

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЕЙ У РАЗІ ВИКОРИСТАННЯ КОНЦЕПЦІЇ ДВОБІЧНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБМІНУ МІЖ ЕЛЕКТРОМОБІЛЕМ, СИСТЕМОЮ ЗБЕРІГАННЯ ТА MICROGRID

Г.С. Белоха^{1*}, канд. техн. наук, Р. Стржелецьки^{2**} докт. техн. наук

¹ НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна,
e-mail: pointage13@gmail.com.

² Гданський технологічний університет, Польща.

Оптимізоване використання електромобілів має великий потенціал, оскільки воно можливе для допоміжних послуг. Задля більш надійної роботи Microgrid, коли не має умов для віддачі енергії в мережу, її можна віддати через систему зберігання енергії в акумулятори електромобілів та зберігати там. При цьому використовується двонаправлена передача енергії: як в електромобіль, так і від нього. Дослідження роботи системи керування Microgrid постійного струму проведено імітаційним моделюванням в Matlab. Керування відбувається згідно розробленого алгоритму підключення та відключення парку електромобілів та щоденного профілю їхніх потужностей. Результати дослідження підтвердили доцільність використання проміжної (буферної) системи зберігання у разі використання концепції двобічного енергетичного обміну між електромобілем та Microgrid. Наведено оцінку ефективності системи керування електромобілем. Бібл. 16, рис. 3, табл. 1.

Ключові слова: електромобіль, Microgrid, локальна система, система зберігання енергії, акумуляторна батарея.

Вступ. Збільшення кількості електромобілів (EV) призвело до виникнення питань, пов'язаних із їхнім зарядом. Неконтрольований заряд електромобілів знижує якість електроенергії через нестабільність частоти та напруги. Особливо це відчутно в електроенергетичних системах з відновлюваними і розосередженими джерелами живлення та системами зберігання енергії. Перед системою керування таких систем стоять задачі, які пов'язані з визначенням пріоритету використання енергії кожного генератора з врахуванням особливостей кожного з джерел енергії та проблеми зберігання невикористаної енергії відновлюваних джерел [3]. Застосування відновлюваних джерел енергії у зарядній станції електромобіля розглядається в багатьох дослідженнях як найбільш адекватне рішення задля максимізації економічних і екологічних переваг електромобілів та розвитку локальних мереж [1 – 7].

Класичний режим роботи під час підключення електромобіля до мережі є режим його заряджання (мережа – електромобіль G2V). Задля керування цим процесом, підтримування заряду акумулятора, оцінювання рівня заряду та продовжування терміну служби акумулятора розробляються спеціальні алгоритми керування зарядом. Двонаправлена передача енергії як в електромобіль, так і від нього назад у мережу надає широкий спектр переваг для локальної системи. Впровадження концепції мережа – електромобіль – мережа (V2G) допоможе енергосистемі в регулюванні частоти, підтримці напруги, балансу реактивної та активної потужностей; використання електромобілів як резервне джерело задля зберігання енергії від відновлюваних джерел. Перетворювачі силової електроніки є невід'ємною частиною системи керування процесів заряду. Задля організації передачі енергії з електромобіля в Microgrid використовуються двонаправлені перетворювачі.

В [4 – 11] відмічається, що використання електромобілів як елементів зберігання збільшують експлуатаційну гнучкість електричної мережі особливо в періоди пікового навантаження, а також для інтеграції відновлюваних джерел енергії в мережу. Задля зниження пікового навантаження здебільшого використовуються програми реагування на попит. Наразі бракує досліджень щодо розробки зарядних станцій, інтегрованих із системами зберігання.

Мета роботи – розробка системи керування зарядом електромобіля задля підвищення ефективності Microgrid у разі використання акумуляторів електромобілів як додаткових елементів зберігання у процесі двобічного обміну енергії з проміжною (буферною) системою зберігання.

© Белоха Г.С., Стржелецьки Р., 2025

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0003-4277-367X>; ** <https://orcid.org/0000-0001-9437-9450>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Матеріал досліджень. Microgrid, що працює на постійному струмі, має численні переваги, включаючи постачання енергії високої потужності без необхідності регулювання реактивної потужності, відсутність вимоги регулювання фази, менші втрати перетворення та ефективний контроль умов дисбалансу [12 – 14].

У рамках концепції двобічного обміну енергією електромобілі є короткостроковими системами зберігання енергії, де між мережею та акумуляторами електромобілів відбувається обмін енергією задля отримання прибутку від сукупної накопиченої енергії під час паркування. Багато дослідників розглядають таке використання електромобілей та вирішують проблеми, які виникають [4, 7]. Це, насамперед, вплив на мережу, виникнення гармонік, перехідних процесів, порушення стабільності мережі, що потребує розробки систем керування зарядом та алгоритмами підключення до мережі.

В [6] розглядається зарядна станція електромобілей, які заряджаються через акумуляторну батарею, основна задача якої є забезпечення потреб електромобілів. Там використовується однонаправлені перетворювачі, електромобілі можуть взаємодіяти з зарядною станцією за концепцією G2V. У [8] представлено застосування акумуляторної батареї для швидкої зарядки електромобілів. Така необхідність викликана зменшенням впливу процесів заряду електромобілей на загальну мережу, оскільки обмін енергією відбувається між батареєю та електромобілями.

Пропонується використовувати концепцію двобічного обміну енергії через проміжну систему зберігання «система зберігання-електромобіль-система зберігання» (рис. 1). Задля зменшення пікових навантажень енергія з електромобілів віддається до проміжної (буферної) системи зберігання.

Щоденний прибуток від експлуатації, а також підтримка якості електроенергії та допоміжні послуги можуть бути отримані за рахунок ефективного використання акумуляторів EV.

Система Microgrid постійного струму включає: сонячні панелі PV з перетворювачем DC/DC; дизель-генератор DG з випрямлячем AC/DC; проміжну (буферну) систему зберігання енергії B; блок парку електромобілів Парк EV, який складається з EV1 та EV2 і двонаправлених перетворювачів постійного струму DC/DC; навантаження змінного струму Load з інвертором AC/DC, а також мережу Grid, до якої можна під'єднатися у разі нестачі електроенергії з розосереджених джерел та системи зберігання. Слід зазначити, що обмін енергією між парком електромобілей і системою зберігання ізолюваний від основної мережі.

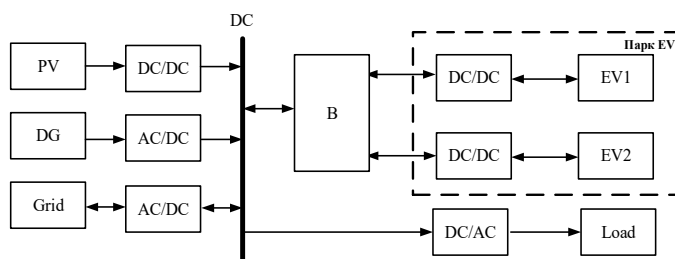


Рис. 1

Парк EV надає необхідні входні дані щодо кількості електромобілів кожного профілю, часу початку та кінця паркування та відповідні значення стану заряду. Початковий і бажаний рівень заряду батареї вказується відповідно до характеристик профілю EV.

Важливим питанням в роботі Microgrid є організація системи керування зарядом. Протокол зарядки літєвих акумуляторів електромобілів відбувається за режимом постійний струм/постійна напруга (CC/CV). Процесом заряду CC/CV керує система керування батареєю B [4]. Реалізація режимів заряду та розряду відбувається за допомогою системи керування двонаправленим перетворювачем DC/DC [15] з примусовим формуванням безперервного струму або напруги. Релейне керування транзисторами перетворювача забезпечує швидкодію та високу точність відпрацювання задаючих сигналів.

Енергетичні процеси, які відбуваються в режимі заряду постійним струмом, описуються рівняннями

$$\begin{aligned}
 I_{EV3} - i_{EV} &= \Delta i_{EV}, \\
 L_{EV} \frac{di_{EV}}{dt} + i_{EV} R_{EV} &= U_{ex} \quad -a \leq \Delta i_{EV} \leq a, \frac{di_{EV}}{dt} > 0, \\
 L_{EV} \frac{di_{EV}}{dt} + i_{EV} R_{EV} &= -U_{ex} \quad -a \leq \Delta i_{EV} \leq a, \frac{di_{EV}}{dt} < 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

де L_{EV}, R_{EV} – індуктивність та опір електромобіля; I_{EV3}, i_{EV} – струм завдання та миттєве значення струму електромобіля; $2a$ – ширина петлі гістерезису релейного регулятора струму EV; U_{ex} – напруга на вході перетворювача.

Енергетичні процеси, які відбуваються в режимі заряду постійною напругою,

$$\begin{aligned}
U_{EV3} - u_{EV} &= \Delta u_{EV}, \\
\frac{L_{EV}}{R_{EV}} \frac{du_{EV}}{dt} + u_{EV} &= U_{ex} \quad -b \leq \Delta U_{EV} \leq b, \frac{du_{EV}}{dt} > 0, \\
\frac{L_{EV}}{R_{EV}} \frac{du_{EV}}{dt} + u_{EV} &= -U_{ex} \quad -b \leq \Delta U_{EV} \leq b, \frac{du_{EV}}{dt} < 0,
\end{aligned} \tag{2}$$

де U_{EV3}, u_{EV} – значення завдання і дійсне значення постійної напруги на навантаженні; $2b$ – ширина петлі гістерезису релейного регулятора напруги EV.

На кожному інтервалі доби Microgrid повинна перебувати в енергетичному балансі. Загальна потужність P , яка виробляється генераторами, повинна дорівнювати загальній необхідній потужності споживачів P_l та енергії P_B , яка буде віддаватися або споживатися з системи зберігання В,

$$\sum_{j=1}^k P_{Gjt}(t) = \sum_{n=1}^m P_{loadn}(t) \pm P_B(t) \pm \sum_{i=1}^l P_{EVi}, \tag{3}$$

де P_{load} – потужність споживачів; k – кількість генераторів; m – кількість споживачів; l – кількість електромобілів; P_B – потужність, яка віддається (знак «+») або поглинається (знак «-») системою зберігання енергії; P_{EV} – потужність, яка віддається (знак «+») або поглинається (знак «-») в електромобілях парку EV.

Задля організації системи керування та розробки алгоритмів керування необхідно виділити щоденний профіль потужності заряджання електромобіля та його параметри:

- максимальна доступна потужність P_{Bmax} , яку може забезпечити система зберігання енергії;
- максимальна потужність, яку можуть поглинати акумулятори автомобіля P_{EVmax} . Ця потужність залежить від режиму заряду і може змінюватися під час процесу заряджання;
- максимальна енергія, яку може зберігати акумулятор автомобіля C_{max} ;
- початковий стан заряду парку електромобілів (SOC_0);
- час прибуття (t_{arr}) і відправлення (t_{dep}) транспортного засобу на/зі стоянки та щоденний час паркування (t_{park}) згідно рівняння $t_{park} = t_{arr} - t_{dep}$.

Після часткового або повного розряду системи зберігання в період паркування, якщо все ще є запас по потужності або ціна на електроенергію з мережі відносно низька (через надлишок електроенергії, нічний час, тощо), система зберігання заряджається задля накопичення електроенергії.

Моніторинг у режимі реального часу вимагає визначення потужності кожного EV

$$P_{EV} = \frac{(SOC_{EV} - SOC_{EV0})C_{EV}}{t_d - t}, \tag{4}$$

де SOC_{EV} – заряд завдання; SOC_{EV0} – початковий заряд; C_{EV} – ємність акумулятора; t_d – час відправлення; t – поточний час.

Під час дослідження були враховані такі обмеження В та EV:

$$0.1 \cdot SOC_{B_max} \leq SOC_B(t) \leq 0.9 \cdot SOC_{B_max}; \quad 0.2 \cdot SOC_{EV_max} \leq SOC_{EV}(t) \leq 0.9 \cdot SOC_{EV_max}, \tag{5}$$

де SOC_{B_max} – максимально можлива ємність; $SOC_B(t)$ – поточний заряд.

Режими роботи.

1. Заряд системи зберігання В від мережі, парк EV відключений. При цьому потік потужності від локальної мережі до батареї та навантаження, яке в даний момент підключене, є

$$P_{Bi}(t) = \sum_{j=1}^k P_{jt}(t) - \sum_{n=1}^m P_{loadi}(t). \tag{6}$$

2. Заряд парку електромобілів від системи зберігання, генератори локальної системи забезпечують навантаження

$$P_{Bi}(t) = \sum P_{EV}, \quad \sum_{j=1}^k P_{jt}(t) = \sum_{n=1}^m P_{loadi}(t). \tag{7}$$

3. Розряд парку електромобілів до системи зберігання

$$\sum P_{EV} = P_{Bi}(t), \quad \sum_{j=1}^k P_{jt}(t) = \sum_{n=1}^m P_{loadi}(t). \tag{8}$$

4. Режим розряду системи зберігання в мережу задля задоволення потреб споживачів або її продажу

$$\sum_{j=1}^k P_{jt}(t) = \sum_{n=1}^m P_{loadi}(t) - P_{Bi}(t). \quad (9)$$

5. Режим холостого ходу, коли батарея не приймає участь в обміні енергією з парком EV, мережею та іншим навантаженням («0» у виразі показує, що система зберігання не задіяна в даний момент, але може мати заряд)

$$\sum_{j=1}^k P_{jt}(t) = \sum_{n=1}^m P_{loadi}(t), \quad P_{Bi}(t) = 0. \quad (10)$$

Розроблено модель Microgrid з системою керування перетворювачами та процесами заряду згідно виразів (1) – (10). Підключення та відключення парку EV згідно щоденного профілю їхніх потужностей та потреб мережі відбувається за допомогою алгоритмів керування. Як приклад обрані електромобілі Nissan leaf EV1 та Kia Soul EV2.

Розроблено систему автоматичного керування процесами заряду як системи зберігання, так і електромобілей. За виразами (1), (2), (4), (5), а також моделі Шеферда акумуляторних батарей отримано вирази, які описують процеси в акумуляторних батареях EV [16],

$$u_{EV}(t) = U_0 - \frac{k C_{EV}}{C_{EV} - \int \frac{i_{EV}(t)}{C_{EV}} dt} i_{EV}(t) - i_{EV}(t) R_{внут}, \quad (11)$$

$$SOC_{EV} = \int \frac{i_{EV}}{C_{EV}} dt, \quad (12)$$

де k – коефіцієнт поляризації; $R_{внут}$ – внутрішній опір; C_{EV} – максимальна ємність батареї EV.

Система автоматичного керування (САК) представляє собою систему підпорядкованого регулювання та має три контури регулювання SOC, струму, напруги (рис. 2). Регулятор струму та напруги PP є релейним регулятором. Регулятор SOC PSOC – ПІ-регулятор, БЗ – блок завдання режимів роботи EV, 331 – 333 – коефіцієнти зворотніх зв'язків, PP CC/CV – блок перемикавання режимів заряду, K1, K2 – перемикачі режимів заряду.

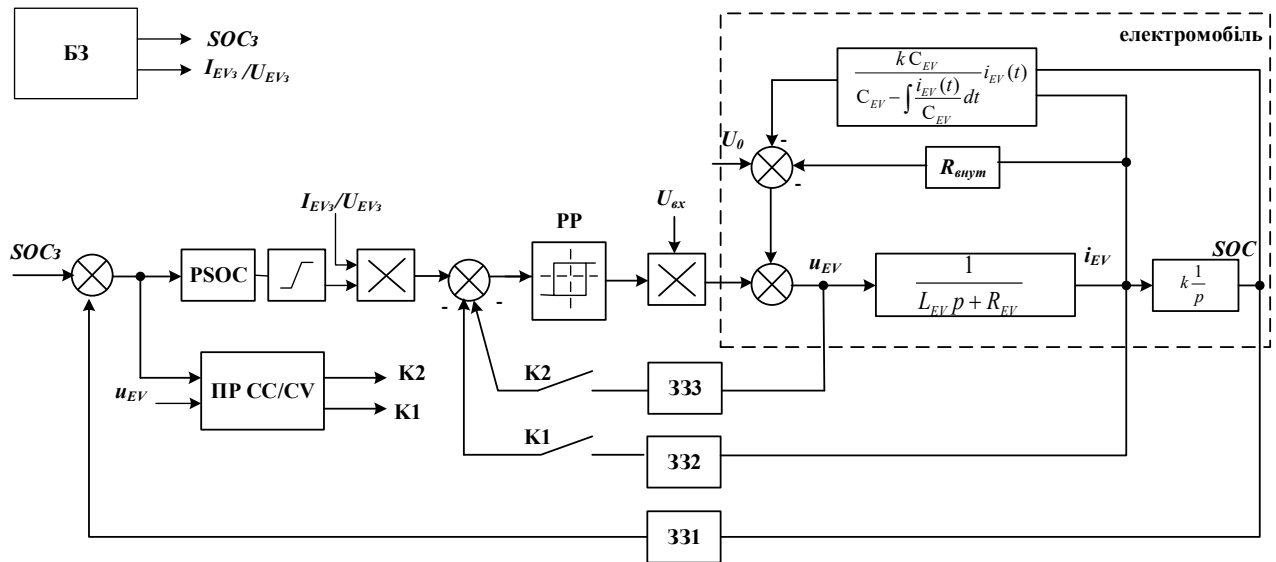


Рис. 2

САК дає можливість оцінити працездатність, стійкість системи, якість перехідних процесів та налаштувати регулятори. Налаштування регуляторів PSOC та PP дало змогу отримати перерегулювання струму та напруги електромобіля до 1%.

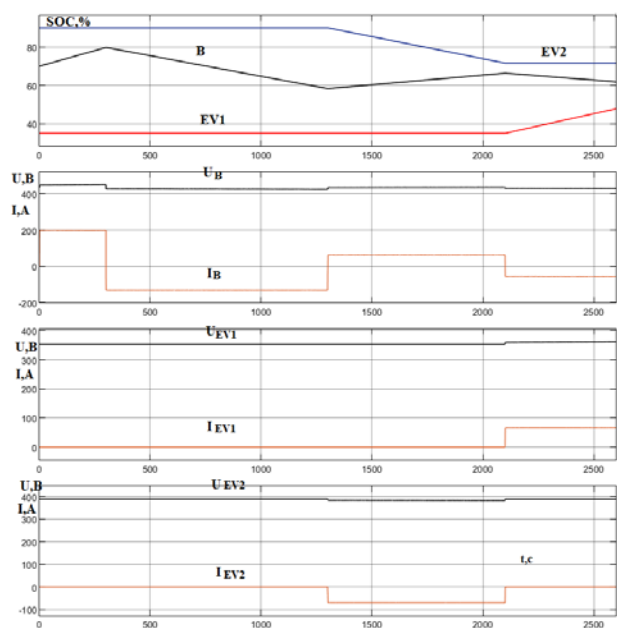
Для системи, що розглядається, оцінено ефективність процесів в EV (таблиця). Оцінка проводилася за допомогою розрахунку коефіцієнта корисної дії $\eta_{EV}(\%)$, який визначається як відношення розрядної ємності до зарядної ємності

$$\eta_{EV}(\%) = \frac{I_d t_d}{\sum_{i=1}^n I_c t_c} 100, \quad (13)$$

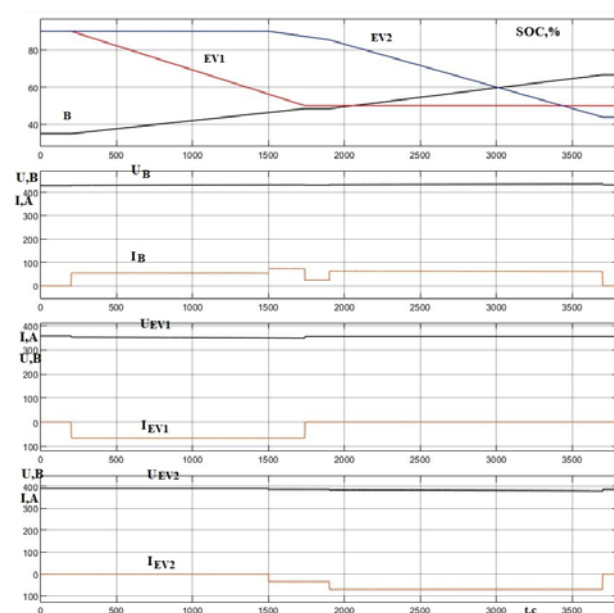
де t_d – час розряду; I_d – струм розряду; I_c – струм заряду; n – кількість етапів заряду; t_c – час заряду.

За параметрами, наведеними у таблиці, виразами (1) – (12) з системою керування згідно рис. 2 проведено імітаційне моделювання в Matlab для системи, яка складається з локальної мережі, системи зберігання та двох електромобілей.

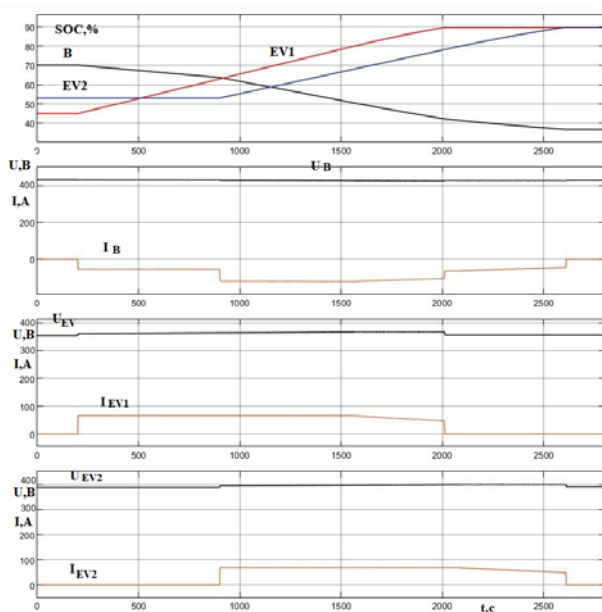
Параметри	Система зберігання	EV1	EV2
Ємність, кВт*год	64	24	31,8
Номінальна напруга, В	400	330	360
Напруга відсічення розряду, В	365	336	336
Макс. напруга зарядки, В	430	394	394
Макс. струм, А	200	71	88
$\eta_{EV}(\%)$	-	96	94,8



а



б



в

Рис. 3

Представлено два сценарії роботи системи: віддача енергії від електромобілів до системи зберігання (рис. 3, а); віддача в мережу енергії від системи зберігання, віддача енергії до системи зберігання електромобілем EV2, заряд електромобіля EV1 від B (рис. 3, б) та одночасний заряд EV1 до EV2 (рис. 3, в).

У всіх режимах роботи перетворювач з системою керування реалізує режим заряду CC/CV. Під час перемикання між режимами роботи системи виникають незначні перехідні процеси, які не впливають на роботу мережі. На відміну від використання електромобілей як систем зберігання енергії безпосередньо від мережі виникають перехідні процеси, які впливають на роботу всієї мережі. Проведені дослідження показали, що у разі підключення електромобіля безпосередньо до мережі для віддачі енергії виникають перехідні процеси з перерегулювання до 7% та до

11% за одночасного підключення двох електромобілей.

Використання проміжної (буферної) системи зберігання у разі використання EV в допоміжних послугах тимчасового зберігання енергії дасть можливість:

- забезпечити швидку зарядку додаткових систем зберігання за відсутності впливів на електричну мережу, які виникають, коли багато електромобілів заряджаються одночасно;
- підвищити стабільність та надійність роботи локальної мережі Microgrid;
- використовувати меншу за ємністю стаціонарну систему зберігання, розмір якої розраховується під час проектування з урахуванням використання EV як додаткових систем зберігання;
- збільшити економічні вигоди. Наприклад, у той час, як власники електромобілів заряджають свої транспортні засоби за низькими тарифами вночі, вони продають енергію в локальну систему Microgrid в години пік, коли енергія дорога вдень, і, таким чином, отримують фінансову вигоду.

Висновки.

Розроблено систему керування процесами заряду, що дає змогу вводити енергію з електромобіля в Microgrid за відсутності впливу на мережу, за рахунок використання електромобіля за концепцією «система зберігання-електромобіль-система зберігання» та отримати перерегулювання струму та напруги електромобіля до 1%.

В залежності від вимог мережі в батареях електромобілів через систему зберігання накопичуватиметься надлишкова енергія, вироблена локальними системами Microgrid, або забезпечуватиметься навантаження енергією, накопленою в електромобілях, коли виникне дефіцит енергії, виробленої Microgrid.

На відміну від локальних систем Microgrid без проміжної системи зберігання, де енергія від автомобілів відправляється одразу до мережі, процеси енергетичного обміну електромобілей та системи зберігання не впливають на процеси обміну потужностей генераторів та споживачів, що надає локальній системі можливість покращити показники надійності, та не впливатиме на якість електричної енергії.

Дослідження показали, що у разі підключення електромобіля безпосередньо до мережі для віддачі енергії виникають перехідні процеси з перерегулювання до 7% та до 11% за одночасного підключення двох електромобілей.

Імітаційним моделюванням підтверджено працездатність запропонованої системи. Оцінено ефективність процесів в електромобілях, ККД складає 94,8 – 96%.

CONTROL SYSTEM OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING PROCESSES USING THE CONCEPT OF TWO-WAY ENERGY EXCHANGE BETWEEN ELECTRIC VEHICLE, STORAGE SYSTEM AND MICROGRID

H.S. Bielokha¹, R. Strezhelsky²

¹ National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
Pr. Beresteiskyi, 37, Kyiv, 03056, Ukraine,
e-mail: pointage13@gmail.com.

² Gdansk University of Technology, Poland.

The optimized use of electric vehicles has great potential, as their use is possible not only for their charging, but also for auxiliary services. For a more reliable operation of the Microgrid, and when there are no conditions for returning energy to the network, it can be given through the energy storage system to the batteries of electric vehicles and stored there. At the same time, two-way energy transfer is used: both to and from the electric vehicle. The study of the operation of the DC Microgrid control system was carried out by simulation modeling in Matlab on the developed model, the control is carried out according to the developed algorithm of connecting and disconnecting the fleet of electric vehicles according to the daily profile of their capacities. Research has confirmed the feasibility of using an intermediate (buffer) storage system when using the concept of two-way energy exchange between an electric vehicle and Microgrid, and the efficiency of the charge management system has been evaluated. References 16, figures 3, table 1.

Keywords: electric vehicle, Microgrid, local system, converter, storage system, battery.

1. Vermeer G.R., Mouli C., Bauer P. Optimal Sizing and Control of a PV-EV-BES Charging System Including Primary Frequency Control and Component Degradation. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*. 2022. Vol. 3. Pp. 236-251. DOI: <https://doi.org/10.1109/OJIES.2022.3161091>.

2. Zharkin A.F., Novsky V.O., Zapadynchuk O.P., Martynov V.V. Features of the construction of bidirectional charging converters for the implementation of the concept of two-way energy exchange vehicle – to –grid in the case of connecting electric vehicles to a general-purpose electrical network. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 5. Pp. 19–25. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.019>. (Ukr)
3. Verma A., Singh B., Chandra A., Al-Haddad K. An Implementation of Solar PV Array Based Multifunctional EV Charger. *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Long Beach, CA, USA, 13-15 June 2018. Pp. 531–536. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITEC.2018.8450191>.
4. Kouka K., Masmoudi A., Abdelkafi A., Krichen L. Dynamic energy management of an electric vehicle charging station using photovoltaic power. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2020. Vol. 24. 100402. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100402>.
5. Shidlovsky A.K., Zharkin A.F., Pavlov V.B., Novsky V.O. The impact of the development of charging infrastructure for electric vehicles and hybrid vehicles on the modes of electrical networks. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 3. Pp. 74–81. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.074>. (Ukr)
6. Muhammad Aziz, Takuya Oda, Masakazu Ito. Battery-assisted charging system for simultaneous charging of electric vehicles. *Energy*. 2016. Vol. 100. Pp. 82–90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.069>.
7. Sarda J., Raj Y., Patel A., Shukla A., Kachhatiya S., Sain M. A Vehicle-to-Grid System for Controlling Parameters of Microgrid System. *Sensors*. 2023. Vol. 23(15). 6852. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23156852>.
8. Ali J., Dyo V., Zhang S. Battery-assisted Electric Vehicle Charging: Data Driven Performance Analysis. 2020 IEEE PES *Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, The Hague, Netherlands, 26-28 October 2020. Pp. 429–433. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248941>.
9. Arena G., Chub A., Lukianov M., Strzelecki R., Vinnikov D., De Carne G. A Comprehensive Review on DC Fast Charging Stations for Electric Vehicles: Standards, Power Conversion Technologies, Architectures, Energy Management, and Cybersecurity. *IEEE Open Journal of Power Electronics*. 2024. Vol. 5. Pp. 1573–1611. DOI: <https://doi.org/10.1109/OJPEL.2024.3466936>.
10. Bielokha H., Chupryna L., Denisyuk S., Eutukhova T., Novoseltsev O. Hybrid Energy Systems and the Logic of Their Service-Dominant Implementation: Screening the Pathway to Improve Results. *Energy Engineering*. 2023. Vol. 120. Pp. 1307–1323. DOI: <https://doi.org/10.32604/ee.2023.025863>.
11. Blinov I., Trach I., Parus Y., Khomenko V., Kuchanskyy V., Shkaruplyo V. Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on *Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 13-17 September 2021. Pp. 262–265. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981>.
12. Jia Q.S., Long T. A review on charging behavior of electric vehicles: data, model, and control. *Control Theory and Technology*. 2020. Vol. 18. Pp. 217–230. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11768-020-0048-8>.
13. Datta Ujjwal, Kalam Akhtar, Shi Juan. The relevance of large-scale battery energy storage (BES) application in providing primary frequency control with increased wind energy penetration. *Journal of Energy Storage*, 2019. Vol. 23. Pp. 9–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.02.013>
14. Lukianov M., Verbitsky I., Cadaval E.R., Strzelecki R. An Overview of Bidirectional EV Chargers: Empowering Traction Grid-Powered Chargers. In: *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*. Springer, Cham. 2024. Vol. 512. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3_9_2.
15. Bielokha H., Samcheleev Y. Electromagnetic compliant of voltage source with relay control. International Conference on *Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenichuk, Ukraine, 15-17 November 2017. Pp. 32-35. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248921>.
16. Hanane Hemi, Nacer K M'Sirdi, Aziz Naamane. A new proposed shepherd model of a li-ion open circuit battery based on data fitting. Proc. of the Int. Conf. on *Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation*, Lisbon, Portugal, 18-20 September 2019.

Надійшла 30.05.2024
Остаточний варіант 10.02.2025