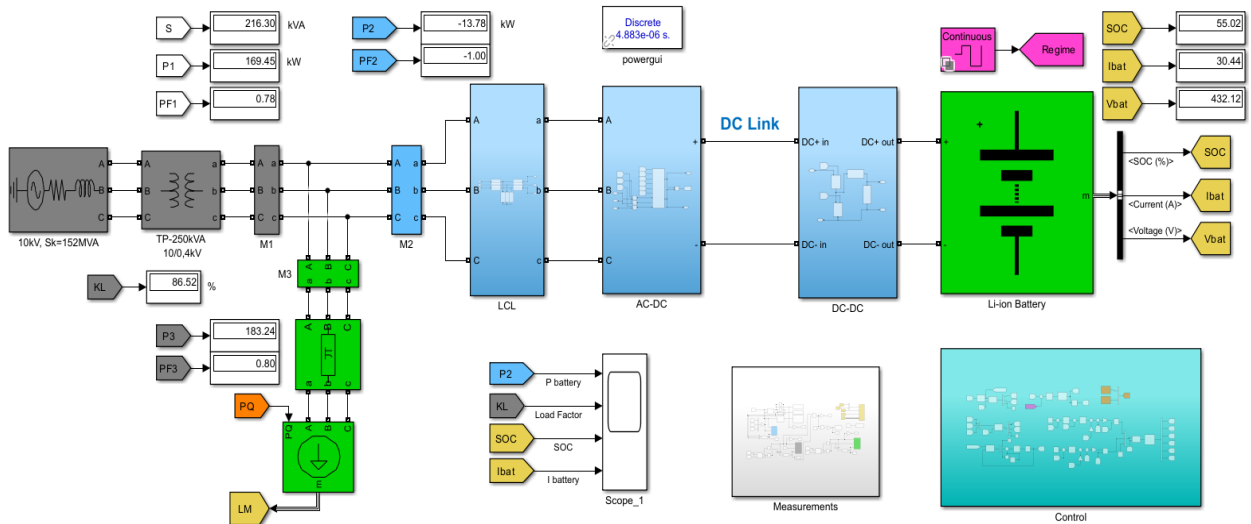
Фиг. II-6 Принципна схема на зареждане на електрически автомобил

Тази подсистема е конструктивна част на електрическите превозни средства. Този силов преобразувател да може да работи в двата режима G2V и V2G, като се задават (управляват) токовете на заряд и разряд на Li-ion батерия.

Чрез постигнатите резултати от предходния модел с захранване от идеален източник, се разглежда пълната схема, която се използва реално при зареждането на електрически автомобили дадена на Фиг. II-6 [97].

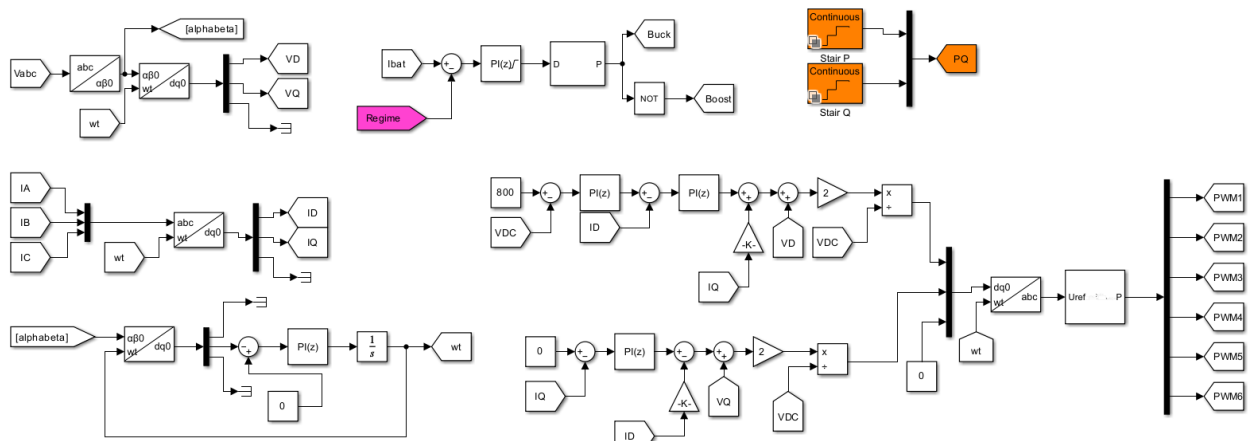
Схемата се състои от електрическа мрежа, подстанция, двупосочен променливотоков преобразувател, двупосочен постояннотоков преобразувател, управляващ блок и електрически автомобил.

Съгласно принципната схема от Фиг. II-6 е разработен модел в Matlab/Simulink и има общ вид даден на Фиг. II-8.



Фиг. II-8 Общ вид на модела мрежа-товар-зарядна станция

Моделът се състои от следните основни елементи - захранваща система, трансформатор, трифазен конвенционален RL товар, захранван чрез кабелна линия, LCL филтър, двупосочен IGBT AC-DC инвертор, двупосочен DC-DC преобразувател, Li-ион батерия, подсистема – управление, подсистема - измерване.

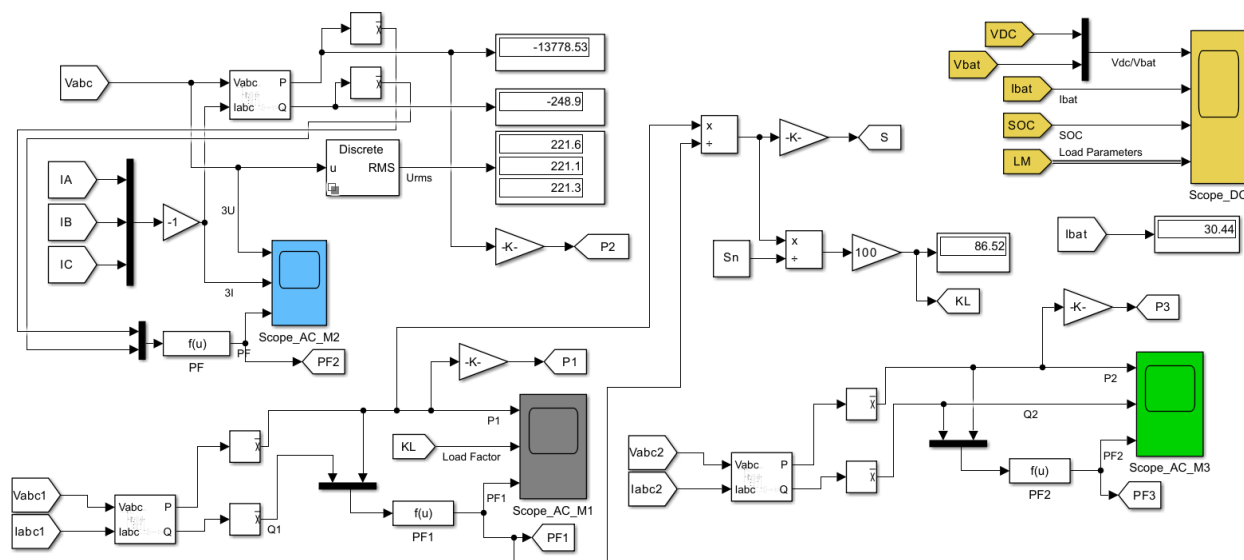


Фиг. II-14 Подсистема – управление

Управляващата подсистема (Фиг. II-14) се състои от няколко подсистеми: управление на AC-DC инвертора, управление на DC-DC преобразувателя и управление режима на работа на батерията - G2V или V2G. Необходимите обратни връзки се взимат от подсистема-измерване.

Измервателната подсистема (Фиг. II-15) измерва и показва токовете, напреженията, мощностите и фактора на мощност в следните възли на

схемата: на шините на захранващия трансформатор - M1; на входа на зарядната станция - M2; на конвенционалния товар - M3; напрежението на DC Link. Тя следи и параметрите на работа на батерията и осигурява информация за управлението на елементите на модела.

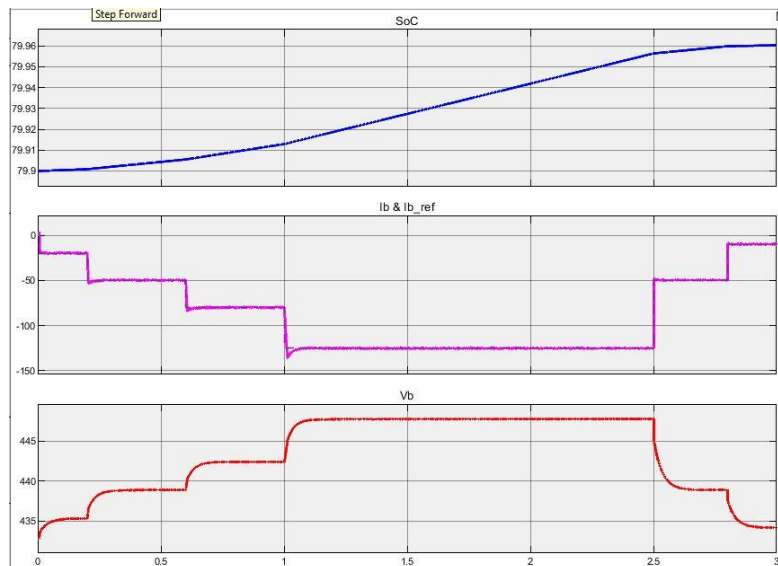


Фиг. II-15 Подсистема – измерване

2.3 Симулации, резултати и анализ

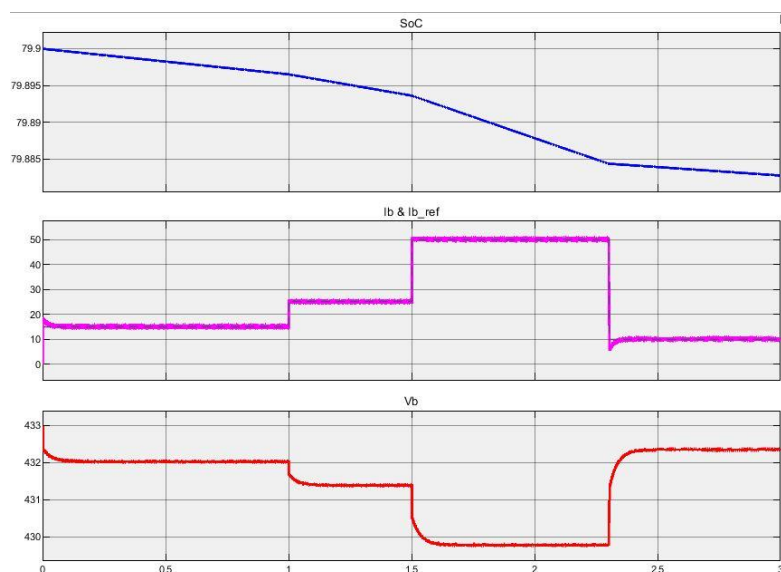
Разглеждания модел се състои от множество сложни подсистеми, за които могат да се използват различни схеми. Тези са причините поради, което трудно може да се направи верификация чрез практически измервания. От тази гледна точка е използван следният подход. Верифицира се работата на отделните подсистеми на базата на това, което се очаква от тях като функции и както е описано в литературата [96]. Втора проверка се прави с баланс на мощностите в отделните възли за да се провери адекватността на целия модел, т.е. съвместената работа на всички негови елементи. Имайки предвид това са дадени и следващите конкретни резултати и фигури.

На Фиг. II-16 са показани резултати от симулация на първия модел с идеален източник на напрежение в режим на работа G2V. На графиката се виждат четири величини: състоянието на заряд на батерията – *State of charge* (SoC); токът през батерията - I_b и референтната му стойност - I_{b_ref} (тези две величини са на обща графика); напрежението на батерията - V_b . По време на симулацията е променяна референтната стойност, която определя тока на заряд на батерията, в диапазона 10 - 125A. От фигурата се вижда, че всички зададени параметри на тока са поддържани от управлението коректно. Токът има отрицателен знак, защото батерията е захранващ източник, тя в случаят е в ролята на електрически товар. В процеса на зареждане се вижда, че зарядът на батерията нараства.



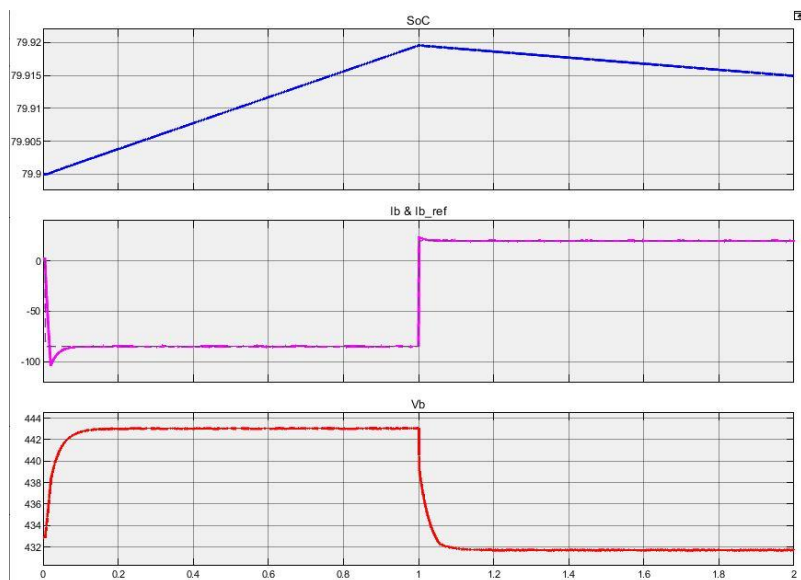
Фиг. II-16 Режим зареждане (G2V) на Li-ion батерия

На Фиг. II-17 се виждат резултати от симулация в режим V2G [96]. В този режим е променена референтната стойност на тока, който в случаят е в посока към мрежата. От средната графика може да се заключи, че в този режим регулаторът също работи правилно и поддържа заданието на тока. Диапазонът на промяна е между 10 и 50А. Състоянието на заряд на батерията - SoC намалява, но с различна скорост в зависимост от отдаваната мощност от батерията.



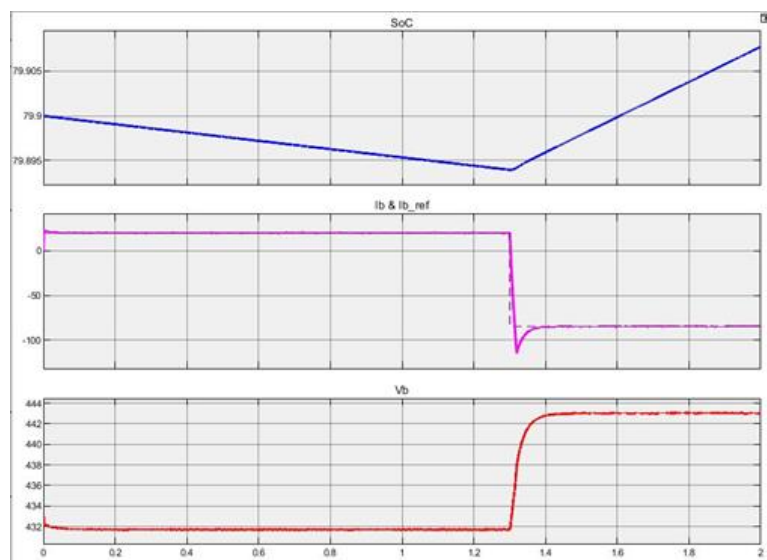
Фиг. II-17 Режим разреждане (V2G) на Li-ion батерия

Симулации на преминаване от режим G2V към режим V2G и обратното са показани на Фиг. II-18 и Фиг. II-19. Схемата може да превключва между двата режима без проблеми, като започва да поддържа зададените стойности на тока от управляващата подсистема - Control. В момента на превключване се вижда преходния процес и действието на PI регулатора за поддържане на зададения ток на заряд на батерията.



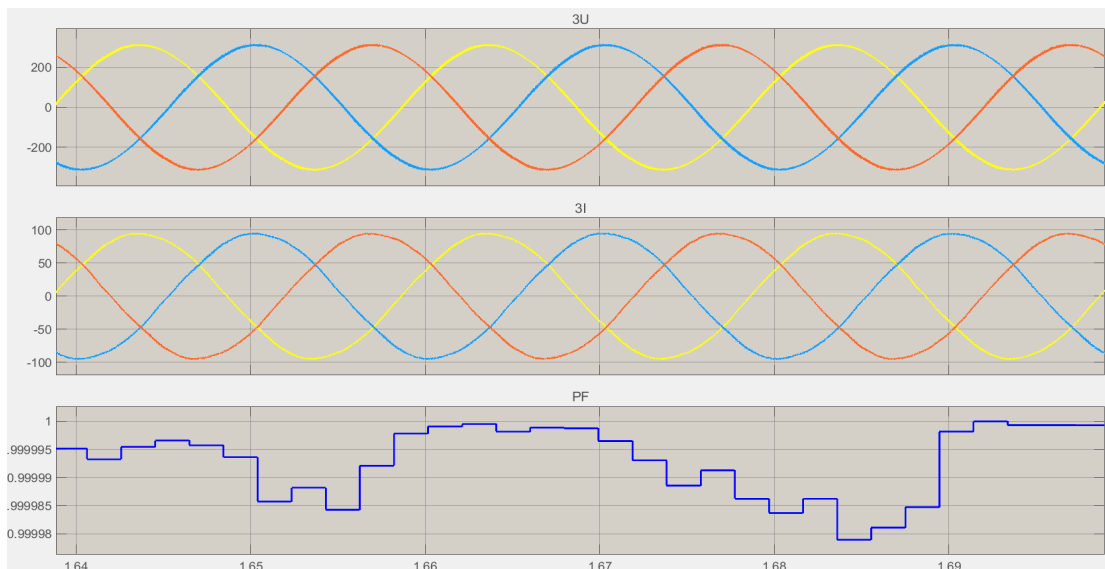
Фиг. II-18 Премаване от режим G2V към режим V2G

Чрез постигнатите резултати предходния модел, се разглежда пълната схема, която се използва реално при зареждането на електрически автомобили дадена на Фиг. II-8. Схемата симулира следните режими на работа на системата - мрежа, товар, зарядна станция [102]:



Фиг. II-19 Премаване от режим V2G към режим G2V

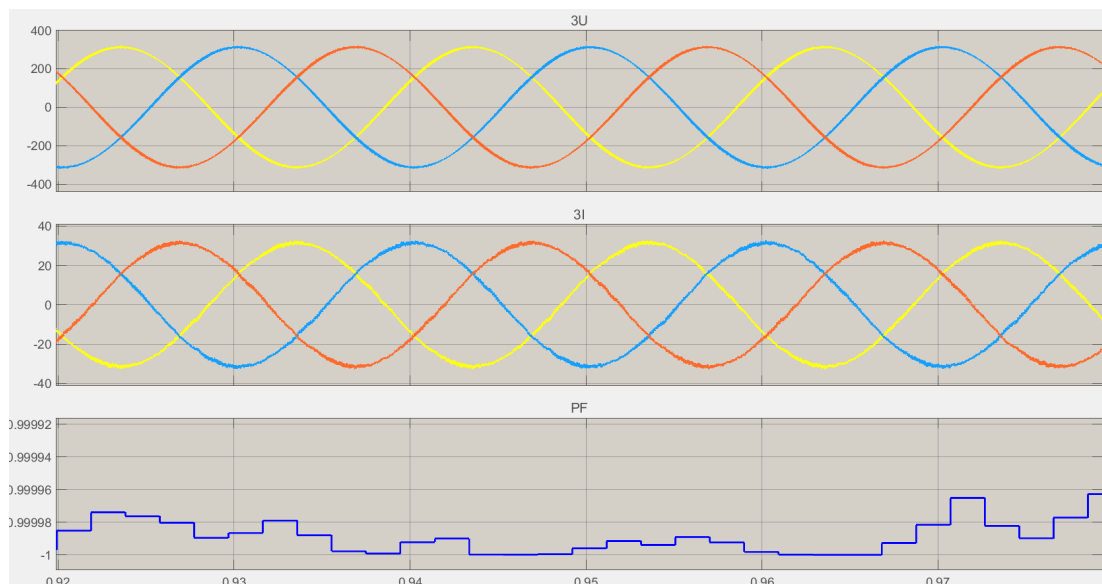
- Променлив график на конвенционалния товар, като се задават фактора на мощност и привидната мощност в относителни единици спрямо номиналната мощност на трансформатора в подстанция;
- Регулиране (задаване) на големината на тока, с който се зарежда/разрежда Li-ion батерия, т.е. EV;
- Превключване на работа на зарядната станция и батерията на електрическия автомобил в режими G2V или V2G.



Фиг. II-20 Напрежения и токове в точка M2 в режим G2V

На Фиг. II-20 са показани трифазните напрежения, токове и PF в точка M2, точката на връзка на LCL филтъра със захранващата мрежа. Вижда се, че напреженията и токовете са във фаза, т.е. зарядната станция е потребител на електрическа енергия. PF има индуктивен характер и е в рамките на 0,99.

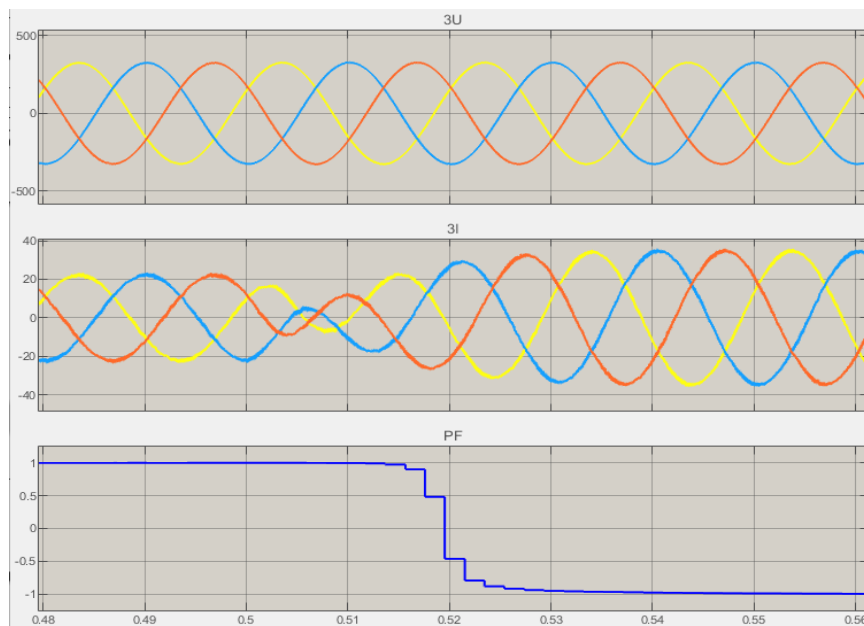
На Фиг. II-21 са дадени същите величини, но в режим на работа на зарядната станция V2G. Това се потвърждава от дефазирането на напреженията и токовете - в противофаза са, т.е. потокът на електрическа енергия е от EV през зарядната станция към мрежата. PF е в същите граници, но е с капацитивен характер.



Фиг. II-21 Напрежения и токове в точка M2 в режим V2G

Сигналите от Фиг. II-20 и Фиг. II-21 могат да верифицират нормалната работа и коректността на системата на зарядната станция, защото се вижда, че няма никакви смущения и прекъсвания в токовете и напреженията, управляващата система поддържа зададените стойности и в двата режима G2V и V2G. Моментът на превключване между двата режима и съответните

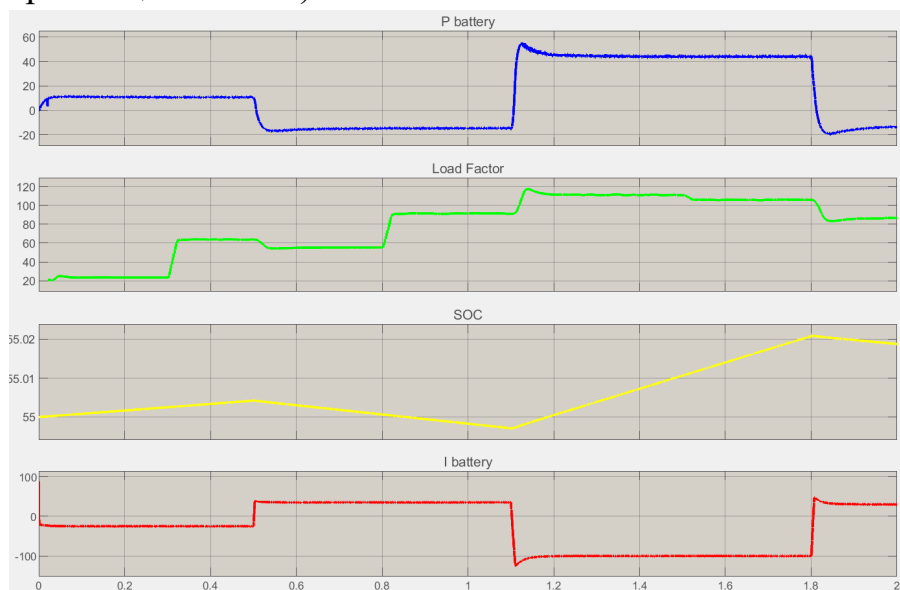
моментни стойности на токовете и напреженията са дадени на следващата фигура.



Фиг. II-22 Моментни стойности на напреженията и токовете в точка M2 в момента на преминаване от G2V към V2G

На Фиг. II-23 са дадени следните величини, съответно:

- Активната мощност, която се консумира/отдава от зарядната станция в мрежата в kW;
- Коефициентът на натоварване на трансформатора в подстанцията в %;
- Състоянието на заряд на батерията (SOC) в %;
- Токът на разряд/заряд на батерията в A (токът е с положителен знак в режим V2G и с отрицателен знак в режим G2V, тъй като Li-ion батерия е захранващ източник).



Фиг. II-23 Преминаване от режим G2V към режим V2G и промяна на конвенционалния товар

Режимите на работа G2V или V2G са лесно различими по наклона на SOC - съответно повишаване и намаляване. В моментите 0,5 и 1,8 се преминава от G2V към V2G и се вижда намаляването на коефициента на натоварване на трансформатора, поради захранването на част от товара от батерията на EV. От другата гледна точка, в момент 1,1 батерията започва да се зарежда със 100А, съответно натоварването на подстанцията се увеличава над 100% - *Load Factor*, което в практиката ще означава претоварване на трансформатора.

В дисертацията са дадени данните и за верификацията на модела чрез баланса на мощностите, който потвърждава коректната работа.

Представените резултати показват работата на модела като цяло и на различните подсистеми във всички предвидени режими на работа, както и моментите на преход. Анализът показва правилна работа на цялата система, което позволява да се използва за изследователски цели.

2.3 Изводи към втора глава

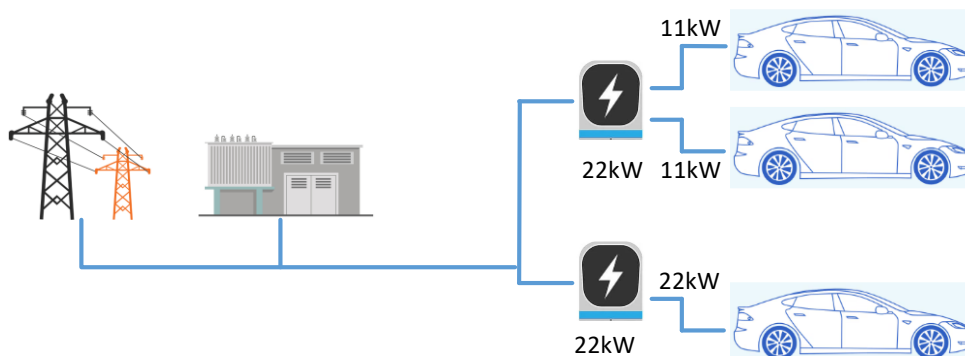
1. Разработен е модел в средата на Matlab на зареждане на Li-ion батерия от идеален източник на напрежение. Моделът позволява регулиране на тока на зареждане и разреждане на батерията.
2. Разработена е управляваща система към постояннотоков регулатор за заряд на батерия, който позволява работа на батерията в режимите G2V и V2G.
3. Разработен е модел в средата на Matlab на зарядна станция захранвана от мрежата позволява регулиране на тока на зареждане и разреждане на батерията на EV. Симулациите разрешават работа на батерията в режимите на консумиране на електрическа енергия и в режим на източник на електрическа енергия.
4. Разработени са лабораторни упражнения за прилагането на математическите модели на зарядните станции в учебния процес при обучението на студентите от ОКС „Магистър“ и докторанти. Упражненията са дадени в Приложения 2 и 3.
5. Представените модели са основа за разработването на алгоритми за управление на множество зарядни станции за EV, примерно на паркинги или друга градска инфраструктура за зареждане на EV. Чрез него могат да се създават и тестват различни режими на работа и алгоритми за управление при изграждане на SCADA системи. Резултатите от тази глава ще се използват по-нататък в дисертацията.

ГЛАВА 3. АЛГОРИТМИ И ПРОГРАМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ РАБОТАТА НА ГРУПА ЗАРЯДНИ СТАНЦИИ

3.1 Стратегии за управление на товарите на зарядните станции

Различните типове управление са класифицирани по сложност. Всеки от типовете има за цел да увеличи максимално използването на капацитета за свързване на електрическа мрежа.

Тип I - Управление на натоварването на единични зарядни точки



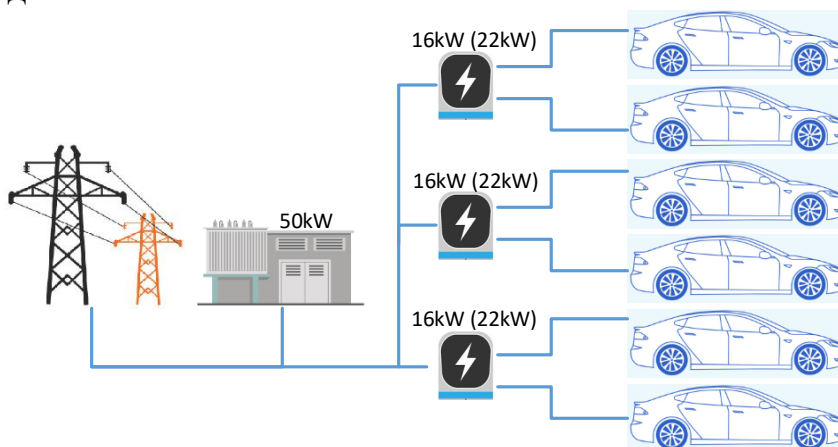
Фиг. III-1 Управление на натоварването на единична зарядна точка

Това е основната форма на управление на натоварването, при която една точка за зареждане с множество изходи управлява наличната мощност за всеки от своите (обикновено два) изхода в зависимост от броя на превозните средства, свързани във всеки един момент (Фиг. III-1). Зарядната станция трябва да поддържа баланс на товарите между контактите.

Все още е възможно да се претовари хранването с управление на натоварването от тип I, ако са налични множество точки за зареждане, тъй като контролът е локален само за една точка за зареждане.

Тип II - Статично управление на зарядна станция

Това управление позволява да се контролира натоварването от множество зарядни точки, свързани към една и съща електрическа разпределителна система (Фиг. III-2). Тук общата мощност, налична за всички зарядни точки, е предварително зададена. Мощността, разпределена за всеки изход за зареждане, представлява наличната мощност, разделена равномерно на броя на изходите за зареждане, независимо от броя на включените електрически превозни средства.



Фиг. III-2 Управление на натоварването на множество зарядни точки – статично

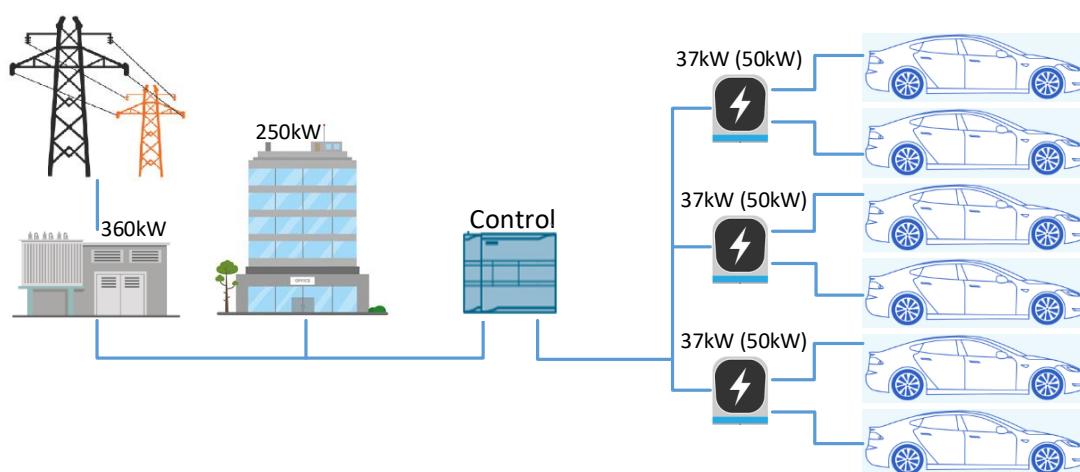
Системата от тип II е използвана само за малък брой точки за зареждане или когато наличният капацитет е такъв, че предварително зададената

мощност на зареждане не е значително по-ниска от номиналната мощност на точката за зареждане.

Тип III - Динамично управление на зарядна станция

Система за управление на натоварването от тип III наличният капацитет, отчитащ натоварванията на обекта в реално време, като натоварвания на сгради, се споделя между използваните зарядни точки (Фиг. III-3).

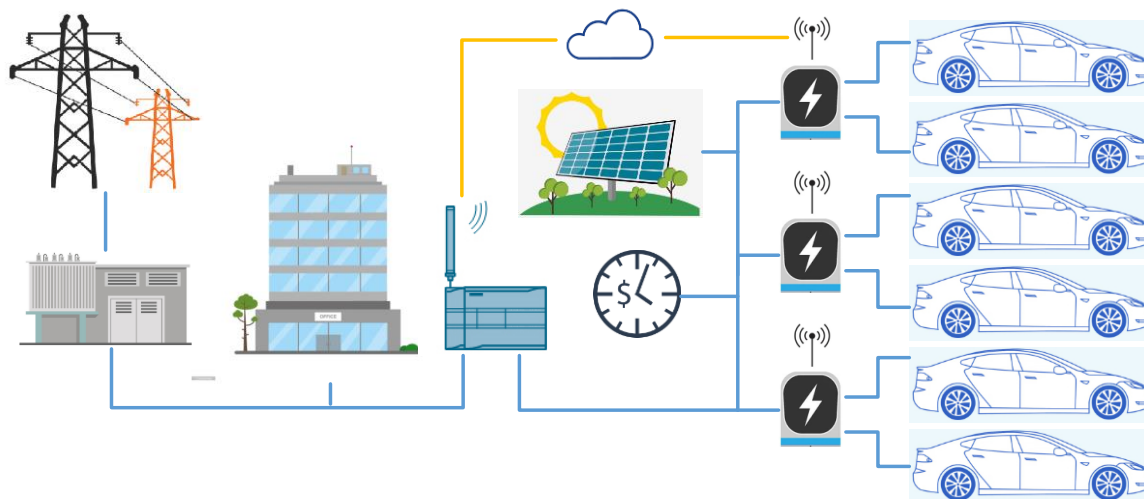
В случай че консумацията на енергия в сградата се увеличи, общата налична мощност за зареждане ще спадне, за да се гарантира, че основният лимит на капацитета на връзката на мястото за зареждане няма да бъде превишен. Това управление позволява максимално използване на наличната мощност във всеки един момент.



Фиг. III-3 Управление на натоварването на множество зарядни точки – динамично

Тип III на управление на натоварването увеличава максимално използването на мрежовата връзка на обекта и следователно е минималният стандарт за обекти с ограничени връзки и/или значителен брой разгърнати зарядни точки.

Тип IV - Интелигентно управление на зарядна станция



Фиг. III-4 Управление на натоварването на множество зарядни точки – интелигентно

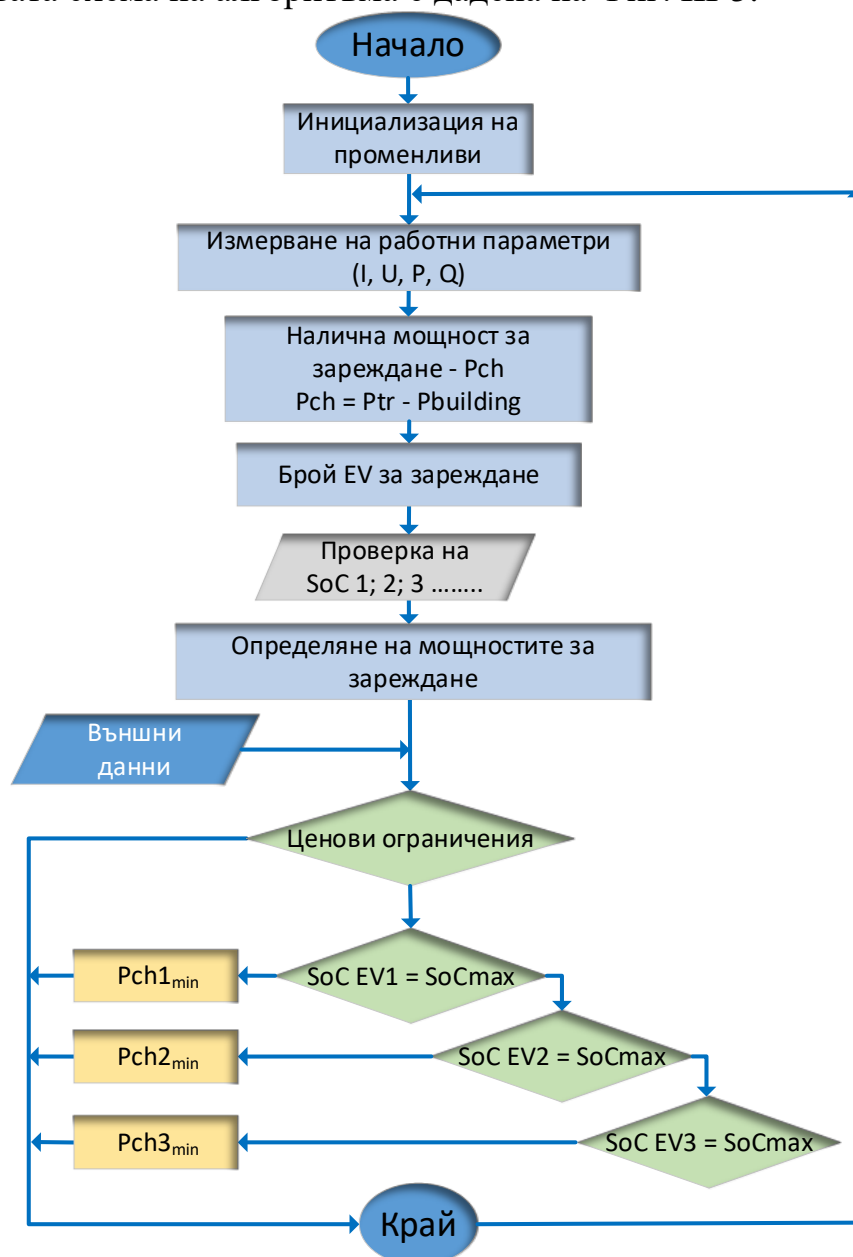
Тип IV (Фиг. III-4) приема динамичното управление на натоварването от тип III и го подобрява чрез интегриране на допълнителни функции и/или чрез интегриране със системи на трети страни (системи на управление на енергийния оператор).

Тези функции могат да включват - график на превозните, оптимизация на тарифата, интегриране с енергийна система, възобновяеми енергийни източници и съхранение на енергия в батерии на място, облачно базиран софтуер.

За всеки от изброените типове управление, в дисертацията са дадени конкретни примери за по-голяма яснота.

3.2 Алгоритми за управление

Като универсално управление е разработен алгоритъм за управление тип IV и блоковата схема на алгоритъма е дадена на Фиг. III-5.



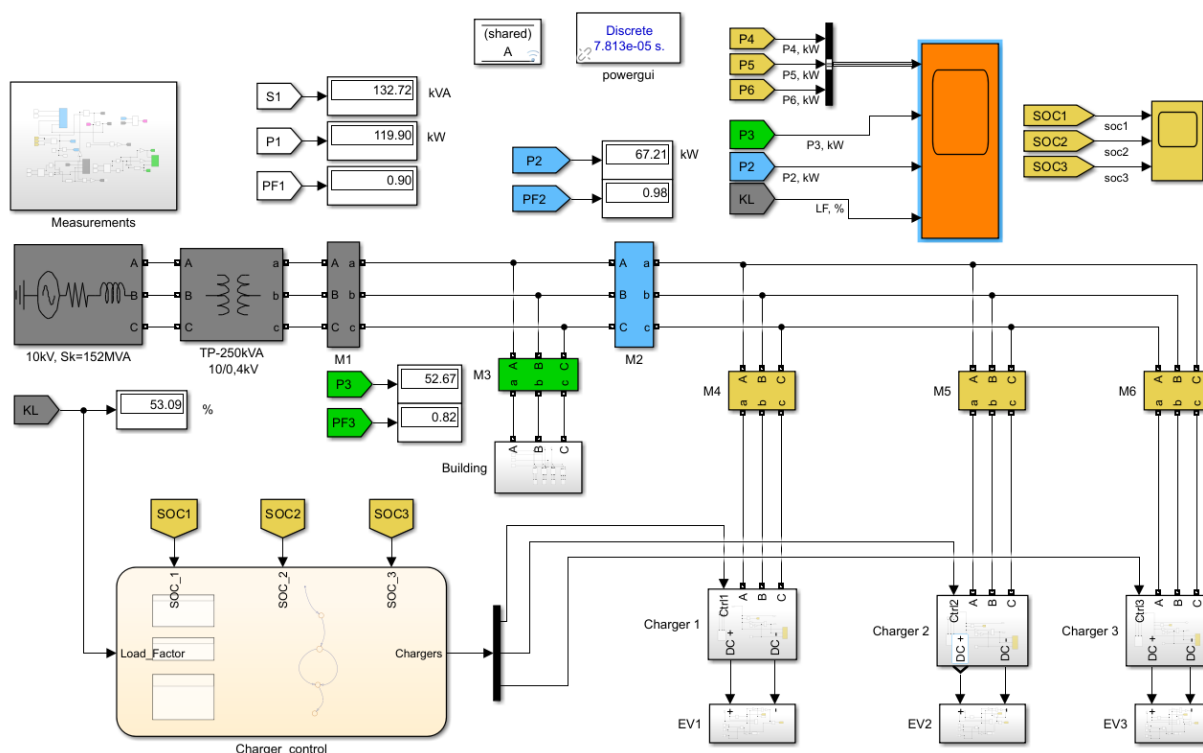
Фиг. III-5 Блокова схема на алгоритъма контролен блок

Първо се инициализират общите променливи. Следващата стъпка е да се измерват в реално време всички величини, необходими за реализиране на алгоритъма. След това е важно да се определи разполагаемата мощност (P_{ch}) за зареждане на електрическите автомобили. Тя се изчислява от общата мощност на захранващия източник (P_{tr}) минус измерената мощност на конвенционалния товар ($P_{building}$). Следващата стъпка е определяне на включените коли за зареждане и нивото им на заряд на батериите. С така наличната информация може да се изчисли мощността на зареждане на всеки автомобил – P_{ch_i} (в конкретния пример $i = 1 \div 3$).

Следващият етап от алгоритъма следи нивото на зареждане на всеки автомобил и при достигане на максималната степен на зареждане (SoC_{max}) мощността на зареждане се редуцира до зададена стойност $P_{ch_i_{min}}$. Стойностите на величините SoC_{max} и $P_{ch_i_{min}}$ могат да се променят при настройката на системата.

3.3 Програмно реализиране на алгоритмите

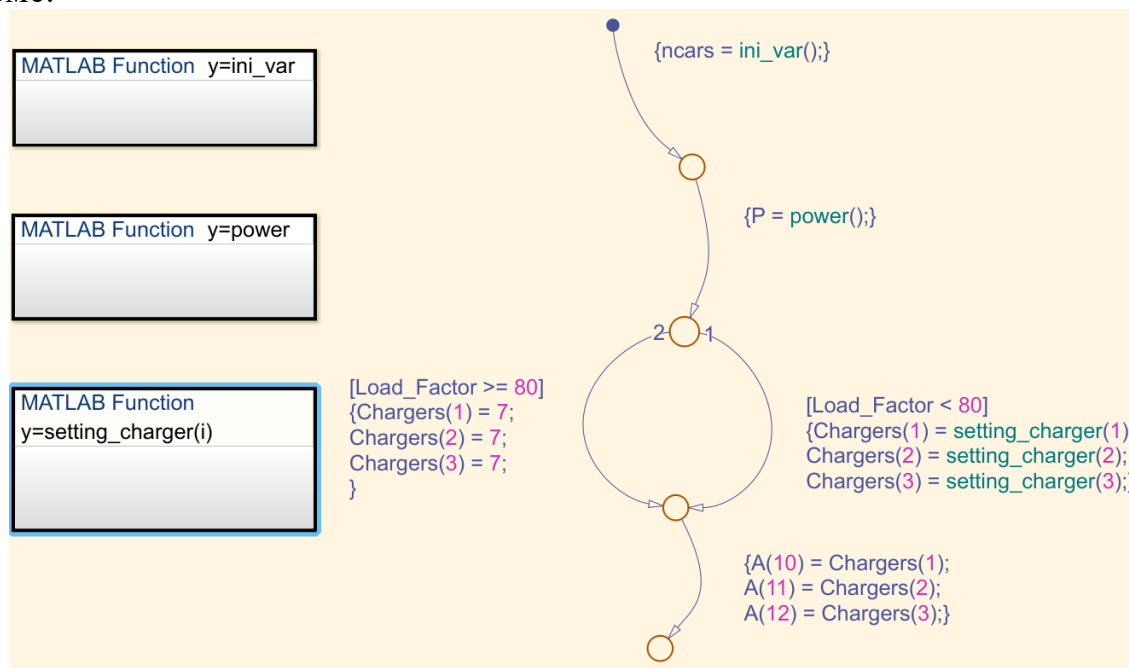
Разработен е модел в Matlab/Simulink/ и има общ вид даден на Фиг. III-6. Моделът се състои от следните основни елементи и подсистеми -захранваща система, трансформатор (подстанция), конвенционален товар (товар на сградата (променящ се по зададен товаров график), stateflow блок – контролна логика, измервателна подсистема, зарядни станции с три зарядни точки по 50kW номинална мощност, автомобили (товари на зарядната станция).



Фиг. III-6 Общ вид на модела мрежа-товар-контролен блок- зарядни станции

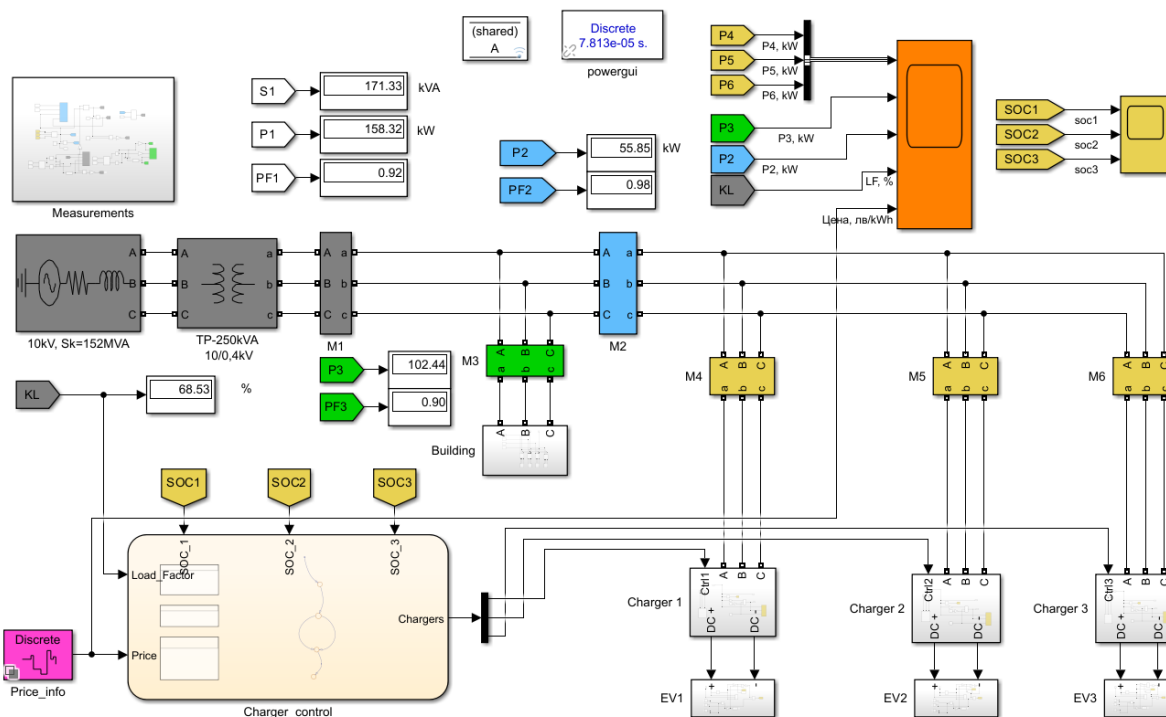
Контролната логика, съответстваща на блоковата схема от Фиг. III-5, е реализирана чрез Stateflow Chart в Matlab (Фиг. III-7).

Моделът с отчитане цената на електрическа енергия е даден на Фиг. III-8. Структурата като цяло е същата, има добавен вход към управляващата система за цената на електрическата енергия, която е възможно да се следи в реално време.



Фиг. III-7 Stateflow chart – контролна логика

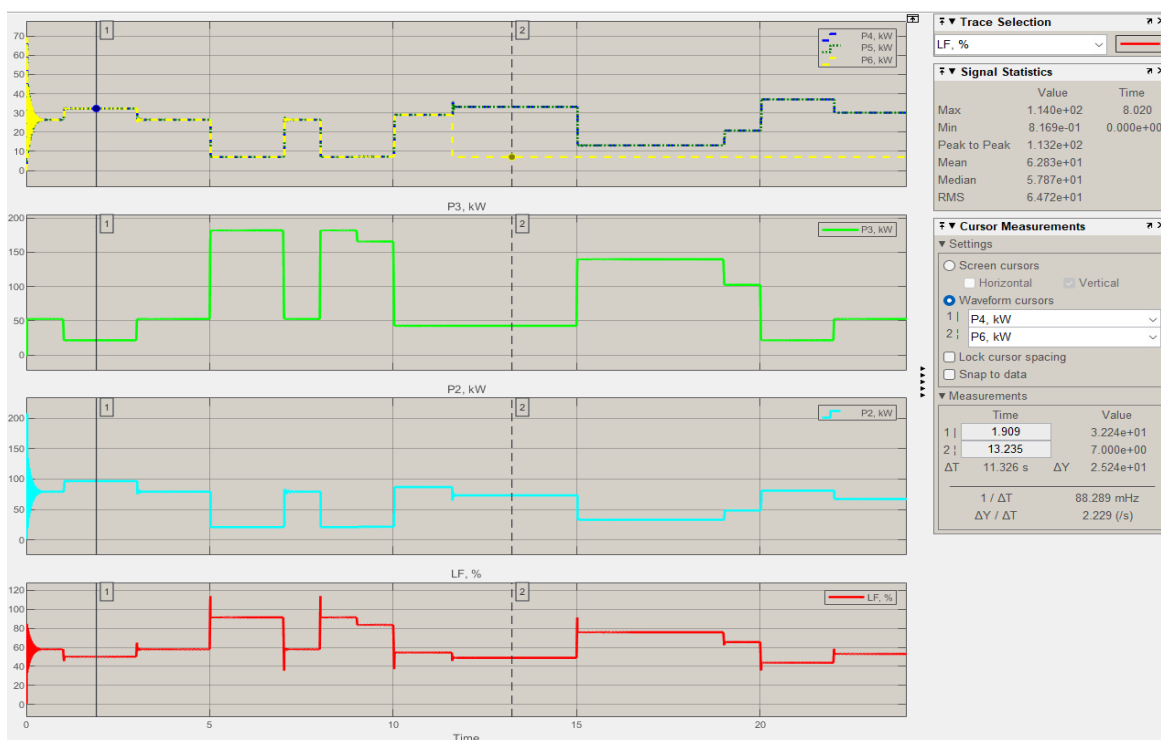
Добавени са правила в софтуера да отчитат цената на енергията. Пределната цена, при която се допуска зареждане на електрическите автомобили се задава с променливата `Price_max`.



Фиг. III-8 Модел с отчитане цената на електрическата енергия

3.4 Резултати и анализи

Примерна ситуация на работа на зарядните станции за едно денонощие, без да има ценови ограничения са дадени на Фиг. III-9.



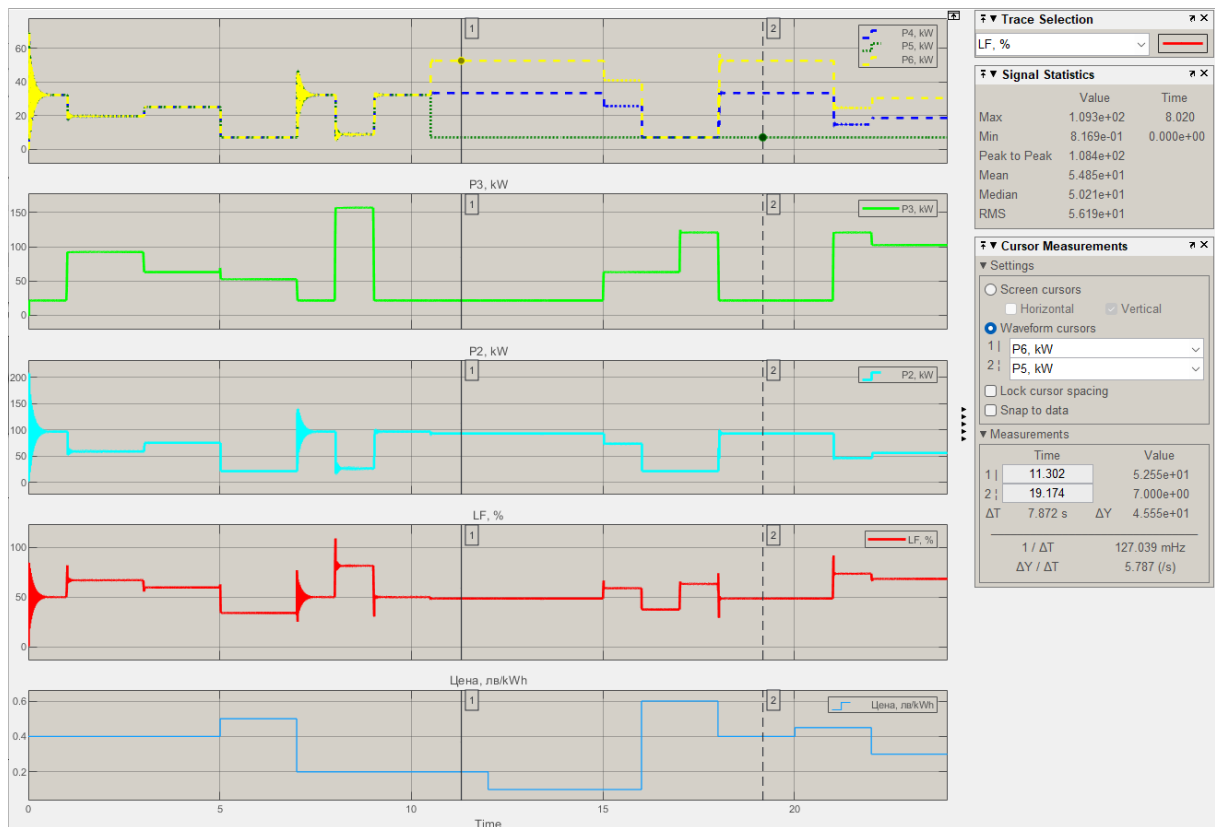
Фиг. III-9 Резултати от симулацията без отчитане цената на електрическата енергия

На Фиг. III-9 са дадени как се променят следните величини по време на симулация:

- Мощностите на зарядните точки – P4, P5, P6, kW (първа, втора и трета зарядни станции);
- Мощността на конвенционалния товар (примерно товар на сградата) – P3, kW;
- Общата мощност за зареждане на електрическите автомобили – P2, kW;
- Коефициентът на натоварване на трансформатора (подстанцията) – LF, %.

От резултатите може да се види как се редуцира и преразпределя мощността към зарядните точки при увеличаване на конвенционалния товар и съответно обратно, увеличаване при намаляване на конвенционалния товар.

На Фиг. III-10 са дадени как се променят вече изброените в предния пример величини, като е добавена и цената на електрическата енергия, защото тук има рестрикция за зареждане свързана цената на енергията.



Фиг. III-10 Резултати от симулацията с отчитане цената на електрическата енергия

3.5 Изводи към глава трета

Увеличаването на броя на електрическите автомобили изисква увеличаване и на броя на зарядните станции, което от своя страна води до увеличаване натоварването на съществуващата енергийна структура. За да може ефективно да се използва наличната структура на електрооснабдяване, ще е необходим прецизен енергиен мениджмънт. В тази насока са направените следните разработки в тази глава:

1. Направена е класификация на възможни решения за управление на товара на зарядните станции за електрически автомобили.
2. Разработен е модел на захранване на сграда и зарядни станции с ограничена захранваща мощност и променлив товаров график на работа.
3. За най-сложния тип енергиен мениджмънт, по направената класификация, е разработен алгоритъм за прилагането му.
4. На базата на алгоритъма е реализирано управление на работата на зарядни станции захранвани с ограничена мощност на захранващия източник. Моделът позволява модификации при нужда от други условия на работа.

Получените резултати могат да са полезни при изграждането и управлението на зарядната инфраструктура за електрически автомобили.

ГЛАВА 4. УПРАВЛЕНИЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ ТОВАРИ В ДОМОВЕТЕ

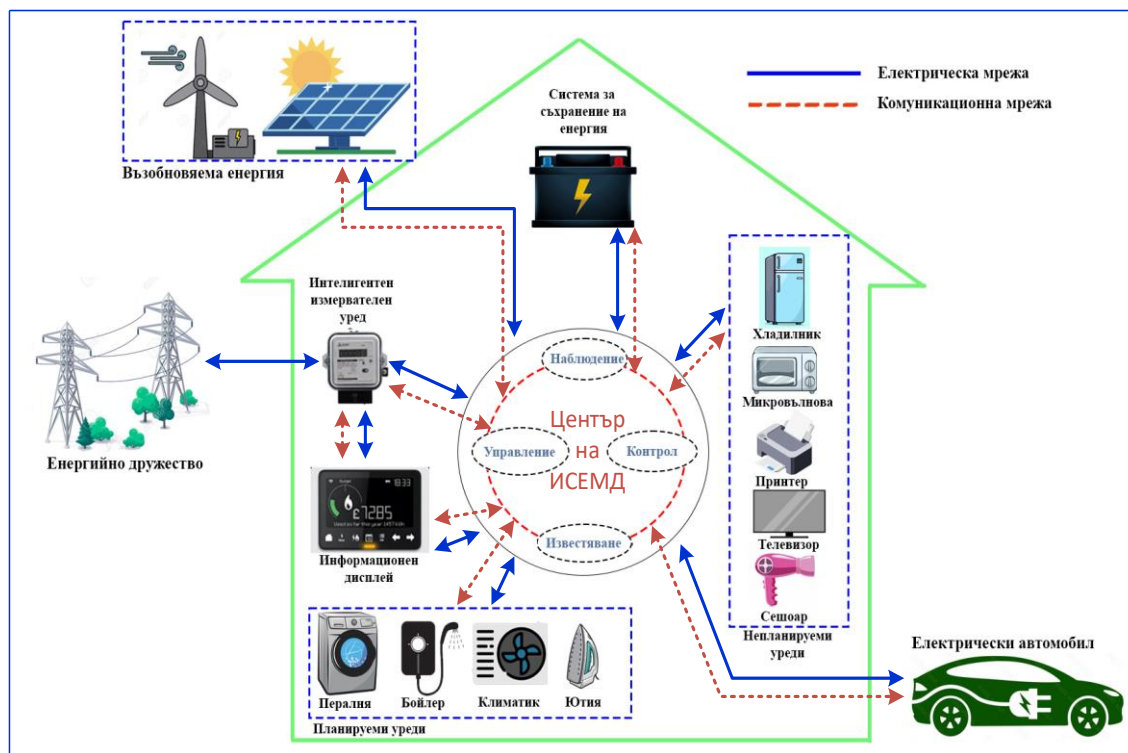
Както беше представено в литературния преглед, сградите представляват над 30% от общото потребление на енергия в световен мащаб като 20% от потреблението на сградите е от жилищни такива. Представена е обща методика и алгоритъм за управление на електрическото потребление на жилищна сграда. Като целта е тя да бъде приложима при изграждането на интелигентни системи за енергиен мениджмънт на домове – ИСЕМД.

В тази глава е представена обща методика и алгоритъм за управление на електрическото потребление на жилищна сграда. Като целта е тя да бъде приложима при изграждането на интелигентни системи за енергиен мениджмънт на домове – ИСЕМД. За да имаме обект на управление и оптимизация е направена типова къща (дом) с неговите електрически потребители и връзки с ИСЕМД – Фиг. IV-1. В следващите точки са дадени конкретни данни за електрическите потребители и времената им на работа.

Центърът има за цел да минимизира разходите и да планира всички операции въз основа на записите за потребление на енергия, цената на електроенергията в реално време и предпочитанията на клиента.

Една ИСЕМД включва:

- Битова техника
 - Планируеми електроуреди
 - Непланируеми електроуреди
- Електрически автомобил
- ВЕИ



Фиг. IV-1 Коммуникация между центъра на ИСЕМД и устройствата

4.1 Алгоритъм за управление на товарите в дома

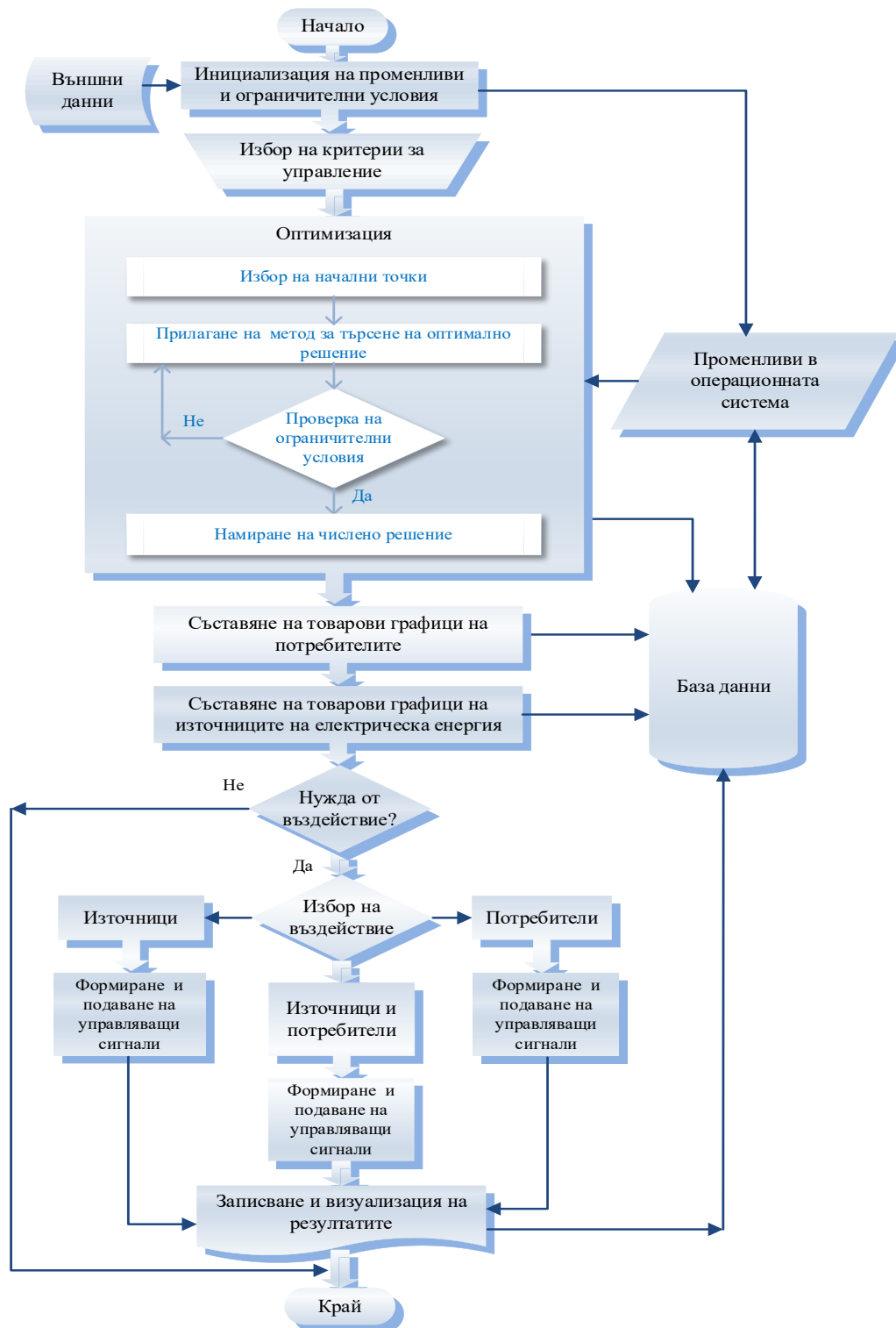
Функционална блокова схема на ИСЕМД е дадена на Фиг. IV-2. Както е показано на фигурата, управляващото ядро на системата трябва да разполага с информация за няколко „външни“ за нея подсистеми. Това са: наличните източници на електрическа енергия, различните преобразуватели на електрическа енергия (електрическите товари), информация за обективната среда и условия, в които се намира обекта на управление (в случая сградата). Последната информация се осигурява от подсистемата „Измерване“ на блоковата схема. И накрая, в идеалния случай, трябва да обменя информация, т.е. да има двупосочен канал за комуникация със системи за управление на интелигентната мрежа от по-високи йерархични нива.



Фиг. IV-2 Принципна схема за управление на енергийната ефективност на дома

Имайки предвид казаното до тук, може да се обобщи следната методика при съставянето на конкретни структурни и функционални решения за управленията на домовете.

- Да се оцени наличната инфраструктура за комуникация с мрежата (има ли мрежата елементи на интелигентна мрежа);
- Да се направи проучване за каналите за информация, свързани с пазара на електрическа енергия;
- Да се оценят наличните пасивни средства за енергийна ефективност на сградата;



Фиг. IV-3 Алгоритъм на работа на ИСЕМД

- Да се изследва и реши какви основни цели ще се преследват при изграждането на конкретната система за енергийна ефективност, като се има предвид, че постигането на тези цели не трябва да понижи качеството на живот на обитателите на сградата или да наруши постигането на стандартни изисквания на средата на живот;

- Да се направи проучване на наличните източниците на електрическа енергия и трябва ли да се добавят нови;
- Да се изследват и анализират товарите графици на електрическите потребители в сградата.

Както се вижда от описаната методика за направата на едно предпроектно проучване, е необходима много информация, което означава, че предварителното наличие на интелигентни системи за измерване ще улесни проектирането и изграждането на ИСЕМД.

Алгоритъмът на работа на една такава ИСЕМД система е даден на Фиг. IV-3. Той се състои от оптимизации, съставяне на товари графици на потребителите и товари графици на източниците на електрическа енергия.

Съществен елемент в алгоритъма на работа е нуждата от целеви функции за оптимизация на двете основни подсистеми: за производство и консумация на електрическата енергия.

Вижда се, че една такава структура за управление ще е достатъчно сложна и в бъдеще неизменно ще използва възможностите на разработваните системи с изкуствен интелект.

4.2 Оптимизация на товарния график на потребителите на електрическа енергия

Постановката на задачата е, че домът се захранва само от обществената електрическа мрежа. Целта е да се минимизира стойността за заплащане на консумираната електрическа енергия.

За съставянето на товарите графици на работа на всеки един консуматор може да се използва следната целева функция (IV-1)

Целева функция: $\min (E_{24})$:

$$E_{24} = \sum_i^N \sum_{t_i=t_{ni}}^{t_{ki}} \beta_t \cdot P_{\text{средно},i} \quad (IV-1)$$

Ограничителни условия:

$$t_i \leq t_k \quad (IV-2)$$

$$t_i \geq t_n \quad (IV-3)$$

В Таблица IV-2 са дадени най-често използваните уреди в един дом, като са дефинирани и ограничителните условия свързани със съставянето на товарите им графици.

Таблица IV-2 Основни типове консуматори и времена на работа

	Електроуред	Средна мощност, kW	Начално време	Крайно време	Време на работа
1	Хладилник с фризер	0.2	0:00	0:00	24.00
2	Съдомиялна	0,75	22:00	23:30	1.30
3	Ютия	3	19:00	20:30	1.30
4	Тостер	0.85	8:00	8:05	0.05
5	Сешоар	2	20:00	20:20	0.20
6	Телефон	0.15	23:00	0:00	1.00

	Електроуред	Средна мощност, kW	Начално време	Крайно време	Време на работа
7	Телевизор	0.1	17:00	23:00	7.00
8	Компютър	0.9	17:00	23:00	7.00
9	Климатик	3.3	0:00	0:00	24.00
10	Преса за коса	0.1	20:20	20:40	0.20
11	Фурна	2.1	17:00	18:00	1.00
12	Пералня	0.7	19:30	21:00	1.30
13	Микровълнова	0.8	18:00	18:05	0.05
14	Праховсмукачка робот	0.7	10:00	10:30	0.30
15	Праховсмукачка	0.7	14:00	15:00	1.00
16	Сушилня	1	21:00	23:00	2.00
17	Бойлер	2.2	17:00	20:00	4.00
18	Котлони	2.4	18:00	18:30	0.30

4.3 Оптимизация на товарния график при собствени източниците на електрическа енергия

Разглежда се вариант на захранване на дома с наличен собствен енергиен източник и електрическа енергия от мрежата. От гледна точка на най-достъпен автономен източник в нашата задача избираме фотоволтаична централа, като собствен източник, а като външен обществената електрическата мрежа. Фотоволтаичната централа ще има възможност за съхранение на енергия. Няма да се връща енергия в мрежата. Критерият за оптимизация ще е като преди, а именно – минимални разходи за използваната електрическа енергия.

Броят на уредите, които трябва да бъдат избрани (да останат включени) за определен час, зависи от целевата функция и ограниченията, т.е. да се плати възможно най-минимална сметка за електрическа енергия и общата консумация на енергия на уредите трябва да отговаря на ограниченията, дадени от уравнения (IV-22) и (IV-23). Проблемът с оптимизацията се определя като

Целева функция

$$\min \left(\left(E^a(t) + E^b(t) - E^{PV}(t) - ES(t) \right) \cdot \beta^{DAP}(t) \right) \quad (IV-21)$$

Ограничителни условия

$$E^{\text{общо}}(t) \leq E_{\text{мрежа}}(t) + E^{PV}(t) + ES(t), \quad \forall \quad 1 \leq t \leq 24 \quad (IV-22)$$

$$E^{\text{общо}}(t) \geq E_{\text{непланируеми}}^{\min} \quad (IV-23)$$

$$\tau_0 \leq \tau_{\text{планируеми}} \leq \tau_{\max} \quad (IV-24)$$

Целевата функция е съставена от дневната консумирана енергия на планируемите уреди $E^a(t)$ и непланируемите уреди $E^b(t)$, енергията от

фотоволтаичната система E^{PV} , съхранената енергия $ES(t)$ и $\beta^{DAP}(t)$ цената на електрическата енергия в конкретния времеви интервал t .

4.4 Изводи към глава четвърта

1. Синтезирана е принципна блокова схема на интелигентна система за енергиен мениджмънт на дома, като са дефинирани и класифицирани основните видове електрически потребители в дома.
2. Разработен е алгоритъм на работа на интелигентна система за енергиен мениджмънт на дома, като основната цел на такава система е повишаване ефективността на използваната електрическа енергия.
3. Съставени са целеви функции за оптимизиране разходите за електрическа енергия в битови сгради, като се разглеждат два варианта
 - Първият е за къща захранвана само от мрежата;
 - Вторият за къща захранвана от фотоволтаична централа с възможност за съхранение на енергия и връзка с мрежата.

НАУЧНОПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Разработен е алгоритъм на работа на интелигентна система за енергиен мениджмънт на дома, който позволява повишаване ефективността на използваната електрическа енергия.
2. Разработена е целеви функции за оптимизиране разходите за електрическа енергия в битови сгради, при две различни постановки на задачата. Едната е за къща захранвана само от мрежата, а другата за къща захранвана от фотоволтаична централа с възможност за съхранение на енергия и връзка с мрежата.
3. Разработен е математически и стимулационен модел на работа на зарядна станция, която може да работи и двата режима - G2V и V2G, т.е. режимите на консумиране на електрическа енергия и режим на източник на електрическа енергия.

ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Разработен е модел на електроснабдителна система с променлив конвенционален товар и захранваща група зарядни станции. Моделът може да се използва за изследване режимите на работа и системите за управление на електрическите товари.
2. Разработен е алгоритъм и програма за управление на група зарядни станции, захранвани с ограничена и променяща се във времето мощност. Програмата може да се използва в реални контролери за управление на зарядната инфраструктура на електрическите автомобили.

3. Синтезирана е принципна блокова схема на интелигентна система за енергиен мениджмънт на дома, като са дефинирани и класифицирани основните видове електрически потребители в дома. Този резултат може да се използва при следващи разработки и моделиране на системи за управление в интелигентните мрежи.
4. Разработени са математически модели, които могат да се използват при проектирането на SCADA системи в разпределителните мрежи на градовете и позволяват изследване на много-вариантни технически решения и подпомагат избора на най-добрите от тях.
5. Разработени са лабораторни упражнения за прилагането на резултатите от дисертацията в обучението на студенти и докторанти.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Matanov N., **A. Zahov**. Remote Electricity Metering Systems. 11th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria, 2019.
2. Matanov N., **A. Zahov**. Developments and Challenges for Electric Vehicle Charging Infrastructure. 12th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria, 2020.
3. Matanov N., **A. Zahov**., I. Angelov. Modeling of the Electric Vehicle Charging Process - Part 1. 13th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria, 2021.
4. Matanov N., **A. Zahov**., I. Angelov. Modeling of the Electric Vehicle Charging Process - Part 2. 14th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria, 2022.
5. Matanov N., **A. Zahov**., I. Angelov. Management of Electric Loads When Charging Electric Vehicles. 15th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria, 2023.

SMART GRIDS AND THE MODERN CITY

MSc. Eng. Atanas Zahov

SUMMARY

The dissertation is developed in four chapters. In the first chapter, a literature review of the existing problems with the use of electrical energy in smart cities is made. The potential of smart metering infrastructure, the types of charging stations for electric cars and the consumption of buildings and homes are examined.

In the second chapter, the problem of charging stations for electric cars is discussed. The charging process of the lithium-ion batteries and the basic block diagram of a charging station were examined. Matlab models were developed, and the simulations allowed the operation of the battery in the modes of consumption of electrical energy (G2V) and in the mode of source of electrical energy (V2G).

The third chapter contains a method for managing a group of charging stations. The method is divided into four types of management classified by complexity. An algorithm has been developed for the control of charging stations of type IV. Matlab models were created to validate the algorithm. The models use *Stateflow* control logic, which monitors the load on the substation and the available power to be distributed between the charging stations, in the second model an external factor for the cost of electricity is added. The results of the simulations show correct operation of all components of the models and control algorithms. Each of the elements can be changed, including the control algorithm when required to realize a specific situation with other input parameters.

The fourth chapter deals with the management of electrical loads in homes. The communication between the center of the smart home load management system and electrical appliances, EVs and renewable energy sources are examined. Considered is a basic scheme for managing energy efficiency in the home and an algorithm is developed. Two cases of home load optimization using objective functions are considered. The first considers when the home is powered only by the electricity grid and optimizes the time of use of each electrical appliance in order to reduce the electricity bill. The second considers when the home has a renewable energy system and an energy storage system.