

Г.С. Белоха¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-4277-367X
Р. Стржелецьки², доктор техн. наук, проф. ORCID 0000-0001-9437-9450
Д.Г. Дерев'янка¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-4877-5601
І.П. Радиш³, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-0187-4183

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

²Гданський Політехнічний Університет

³Ужгородський національний університет

АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЕЙ В ТРАНЗАКТИВНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Впровадження розумної зарядки електромобілів дозволяє операторам локальних електромереж і постачальникам електроенергії впроваджувати нові бізнес-моделі взаємодії електромобілів з мережею. Крім оптимального відбору потужностей Microgrid при заряді електромобілів, важливо і використання різних методів заряду. Для задоволення інтересів всіх учасників локальних систем з економічної та технічної точки зору обрано концепцію транзактивної енергії. Проведено дослідження впливу різних методів керування зарядом на ККД батареї EV, таких як двоетапне зарядження (CC-CV), прискорену зарядку (BC) та альтернативну багаторівневу зарядку MSCC. Оптимізація процесів заряду має на меті не тільки збільшення прибутку від продажу електроенергії, а також мінімізація витрат на зарядку за допомогою оптимального потоку електроенергії від мережі до автомобіля. Запропонована цільова функція залежить від потужності генерації усіх джерел які входять до системи, стану заряду систем зберігання, часу добу, часу зарядження електромобілів, швидкості зарядження, ціни на електроенергію. Система керування, вирішуючи цільову функцію, сама обирає та пропонує споживачу та агрегатору метод зарядження, який для даних параметрів системи буде оптимальним для усіх учасників транзактивної системи. Цифровим моделюванням досліджено три методи заряд, для чотирьох різних типів електромобілів, всі розглянуті методи заряду високі показники енергоефективності які можливо використовувати, як методи керування при заряді електромобілів від локальних систем.

Ключові слова: Microgrid, електромобіль, заряд електромобіля, транзактивна система, розумна зарядка, локальні системи.

Вступ.

За останні роки кількість електромобілів значно зросла. Однак широке розповсюдження електромобілів створює декілька проблем, зокрема щодо зарядної інфраструктури та впливу на електричну мережу. Особливо негативний вплив відчутно в локальних електроенергетичних системах. Реалізація швидкої та ефективної зарядки, є важливим, але складним питанням у перетворенні енергії та керуванні зарядом електромобілів. Добре розроблена стратегія заряду може захистити батареї від перегріву, продовжити термін служби батареї і підвищити ефективність перетворення енергії. Крім того, економічні втрати під час експлуатації електромобілів можна зменшити за допомогою відповідних протоколів зарядки акумуляторів та системи енергоменеджменту Microgrid [1-4]. Вплив впровадження електромобілів в локальні енергетичні системи представлено на рис. 1 [4]. Для вирішення проблем зв'язаних з негативним впливом, з'явилися підходи до розумної зарядки які оптимізують процеси зарядження та сприяють підвищенню надійності та ефективності мережі.

Для задоволення інтересів всіх учасників локальних систем з економічної та технічної точки зору доречно використовувати концепцію транзактивної енергії та транзактивних енергетичних систем. Такі системи об'єднують декілька Microgrid. У транзактивній системі керування енергією відбувається через взаємодію генераторів електричної енергії та об'єктів споживання безпосередньо або через агрегаторів через економічні сигнали.

Основні характеристики транзактивних енергетичних систем

- децентралізованість, можливість роботи без централізованої мережі
- автономність, в структурі транзактивної системи джерелами генерації керують їхні власники; але механізми транзакцій призначені для узгодження їх з потребами електромережі, при цьому усі учасники транзактивної системи виробляють, купують та продають електроенергію, оптимізуючи свої власні цілі.
- висока ступінь автоматизації, наявність програмного забезпечення, інформаційний та фізичний зв'язок усіх учасників транзактивних систем.

Впровадження розумної зарядки для електромобілів дозволяє операторам електромереж і постачальникам електроенергії впроваджувати нові бізнес-моделі взаємодії електромобілів з мережею.

Збираючи детальні дані про методи заряджання електромобілів і споживання енергії, постачальники послуг можуть пропонувати додаткові послуги, такі як оптимізовані плани заряджання, методів заряду та застосування програм реагування на попит. Крім того, інтеграція електромобілів в локальні електроенергетичні системи дозволяє використовувати технологію «автомобіль-мережа», де електромобілі можуть надавати допоміжні послуги мережі, такі як регулювання частоти та зберігання енергії [5-8].

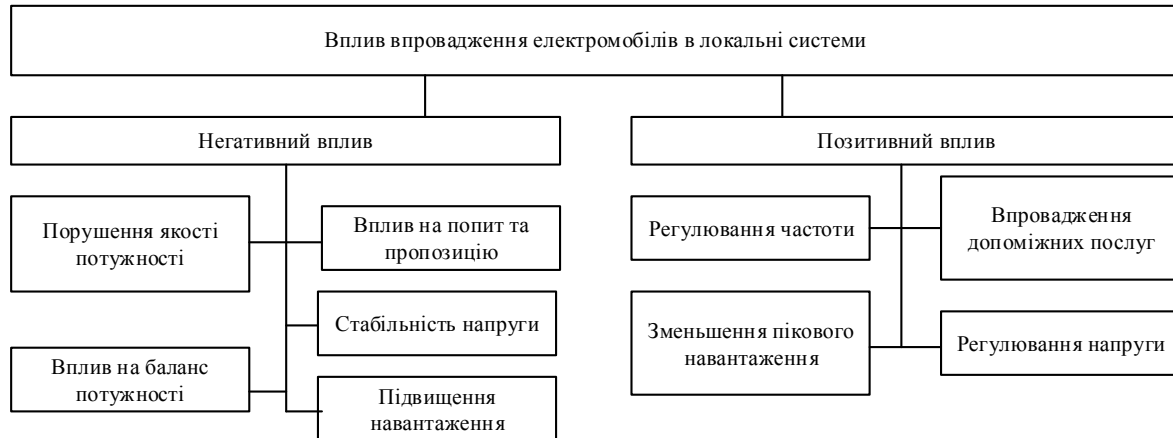


Рисунок 1 - Вплив впровадження електромобілів

Цілі методів заряджання зосереджені навколо скорочення часу заряджання, плавне підвищення температури під час заряджання, підвищення ефективності заряджання та подовження загального терміну служби акумулятора.

Оскільки процес заряджання акумулятора є нелінійним, застосовуються різні методи для ефективного контролю заряду акумулятора.

Традиційні методи керування, які зазвичай використовуються для заряджання акумулятора: постійний струм (CC), постійна напруга (CV), двоетапне заряджання (CC-CV), імпульсне заряджання (PC), рефлекторне заряджання або негативне імпульсне заряджання (NPC), та плаваючий заряд (FC) [9-11] (рис.2).

- *Заряд постійним струмом (CC)*. Цей метод полягає в заряджанні акумулятора постійним струмом, при цьому значення напруги залежить від струму заряджання (рис. 2 а). Недоліком цього методу є неконтрольована напруга, яка може спричинити перезаряд акумулятора, перенапруги та перегрів, що призведе до зменшення терміну служби акумулятора.

- *Заряд постійною напругою (CV)*. На початковому етапі зарядки струм заряду високий. В процесі заряду зарядний струм зменшується. Цей метод використовується в програмах, коли необхідні тривалі періоди заряджання для досягнення необхідного заряду. Оскільки для цього потрібен тривалий час заряджання, це спричинить підвищення температури та погіршення терміну служби батареї (рис 2 б).

- *Плаваючий заряд (FC)*: цей метод передбачає заряд CV після завершення процесу заряджання, під час якого ємність батареї підтримується на максимальному рівні. Цей метод використовується для стаціонарних акумуляторів, переважно свинцевих, та не підходить для заряду електромобілів.

- *Постійний струм – постійна напруга (CC-CV)* це двоетапний метод, він поєднує в собі як CC, так і CV методи. CC застосовується на початковій стадії зарядки, доки напруга батареї не досягне попередньо визначеної напруги. На другому етапі метод заряджання перемикається на CV для підтримки напруги батареї, таким чином він уникає перенапруги. Дослідження показують, що метод зарядки CC-CV є найефективнішим для заряджання акумулятора незалежно від його типу. Крім того, це найбільш використовуваний метод керування зарядом. Однак швидкість заряджання і ефективність стратегії заряджання CC-CV низькі, а також він не підходить для швидкої зарядки, оскільки етап зарядки CV подовжує час зарядки, підвищує температуру батареї та скорочує її життєвий цикл (рис. 2.в).

- *Прискорена зарядка (BC)* є одним із методів збільшення швидкості зарядки порівняно з методом CC-CV. BC — це варіант заряджання CC-CV, який включає більш високий CC або період постійної потужності (CP) на початку періоду заряджання. (рис. 2 г.)

- *Постійна потужність — постійна напруга (CP-CV)* подібна до CC-CV, за винятком того, що постійна потужність використовується замість постійного струму для заряджання до певної межі напруги перед переходом на постійну напругу (рис. 2 д). Цей спосіб заряджання зменшує зарядний струм батареї, поки він не досягне заданого порогу. На початковій ділянці зарядки потрібен великий струм, щоб підтримувати контрольовану напругу. Однак така швидка швидкість заряджання підвищує температуру батареї, що призводить до збільшення втрат тепла. Основним завданням цієї техніки заряджання є пошук

оптимального значення постійної напруги, щоб збалансувати швидкість заряджання, використання ємності акумулятора та розпад електроліту.

- *Імпульсне заряджання (PC)*: цей метод заряду полягає в періодичній подачі імпульсного струму до батареї. Батареї розряджаються та періодично перезаряджаються під час так званого вирівнюючого заряду. Це дозволить напрузі акумулятора стати більш стабільним. У цьому методі заряджання важливо брати до уваги частоту заряджання, пік імпульсу та ширину імпульсу, оскільки вони пов'язані з ємністю та часом заряджання. Цей метод може зменшити поляризацію, щоб запобігти підвищенню температури батареї, але є складність при реалізації (рис. 2 е).

- *Рефлекторна зарядка або негативна імпульсна зарядка (NPC)*: це вдосконалена імпульсна зарядка. Цей метод може зменшити поляризацію, щоб запобігти підвищенню температури батареї. Однак це також може знизити ефективність заряду (рис.2 ж).

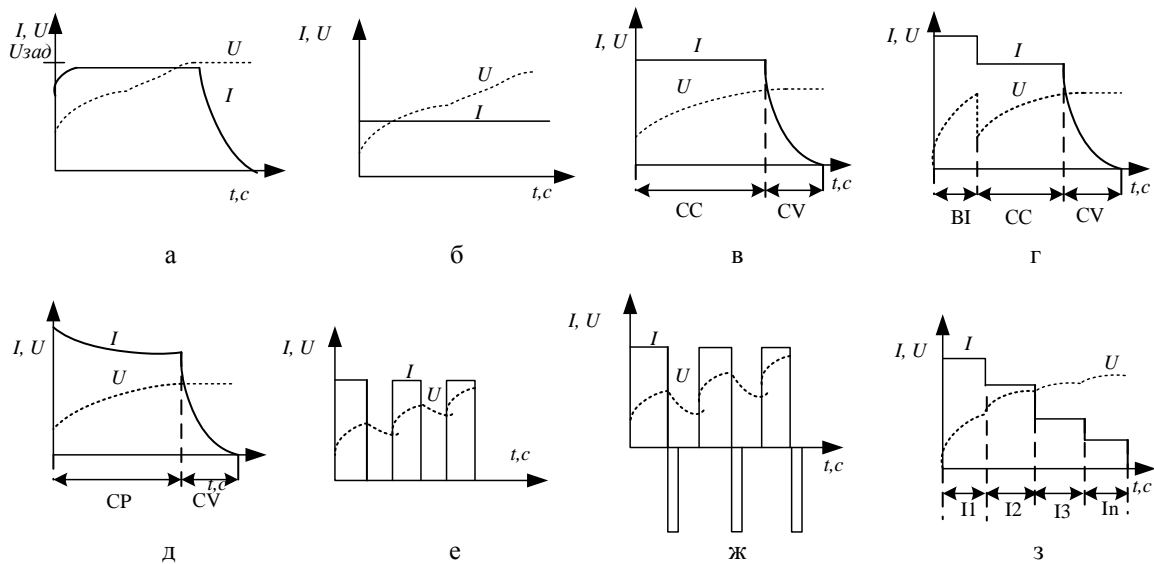


Рисунок 2 - Методи заряду: постійна напруга (а); постійний струм (б); метод СС-СМ (в); метод ВІ (г); метод СР-СВ (д); імпульсний (е); рефлекторний (ж); багаторівневий (з)

Альтернативні методи. Багаторівневі методи заряджання (MSCC) відносяться до альтернативних методів для отримання швидшої та безпечнішої зарядки та довшого циклу роботи батареї. Заряджання полягає в багаторівневому методі зарядки постійним струмом, у якому час заряджання ділиться на декілька етапів. На кожному етапі зарядний струм встановлюється на постійне порогове значення. Цей процес триватиме до тих пір, поки номер етапу не досягне максимально заданого (рис. 2 з). Для визначення зарядного струму та часу переключення на кожному етапі можна використовувати різні алгоритми.

Перехід від однієї стадії до наступної визначається здебільшого виконанням одного з наступних чотирьох критеріїв:

Перехід на основі часу. Час є одним з параметрів для переходу від одного етапу до наступного, як показано на рис.3 а. Переходи на основі часу легко реалізувати, але не існує стандартного методу для визначення того, коли етапи переходять від одного до наступного. Дослідження показали, що зарядка MSCC покращує термін служби та значно скорочує час зарядки порівняно з методом СС. Однак не має стандартною процедура пошуку оптимального часу перемикання етапів.

Перехід на основі SOC. Для переходу від однієї стадії до іншої різні дослідження пропонували певну кількість стадій SOC. Перехід на основі SOC використовувався для переходу від однієї стадії до іншої, як показано на рис. 3 б. Результати показали, що запропонована стратегія MSCC із переходом на основі SOC може зменшити час заряджання, підвищити ефективність заряджання, збільшити ємність заряду/розряду, зменшити підвищення температури, і збільшити термін служби порівняно зі стандартом метод (CC-CV). Але точна оцінка SOC є складною, тому застосувати перехід на основі SOC може бути складно при практичному використанні.

Критерії на основі порогової напруги. Перехід на основі порогової напруги є ще одним критерієм для проектування переходу зарядки між двома послідовними етапами. У цьому випадку для зміни вибирається інший поріг напруги ступінь і значення зарядного струму, як показано на рис. 3 в.

Критерії на основі напруги відключення. Критерії на основі напруги відключення є найбільш використовуваним критерієм у літературі для переходу від одного етапу до наступного (рис. 3 г). Виробник визначає значення напруги відключення.

Кожен спосіб заряджання має свої переваги та недоліки. Хоча зарядку CC-CV відносно просто реалізувати, але вона не підходить для швидкої зарядки. Методи заряджання PC та NPC зменшують час заряджання, але є дорогими та складними. Однак підхід до стягнення плати за MSCC простий у використанні. Обмеженням MSCC є необхідність точного прогнозування SOC або рівня напруги для їх використання.

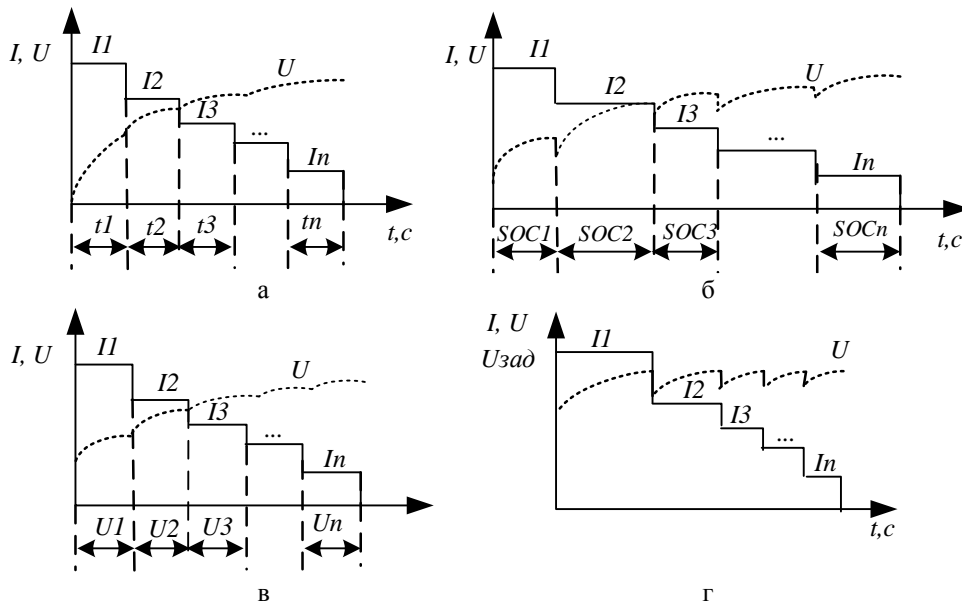


Рисунок 3 - Керування зарядом при переході з рівень на рівень на основі часу (а), SOC (б), порогової напруги (в), напруги відключення (г)

Процес зарядки літій-іонного акумулятора потрібно проводити обережно, оскільки спосіб зарядки сильно впливає на те, наскільки активно протікають електрохімічні реакції всередині батареї, а також впливають на термін служби самої батареї. З цієї причини пошук оптимальної методики зарядки батареї за найкоротший період часу з високою ефективністю є актуальною проблемою.

Мета роботи – дослідження впливу різних методів керування зарядом на ефективність батареї EV, виявлення кращих методів зарядження для використання їх при оптимізації транзактивних систем.

Матеріал і результати досліджень

Локальна енергетична система складається з джерел розосередженої генерації, систем зберігання енергії, та навантажень.

Оптимізація процесів заряду має на меті не тільки збільшення прибутку від продажу електроенергії, а також мінімізація витрат на зарядку за допомогою оптимального потоку електроенергії від мережі до автомобіля. Запропонована цільова функція ЦФ залежить від потужності генерації усіх джерел P_T , які входять до системи, потужностей споживачів P , стану заряду систем зберігання P_{C3} , часу заряджання електромобілів t_3 , швидкості заряджання V_3 , ціни на електроенергію C :

$$ЦФ = f(P_T, P, P_{C3}, t_3, V_3, C) \tag{1}$$

Для задоволення потреб заряджання електромобілів у різних ситуаціях було розроблено різноманітні режими заряджання відповідно до стандартів SAE J1772, IEC 61851-1 і GB/T 18487-1. Режим з параметрами 120В 16А є найпоширенішим режимом повільного заряджання змінним струмом, який можна зручно виконувати від домашньої розетки, і потрібен лише вбудований перетворювач живлення. У цьому випадку час зарядки зазвичай становить кілька годин. Режим постійного струму є перспективним рішенням, який може забезпечити потужністю 400 кВт з напругою від 250 до 400 В та зарядним струмом до 100 А. Крім того, Tesla пропонує свої характеристики режиму зарядки, з можливістю заряду постійним струмом на 1000 В [13].

Неконтрольоване керування, яке використовується в електромобілях, створює високі піки попиту на електроенергію, якщо розглядати класичні щоденні сценарії з поїздками з дому на роботу та з роботи додому. Електромобілі підключаються до електромережі в один і той же момент і очікують негайного початку заряджання, тоді як у більшості випадків заряджання транспортних засобів може бути відкладено. Використання цін на електроенергію для контролю зарядки електромобілів є можливим рішенням у стратегії керування зарядом.

Система керування сама обирає та пропонує споживачу та агрегатору метод заряджання, який буде для даних параметрів системи буде оптимальним для усіх учасників локальної системи. Наприклад, змінення швидкої зарядки на звичайну, або відкладення зарядки у часі знижує пікові навантаження на систему. Користувач і мережа живлення можуть безпосередньо отримати конкретні переваги, такі як дешевше заряджання.

Для аналізу продуктивності літій-іонних батарей використовують: час заряджання, ефективність заряджання та розряджання (коефіцієнт корисної дії), зарядна/розрядна ємність і підвищення температури під час заряджання.

Є три типи енергоефективності відповідно до різних умов роботи батареї: енергоефективність під час заряджання ($\eta_{зар}$), енергоефективність під час розряду ($\eta_{роз}$) та енергоефективність під час заряджання та розрядження (η) [11].

Енергоефективність під час заряджання $\eta_{зар}$ — це відношення хімічної енергії, отриманої батареєю під час заряджання, тобто чистої енергії ($\Delta E_{battery}$), до енергії, отриманої від джерел живлення для зарядки батареї (ΔE_{in}).

$$\eta_{зар} = \frac{\Delta E_{battery}}{\Delta E_{in}} \quad (2)$$

$$\Delta E_{battery} = \int_{t_0}^t U_{OCV} Idt = \int_{SOC(0)}^{SOC(t)} U_{OCV} C_n dSOC \quad (3)$$

$$\Delta E_{in} = \int_{t_0}^t U_C I_C dt = \int_{SOC(0)}^{SOC(t)} U_C C_n dSOC \quad (4)$$

де U_C — напруга замкнутого ланцюга батареї (CC-CV) під час заряджання, I_C — зарядний струм, C_n — стандартна ємність батареї, $SOC(0)$ — стан заряду батареї на момент початку заряджання, і $SOC(t)$ — SOC, коли зарядка завершена.

Значення U_{OCV} при різних SOC отримують двома способами. Традиційний метод полягає у вимірюванні напруги на клеммах батареї після певного періоду часу заряджання/розряджання.

Енергоефективність при розрядці $\eta_{роз}$ розраховується подібним чином, як відношення енергії, що розряджається від батареї, до корисної енергії батареї $\Delta E_{battery}$.

$$\eta_{роз} = \frac{\Delta E_{out}}{\Delta E_{battery}} \quad (5)$$

Значення ΔE_{out} обчислюється за таким рівнянням:

$$\Delta E_{out} = \int_{t_0}^t U_d I_d dt = \int_{SOC(0)}^{SOC(t)} U_d C_n dSOC \quad (6)$$

де U_d — напруга батареї під час розряду, а I_d — розрядний струм.

Коефіцієнт корисної дії є одним із ключових показників ефективності процесу заряду. Він визначається як відношення розрядної ємності, отриманої від зарядженого EV, до зарядної ємності під час заряджання [9]:

$$\eta = \frac{I_d t_d}{\sum_{i=1}^n I_c t_c} \quad (7)$$

де t_d — час розряду, n — кількість ступенів, t_c — час заряду.

В програмі Matlab досліджено для локальної системи постійного струму досліджені різні етапи заряду, та оцінено їх ефективність. Використання різних стратегій керування дозволить оптимізувати локальну систему. У якості прикладу обрані 4 електромобіля [15,16].

Таблиця 1. Параметри електромобілів

Параметри	Nissan leaf (2013)	Kia Soul	Renault ZOE	Kia Niro
Ємність (кВт*год)	24	31,8	52	64,8
Номинальна напруга, В	330	360	350	348
Напруга відсічення розряду, В	336	336		
Макс. напруга зарядки, В	394	394		
Макс. струм, А	71	88	134	

Метод CC-CV не використовується для швидкої зарядки, оскільки високий зарядний струм необхідно тримати майже увесь час зарядження, що призведе до перегріву та скороченню терміну служби. Метод BC має короткочасну ділянку зі збільшеним струмом заряду, що пришвидшує заряд, при цьому не призводить до надмірного нагріву батареї. В цьому дослідженні використовувалось збільшення струму на 20% на першій ділянці. Також використовувався метод MSCC, на швидкість заряджання впливає декілька факторів, зокрема кількість ступенів, а також струм заряду першого й останнього етапів. Збільшення кількості ступенів покращує використання ємності та ефективність зарядки.

За виразами (2)-(7) та цифровим моделювання отримані значення ККД для представлених електромобілів при обраних методах заряджання (таблиця 2).

Таблиця 2. Результати досліджень

	η		
	CC-CV	BC	MSCC
EV1	0,961	0,962	0,98
EV2	0,948	0,951	0,978
EV3	0,952	0,96	0,976
EV4	0,956	0,963	0,982

Висновки. Важливо при заряді електромобілів використовувати оптимальні методи заряджання які не тільки сприятимуть скорочення часу заряджання, плавному підвищенню температури під час заряджання, підвищенню ефективності заряджання та подовженню загального терміну служби акумулятора. Але й вибір того чи іншого методу заряду сприятиме оптимальній роботі локальної мережі.

Проведено дослідження впливу різних методів керування зарядом на ККД батареї електромобіля, таких як двоетапне заряджання (CC-CV), прискорену заряду (BC) та альтернативну багаторівневу зарядку MSCC. Запропонована цільова функція залежить від потужності генерації усіх джерел які входять до системи, стану заряду систем зберігання, часу добу, часу заряджання електромобілів, швидкості заряджання, ціни на електроенергію. Система керування, вирішуючи цільову функцію, сама обирає та пропонує споживачу та агрегатору метод заряджання, який для даних параметрів системи буде оптимальним для усіх учасників транзактивної системи. Цифровим моделюванням проведено аналіз трьох методів заряду, всі мають високі показники енергоефективності які можливо використовувати, як методи керування при оптимізації процесів заряджання в транзактивних системах.

Список використаної літератури

1. Chen, Guan-Jhu, and Wei-Hsin Chung. 2023. "Evaluation of Charging Methods for Lithium-Ion Batteries" *Electronics* 12, no. 19: 4095. <https://doi.org/10.3390/electronics12194095>
2. H.S. Das, M.M. Rahman, S. Li, C.W. Tan, Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 120, 2020, 109618, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109618>.
3. Lavrenova Y.R., Denysiuk S.P. "Optimization of power dispatching schedule of a charging station based on a micro grid with a photovoltaic module". *Applied Aspects of Information Technology*. 2023; Vol. 6, No. 4: 391–403. DOI:<https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.26>.
4. Muhammad Shahid Mastoi, Shenxian Zhuang, Hafiz Mudassir Munir, Malik Haris, Mannan Hassan, Muhammad Usman, Syed Sabir Hussain Bukhari, Jong-Suk Ro, An in-depth analysis of electric vehicle charging station infrastructure, policy implications, and future trends, *Energy Reports*, Volume 8, 2022, Pages 11504-11529, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.011>.
5. Nizam, M.; Maghfiroh, H.; Irfani, B.; Inayati, I.; Ma'arif, A. Designing and Prototyping of Lithium-Ion Charging System Using Multi-Step Constant Current Method. *World Electr. Veh. J.* 2022, 13, 178. <https://doi.org/10.3390/wevj13100178>
6. Zeng, L.; Chen, S.-Z.; Tang, Z.; Tian, L.; Xiong, T. An Electric Vehicle Charging Method Considering Multiple Power Exchange Modes' Coordination. *Sustainability* 2023, 15, 10520. <https://doi.org/10.3390/su151310520>
7. Limmer, Steffen. 2019. "Dynamic Pricing for Electric Vehicle Charging—A Literature Review" *Energies* 12, no. 18: 3574. <https://doi.org/10.3390/en12183574>
8. Brenna, M., Foadelli, F., Leone, C. et al. Electric Vehicles Charging Technology Review and Optimal Size Estimation. *J. Electr. Eng. Technol.* 15, 2539–2552 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00547-x>
9. Tahir, M. U., Sangwongwanich, A., Stroe, D-I., & Blaabjerg, F. (2023). Overview of multi-stage charging strategies for Li-ion batteries. *Journal of Energy Chemistry*, 84, 228-241. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.05.023>
10. Banguero, Edison, Antonio Correcher, Ángel Pérez-Navarro, Francisco Morant, and Andrés

Ariztizabal. 2018. "A Review on Battery Charging and Discharging Control Strategies: Application to Renewable Energy Systems" *Energies* 11, no. 4: 1021. <https://doi.org/10.3390/en11041021>

11. K. Li and K. J. Tseng, "Energy efficiency of lithium-ion battery used as energy storage devices in microgrid," *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Yokohama, Japan, 2015, pp. 005235-005240, doi: 10.1109/IECON.2015.7392923

12. Ліпко Д. О., Бондаренко О. Ф. Використання часткового зарядно-розрядного циклу акумуляторної батареї для збільшення її ресурсу Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3-4, с. 9-15.

13. M. S. Rahman, M. J. Hossain, F. H. M. Rafi and J. Lu, "EV charging in a commercial hybrid AC/DC microgrid: Configuration, control and impact analysis," 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Brisbane, QLD, Australia, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/AUPEC.2016.7749351

14. Lo Franco F, Ricco M, Mandrioli R, Grandi G. Electric Vehicle Aggregate Power Flow Prediction and Smart Charging System for Distributed Renewable Energy Self-Consumption Optimization. *Energies*. 2020; 13(19):5003. <https://doi.org/10.3390/en13195003>

15. <https://ev-database.org/>

16. K. Kouka, A. Masmoudi, A. Abdelkafi et al., Dynamic energy management of an electric vehicle charging station using photovoltaic power, *Sustainable Energy, Grids and Networks* (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100402>

H. Bielokha¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4277-367X

R. Strezhelsky², Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0001-9437-9450

D. Derevinko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-4877-5601

I. Radysh³, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-0187-4183

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

²Gdansk University of Technology

³Uzhhorod National University

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING PROCESSES IN TRANSACTIVE ENERGY SYSTEMS

The implementation of smart charging of electric vehicles allows operators of local power networks and electricity suppliers to implement new business models for the interaction of electric vehicles with the network. In addition to the optimal selection of Microgrid capacities when charging electric vehicles, it is also important to use different charging methods. To satisfy the interests of all participants of local systems from an economic and technical point of view, the concept of transactional energy was chosen. The effect of different charge management methods on EV battery efficiency, such as two-stage charging (CC-CV), accelerated charging (AC) and alternative multi-level MSCC charging, has been investigated. The optimization of charging processes aims not only to increase the profit from the sale of electricity, but also to minimize charging costs by means of an optimal flow of electricity from the network to the car. The proposed objective function depends on the generation capacity of all sources included in the system, the state of charge of the storage systems, the time of day, the charging time of electric vehicles, the charging speed, and the price of electricity. The control system, solving the objective function, itself chooses and offers the consumer and the aggregator a charging method that, given the system parameters, will be optimal for all participants of the transactional system. Three charge methods were investigated by digital simulation for four different types of electric vehicles, all considered charge methods have high energy efficiency indicators that can be used as control methods for charging electric vehicles from local systems.

Keywords: *Microgrid, electric vehicle, electric vehicle charging, transactive system, smart charging, local systems.*

References

1. Chen, Guan-Jhu, and Wei-Hsin Chung. 2023. "Evaluation of Charging Methods for Lithium-Ion Batteries" *Electronics* 12, no. 19: 4095. <https://doi.org/10.3390/electronics12194095>

2. H.S. Das, M.M. Rahman, S. Li, C.W. Tan, Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 120, 2020, 109618, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109618>.

3. Lavrenova Y.R., Denysiuk S.P. "Optimization of power dispatching schedule of a charging station based on a micro grid with a photovoltaic module". *Applied Aspects of Information Technology*. 2023; Vol. 6, No. 4: 391–403. DOI:<https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.26>.

4. Muhammad Shahid Mastoi, Shenxian Zhuang, Hafiz Mudassir Munir, Malik Haris, Mannan Hassan, Muhammad Usman, Syed Sabir Hussain Bukhari, Jong-Suk Ro, An in-depth analysis of electric vehicle charging

station infrastructure, policy implications, and future trends, Energy Reports, Volume 8, 2022, Pages 11504-11529, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.011>.

5. Nizam, M.; Maghfiroh, H.; Irfani, B.; Inayati, I.; Ma'arif, A. Designing and Prototyping of Lithium-Ion Charging System Using Multi-Step Constant Current Method. World Electr. Veh. J. 2022, 13, 178. <https://doi.org/10.3390/wevj13100178>

6. Zeng, L.; Chen, S.-Z.; Tang, Z.; Tian, L.; Xiong, T. An Electric Vehicle Charging Method Considering Multiple Power Exchange Modes' Coordination. Sustainability 2023, 15, 10520. <https://doi.org/10.3390/su151310520>

7. Limmer, Steffen. 2019. "Dynamic Pricing for Electric Vehicle Charging—A Literature Review" Energies 12, no. 18: 3574. <https://doi.org/10.3390/en12183574>

8. Brenna, M., Foadelli, F., Leone, C. et al. Electric Vehicles Charging Technology Review and Optimal Size Estimation. J. Electr. Eng. Technol. 15, 2539–2552 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00547-x>

9. Tahir, M. U., Sangwongwanich, A., Stroe, D-I., & Blaabjerg, F. (2023). Overview of multi-stage charging strategies for Li-ion batteries. Journal of Energy Chemistry, 84, 228-241. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.05.023>

10. Banguero, Edison, Antonio Correcher, Ángel Pérez-Navarro, Francisco Morant, and Andrés Aristizabal. 2018. "A Review on Battery Charging and Discharging Control Strategies: Application to Renewable Energy Systems" Energies 11, no. 4: 1021. <https://doi.org/10.3390/en11041021>

11. K. Li and K. J. Tseng, "Energy efficiency of lithium-ion battery used as energy storage devices in microgrid," IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Yokohama, Japan, 2015, pp. 005235-005240, doi: 10.1109/IECON.2015.7392923

12. Lipko D. O., Bondarenko O. F. Vykorystannia chastkovoho zariadno-rozriadnoho tsykladu akumulatornoj batarei dlia zbilshennia yii resursu [Use of a partial charge-discharge cycle of the battery to increase its resource] Tekhnolohiia ta konstruiuvannia v elektronni aparaturi, 2023, № 3-4, s. 9-15.

13. M. S. Rahman, M. J. Hossain, F. H. M. Rafi and J. Lu, "EV charging in a commercial hybrid AC/DC microgrid: Configuration, control and impact analysis," 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Brisbane, QLD, Australia, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/AUPEC.2016.7749351

14. Lo Franco F, Ricco M, Mandrioli R, Grandi G. Electric Vehicle Aggregate Power Flow Prediction and Smart Charging System for Distributed Renewable Energy Self-Consumption Optimization. Energies. 2020; 13(19):5003. <https://doi.org/10.3390/en13195003>

15. <https://ev-database.org/>

16. K. Kouka, A. Masmoudi, A. Abdelkafi et al., Dynamic energy management of an electric vehicle charging station using photovoltaic power, Sustainable Energy, Grids and Networks (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100402>

Надійшла: 29.04.2024

Received: 29.04.2024