

doi:10.15199/48.2025.01.32

Inteligentne sieci ładowania samochodów elektrycznych z użyciem źródeł odnawialnych i magazynów energii

Streszczenie. *Inteligentne sieci ładowania (ISL) są kompleksowymi systemami zarządzania procesem ładowania pojazdów elektrycznych (EV). Wykorzystują zaawansowane algorytmy i technologie, aby zoptymalizować zarówno wydajność ładowania jak i wpływ na sieć energetyczną. ISL integruje punkty ładowania, algorytmy zarządzania popytem oraz odnawialne źródła energii, aby zminimalizować koszty i obciążenie sieci. Główne korzyści wynikające z ISL to redukcja kosztów ładowania, zwiększenie efektywności energetycznej i wsparcie dla odnawialnych źródeł energii. Istnieje również potencjał rozszerzenia modelu ISL o dodatkowe funkcje i analizę zmienności wyników w czasie, aby jeszcze lepiej odpowiadać na rosnące potrzeby związane z ładowaniem pojazdów elektrycznych.*

Abstract. *Intelligent charging networks (ISL) are complex systems for managing the charging process of electric vehicles (EV). They use advanced algorithms and technologies to optimize both the charging efficiency and the impact on the power grid. ISL integrates charging points, demand management algorithms and renewable energy sources to minimize costs and grid load. The main benefits of ISL are reduced charging costs, increased energy efficiency and support for renewable energy sources. There is also the potential to extend the ISL model with additional features and analysis of variability of results over time to better meet the growing needs related to charging electric vehicles. (Smart charging networks for electric vehicles using renewable sources and energy storage)*

Słowa kluczowe: pojazdy elektryczne, elektrownie fotowoltaiczne, farmy wiatrowe, magazyny energii, system elektroenergetyczny, inteligentne sieci ładowania.

Keywords: electric vehicles, photovoltaic power sources, wind farms, energy storage facilities, energy distribution system, intelligent charging networks

Wprowadzenie

W pracy omówiono rolę inteligentnych sieci ładowania w optymalizacji procesów związanych z ładowaniem pojazdów elektrycznych. W związku z rosnącą popularnością pojazdów elektrycznych oraz wzrostem udziału odnawialnych źródeł energii w rynku energetycznym zastosowanie inteligentnych sieci ładowania (ISL) staje się niezwykle istotne. ISL to systemy, które mają na celu efektywne koordynowanie procesów ładowania pojazdów elektrycznych (EV) oraz minimalizację wpływu wzrostu zapotrzebowania na energię, na sieć energetyczną. W niniejszej pracy skupimy się na analizie kluczowych koncepcji, wyzwań i korzyści związanych z inteligentnymi sieciami ładowania. Przegląd technologii ładowania, niezbędnej infrastruktury i schematów rekomendacji stacji ładowania EV dostarcza [1].

Metodologia i problemy do rozwiązania

Podstawowym problemem, z jakim mamy do czynienia w rozwoju sieci zasilania EV, jest zapewnienie zasilania tych sieci w energię ze źródeł odnawialnych (OZE) w sposób, który możliwie najmniej ingeruje w zasoby środowiska naturalnego oraz może być stabilny. Takim rozwiązaniem zdaniem autorów mogą być stacje ładowania EV funkcjonujące w oparciu o własne lub nieodległe zasoby OZE. Dla stabilnego funkcjonowania takiego systemu niezbędne jest określenie wielkości poszczególnych źródeł energii oraz ich konfiguracji w stosunku do danej wielkości stacji ładowania EV oraz zoptymalizowanie samego procesu zasilania i ładowania.

Proponowanym przez autorów rozwiązaniem jest skonstruowanie programu, który po wstępnym określeniu proponowanych składowych systemu będzie symulował jego pracę, co pozwoli zoptymalizować jego elementy. Dla odzwierciedlenia pracy systemu w warunkach rzeczywistych, które charakteryzują się zmiennością, takie dane wejściowe jak zmienność pogody, zmienność ruchu drogowego oraz zmienność zużycia energii uwzględniono z wykorzystaniem analizy Monte Carlo. Opracowany model obliczeniowy umożliwi analizę różnych scenariuszy, optymalizację

parametrów ładowania oraz podejmowanie decyzji dotyczących infrastruktury ładowania EV.

Inteligentne sieci ładowania - podstawowe koncepcje oraz wyzwania i korzyści

Inteligentne sieci ładowania to systemy koordynujące procesy ładowania EV, mające na celu zarówno zaspokajanie potrzeb użytkowników oraz minimalizowanie wpływu na sieć energetyczną.

Kluczowe elementy ISL obejmują:

- punkty ładowania (PL) dla EV
- algorytmy zarządzania popytem, które optymalizują procesy ładowania
- źródła energii zasilającej punkty ładowania.

W omawianym przypadku koncentrujemy się na źródłach energii odnawialnej OZE i magazynach energii, które wspierają stabilność sieci.

Inteligentna sieć ładowania wykorzystuje zaawansowane systemy kontroli i komunikacji do dynamicznego zarządzania ładowaniem EV w czasie rzeczywistym. Wykorzystuje algorytmy prognostyczne do określenia zapotrzebowania ładowania w sieci, a następnie dopasowuje do niego dostawy energii z systemu elektroenergetycznego i magazynów energii [2] lub stosuje bardziej zaawansowane metody wykorzystujące uczenie przez wzmacnianie, które poprawiają wydajność koordynacji zapotrzebowania na ładowanie [3].

Główne wyzwania dla ISL w przedstawionej formule rozszerzonej o OZE to zarządzanie popytem oraz optymalizacja procesów ładowania w taki sposób, by z jednej strony łagodzić skutki rosnącego popytu na energię elektryczną ze strony EV, co ma wpływ na stabilność sieci oraz integracja z OZE, które same charakteryzują się nieregularnym charakterem produkcji energii elektrycznej.

Planowane korzyści wynikające z ISL obejmują:

- redukcję obciążenia sieci energetycznej i kosztów związanych z ładowaniem
- wsparcie dla integracji OZE z systemem ładowania EV
- zwiększenie efektywności ładowania EV.

Innym zagadnieniem dotyczącym zarządzania zasobami energetycznymi jest zarządzanie popytem na energię w inteligentnej sieci elektroenergetycznej. Inteligentna sieć elektroenergetyczna jest zaawansowanym systemem elektroenergetycznym, który wykorzystuje nowoczesne technologie informacyjne i komunikacyjne do monitorowania i sterowania siecią oraz jej uczestnikami. Zarządzanie popytem na energię polega na wpływaniu na zachowanie odbiorców energii w celu zmniejszenia lub przesunięcia ich zużycia w odpowiedzi na sygnały cenowe lub warunki rynkowe. Zarządzanie popytem na energię ma wiele korzyści, takich jak poprawa efektywności energetycznej, redukcja szczytów zapotrzebowania, zmniejszenie kosztów operacyjnych i inwestycyjnych, zwiększenie niezawodności systemu i wspieranie integracji odnawialnych źródeł energii. W artykule [4] dokonano przeglądu literatury dotyczącej zarządzania popytem na energię w inteligentnej sieci elektroenergetycznej z identyfikacją wyzwań i możliwości rozwoju tego obszaru. Interesującym przypadkiem jest rozważenie możliwości regulacji częstotliwości sieci elektroenergetycznych poprzez kontrolowanie ładowania i rozładowywania pojazdów elektrycznych jako sposób zapewnienia elastyczności systemu energetycznego integrującego OZE z tradycyjnymi systemami zasilania [5].

Kolejnym zagadnieniem dotyczącym zarządzania zasobami energetycznymi jest poprawa jakości energii i stabilności napięcia w sieci zintegrowanej z hybrydowym systemem wiatrowo-fotowoltaicznym. Hybrydowy system wiatrowo-fotowoltaiczny jest systemem, który łączy dwa odnawialne źródła energii: wiatr i słońce. Taki system ma wiele zalet, takich jak zwiększenie niezależności energetycznej, zmniejszenie emisji zanieczyszczeń i wykorzystanie lokalnych zasobów. Jednak wprowadza on wiele wyzwań dla zapewnienia jakości energii i stabilności napięcia w sieci, takich jak fluktuacje mocy, harmoniczne, migotanie napięcia, przepięcia i przerwy. Aby rozwiązać te problemy, można zastosować różne urządzenia kompensacyjne i regulacyjne, takie jak filtry aktywne, statyczne przetwornice mocy lub jednostki kompensacji mocy i jakości (UPQC). W artykule [6] zaprezentowano zastosowanie UPQC do poprawy jakości energii i stabilności napięcia w sieci zintegrowanej z hybrydowym systemem wiatrowo-fotowoltaicznym.

Integracja OZE takich jak farmy PV czy elektrownie wiatrowe z ISL może przyczynić się do zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii w systemie energetycznym bez konieczności ponoszenia dodatkowych nakładów na rozbudowę infrastruktury przesyłowej. Działanie to może ograniczyć również negatywny wpływ zmienności produkcji energii w OZE na system elektroenergetyczny. Przykłady badań dotyczących integracji OZE z ISL to optymalizacja lokalizacji PL w oparciu o dostępność OZE [7][8] oraz wykorzystanie energii słonecznej do ładowania EV przez fotowoltaikę [9].

Optymalizacja systemu pracy stacji ładowania EV zasilanej z OZE i magazynu energii

Istotnym zagadnieniem jest zoptymalizowanie pracy generatorów energii opartych na OZE i magazynu energii. Ważna jest analiza możliwości zwiększenia różnorodności obciążenia stacji ładowania z uwzględnieniem zmienności popytu na energię. Jednocześnie przy zaspokajaniu popytu stacji na energię trzeba uwzględnić zmienności generacji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych i stabilizujące zasilanie w energię funkcjonowania magazynu energii.

Opracowano algorytm dla programu optymalizacji, dla którego przyjęto szereg założeń, m.in.:

1. Inicjalizacja parametrów symulacji, takich jak liczba iteracji, liczba ładowarek, moc ładowarek, pojemność baterii,

poziom naładowania, liczba pojazdów, moc poszczególnych OZE oraz pojemność magazynu energii (lista parametrów może zostać powiększona zależnie od poziomu odzwierciedlania warunków rzeczywistych przez model).

2. Wygenerowanie danych wejściowych dla analizy Monte Carlo, takich jak zmienność pogody, zmienność ruchu drogowego oraz zmienność zużycia energii.

3. Definicja funkcji obliczeniowej `calculate_optimal_strategy`, która przyjmuje wszystkie parametry oraz dane wejściowe i zwraca wartość funkcji celu, średnią liczbę ładowanych pojazdów oraz średnie zużycie energii.

4. Rozpoczęcie symulacji dla każdej iteracji analizy Monte Carlo: a) obliczenie dostępnej energii wiatrowej i słonecznej w danym czasie, uwzględniając zmienność pogody; b) obliczenie dostępnej energii do ładowania, uwzględniając ruch drogowy, c) obliczenie maksymalnej liczby ładowanych pojazdów w danym czasie, d) obliczenie rzeczywistej liczby ładowanych pojazdów w zależności od dostępnej energii i mocy ładowarek, e) aktualizacja sumarycznej liczby ładowanych pojazdów i sumarycznej zużytej energii.

Optymalizacja infrastruktury ładowania w modelu

Model jest oparty na symulacji dynamicznej i analizie Monte Carlo. Przedstawia on optymalną strategię ładowania pojazdów elektrycznych w stacji ładowania zasilanej z OZE wyposażonej w magazyn energii.

Założenia do przykładowego modelu (pobrane z programu Python):

```
# Inicjalizacja parametrów symulacji
```

```
num_iterations = 1000
```

```
num_chargers = 20
```

```
charger_power = 150 # kW
```

```
battery_capacity = 200 # kWh
```

```
initial_charge_level = 50 # %
```

```
num_vehicles = 500
```

```
res_power = {
```

```
    'wind_turbine': 500, # kW
```

```
    'solar_panels': 1500 # kW
```

```
storage_capacity = 2100 # kWh
```

Przykładowe wyniki

Średnia liczba ładowanych pojazdów: 13.3

Średnie zużycie energii kWh: 2002.7

Zmienne "Średnia liczba ładowanych pojazdów" i "Średnie zużycie energii" odnoszą się do średniej liczby ładowanych pojazdów oraz średniego zużycia energii w określonym przedziale czasowym, który jest ustalony przez wartość parametru `n_iterations` w modelu. W tym przypadku `n_iterations` wynosi 1000, co oznacza, że symulacja została przeprowadzona dla 1000 iteracji.

W każdej iteracji model oblicza liczbę pojazdów ładowanych w danym przedziale czasowym oraz sumaryczną zużyta energię. Następnie, na koniec wszystkich iteracji, obliczane są średnie wartości liczby ładowanych pojazdów i zużytej energii, które są przedstawione jako "Średnia liczba ładowanych pojazdów" i "Średnie zużycie energii".

Wartość "Średnia liczba ładowanych pojazdów" wynosi 13, co oznacza, że średnio tyle pojazdów jest ładowanych w danej iteracji, uwzględniając zmienność pogody, ruchu drogowego i zużycia energii. To kluczowa metryka, która mierzy wydajność i dostępność systemu ładowania pojazdów elektrycznych.

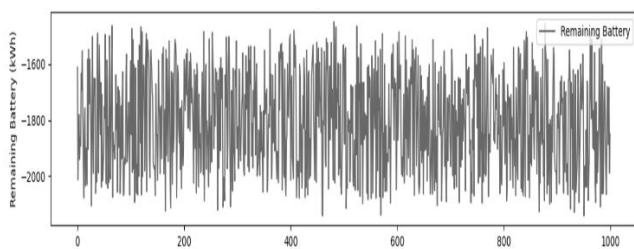
Wartość "Średnie zużycie energii" wynosi 2002,73 kWh, co oznacza, że w przeliczeniu na jedną iterację średnio

zużywane jest około 2,003 MWh energii. Ta miara pokazuje ilość zużytej energii do ładowania pojazdów elektrycznych w danym okresie. Jest to istotne z punktu widzenia zarządzania dostępnością energii.

Wartości te odnoszą się do wyników uzyskanych w analizie Monte Carlo dla określonej liczby iteracji $n_{iterations}$, która determinuje rozmiar i precyzję symulacji.

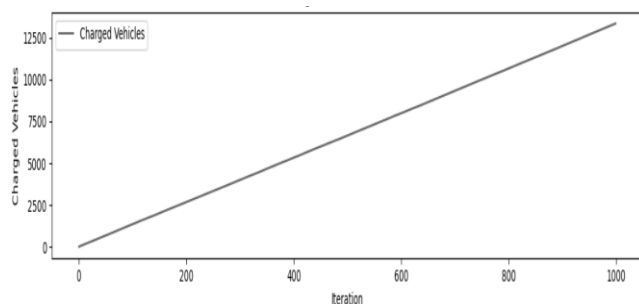
Tabela 1. Wyniki 1 symulacji

Iteracja	Wykorzystanie magazynu energii (kWh)	Naładowane pojazdy EV	Zużyta energia z OZE (kWh)
0	-1612,25	12	1812,25
1	-2011,58	27	4023,82
2	-1858,36	41	6082,19
3	-1780,92	54	8063,11
4	-1939,02	68	10202,13
...
995	-1749,96	13297	1994520
996	-1885,6	13311	1996605
997	-1684,18	13323	1998489
998	-1987,62	13338	2000677
999	-1850,5	13352	2002727



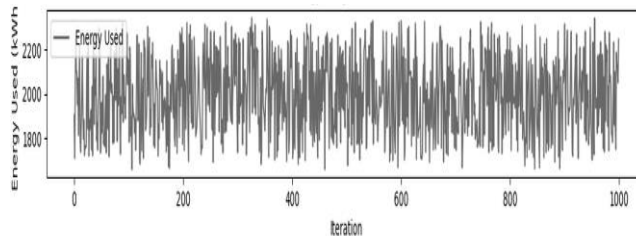
Rys. 1. Zmienność pracy magazynu energii

Wykres przedstawia zmienność poziomu naładowania magazynu w czasie (ilość energii w kWh). Na wykresie możemy śledzić, jak system zarządza dostępną energią i utrzymuje odpowiedni poziom naładowania magazynu.



Rys 2. Liczba ładowanych pojazdów w czasie

Wykres na Rys. 2 przedstawia liniowy wzrost ilości ładowanych pojazdów w całym okresie działania systemu. Wykres na Rys. 3 pokazuje, jak zużycie energii zmienia się w zależności od dostępności energii odnawialnej, ruchu drogowego i innych czynników. To istotna informacja z punktu widzenia zarządzania dostępnością energii i jej równowagą w systemie.



Rys 3. Energia zużyta w poszczególnych iteracjach pracy systemu

Efektom prac jest stworzenie modelu obliczeniowego, który umożliwi analizę różnych scenariuszy, optymalizację parametrów ładowania oraz podejmowanie decyzji dotyczących infrastruktury ładowania EV.

Model generuje kilka istotnych efektów użytecznych w analizie i planowaniu procesu ładowania EV:

1. Optymalna strategia ładowania pozwala na maksymalne wykorzystanie dostępnej energii i minimalizację kosztów.
2. Funkcja celu, uwzględnia takie czynniki jak liczba ładowanych EV, wykorzystanie energii z różnych źródeł.
3. Pojemność baterii i poziom ładowania.
4. Liczba ładowanych pojazdów: w jednej iteracji symulacji.
5. Zużycie energii: Model informuje o średnim zużyciu energii w jednej iteracji symulacji. Jest to istotne dla analizy obciążenia sieci energetycznej i oceny efektywności procesu ładowania.

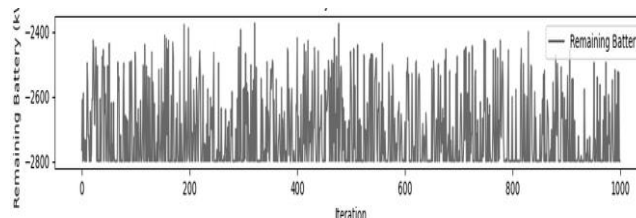
Aby poprawić funkcjonowanie systemu i lepiej dopasować go do projektowanych założeń możemy wprowadzać zmiany takie jak zwiększenie liczby ładowarek lub ich mocy, co skróci czas oczekiwania na ładowanie i umożliwi obsłużenie większej liczby pojazdów po stronie popytu oraz zwiększenie pojemności baterii, co pozwoli na gromadzenie większej ilości energii i zwiększy elastyczność systemu zmniejszając jego zależność od niestabilności produkcji energii generowanej z OZE. Istotne jest również zbadanie, czy wzrost mocy generowanej w OZE może wpłynąć na ilość ładowanych pojazdów oraz jakie inne implikacje może ta zmiana wywołać. Okazuje się na przykład, że sam wzrost mocy ładowarek nie pozwoli na przyspieszenie procesu ładowania pojazdów i tym samym zwiększenie ilości ładowanych pojazdów w jednostce czasu.

W kolejnej symulacji pracy systemu zwiększono poziom generacji mocy z farmy wiatrowej:

`res_power = {`

`'wind_turbine': 1500, # kW`

Wzrost mocy turbin wiatrowych o 1000 kW pozwolił zwiększyć ilość ładowanych pojazdów. Średnia liczba ładowanych pojazdów mogłaby wzrosnąć do 19. Jednak wykres zmienności pracy magazynu energii wskazuje na przekroczenie przyjętych założeń co do jego pojemności, co pokazano poniżej.



Rys. 4. Zmienność pracy magazynu energii

Z uwagi na zmienność produkcji energii z turbin wiatrowych konieczne byłoby istotne zwiększenie magazynu energii o 800 kWh.

Tabela 2. Wyniki 2 symulacji

Iteracja	Wykorzystanie magazynu energii (kWh)	Naładowane pojazdy EV	Zużyta energia z OZE (kWh)
0	-1612,25	12	1812,25
1	-2011,58	27	4023,82
2	-1858,36	41	6082,19
3	-1780,92	54	8063,11
4	-1939,02	68	10202,13
...
995	-1749,96	13297	1994520
996	-1885,6	13311	1996605
997	-1684,18	13323	1998489
998	-1987,62	13338	2000677
999	-1850,5	13352	2002727

Zaprezentowany program jest symulacją inteligentnej sieci ładowania ISL dla pojazdów elektrycznych EV oraz systemu magazynowania energii. Symulacja uwzględnia zmienność pogody, ruchu drogowego i zużycia energii, co pozwala na optymalizację procesu ładowania pojazdów oraz zarządzanie dostępnymi źródłami energii odnawialnej OZE i magazynem energii. Analiza wyników programu umożliwia śledzenie zmian poziomów naładowania baterii w czasie, liczby ładowanych pojazdów oraz zużycia energii. Program pomaga w zrozumieniu, jak ISL może optymalizować procesy związane z ładowaniem pojazdów elektrycznych i wykorzystywać energię odnawialną oraz magazyn energii.

Podsumowanie

Inteligentne sieci ładowania to istotne narzędzie w zarządzaniu popytem na energię elektryczną w kontekście rosnącej liczby samochodów elektrycznych, ponieważ największym wyzwaniem nie będzie sam pobór energii, a nieprzewidywalność w zakresie sposobu ładowania pojazdów elektrycznych.

W artykule zawarto wstępne wyniki rozwiązania problemu polegającego na określeniu optymalnych strategii ładowania pojazdów przy uwzględnieniu różnych ograniczeń, takich jak dostępność ładowarek, pojemność magazynów energii, czy koszty energii. Wyniki wskazują, że system inteligentnych sieci ładowania jest w stanie utrzymać stabilność w dostarczaniu energii do pojazdów elektrycznych pomimo zmienności warunków pogodowych i ruchu drogowego. Średnia liczba ładowanych pojazdów i średnie

zużycie energii są na akceptowalnym poziomie, co przekłada się na efektywne zarządzanie zasobami energetycznymi i dostępnością stacji ładowania dla użytkowników EV.

Symulacje pozwolą uzyskać optymalne strategie decyzyjne dla systemów, które są oparte na modelowaniu działania w czasie rzeczywistym stacji ładowania EV zasilanej z OZE, przydatne do planowania zasobów i infrastruktury ładowania, które sprostatą zapotrzebowaniu.

Autorzy: mgr Robert Kaznowski doktorant, Politechnika Wroclawska, Katedra Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370, E-mail: robert.kaznowski@pwr.edu.pl; dr hab. Dariusz Szafrowski prof. PWr Politechnika Wroclawska, Katedra Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wroclaw, E-mail: dariusz.szafrowski@pwr.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Savari, George Fernandez, et al. "Assessment of charging technologies, infrastructure and charging station recommendation schemes of electric vehicles: A review." *Ain Shams Engineering Journal* 14.4 (2023): 101938.
- [2] Sadeghianpourhamami, N.; Refa, N.; Strobbe, M.; Develder, C. Flexibility provision from EV fleets with V2G: A review of services, algorithms and demonstration projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021, 135, 110136.
- [3] Lahariya, Manu, Nasrin Sadeghianpourhamami, and Chris Develder. "Computationally efficient joint coordination of multiple electric vehicle charging points using reinforcement learning." *arXiv preprint arXiv:2203.14078* (2022).
- [4] A review on demand response management in smart grid: challenges and opportunities by M. A. Mahmud, M. J. Hossain and H. R. Pota, published in *Renewable and Sustainable Energy Reviews* in 2020.
- [5] Kataoka, Ryosuke, Kazuhiko Ogimoto, and Yumiko Iwafune. "Marginal Value of Vehicle-to-Grid Ancillary Service in a Power System with Variable Renewable Energy Penetration and Grid Side Flexibility." *Energies* 14.22 (2021): 7577.
- [6] Zani, Noor, et al. "Analysis and power quality improvement in hybrid distributed generation system with utilization of unified power quality conditioner." *Comput. Model. Eng. Sci* 134 (2022): 1105-1136.
- [7] Zhang, X., Shahidehpour, M., Alabdulwahab, A., & Abusorrah, A. (2016). Hourly electric vehicle charging load forecasting based on the integration of renewable energy resources. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(6), 2660-2669
- [8] Wang, Haolin, Yongjun Zhang, and Haipeng Mao. "Load forecasting method of EVs based on time charging probability." 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). IEEE, 2018.
- [9] Wang, Z., Wu, J., Zhao, H., & Liu, Y. (2019). Optimal sizing and placement of electric vehicle charging stations considering the impact of photovoltaic generation. *IEEE Access*, 7, 85581-85590.676