

Підвищення електромагнітної сумісності і енергоефективності зарядної станції електромобілів

Багач Р. В.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна
Надійшла: 19.03.2024. Прийнято: 02.06.2024. Опубліковано: 11.06.2024. Відкритий доступ: CC BY 4.0.

Анотація. У статті запропоновано одноланкову структуру зарядної станції електромобілів з використанням активного чотириквADRантного випрямляча з корекцією коефіцієнта потужності. Побудована Matlab-модель розглянутої зарядної станції, яка враховує параметри мережі живлення, параметри ключів активного випрямляча та його систему автоматичного керування, а також еквівалентну модель акумуляторного відсіку. На підставі поліноміальної апроксимації енергетичних залежностей IGBT-модулів створено математичну модель розрахунку статичних та динамічних втрат. Проведений аналіз параметрів якості електроенергії, складових енергії втрат та ККД зарядної станції на інтервалі повного заряду батареї при різних струмах заряду та частоті ШІМ.

Ключові слова: зарядні станції, електромобіль, активний випрямляч, ефективність, якість електроенергії, широтно-імпульсна модуляція.

Вступ

З кожним роком електромобілі стають привабливішими порівняно з автомобілями з двигунами внутрішнього згорання. Розвитку електромобілів (EV) приділяється значна увага уряду, виробників та дослідників [1-3]. При цьому важливим питанням є створення енергоефективних зарядних станцій із найвищими параметрами коефіцієнта корисної дії потужності. Досить важливим параметром є час заряду тягових батарей електромобілів. У зв'язку з цим досить перспективними є топологія громадських зарядних станцій з режимом швидкої зарядки (DC, Mode 4) [1-3]. До громадських зарядних станцій електромобілів висуваються вимоги забезпечення електромагнітної сумісності з живлячою мережею, обмеження емісії вищих гармонік фазних струмів, а також підвищення коефіцієнту корисної дії та зниження власних втрат потужності [5].

Традиційні зарядні станції швидкої зарядки зазвичай містять дві ланки перетворення, а саме вхідного випрямляча AC/DC і вихідного DC/DC перетворювача [6,7]. У даній

топології DC/DC перетворювач забезпечує регулювання вихідної напруги та струму зарядної станції у широкому діапазоні. DC/DC перетворювач використовується також для забезпечення гальванічної розв'язки електромобіля з мережею. Схема швидкої зарядної станції на основі AC/DC – DC/DC представлена на рис. 1.

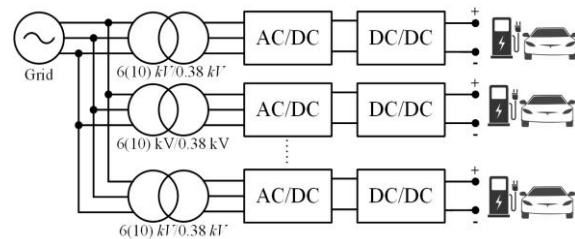


Рис. 1. Схема швидкої зарядної станції на основі AC/DC – DC/DC

У той же час дволанкове перетворення електроенергії веде до додаткових втрат і зниження коефіцієнта корисної дії потужності зарядної станції.

Аналіз публікацій

Створення енергоефективних зарядних станцій стає ключовим аспектом зі зростанням числа електромобілів. До зарядних станцій електромобілів висуваються вимоги за наступними показниками: можливість режиму швидкої зарядки, забезпечення збільшення ККД, забезпечення коефіцієнту потужності близького до одиниці, можливість двонаправленої передачі електроенергії, рівень емісії вищих гармонік, що забезпечує вимоги міжнародних та українських стандартів та інші показники [7-9].

Задачею дослідників є створення зарядних станцій, які б дозволили забезпечити низький рівень втрат потужності в перетворювачі зарядної станції, забезпечили вимоги електромагнітної сумісності та змогли б при цьому забезпечити режим швидкого заряду. Таким чином питанням, покращення параметрів енергоефективності перетворювачів зарядних станцій електромобілів, а саме підвищення ККД, зниження рівня вищих гармонік струмів та реалізація режиму швидкого заряду тягових акумуляторних батарей електромобілів є актуальним.

Вивчення та аналіз усіх питань, пов'язаних з якістю електричної енергії та енергоефективності зарядних станцій для електромобілів, присвячені роботи українських та закордонних науковців.

В роботі [8] запропоновано триланкову структуру зарядної станції електромобілів потужністю 80 кВт на базі резонансного перетворювача, що містить інвертор, високочастотний трансформатор та керований випрямляч. Запропоноване технічне рішення дозволяє забезпечити гальванічний розв'язок та регулювання режиму заряду, проте зумовлює досить високі втрати потужності в двох перетворювачах та проміжному трансформаторі.

В роботі [9] запропонована структура зарядної станції на базі дволанкової структури, що містить два послідовні DC/DC перетворювача. Дві ланки перетворення забезпечують режим зарядку «постійний струм – постійна напруга», проте зумовлюють підвищені втрати потужності.

В роботі [10] запропонована зарядна станція електромобілів, що містить дві ланки перетворення на базі керованого випрямляча та повномостового DC/DC перетворювача з проміжним конденсатором, що працює в режимі шви-

дкого заряду. В роботі не досліджено показники електромагнітної сумісності з електричною мережею та не представлено результати досліджень втрат потужності та ККД.

Таким чином в оглянутих дослідженнях представлені рішення визначають необхідність використання декількох послідовних перетворювачів, що зумовлює додаткові втрати потужності. Крім цього не визначені параметри електромагнітної сумісності з живлячою мережею, а також показники ККД запропонованих рішень зарядних станцій.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є покращення енергетичної ефективності та електромагнітної сумісності зарядної станції електромобілів, шляхом реалізації зарядної станції на базі активного чотириквadrантного випрямляча з корекцією коефіцієнта потужності.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких завдань:

- опис запропонованої схеми електричної схеми зарядної станції для електромобілів з одноланковим перетворенням енергії на базі активного чотириквadrантного випрямляча;
- визначення параметрів навантаження зарядної станції, а саме параметрів схеми заміщення акумуляторної батареї у електромобілі Tesla Model S;
- розробка Matlab-моделі запропонованої зарядної станції електромобілів;
- дослідження на моделі втрат потужності втрат в складових запропонованої зарядної станції та визначення ККД;
- визначення на моделі параметрів якості електричної енергії зарядної станції, а саме коефіцієнта потужності та коефіцієнта гармонійних спотворень фазного струму.

Запропонована топологія зарядної станції

У даній роботі висунуто авторами вперше топологію концепції громадської зарядної станції, що ґрунтується на активному трифазному випрямлячі (AB) із корекцією коефіцієнта потужності рис. 2. При цьому активний випрямляч виконує функцію регулювання вихідної напруги та струму заряду, а гальванічну розв'язку забезпечує вхідний трансформатор.

Перевагами від існуючих рішень запропонованої зарядної станції з АВ є високий коефіцієнт потужності, що наближається до

одиниці, низький рівень гармонічних спотворень споживаного струму, що визначається коефіцієнтом гармонійних спотворень (англ. THD total harmonic distortion). Коефіцієнт гармонійних спотворень фазного струму зарядної станції визначається згідно виразу:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}, \quad (1)$$

де I_1 – діюче значення першої гармоніки струму; n – порядок (номер) вищої гармоніки; I_n – діюче значення n -ої вищої гармоніки

в фазному струмі.

Запропонована схема рядної станції забезпечує $THD < 5\%$, покращений ККД порівняно з дволанковими зарядними станціями типу AC/DC – DC/DC, а також можливість забезпечення двонаправленої передачі енергії від акумуляторної батареї до електричної мережі в разі необхідності створення мікромережі, або режиму V2G (англ. Vehicle to grid) [8].

Схема запропонованої зарядної станції для електромобілів на базі активного чотириквadrантного випрямляча представлена на рис. 2.

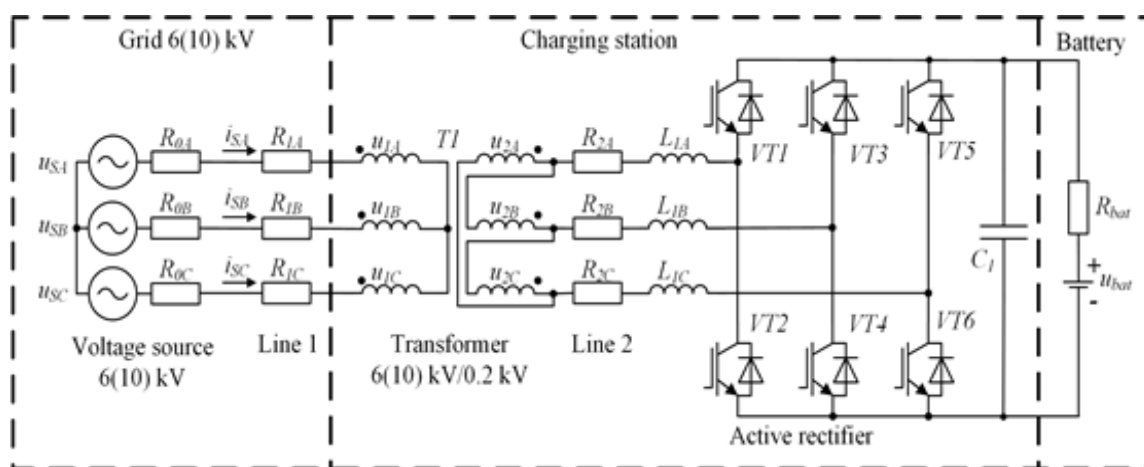


Рис. 2. Схема зарядної станції для електромобілів на базі активного чотириквadrантного випрямляча

В запропонованому рішенні зарядна станція живиться від електричної мережі 6(10) кВ. Параметри трифазного трансформатора живильної підстанції типу ТМН4000/35/6 визначають характеристики мережі живлення [9], для якого опір фази $R_{0A} = 1,4$ Ом [10]. Параметри лінії 1 визначаються відстанню між тяговою підстанцією та перетворювальним трансформатором, яке прийемо рівним 1 км. Використаний у лінії 1 алюмінієвий трижильний кабель має величину опору фази R_{1A} , що дорівнює 0,8 Ом/км. Перетворювальний трансформатор серії ТСЗП-1000/10/0,23УЗ має номінальну потужність 0,878 МВт та втрати короткого замикання 8 кВт. Сумарний еквівалентний опір його обмотки його фази R_{TV} дорівнює 1,73 мОм. Параметри лінії 2 визначаються відстанню між перетворювальним трансформатором Т1 та активним випрямлячем, яке прийнято рівним 50 м. При цьому переріз мідного кабелю

дорівнюватиме 350 мм², величина опір фази $R_{2A} = 2,5$ мОм. Значення індуктивності входних дроселів активного випрямляча дорівнюють 0,2 мГн. В якості силових транзисторів були обрані ключі типу CM600DX-13T від виробника Mitsubishi Electric з параметрами струму колектора I_c 600 А та напруги колектор-емітер U_{CE} 650 В, ємність вихідного конденсатора дорівнює 20 мФ. Система автоматичного регулювання струму та напруги заряду батареї реалізована на підставі інтегрального регулятора з подальшим ШІМ формуванням форми входного струму [11].

В роботі досліджувався заряд еквівалентної моделі батарейного відсіку електромобіля Tesla S, який містить 7104 батареї Panasonic NCR – 18650 сумарною ємністю 85 кВт·год [12]. Схема з'єднання тягових батарей електромобіля Tesla Model S наведено на рис. 3 [12].

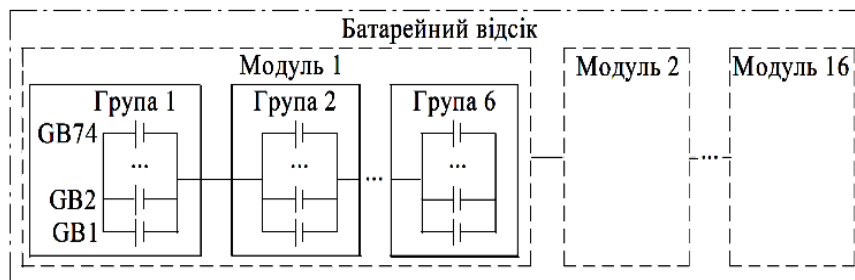


Рис. 3. Схема з'єднання батарей у електромобілі Tesla Model S

У батареїному відсіку окремі батареї типу NCR-18650b паралельно з'єднуються до груп по 74 шт. При паралельному з'єднанні напруга групи дорівнює напрузі кожного з елементів 4,2 В, а ємність групи дорівнює сумі ємностей елементів 250 А·г. Далі шість груп послідовно з'єднуються в модуль. При цьому напруга модуля підсумовується з напруги груп і дорівнює 25,2 В. Далі модулі з'єднуються послідовно в батарею. Усього батарея містить 16 модулів (всього 96 груп). Напруга всіх повністю заряджених модулів підсумовується і становить 400 В. Також розрахований і еквівалентний опір блоку батарей. Виходячи з того, що середній опір одного акумулятора типу R_{NCR} складає 37 мОм, еквівалентний опір батареї електромобіля R_{bat} за схемою з'єднання дорівнює 27 мОм.

При реалізації швидкого заряду батареї значну роль відіграє метод (алгоритм), який використовуватиметься для заряду батареї. Розглянутий відомий метод заряду акумулятора, який користується найбільшою популярністю, – це метод «постійний струм – постійна напруга» (англ. CC–CV, constant current – constant voltage). Режим заряду по методу CC – CV представлено на рис. 4.

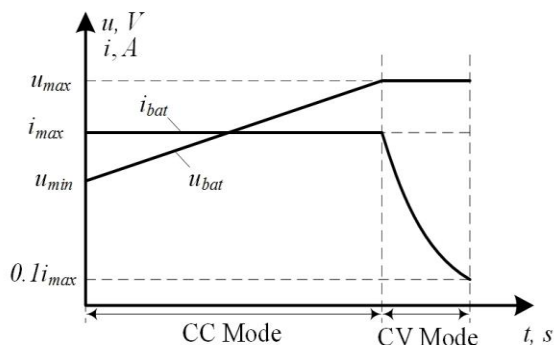


Рис. 4. Режим заряду по методу CC – CV

Основна концепція методу CC – CV полягає в тому, що акумулятор заряджається сталою максимальною силою струму i_{max} , яка визнача-

ється виробником батареї до досягнення певної напруги відсікання u_{max} . Після досягнення цієї напруги акумулятор продовжує заряджатися при цій напрузі до того моменту, коли споживання струму зменшиться приблизно до 0,1С або менше, що гарантує повний заряд [13]. Слід зазначити, що при перемиканні з режиму CC на режим CV (це відбувається приблизно на 80% заряду акумулятора) швидкість заряду значно зменшується.

Розрахунок ККД

У роботі проведено оцінку коефіцієнта корисної дії запропонованої зарядної станції, представленої на рис. 2 коефіцієнта корисної дії оцінювався на підставі сумарної енергії втрат та корисної енергії отриманої батареєю протягом повного інтервалу заряду [14,15]. Була використана формула для розрахунку коефіцієнта корисної дії:

$$\eta = \frac{E_{Load}}{E_{Load} + \Delta E_{\Sigma}}, \quad (2)$$

де E_{Load} – корисна енергія, передана на батарею під час заряду; ΔE_{Σ} – сумарна енергія втрат у розглянутій системі.

$$\Delta E_{\Sigma} = E_S + E_{L1} + E_{TV} + E_{L2} + E_L + E_{AR} + E_{bat}, \quad (3)$$

де E_S – енергія втрат у джерелі 6(10) кВ; E_{L1} – енергія втрат у лінії 1; E_{TV} – енергія втрат у трансформаторі; E_{L2} – енергія втрат у лінії 2; E_{AR} – енергія втрат у ключах активного випрямляча; E_{bat} – енергія втрат у батареї.

Корисна енергія, передана в навантаження:

$$E_{Load} = \int_0^{T_3} (u_{Load} \cdot i_{Load}) \cdot dt, \quad (4)$$

де T_3 – час повного заряду батареї EV; u_{load} –

миттєве значення вихідної напруги, що подається на акумуляторний відсік літій-іонних батарей (при заряді діапазон від 340 В до 420 В); i_{load} – миттєве значення струму навантаження (заряд батареї), яке в процесі заряду варіюється від 15 до 400 А.

Оцінку ККД виконано для режиму CC–CV шляхом комп’ютерного моделювання.

Втрати в джерелі 6(10) кВ, лінії 1, в трансформаторі Т1, лінії 2 і в батареї розраховуються за формулою:

$$E = \int_0^{T_2} (i^2 \cdot R) \cdot dt, \quad (5)$$

де i і R – миттєве значення струму і опір в ділянці ланцюга, що розраховується.

Для визначення втрат потужності в силових транзисторах активного випрямляча було обрано IGBT – модуль типу CM600DX – 13Т. Сумарні втрати в IGBT – модулі складаються з динамічних і статичних втрат в IGBT – транзисторі та зворотному діоді [15], розраховуються:

$$E_{loss.IGBT} = E_{loss.VT} + E_{loss.VD}; \quad (6)$$

$$E_{lossVT} = E_{VT.DC} + E_{VT.SW}; \quad (7)$$

$$E_{lossVD} = E_{VD.DC} + E_{VD.SW}, \quad (8)$$

де $E_{VT.DC}$ – енергія статичних втрат у IGBT – транзисторах; $E_{VT.SW}$ – енергія динамічних втрат у IGBT – транзисторах; $E_{VD.DC}$ – енергія статичних втрат у паралельних діодах; $E_{VD.SW}$ – енергія динамічних втрат у паралельних діодах:

$$E_{VT.DC} = \int_0^{T_2} (i_c \cdot u_{ce}) dt, \quad (8)$$

де i_c – струм колектора; $u_{ce}(i_c)$ – напруга між колектором та емітером, що залежить від величини струму колектора.

Динамічні втрати в IGBT – транзисторах визначаються відповідно до виразу:

$$E_{VT.SW} = \int_0^{T_2} [E_{on}(I_c) + E_{off}(I_c)] \cdot dt, \quad (9)$$

де $E_{on}(I_c)$ та $E_{off}(I_c)$ – енергія, що розсіюється в транзисторі при вмиканні та вимиканні, яка залежить від величини струму колектора.

Статичні втрати у зворотних діодах:

$$E_{VD.DC} = \int_0^{T_2} (u_{fwd} \cdot i_{vd}) \cdot dt, \quad (10)$$

де u_{fwd} – падіння напруга на зворотному діоді; i_{vd} – струму зворотного діода.

Динамічні втрати у зворотних діодах:

$$E_{VD.SW} = \int_0^{T_2} E_{rec}(i_{vd}) \cdot dt, \quad (11)$$

де E_{rec} – енергія відновлення зворотного діода.

Залежності $E_{on}(i_c)$, $E_{off}(i_c)$, $E_{rec}(i_c)$, $u_{ce}(i_c)$, $u_{fwd}(i_{vd})$ взяті з технічної документації на модуль CM600DX-13Т. [16].

Моделювання зарядної станції

Для досліджень параметрів електромагнітної сумісності запропонованої автором зарядної станції та визначення втрат потужності та ККД запропонованої структури було розроблено Matlab – модель зарядної станції на базі активного чотириквadrантного випрямляча, яка наведена на рис. 5.

Система автоматичного керування (САК) з активним випрямлячем побудована на основі інтегрального регулятора, забезпечує сталість струму заряду на етапі заряду «постійний струм» та сталість напруги на етапі заряду «постійна напруга», що вимагає режим заряду CC–CV.

Метод широтно-імпульсної модуляції відзначається перевагою перед гістерезисним методом у можливості зменшення частоти комутації ключів АВ та обумовлює зменшення динамічних втрат у ключах та підвищення ККД. Запропонована автором структурна схема системи управління АВ з широтно-імпульсною модуляцією представлена на рис. 6 [17].

На рис. 6 позначено: I_{fb} , U_{fb} і I_{ref} , U_{ref} – струми та напруги заряду батарей, отримані у зворотному зв'язку та блоці сигналу задання відповідно.

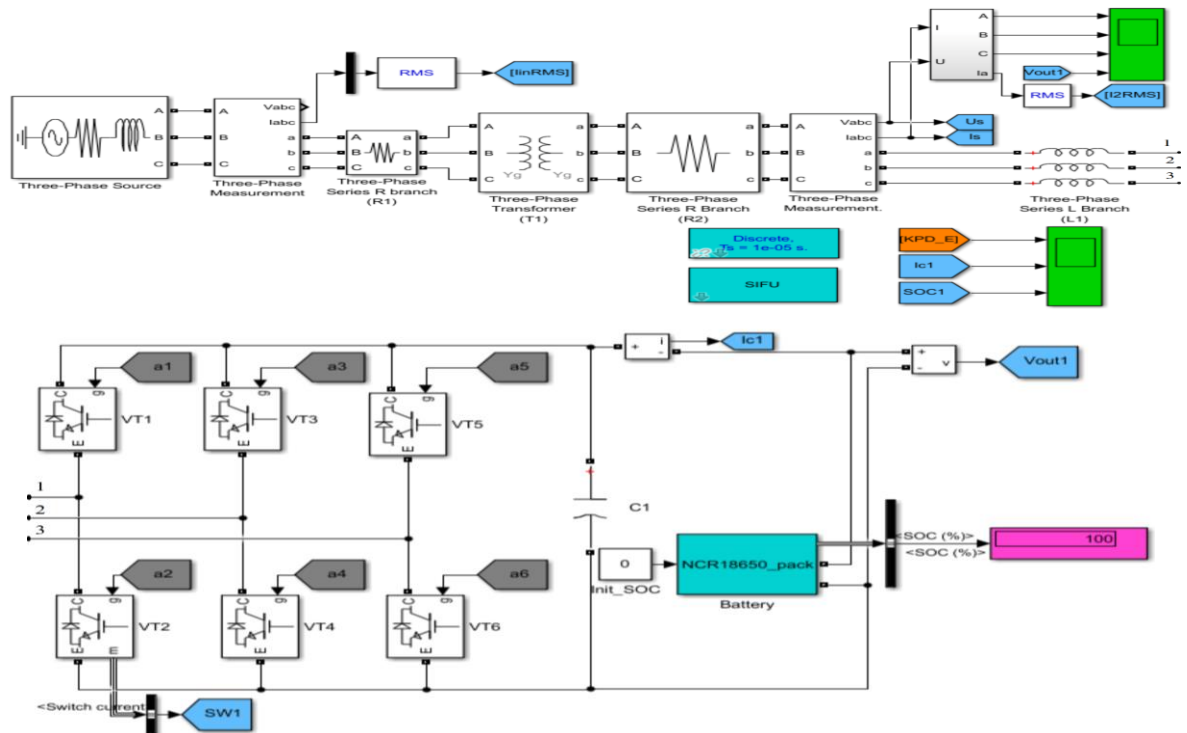


Рис. 5. Matlab-модель системи зарядної станції для електромобілів

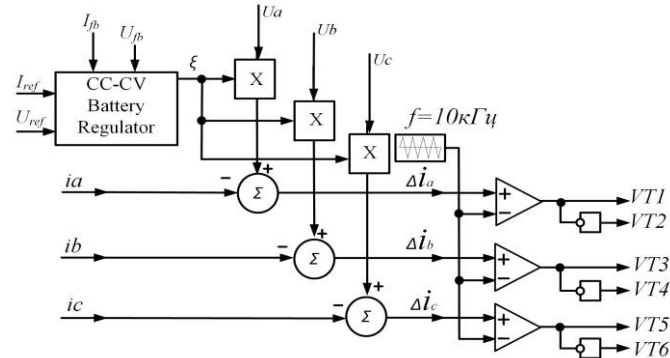


Рис. 6. Структура САК напруги та струму заряду батареї трифазного АВ із ШІМ

У субмоделі блоку регулятора напруги та струму заряду батареї (CC-CV battery regulator), зображеному на рис. 6, реалізований інтегральний регулятор. Характерною особливістю запропонованого регулятора є використання різних інтегральних коефіцієн-

тів для режимів установки струму та напруги заряду. Це покращує динаміку регулювання в порівнянні з ситуацією, коли в обох режимах (CC та CV) використовується однаковий коефіцієнт рис. 7.

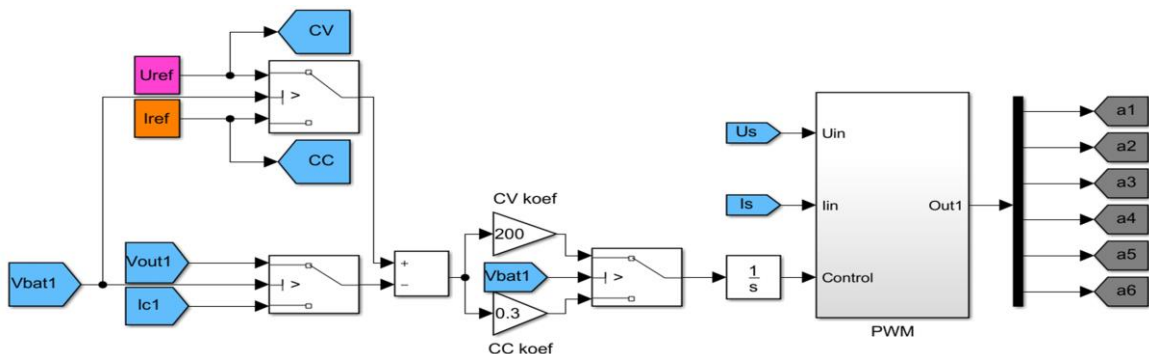


Рис. 7. Модель САК напруги та струму заряду батареї трифазного АВ із ШІМ

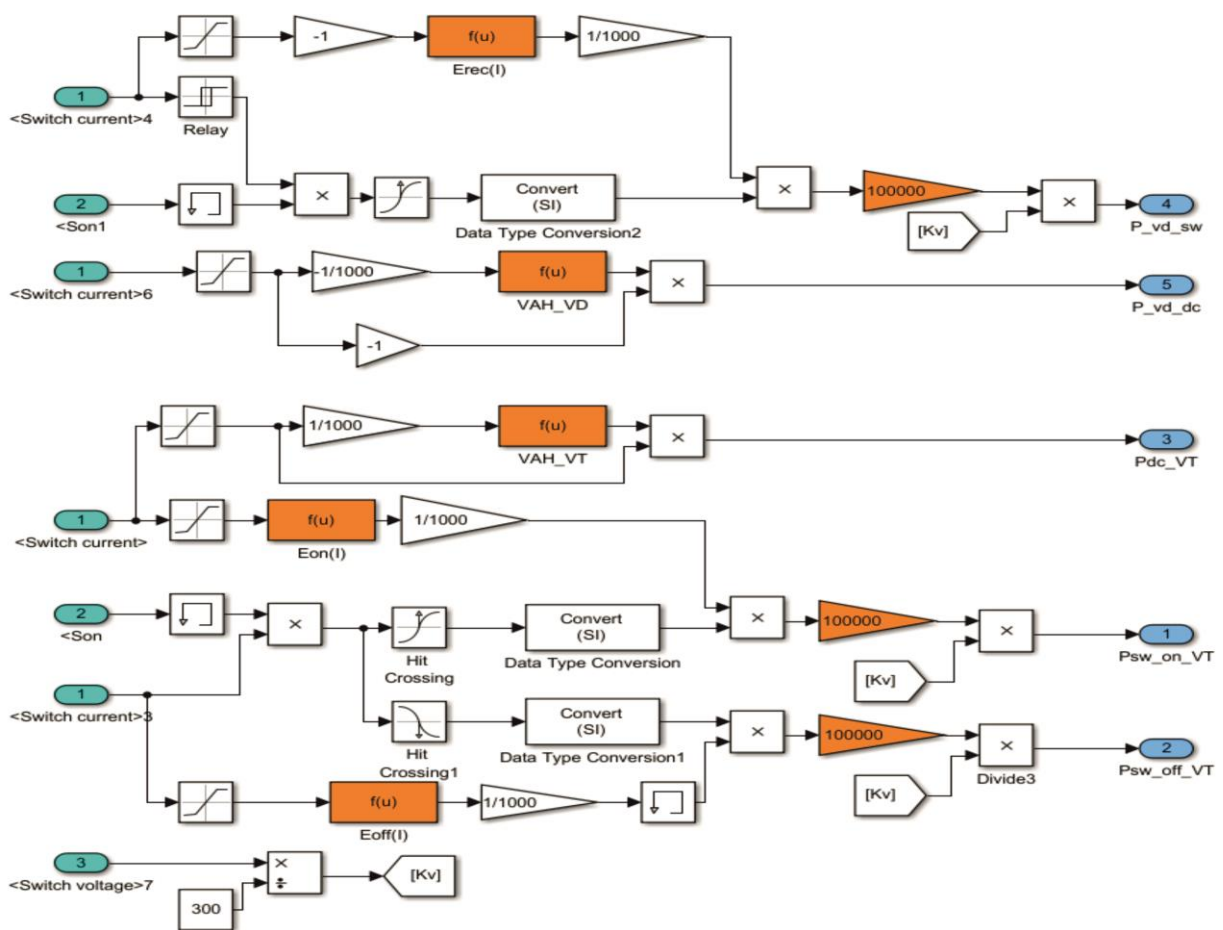


Рис. 8. Matlab – модель розрахунку втрат у IGBT – модулях

Субмодель розрахунку втрат у IGBT – транзисторах

Базові MatLab – моделі IGBT – транзисторів та силових діодів не враховують динамічних втрат. Крім цього ВАХ даних компонентів Matlab представлено прямою лінією, що обумовлює досить велику похибку при моделюванні втрат. Для отримання більш високої точності була побудована модель розрахунку, що враховує всі втрати в транзисторах IGBT і зворотних діодах модуля CM600DX – 13T.

Моделювання втрат в IGBT – модулях виконано шляхом поліноміальної апроксимації залежностей $E_{on}(i_c)$, $E_{off}(i_c)$ і $E_{rec}(i_c)$, $u_{ce}(i_c)$, $u_{fwd}(i_{vd})$, наведених у технічних характеристиках (модуль CM600DX–13T.) Результати апроксимації наведені в наступних формулах:

$$E_{rec}(i_{vd}) = 39,7 \cdot 10^{-9} \cdot i_{vd}^3 - 94,6 \cdot 10^{-6} \cdot i_{vd}^2 + 81,8 \cdot 10^{-9} \cdot i_{vd} + 1,2; \quad (12)$$

$$u_{fwd}(i_{vd}) = 1,243 \cdot i_{vd}^3 - 3,033 \cdot i_{vd}^2 + 2,975 \cdot i_{vd} + 0,562; \quad (13)$$

$$u_{ce}(i_c) = 0,863 \cdot i_c^3 - 2,1104 \cdot i_c^2 + 2,363 \cdot i_c + 0,5114; \quad (14)$$

$$E_{on}(i_c) = 6,2304 \cdot 10^{-6} \cdot i_c^2 + 7,9925 \cdot 10^{-3} \cdot i_c + 1,49582; \quad (15)$$

$$E_{off}(i_c) = 39,8 \cdot 10^{-9} \cdot i_c^3 - 55,3 \cdot 10^{-6} \cdot i_c^2 + 71,53 \cdot 10^{-3} \cdot i_c + 2. \quad (16)$$

Автором була проведена верифікація результатів розрахунків втрат у IGBT – модулях, отриманих при моделюванні MatLab з програмою MelcoSim 5.1 від виробника Mitsubishi Electric рис. 8. Похибка у розрахунках становить 2-3 %.

Результати моделювання ефективності системи зарядної станції

Осцилограми вхідного струму та вхідної напруги АВ випрямляча наведені на рис. 9.

Процес заряду, а саме динаміка зміни вихідної напруги, струму заряду батареї, а також величина батареї SOC на всьому інтервалі заряду наведена на рис. 10.

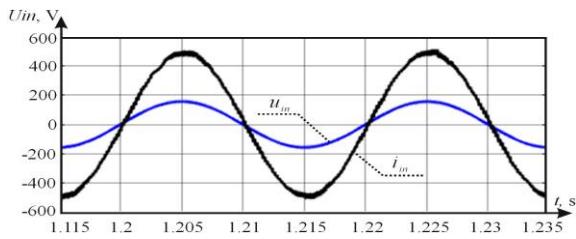


Рис. 9. Осцилограми вхідного струму та напруги активного випрямляча

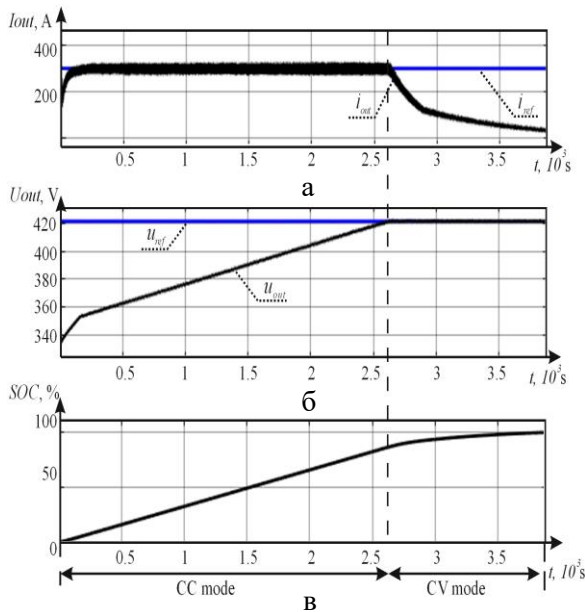


Рис. 10. Осцилограми роботи ЗС: а – вихідний струм та струм завдання (СС); б – вихідна напруга та напруга завдання (CV); в – ступінь заряду батареї

В результаті моделювання отримано значення складових енергії втрат потужності у ділянках системи зарядної станції при частотах ШІМ модуляції 5кГц та 10кГц, які наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Значення втрат потужності в елементах системи запропонованої зарядної станції

Складові енергії втрат	Енергія втрат, Дж	
	$f_{PWM}=5$ кГц	$f_{PWM}=10$ кГц
В джерелі, E_S	1716	1713
В ланцюгу 1, E_{L1}	983	982
В трансформаторі, E_{TV}	3217	3210
В ланцюгу 2, E_{L2}	2590	2582
В ключах АВ, E_{AR}	5160	6358
В батареї, E_{bat}	6718	6705
Сумарні втрати, ΔE_{Σ}	20384	21550

У табл. 2 наведено результати моделювання, а саме значення ККД, коефіцієнта потужності та коефіцієнта гармонійних спотво-

рень аналізованої системи ЗС при різних струмах заряду та частоти ШІМ.

З отриманих результатів моделювання визначено, що ККД запропонованої структури зарядної станції досить високий та складає 93,8 %-96,48 %.

Таблиця 2 – Параметри енергоефективності

Частота ШІМ, кГц	Струм заряду в режимі СС, А	ККД, %	Час заряду, с·10 ³	PF	THD, %
5	150 (0,6С)	96,48	6,55	0,988	9,4
	200 (0,8С)	95,85	5,18	0,991	7
	250 (1С)	95,19	4,38	0,992	6
	300 (1,2С)	94,51	3,84	0,994	4,6
	350 (1,4С)	93,8	3,47	0,994	4
	400 (1,6С)	93,09	3,2	0,994	3,5
10	150 (0,6С)	96,1	6,55	0,991	5,3
	200 (0,8С)	95,48	5,19	0,992	3,9
	250 (1С)	94,84	4,38	0,994	3,1
	300 (1,2С)	94,22	3,85	0,994	2,6
	350 (1,4С)	93,6	3,48	0,995	2,3
	400 (1,6С)	93	3,2	0,995	2

Висновки

Наведено результати дослідження параметрів енергоефективності зовнішньої зарядної станції EV постійного струму з використанням активного випрямляча.

Запропонована структура зарядної станції включає опис параметрів схеми підключення акумуляторного відсіку електромобіля Tesla Model S, які об'єднуються в одну еквівалентну батарею. Описано метод швидкого заряду батареї за технологією СС – CV, що забезпечує більшу кількість циклів заряду-розряду. Наведено формули для розрахунку складових втрат та ККД на інтервалі повного заряду батареї.

Представлено Matlab – модель системи ЗС та результати моделювання: осцилограми струмів та напруг, динаміка роботи регулятора струму заряду.

На підставі поліноміальної апроксимації

енергетичних залежностей IGBT – модулів створено математичну модель розрахунку статичних та динамічних втрат. Проведено аналіз параметрів якості електроенергії, складових енергії втрат та ККД зарядної станції на інтервалі повного заряду батареї при різних струмах заряду та частоті ШІМ. Проведені дослідження показали, що максимальний ККД системи досягається у режимі мінімального струму заряду. У той же час зниження струму заряду веде до збільшення часу процесу заряду, а також до невеликого погіршення параметрів якості електроенергії.

Література

1. Zhou, X., Wang, G., Lukic, S., Bhattacharya, S., & Huang, A. (2009). Multi-function bi-directional battery charger for plug-in hybrid electric vehicle application. In *2009 IEEE energy conversion Congress and exposition*. 3930-3936.
2. Dusmez, S., & Khaligh, A. (2012). A compact and integrated multifunctional power electronic interface for plug-in electric vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(12), 5690-5701.
3. Dusmez, S., & Khaligh, A. (2012). A novel low cost integrated on-board charger topology for electric vehicles and plug-in hybrid electric vehicles. In *2012 Twenty-seventh annual IEEE applied power electronics conference and exposition (APEC)*. 2611-2616.
4. Gemerov, G., Ilyina, N., Tugay, D., Mashura, A. (2018) "Energy efficiency of regenerative braking in regulated power systems," *International Scientific and Technical Conference "Problems of Modern Electrical Engineering – 2018"*, Kiev, 73-76.
5. Deilami, S., Masoum, A. S., Moses, P. S., & Masoum, M. A. (2011). Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile. *IEEE Transactions on smart grid*, 2(3), 456-467.
6. Erb, D. C., Onar, O. C., & Khaligh, A. (2010). Bi-directional charging topologies for plug-in hybrid electric vehicles. In *2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* 2066-2072.
7. Tugay, D., Kotelevets, S., Korneliuk, S., & Zhemerov, G. (2018). Energy efficiency of microgrid implementation with solar photovoltaic power plants. In *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. 275-279.
8. Alhurayyis, I., Elkhateb, A., & Morrow, D. J. (2020). Bidirectional DC-DC Resonant Converter Design for Electric Vehicle Charging Stations Integration to MVDC Grids. 2020 9th International Conference on Renewable Energy Research and Application(ICRERA). doi:10.1109/icrera49962.2020.9242656
10. Rivera, S., Pesantez, D., Kouros, S., & Lehn, P. W. (2018). Pseudo-Partial-Power Converter without High Frequency Transformer for Electric Vehicle Fast Charging Stations. 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). doi:10.1109/ecce.2018.8558238
11. Sokol, Y., Zamaruiev, V., Ivakhno, V., & Styslo, B. (2018). Improving the quality of electrical energy in the railway power supply system. In *2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 563-566.
12. Багач, Р. (2023). Дослідження акумуляторних блоків електромобілів та зарядних станцій на основі активного трифазного випрямляча струму. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (24), 62–71. Bahach, R. (2023). Doslidzhennia akumuliatornykh bloktiv elektromobiliv ta zariadnykh stantsii na osnovi aktyvnoho tryfaznoho vypryamliacha strumu. [Research of battery units of electric vehicles and charging stations based on an active three-phase rectifier] *Car and electronics. Modern technologies*, (24), 62–71. Doi:10.30977/VEIT.2023.24.0.2 [in Ukrainian].
13. Нерубацький, В. П., Плахтій, О. А., Машура, А. В., & Гордієнко, Д. А. (2019). Аналіз технічних характеристик акумуляторних батарей і систем зарядання електромобілів. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 24(6), 11-19. Nerubatskyi, V. P., Plakhtii, O. A., Mashura, A. V., & Hordiienko, D. A. (2019). Analiz tekhnichnykh kharakterystyk akumuliatornykh batarei i system zariadzhannia elektromobiliv. [Analysis of technical characteristics of accumulator batteries and electric car charging systems] *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 24(6), 11-19. [in Ukrainian]. DOI: 10.18664/ikszt.v24i6.185510
14. Zhemerov, G., Plakhtii, O., & Mashura, A. (2020). Efficiency analysis of charging station for electric vehicles using the active rectifier in microgrid system. In *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)* 37-42.
15. Tugay, D., Zhemerov, G., Korneliuk, S., & Kotelevets, S. (2019). Three theoremes of the instantaneous power theory. In *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)* 289-294.
16. Documentation for the CM600DX-13T transistor. Access mode: https://www.mitsubishielectric.com/semiconducto/rs/powerdevices/datasheets/igbt/t_series/cm600dx-13t_e.pdf

17. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Mashura, A., Hordiienko, D., & Khoruzhevskiy, H. (2020). Improving energy indicators of the charging station for electric vehicles based on a three-level active rectifier. *East European Journal of Advanced Technologies*, 3(8-105), 46-55. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.204068

Багач Руслан Володимирович¹, аспірант кафедри автомобільної електроніки, тел. +38 0507255660, +38 0935761042, e-mail: bagach.ruslan@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0157-5933>

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Enhancing electromagnetic compatibility and energy efficiency of electric vehicle charging stations

Abstract. Problem. The article proposes a single-link structure for an electric vehicle charging station utilizing an active four-square rectifier with power factor correction. A Matlab model of the proposed charging station is developed, taking into account parameters such as the power network, the switches of the active rectifier, its automatic control system, and an equivalent model of the battery compartment. Additionally, a mathematical model for calculating static and dynamic losses is created based on polynomial approximation of the energy dependencies of IGBT modules. The analysis investigates power quality parameters, components of energy losses, and efficiency of the charging station across various charge currents and PWM frequencies during a full battery charge interval. **Goal.** The aim of this study is to propose a single-link structure for an electric vehicle charging station using an active four-square rectifier with power factor correction. It includes an analysis of power quality parameters, components of energy losses, and efficiency of the charging station at different charge currents and PWM frequencies during a full battery charge interval. **Methodology.** To achieve the goal, several key steps are considered. These include

theoretical substantiation of the scheme of the electric microgrid charging station for electric vehicles with one-stage energy conversion, analysis of the battery connection scheme in the Tesla Model S electric car, research and calculation of efficiency, modeling of the charging station, development of a Matlab model of a microgrid system for the charging station, SAC analysis of battery charge voltage and current of a three-phase AV with PWM, modeling of losses in IGBT modules by polynomial approximation of dependencies, distribution of losses in the charging station system, and analysis of energy efficiency parameters. **Results.** The study presents the energy efficiency parameters of an external DC EV charging station using an active rectifier. It reveals that maximum efficiency of the system is achieved at minimum charge current. However, decreasing the charge current prolongs the charge process and slightly affects power quality parameters. **Originality.** A mathematical model for calculating static and dynamic losses was developed based on polynomial approximation of the energy dependencies of IGBT modules. The analysis encompasses power quality parameters, components of energy losses, and efficiency of the charging station across various charge currents and PWM frequencies during a full battery charge interval. **Practical value.** This study contributes to the further development of electric vehicles by improving the energy indicators of electric vehicle batteries and converters of electric vehicle charging stations, enabling fast charging modes. Active development is observed in each of these directions.

Key words: charging stations, electric car, active rectifier, efficiency, power quality, pulse width modulation.

Ruslan Bahach¹, postgraduate, Vehicle Electronics Department, tel. +38 0507255660, +38 0935761042, e-mail: bagach.ruslan@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0157-5933>

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.