

## МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

**Вступ.** Перехід до вуглецево-нейтральної енергетики відбувається зі зростаючим рівнем невизначеності, як з боку генерації відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), так і з боку навантаження, такого як електромобілі. Широке проникнення електромобілів в енергосистему з неконтрольованою зарядкою призведе до небажаних порушень напруги та струму, безпекових проблем та необхідності розширення пропускної спроможності мережі. Для запобігання розбалансування напруги, гармонік, перевантажень і зменшення втрат мережі необхідна розумна зарядка електромобілів. У дослідженнях використовуються різні методи оптимізації (пряма оптимізація, евристика, теорія ігор та машинне навчання), в залежності від типу та складності проблеми, бажаного обчислювального часу та необхідності пошуку глобального оптимального рішення.

**Мета роботи:** проаналізувати та порівняти методи оптимізації, які використовуються для диспетчеризації розумної зарядки електромобілів та пошуку оптимальної стратегії поведінки гравців на ринку.

**Основний зміст.** Широке проникнення електромобілів із неконтрольованою зарядкою призведе до небажаних порушень лімітів напруги та струму, до проблем безпеки та високої вартості розширення пропускної спроможності мережі. Для запобігання розбалансування напруги, гармонік, перевантажень і зменшення втрат мережі необхідна розумна зарядка електромобілів. Через шкідливий вплив на екологію електростанції на основі викопного палива не можна характеризувати як стабільні та надійні джерела енергії. Урядові ініціативи підкреслюють важливість скорочення викидів парникових газів, які, разом зі збільшенням частки поновлюваних джерел енергії (ВДЕ), будуть основними драйверами для зеленої та чистої енергосистеми. Однак, через переривчастість та нестабільність ВДЕ для забезпечення безпечної та ефективної роботи енергосистеми необхідні інноваційні підходи в плануванні та експлуатації. Рівень невизначеності зростає через змінний характер ВДЕ та збільшення кількості електромобілів, що вимагає більш точного прогнозування навантаження [1] та гнучкості в енергосистемі, яку можна забезпечити з боку кінцевого клієнта [2].

Оптимізація роботи є одним із підходів забезпечення надійності функціонування зарядної станції. Планування зарядки EV є складною проблемою оптимізації. Оптимізований графік зарядки необхідний для підвищення ефективності мережі, агрегатора, розподільних трансформаторів та самого EV. Цільових функцій оптимізації зарядки електромобілів може бути декілька. Найпоширенішою ціллю оптимізації є мінімізація загальної вартості зарядки з метою економії витрат. Вартість може включати витрати на експлуатацію та витрати на паливо. З точки зору енергоефективності розглядаються загальні витрати на електроенергію, а також втрати електроенергії, така оптимізація спрямована на планування розподілу електроенергії більш ефективним способом. Екологічний слід також враховують в задачах оптимізації для зменшення викидів парникових газів, а також деяких інших газоподібних забруднювачів, таких як оксиди азоту (NOx). Отримання доходу від V2G є основним стимулом участі в моделі, тому варто розглядати також можливість знаходження рішення задачі оптимізації з метою максимізації прибутку. Крім цього, в якості цільової функції також можна розглядати максимізацію середнього стану заряду батареї EV.

Іншою складовою задачі оптимізації є обмеження. Обмеження вводяться для зв'язування рішень у межах фізичних та визначених користувачем обмежень. Потужність, напруга та струм зарядного пристрою зазвичай обмежені технічними характеристиками зарядних пристроїв та ємністю акумулятора EV. Для оптимізації всієї розподільної енергосистеми часто розглядаються обмеження генерації та передачі в межах робочих параметрів мережевих операторів «grid code».

Якщо оптимізаційні моделі опуклі, мають невелику кількість змінних і вхідних параметрів, і можуть бути вирішені за поліноміальний час, методи прямої оптимізації знайдуть глобальний

оптимум, який задовольняє всі обмеження. Однак більші задачі з кількома змінними та численними обмеженнями іноді не можуть бути вирішені за поліноміальний час, тому необхідні інші підходи до їх вирішення. Зі збільшенням кількості змінних і обмежень складність моделі та час, необхідний для пошуку рішення, також зростають. Завдяки простій реалізації та високій швидкості обчислень евристичні методи використовуються в оптимізаційних задачах, у яких швидкість виконання важливіша за знаходження точного рішення. З іншого боку, коли досліджується конкуренція між різними гравцями ринку, підхід теорії ігор моделює їхню взаємодію, максимізуючи переваги кожного залученого гравця. Якщо деякі вхідні дані відсутні, алгоритми машинного навчання підходять для їх прогнозування на основі попередньо зібраних даних. Тому для різних типів задач оптимізації функціонування зарядної станції необхідно використовувати різні методи, в тому числі їх поєднання.

В роботі [3] встановлено, що використання акумуляторних батарей і джерел відновлюваної енергії на швидкісних зарядних станціях може знизити експлуатаційні витрати зарядної станції, а також має позитивний вплив на енергосистему. Для визначення оптимальної потужності генеруючої установки та типу акумуляторної батареї з урахуванням кількості циклів зарядки, глибини розряду та терміну служби батареї була сформульована задача MILP. Оптимальний розв'язок показує, що система накопичення енергії і ВДЕ можуть знизити витрати на 35%, а пікове навантаження може бути зменшено майже на 8%. В роботі [4] визначено оптимальний розмір і тип накопичувача енергії (махове колесо, свинцево-кислотна батарея, літій-іонна батарея, ванадієво-відновна батарея), інтегрованої в зарядну станцію, з метою зменшення витрат на зарядку, а також зменшення негативного впливу на мережу. Для оптимальної конфігурації та управління агрегаторами EV з урахуванням обмежень розподільної мережі стохастична модель змішаного цілого нелінійного програмування (MINLP) була розв'язана за допомогою декомпозиції Бендерса, в якому керування заряджанням EV розраховувалося за допомогою моделі черги M/M/N/N з неоднорідним процесом Пуассона. Основна задача - визначити економічний план роботи енергосистеми з урахуванням поведінки агрегатора EV. Змінні в основній задачі пов'язані з конфігурацією агрегаторів EV (розташування та кількість інтелектуальних лічильників, зарядних пристроїв та зарядної потужності). Підзадача - пошук оптимального розподілу електромобілів на основі конфігурацій та правил, зазначених у головній задачі. Моделювання показало, що ємність системи акумуляування на зарядній станції зменшується, якщо збільшується запас ходу автомобіля.

Якщо брати до уваги обчислювальний час великих задач оптимізації, евристичні алгоритми перевершують пряму оптимізацію. Рішення, знайдене евристичними алгоритмами може бути не найкращим, однак не повинно суттєво відхилитися від рішення, отриманого шляхом прямої оптимізації. У [5] автори розробили евристичний алгоритм, щоб отримати мінімальну вартість зарядки. Результати, отримані при виконанні алгоритму, планують типову схему зарядки. У дослідженні [6] представлений евристичний підхід, який називається алгоритмом пошуку графів, дозволяє клієнтам обирати зарядну діяльність EV. Одним із найпоширеніших евристичних алгоритмів є алгоритм рою частинок (Particle swarm optimization, PSO). Цей алгоритм складається з трьох етапів: самостійний пошук області розв'язку, оцінка зібраних даних і визначення найкращого результату, а також зміщення всіх агентів в пошуковій області на краще рішення. Багатоцільова оптимізація рою частинок в [7] використовується для визначення місця розташування зарядної станції електрокарів з урахуванням мінімізації втрат в мережі, придбаної енергії від мережі, відхилення напруги, підвищення надійності електроживлення і зниження витрат на зарядку. Для вирішення проблеми перевантаження розподільної мережі через неконтрольовану зарядку електромобілів запропоновано стратегію розумної зарядки з можливістю надання послуг V2G [8]. Нелінійна задача вирішується за допомогою оптимізації рою частинок. Перевагами запропонованої моделі є зниження експлуатаційних витрат, перевантаженість мережі, втрати. В роботі [9] цільовою функцією є максимізація середнього SOC, враховуючи вартість енергії, ємність акумулятора та час зарядки, яка є нелінійною, тому ця задача вирішується з використанням PSO.

Агрегатор EV прагне купувати енергію на ринку на добу вперед (РДН) за найнижчою можливою ціною, маючи на меті мінімізувати відхилення від запланованого графіка в режимі реального часу. Агрегатор не має точної інформації про час прибуття і SoC кожного EV, що прибуде на станцію наступного дня. Агрегатор прогнозує споживання на основі отриманих попередніх знань від даних зарядки EV. Оскільки фактичний час прибуття та відправлення не відомий заздалегідь, евристичний алгоритм планує заряджання електромобіля на основі історичних даних та оновлює графік з

урахуванням фактичного часу прибуття та відправлення, щоб мінімізувати витрати на зарядку. Оптимальна зарядка EV, яка відповідає всім технічним обмеженням в мережі, отримується метаевристичними методами, які забезпечують якісне рішення, дуже близьке до оптимального (або навіть оптимального) зі значно меншою кількістю обчислювальних ресурсів.

В роботі [10] було доведено, що використання класичних методів оптимізації не вирішують проблему рекомендації зарядної станції для водіїв з низьким рівнем заряду, і як результат запропоновано змоделювати задачу як гру з переваженнями, для якої існує принаймні одна рівновага Неша (тобто рішення, яке всі електромобілі вважають задовільним). Знайдене рішення дозволяє знизити затори на дорогах та споживання енергії, а також підвищити задоволення користувачів. В роботі [11] теорія некоопераційних ігор була застосована для зменшення витрат на зарядку електромобілів без шкоди для розподільної мережі. Цільова функція вимірює, виграв індивідуального учасника процесу зарядки, при зміні власної стратегії, та відсутності змін стратегії інших учасників. Для пошуку оптимальної стратегії поведінки агрегатора зарядної станції на ринку в роботі [12] був використаний децентралізований підхід теорії ігор, оптимізуючи взаємодію електромобілів із зарядною інфраструктурою. Зарядка виконується переважно від сонячних батарей, EV заряджаються від мережі тільки тоді, коли потреба в потужності не може бути задоволена від сонячної генерації. Також теорію ігор було використано для формування оптимальної цінової політики зарядних станцій з ВДЕ з дотриманням всіх обмежень в системі в роботі [13] Доведено збіжність задачі на основі супермодульності. Метою кожної зарядної станції є вибір правильної цінової стратегії для EV, завдяки якій зарядна станція може використовувати енергію, отриману з відновлюваних джерел, для зарядки транспортних засобів або для продажу надлишкової енергії в мережу.

Методи машинного навчання також широко використовуються для оптимізації роботи зарядних станцій. Так, в роботі [14] для прогнозування початкового розташування EV було використано метод класифікації, а для розрахунку відстані, яку пройде EV, використано регресію. На основі спрогнозованих даних для розрахунку витрат на зарядку EV було використано пряму оптимізацію. Алгоритм ансамблевого прогнозування, який зменшує похибку прогнозування споживання енергії, використовується в [15] для зменшення пікового навантаження, вартості та дисперсію навантаження. В роботі [16] система управління заряджанням EV, заснована на машинному навчанні, використовується для направлення EV на зарядні станції, щоб мінімізувати дисперсію навантаження, втрати потужності, коливання напруги та вартість зарядки, враховуючи звичайну технологію зарядки, швидку зарядку та V2G. Алгоритм LSTM застосовується для класифікації швидкості заряджання та зарядної станції із середньою точністю 95% та дозволяє без втрати точності вводити невизначеність даних навантаження. Як результат середня енергоефективність мережі знижується лише на 3,1% порівняно з базовою енергоефективністю без EV.

**Висновки.** Поява Plug-in Electric Vehicles (PEVs) в енергосистемі становить серйозну проблему, впливаючи на різні аспекти енергосистеми, включаючи виробництво, передачу, розподіл, економічну диспетчеризацію та оптимізацію розподілу потужності. За умови належного планування процесу заряджання та правильного використання EV з характеристиками розподіленого зберігання енергії, вони можуть внести значний внесок у підвищення ефективності енергосистеми та розвиток інтеграції відновлюваної енергії. Мінімізація впливу на навколишнє середовище та максимізація доходу власників EV, також можуть бути досягнуті за допомогою оптимального планування процесу заряджання. В цій роботі було розглянуто практики методів планування процесу заряджання та оптимізації роботи зарядних станцій. Було встановлено, що традиційні методи оптимізації, хоча і можуть бути досить ефективними, мають деякі обмеження для вирішення складних цільових функцій з обмеженнями. На евристичні алгоритми не накладаються обмеження щодо складності оптимізаційної задачі, таким чином, завдяки своїй високій гнучкості та ефективності, вони надають відмінні переваги у вирішенні складних цільових функцій щодо оптимізації роботи зарядних станцій. Оскільки природа поведінки власників EV та ВДЕ носить стохастичний характер, перш ніж виконувати оптимізацію необхідно виконати прогнозування. Тому методи машинного навчання знайшли широке застосування в операційному менеджменті зарядних станцій. Окрім того для моделювання взаємодії агрегаторів на ринку доречно використовувати методи теорії ігор, з метою пошуку найвигідніших стратегій.

### Список використаних джерел:

1. Sicaĳa, A. Previĳ siĳ c, M. Zeĳ ceviĳ c, and D. Budiĳ sa, "Evaluation of loadĳ forecast model performance in Croatian DSO,," *Journal of Energy*, vol. 67, pp. 54–62, 2018.
2. I. Krnic, "Customer Empowerment Strategy and Shaping Markets in theĳ Production of Electricity,," *Journal of Energy*, vol. 68, pp. 22–32, 2019.
3. M. Moradzadeh and M. M. A. Abdelaziz, "A New MILP Formulation for Renewables and Energy Storage Integration in Fast Charging Stations," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 1, pp. 181–198, 2020.
4. S. Negarestani, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Rastegar, and A. RajabiGhahnavieh, "Optimal sizing of storage system in a fast charging station for plug-in hybrid electric vehicles," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 2, no. 4, pp. 443–453, 2016.
5. Cao, Y.; Tang, S.; Li, C.; Zhang, P.; Tan, Y.; Zhang, Z.; Li, J. An optimized EV charging model considering TOU price and SOC curve. *IEEE Trans. Smart Grid* 2011, 3, 3
6. Mierau, M.; Kohrs, R.; Wittwer, C. A distributed approach to the integration of electric vehicles into future smart grids. In *Proceedings of the 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, Berlin, Germany, 14–17 October 2012; ; pp. 1–7.
7. E. Hadian, H. Akbari, M. Farzinfar, and S. Saeed, "Optimal Allocation of Electric Vehicle Charging Stations With Adopted Smart Charging/Discharging Schedule," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 196 908 - 196-919, 2020.
8. S. Deb, A. K. Goswami, P. Harsh, J. P. Sahoo, R. L. Chetri, R. Roy, and A. S. Shekhawat, "Charging Coordination of Plug-In Electric Vehicle for Congestion Management in Distribution System Integrated with Renewable Energy Sources," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 5, pp. 5452–5462, 2020.
9. Su, W. and Chow, M.Y. (2011). Performance evaluation of a phev parking station using particle swarm optimization. In *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, 1–6. IEEE.
10. Malandrino F.; Casetti C.; Chiasserini C.F.; Reineri M. (2015). A Game-theory Analysis of Charging Stations Selection by EV Drivers. In: *PERFORMANCE EVALUATION*, vol. 83-84, pp. 16-31. - ISSN 0166-5316
11. J. Li, C. Li, Y. Xu, Z. Y. Dong, K. P. Wong, and T. Huang, "Noncooperative Game-Based Distributed Charging Control for Plug-In Electric Vehicles in Distribution Networks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 1, pp. 301–310, 2018.
12. T. G. Alghamdi, D. Said, and H. T. Mouftah, "Decentralized gametheoretic scheme for D-EVSE based on renewable energy in smart cities: A realistic scenario," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 48 274–48 284, 2020.
13. W. Lee, L. Xiang, R. Schober, and V. W. S. Wong, "Electric Vehicle Charging Stations With Renewable Power Generators: A Game Theoretical Analysis," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 608–617, mar 2015. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6987327/>.
14. D. Aguilar-Dominguez, J. Ejeh, A. D. Dunbar, and S. F. Brown, "Machine learning approach for electric vehicle availability forecast to provide vehicle-to-home services," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 71–80, 2021, 5th Annual CDT Conference in Energy Storage and Its Applications. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721001517>
15. Y.-W. Chung, B. Khaki, T. Li, C. Chu, and R. Gadh, "Ensemble machine learning-based algorithm for electric vehicle user behavior prediction," *Applied Energy*, vol. 254, p. 113732, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919314199>
16. Shibl, M.; Ismail, L.; Massoud, A. Electric Vehicles Charging Management Using Machine Learning Considering Fast Charging and Vehicle-to-Grid Operation. *Energies* 2021, 14, 6199. <https://doi.org/10.3390/en14196199>