

Leszek KASPRZYK\*, Robert PIETRACHO\*

## **POJAZDY ELEKTRYCZNE, A STRATY MOCY W SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ**

Niniejszy artykuł dotyczy problematyki odpowiedniego wykorzystania dostępnych mobilnych magazynów energii i jej dystrybucji do odbiorców. Przedstawiono w nim krótką charakterystykę systemu elektroenergetycznego oraz metody regulacji parametrów sieci z wykorzystaniem magazynów energii. Zaprezentowano symulację analizującą starty mocy w wybranych liniach sieci elektroenergetycznej. Wyniki obliczeń zostały przedstawione dla założonego modelu obciążenia sieci z uwzględnieniem wpływu magazynów energii, podłączonych do sieci pojazdów elektrycznych.

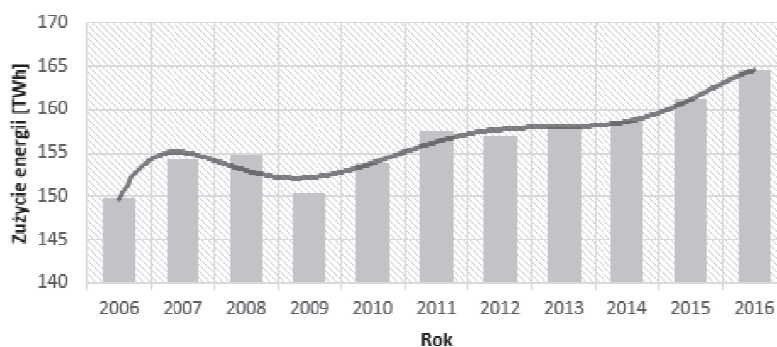
**SŁOWA KLUCZOWE:** pojazdy elektryczne, eksploatacja, starty mocy, parametry sieci elektroenergetycznej, ładowanie, rozładowywanie.

### **1. WPROWADZENIE**

Sieć elektroenergetyczna jest kluczowym elementem systemu energetycznego. Dzięki tej sieci istnieje możliwość dostarczenia energii elektrycznej do klientów indywidualnych i przemysłowych, korzystających z usług dystrybutorów. Obecna struktura sieci elektroenergetycznej pozwala na zaspokojenie potrzeb odbiorców, jednakże dalszy wzrost zapotrzebowania wskazuje na to, że brak modernizacji sieci przyczynić się może do występowania licznych awarii i w konsekwencji przerw w dostawach energii. Jak wynika z danych Krajowego Systemu Energetycznego i Rynku Bilansującego, zużycie energii elektrycznej wzrosło o 7,2% w okresie 10 lat (od roku 2006 do 2016). Wzrost ten przedstawiono na rysunku 1. Na pracę sieci elektroenergetycznej ma ponadto wpływ kilka czynników, takich jak: wykonywanie pomiarów w trybie zdalnym, monitorowanie systemów składowych, które nadzorują poprawną eksploatację urządzeń i linii na każdym poziomie napięć. W przypadku braku tych rozwiązań system narażony jest na lokalne nieplanowane wyłączenie z eksploatacji.

---

\* Politechnika Poznańska



Rys. 1. Zużycie energii elektrycznej na podstawie raportów miesięcznych (dane PSE z dnia 22.04.2017 r.)

Na podstawie danych z rysunku 1 można stwierdzić, że konieczne jest przeprowadzenie niezbędnych inwestycji w sektorze energetycznym. Inwestycje te mogą wiązać się z zainstalowaniem inteligentnych systemów pomiarowych i monitorujących pracę sieci (Smart Grid), zwiększeniem przepustowości linii przesyłowych i rozdzielczych oraz zwiększeniem generacji z źródeł wytwórczych. Odnawialne źródła energii i ich integracja z siecią Smart Grid jest jedną z możliwości modernizacji sieci elektroenergetycznej [6]. Na rysunku 2 zostały przedstawione korzyści wynikające z zastosowania tych systemów.

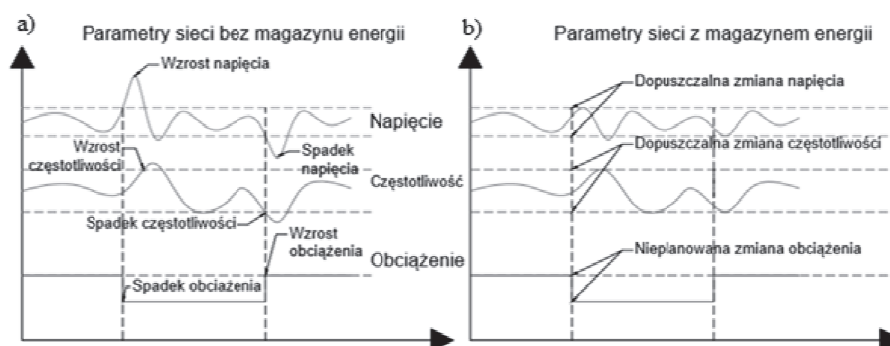
RYNEK WEWNĘTRZNY	BEZPIECZEŃSTWO DOSTAW	ŚRODOWISKO
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Innowacyjność</li> <li>● Konkurencyjność</li> <li>● Niskie ceny</li> <li>● Zwiększona wydajność</li> <li>● Liberalizacja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Niezawodność</li> <li>● Zwiększona przepustowość linii</li> <li>● Zwiększona jakość energii</li> <li>● Ograniczenie zużycia energii pierwotnej</li> <li>● Liberalizacja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ograniczenie zanieczyszczeń</li> <li>● Przeciwdziałanie zmianom klimatu</li> <li>● Ochrona przyrody</li> </ul>

Rys. 2. Korzyści związane z zastosowaniem inteligentnych sieci i OZE [3]

Sieć Smart Grid pozwala na kontrolę produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych, dlatego takie połączenie pozwoliłoby na zwiększenie niezawodności pracy sieci elektroenergetycznej i obniżenie wartości współczynników SAIFI, SAIDI itp. oraz pokrycie lokalnych strat mocy w sieci w zależności od obciążenia.

## 2. REGULACJA PARAMETRÓW SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

Nagle i niekontrolowane zmiany zapotrzebowania na energię elektryczną mogą powodować występowanie wahań częstotliwości i napięć, które mogą doprowadzić do zadziałania automatyki zabezpieczeniowej i w konsekwencji wyłączenia elektrowni z systemu elektroenergetycznego. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy wpływ zmian obciążenia na podstawowe parametry pracy sieci z oraz bez magazynu energii.



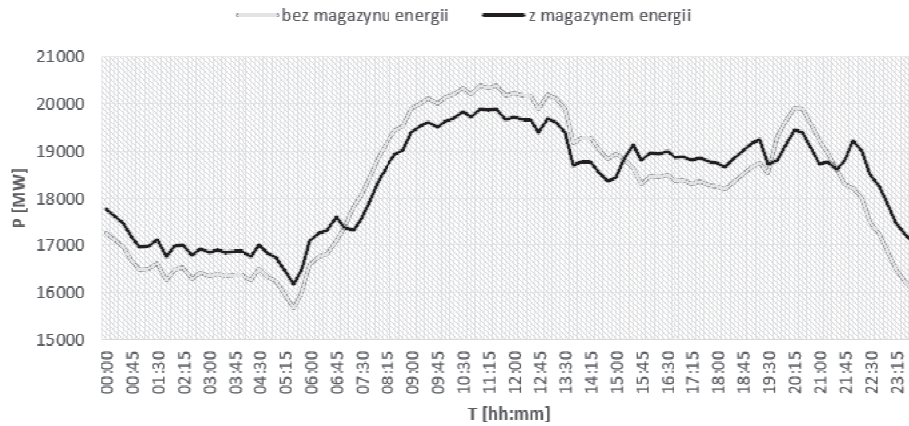
Rys. 3. Teoretyczny wpływ nagłej zmiany obciążenia w sieci na napięcie i częstotliwość [5]

Poprawę jakości energii w sieciach elektroenergetycznych oraz zmniejszenie ryzyka awarii można uzyskać wykorzystując różnego rodzaju magazyny energii, którymi według rozporządzenia ministra [8] są wyodrębnione urządzenia lub zespoły urządzeń służących do przechowywania energii w dowolnej postaci, niepowodujące emisji substancji, która może być szkodliwa dla środowiska, w sposób pozwalający na jej częściowe odzyskanie.

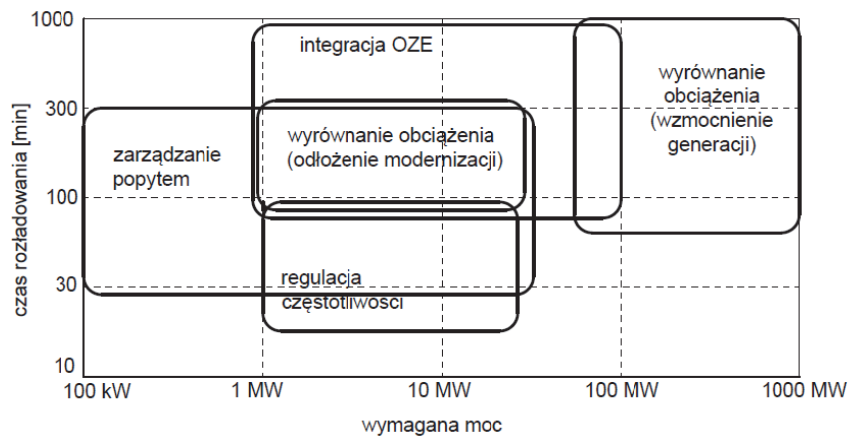
Większość magazynów energii posiada cechy, które pozwalają na poprawę efektywności zarządzania procesami energetycznymi w polskim systemie energetycznym. Ponadto charakteryzują się krótkim czasem reakcji na zmianę obciążenia i dużą dyspozycyjność. Wraz z odnawialnymi źródłami energii, magazyny mogą stanowić system hybrydowy, który pozwoli na lepsze wykorzystanie niektórych źródeł [2] (turbiny wiatrowe, moduły fotowoltaiczne itd.). Na rysunku 4 przedstawiono potencjalny wpływ wykorzystania magazynów energii na dobowe zapotrzebowanie mocy w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym.

Eksplotacja systemu elektroenergetycznego polega na ciągłym pokrywaniu zapotrzebowania na moc i energię przez jednostki wytwórcze oraz pokrywaniu strat systemowych [5], dlatego zachodzi konieczność stałej kontroli bilansu mocy, spadków napięć i częstotliwości. Bilans mocy może być realizowany przy wykorzystaniu obecnych technologii magazynowania energii elektrycznej. Na

rysunku 5 przedstawiono możliwości wykorzystania różnego typu magazynów w zależności od ich specyfiki.



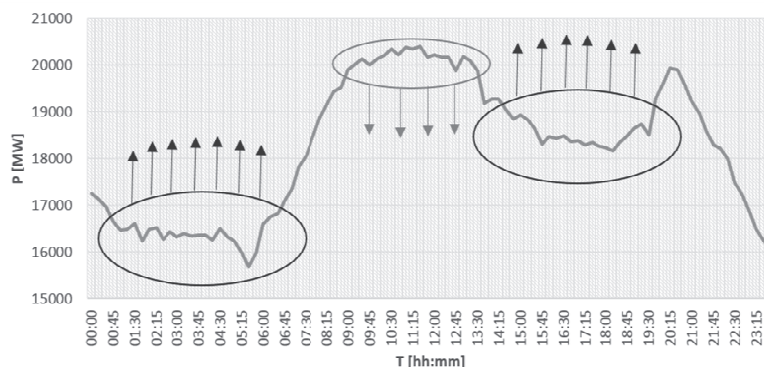
Rys. 4. Teoretyczny wpływ wykorzystania magazynów energii na obciążenie systemu elektroenergetycznego (dane PSE z dnia 22.04.2017 r.)



Rys. 5. Wykorzystanie magazynów energii do poprawy pracy sieci w zależności od ich specyfikacji [1]

System elektroenergetyczny powinien bilansować obciążenie i optymalnie dostosowywać generację w taki sposób, by przy jednoczesnym podniesieniu poziomu zużycia energii w godzinach najmniejszego zapotrzebowania na energię elektryczną mógł jednocześnie obniżyć zapotrzebowanie momentach największego zapotrzebowania. Wyrównanie dobowego zapotrzebowania na energię elektryczną korzystnie wpłynie na stabilność systemu i efektywność wyko-

rzystania odnawialnych źródeł energii. Ponadto zminimalizuje to odchylenia od standardowych warunków pracy systemu. Opisane założenia zostały przedstawione w formie graficznej na rysunku 6.

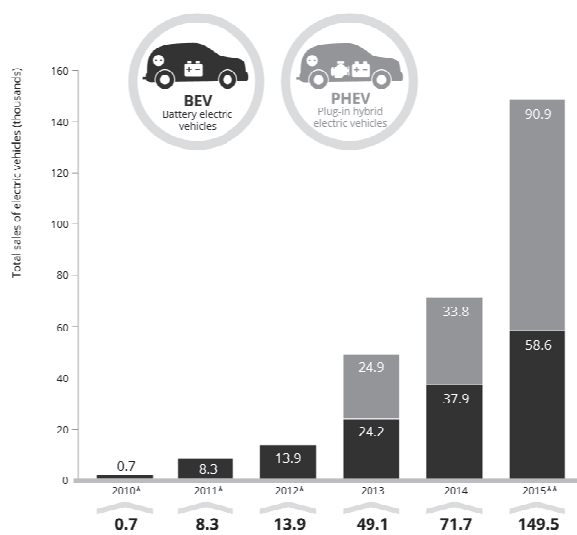


Rys. 6. Przykładowa krzywa zmian obciążenia dla systemu polskiego, na dzień 22.04.2017 r

### 3. WYKORZYSTANIE POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH I ICH WPLYW NA PRACĘ SYSTEMU

Na podstawie danych statystycznych Europejskiej Agencji Środowiska EEA, można zauważyć wzrost liczby pojazdów elektrycznych na terenie Europy. Jest to związane z rozwojem technologii i obniżeniem kosztów produkcji, zwłaszcza baterii, które są najdroższym elementem samochodu. Dynamika zmian liczby sprzedawanych pojazdów na terenie Europy została przedstawiona na rysunku 7.

Znaczący wzrost liczby pojazdów niesie za sobą konieczność przeprowadzenia modernizacji w istniejącej sieci elektroenergetycznej. Akumulatory wykorzystywane do magazynowania energii w pojazdach cechują się wysoką wartością pojemności (rzędu kilkudziesięciu kWh), a moce stacji ładowania wynoszą nawet do 120 kW, dlatego wzrost liczby tych odbiorników w znaczny sposób będzie wpływać na stan sieci elektrycznej w przyszłości. Konieczne jest w tym przypadku opracowanie systemu ładowania, który pozwoliłby na optymalne rozłożenie w czasie procesów ładowania samochodów elektrycznych. Procesy te powinny zachodzić w godzinach, w których sieć jest najmniej obciążona.



Rys. 7. Wzrost sprzedaży pojazdów elektrycznych i hybrydowych w latach 2010-2015 na rynku europejskim [4]

Taka sytuacja pozwoliłaby nie tylko na zmniejszenie ryzyka awarii w sieci spowodowanej przeciążeniem, ale również na obniżenie kosztów, ze względu na fakt, że cena jednostkowa energii jest najniższa w godzinach wieczornych i nocnych. W ciągu dnia energia zgromadzona w akumulatorach, nie jest w pełni wykorzystywana w większości przypadków. Z tego względu można wykorzystać jej nadmiar do pokrywania lokalnych strat mocy w sieci elektroenergetycznej. Ważnym aspektem problematyki wykorzystania tego rozwiązania jest konieczność kontrolowania poziomu naładowania akumulatorów. Pojazd elektryczny ze względu na swoją funkcję musi być dyspozycyjny w każdej godzinie w ciągu doby, dlatego nie można dopuścić do całkowitego rozładowania baterii. Właściciel pojazdu powinien być w stanie korzystać z samochodu bez względu na stan sieci elektroenergetycznej. Kolejnym aspektem jest określenie sposobów rozliczania między dystrybutorem a właścicielem pojazdu w zakresie wykorzystywania jego akumulatorów do celów regulacyjnych w systemie energetycznym.

Ze względu na uwarunkowanie geograficzne Polska nie ma wystarczającej liczby szczytowo-pompowych magazynów energii, których obecność pozwoliłaby na bezpieczną i stabilną pracę całego systemu energetycznego. Dlatego konieczne jest wykorzystanie rozproszonych magazynów, jakimi są pojazdy wyposażone w baterie akumulatorów. Biorąc pod uwagę stopień rozwoju emobility w Europie jest to cel możliwe do zrealizowania.

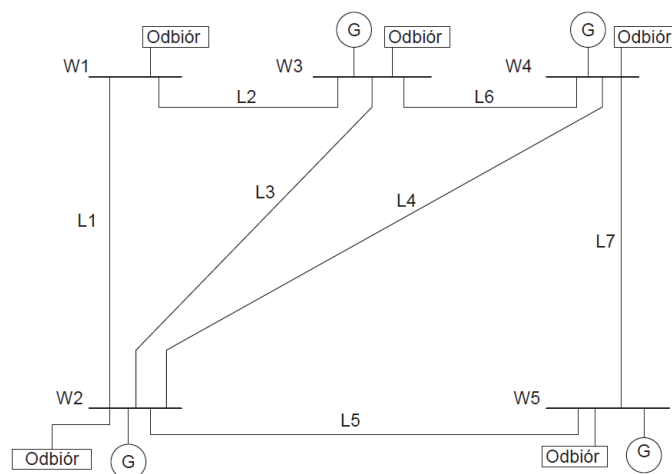
Ponadto korzystanie ze zmagazynowanej energii pochodzącej z odnawialnych źródeł energii przyczynia się do obniżenia emisji CO<sub>2</sub>. Jest to ważny aspekt

biorąc pod uwagę coraz wyższe wymagania stawiane krajom członkowskim EU, dotyczące ograniczanie emisji gazów do atmosfery wynikające z produkcji energii elektrycznej.

#### 4. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Głównym celem symulacji jest określenie wpływu grupy pojazdów elektrycznych na rozpływ mocy w przykładowym systemie elektroenergetycznym. W proponowanej symulacji zakłada się, że proces ładowania i rozładowywania akumulatorów pojazdów elektrycznych zachodzi w sposób kontrolowany. W tym celu opracowano aplikację, której algorytm składa się z następujących etapów:

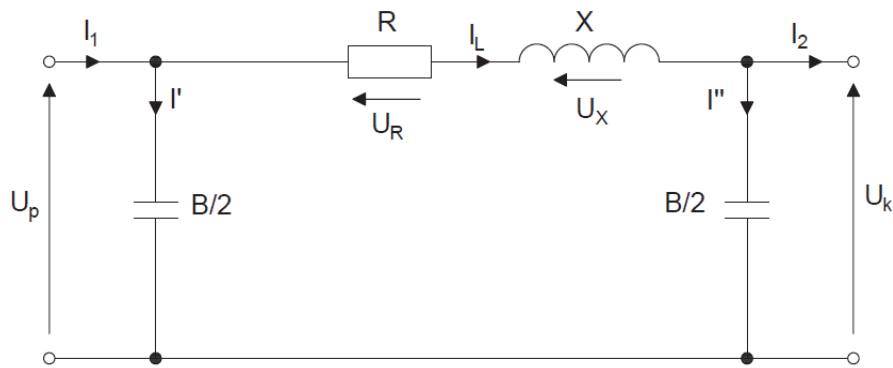
1. Wybór modelu sieci, na podstawie którego obliczony zostanie rozpływ mocy w tej sieci. Dla przykładowych obliczeń został wybrany model sieci IEEE 5 z zadeklarowanymi parametrami opisującymi tę sieć (rys. 8).
2. Wybór profilu ładowania i rozładowywania pojazdu elektrycznego. Pojazdy elektryczne w określony sposób wpływają na warunki pracy sieci w zależności od godziny w ciągu dnia. W obliczeniach uwzględniono profil przedstawiony na rysunku 9.
3. Określenie krzywej zmiany obciążenia i strat w liniach między węzłami. Aplikacja pozwala na wykreślenie charakterystyk, które obrazują zmianę rozptywu mocy w systemie w zależności od przyłączonych do węzłów pojazdów elektrycznych.



Rys. 8. Model sieci IEEE 5 bus [7]

W celu określenia rozptywu mocy konieczne jest zadeklarowanie parametrów linii przesyłowych, które opisują sieć. Parametry te zostały przedstawione

w tabeli 1. Profil generacji został określony dla każdego węzła zgodnie danymi przedstawionymi na z rysunku 10. Wartości generowanych mocy zostały przedstawione w tabeli 2. Na rysunku 9 przedstawiono schemat zastępczy linii przesyłowej łączącej dwa węzły, stanowiący czwórnik typu  $\pi$ . Parametrami strukturalnymi opisującymi ten czwórnik są: rezystancja  $R$ , reaktancja  $X$  oraz dwie poprzecznie włączone susceptancje  $B/2$  (pominięto konduktancję pomiędzy liniami oraz między liniami, a ziemią).



Rys. 9. Linia elektroenergetyczna - schemat zastępczy [5]

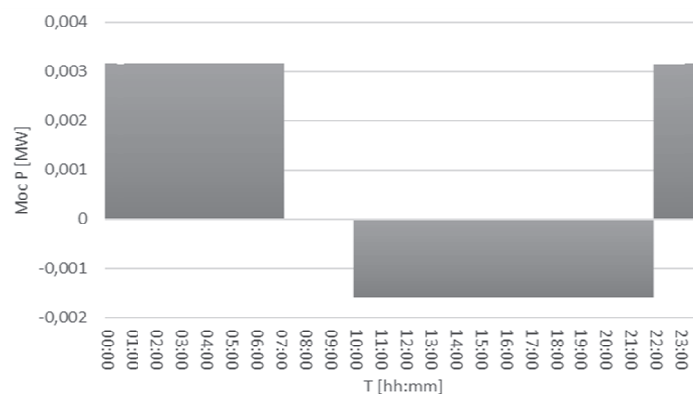
Tabela 1. Zestawienie parametrów linii przesyłowych [7].

Numer linii	Z węzła	Do węzła	R [ $\Omega$ ]	X [ $\Omega$ ]	B [S]
L1	W1	W2	0,02	0,06	0,030
L2	W1	W3	0,08	0,24	0,025
L3	W2	W3	0,06	0,18	0,025
L4	W2	W4	0,06	0,18	0,020
L5	W2	W5	0,04	0,12	0,015
L6	W3	W4	0,01	0,03	0,010
L7	W4	W5	0,08	0,24	0,025

Tabela 2. Parametry węzłów generacyjnych.

Nr węzła	Moc czynna [MW]	Moc bierna [Mvar]
W1	0	0
W2	4	3
W3	4	0
W4	4	0
W5	5	0



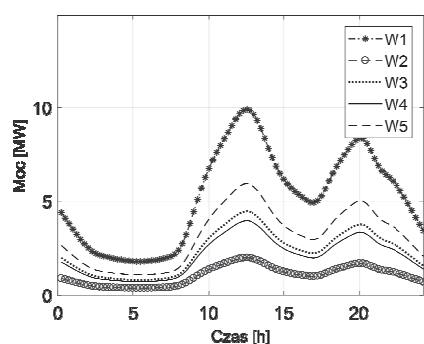


Rys. 10. Profil ładowania i rozładowywania grupy pojazdów wykorzystywanych w symulacji

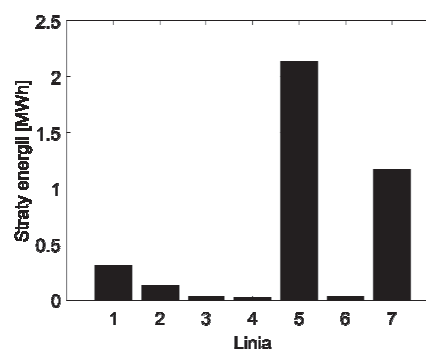
W celu przedstawienia różnic w rozplywie mocy w sieci IEEE 5, do aplikacji zostały zaimplementowane następujące przypadki:

- bez uwzględnienia dodatkowych punktów generacji,
- z uwzględnieniem dodatkowych punktów generacji w postaci grupy pojazdów elektrycznych podłączonych do węzła 3.

Na podstawie przeprowadzonej symulacji nieuwzględniającej dodatkowych punktów generacji przedstawiono wykresy, które reprezentują stan sieci elektroenergetycznej tzn. krzywej obciążenia (rys. 11) oraz dobowe straty energii (rys. 12) w liniach łączących poszczególne węzły zgodnie z tabelą 1.



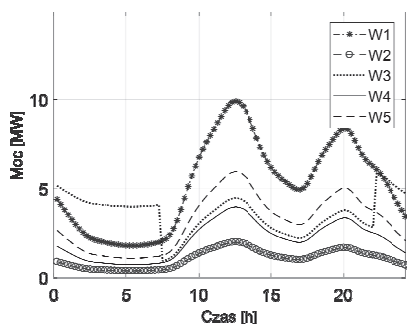
Rys. 11. Profile obciążenia rozpatrywanych węzłów



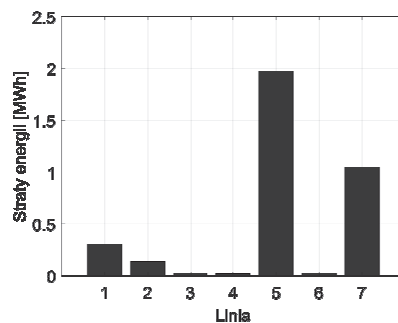
Rys. 12. Dobowe straty energii we wszystkich liniach analizowanej sieci

W przypadku, gdy sieć pracuje bez dodatkowej generacji, straty energii w liniach osiągają największe wartości dla linii 5 (łączącej węzeł drugi z piątym). Wartość tych strat wynosi około 2,2 MWh. Profile obciążenia nie ulegają zmianie, reprezentując obciążenie charakterystyczne dla danego węzła. W wyniku

analizy modelu tego samego systemu lecz po dołączeniu dodatkowych punktów generacji w postaci pojazdów elektrycznych z możliwością oddawania energii otrzymano wykresy, które zobrazowano na rysunkach 13 i 14.

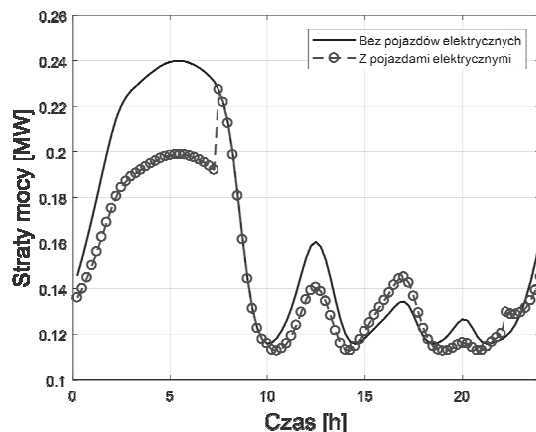


Rys. 13. Profile obciążenia rozpatrywanych węzłów



Rys. 14. Dobowe straty energii we wszystkich liniach analizowanej sieci

Na podstawie otrzymanych wykresów można zaobserwować zmianę krzywej obciążenia dla węzła 3, do którego została podłączona grupa pojazdów elektrycznych. Pojazdy te stanowiły źródło energii elektrycznej podczas ich rozładowywania i jednocześnie pracowały jako odbiornik energii elektrycznej podczas ich ponownego ładowania. Straty mocy w liniach łączących poszczególne węzły zostały zmniejszone w porównaniu z wariantem nieuwzględniającym dodatkowych źródeł (rys. 15). Dla porównania w linii 5 można odnotować wartość strat mocy na poziomie 2 MW. Jest to wartość mniejsza o 0,2 MW w stosunku do obliczonego modelu bez podłączonych pojazdów.



Rys. 15. Porównanie całkowitych straty mocy (we wszystkich analizowanych liniach sieci)

## 5. PODSUMOWANIE

W przypadku wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną konieczne jest uwzględnienie dodatkowych źródeł energii, które w przyszłości mogą stanowić źródła interwencyjne. Możliwe jest zaplanowanie generacji na podstawie przewidywanego obciążenia w systemie elektroenergetycznym, lecz planowanie to może być nieskuteczne w przypadku wystąpienia sytuacji losowych, na przykład awarii urządzeń wytwórczych. Wówczas magazyny energii mogą wspierać system nie dopuszczając jednocześnie do wystąpienia blackout'u.

Przeprowadzona analiza potwierdza pozytywne oddziaływanie pojazdów elektrycznych na parametry sieci elektroenergetycznej, w tym na kształt dobowego profilu obciążenia. Pojazdy te mogą służyć przede wszystkim jako źródła energii do pokrywania lokalnych strat mocy. Na podstawie otrzymanych wykresów można zaobserwować zmiany w rozplywie mocy w systemie i redukcję strat występujących w liniach sieci elektroenergetycznej.

Wykorzystanie pojazdów elektrycznych jako magazynu energii wiąże się ze zwiększeniem intensywności procesów starzeniowych ich baterii, dlatego konieczne jest również określenie aspektu ekonomicznego emobilności. Takie działania są możliwe jedynie przy wykorzystaniu nowych technologii komunikacyjnych w energetyce.

## LITERATURA

- [1] ABB, Magazyn dla klientów ABB w Polsce 3/13, [http://new.abb.com/docs/librariesprovider28/dzisiaj/dzisiaj-013\\_3.pdf?sfvrsn=4](http://new.abb.com/docs/librariesprovider28/dzisiaj/dzisiaj-013_3.pdf?sfvrsn=4), dostęp: 24.06.2017.
- [2] Dobrzycki A., Kamiński J., Pietracho R., Koncepcja algorytmu optymalnego podziału mocy źródeł hybrydowej elektrowni wiatrowo-solarnej, Poznań University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, Issue 87, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, pp. 143-154, Poznań, 2016.
- [3] Fan Z., Kulkarni P., Gormus S., Efthymiou C., Kalogridis G., Sooriyabandara M., Zhu Z., Lambotharan S., Chin H.W., Smart Grid Communications: Overview Of Research Challenges, Solutions and Standardization Activities, IEEE Communications Surveys & Tutorials, pp. 21-38, ISSN 1553-877X, 2012.
- [4] Józwicka M., Hacker F., Hulsmann F., Kuhnel S., Minnich L., Purwanto J., Bolech M., Electric vehicles in Europe, European Environment Agency, ISSN 1977-8449, 2016.
- [5] Kahl T., Sieci Elektroenergetyczne, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, ISBN 83-204-0261-1, Warszawa, 1984.
- [6] Mwasilu F., Justo. J. J, Eun-Kyung K., Duc Do T., Jin-Woo Jung., Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable Energy sources integration, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 34, pp 501-516, 2014.

- [7] Srikanth P., Rajendra O., Yesuraj A., Tilak M., Raja K., Load Flow Analysis Of Ieee 14 Bus System Using Matlab, International Journal of Engineering Research & Technology, Volume 2, Issue 5, ISSN 2278-0181, 2013.
- [8] Ustawa o odnawialnych źródłach energii z dnia 20 lutego 2015 r., Dz.U. z 2015 r. poz. 478.

#### **ELECTRIC VEHICLES AND POWER LOSSES IN A TRANSMISSION NETWORK**

This article deals with the issue of appropriate use of energy stores and its distribution to customers. It presents a short characteristic of the power system and methods for regulating network parameters using energy storages. A simulation analyzing power losses in selected power network lines was presented. The results of the calculations were presented for the assumed load model of the network, taking into account the impact of energy storage, which is represented by electric vehicles

*(Received: 24.01.2018, revised: 09.03.2018)*