

## Bateryjny układ redukcji mocy szczytowej podstacji trakcyjnej z ograniczeniem dwuprogowym

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono koncepcję systemu dynamicznej redukcji mocy szczytowej podstacji trakcyjnej z magazynem energii o sterowaniu z dwuprogowym ograniczeniem mocy. Zaproponowany system pozwala na redukcję mocy szczytowej podstacji trakcyjnej, co przekłada się na redukcję wahań napięcia stałego sieci trakcyjnej oraz napięcia przemiennego w sieci dystrybucyjnej. Ponadto zmniejszenie wartości mocy szczytowej pozwala na redukcję kosztów eksploatacyjnych oraz zmniejszenie mocy systemu magazynowania energii, przy zachowaniu założonych parametrów pracy.

**Abstract.** This paper introduces the concept of an energy storage system with two-threshold power limitation control which allows to reduce demanded peak power of railway traction. The proposed system allows to reduce the peak power of the traction substation, which translates into a reduction of fluctuations in the direct voltage of the traction network and alternating voltage in the distribution network. Additional, reducing the peak power value allows to reduce operating costs and reduce the power of the energy storage system, while maintaining the assumed operating parameters. (**Battery peak-power reduction system of traction substation with two-threshold limitation**).

**Słowa kluczowe:** podstacja trakcyjna, bateryjny system magazynowania energii, ograniczenie dwuprogowe.

**Keywords:** train substation, battery energy storage system, two-threshold limitation.

### Wstęp

W klasycznych układach redukcji mocy szczytowej z zasobnikiem energii stosuje się zwykle algorytmy ograniczenia jednoprogowego [1-7], w których po przekroczeniu nastawionej wartości progowej bilans mocy uzupełniany jest mocą zasobnika. Wadą tego typu rozwiązania w przypadku układów z krótkotrwałym obciążeniem udarowym o znacznych mocach szczytowych i niewielkiej energii jest konieczność wymiarowania parametrów znamionowych zasobnika i przekształtnika, ze względu na wartość mocy będącej różnicą mocy szczytowej obciążenia i przyjętego progu ograniczenia mocy. Podraża to znaczenie koszt inwestycyjny takiego rozwiązania. W artykule przedstawiono metodę sterowania, która wykorzystuje dwa progi ograniczenia mocy:

- pierwszy, aktywujący bilansowanie mocy odbiornika mocą zasobnika,
- drugi, o wyższej wartości dezaktywacji to bilansowanie.

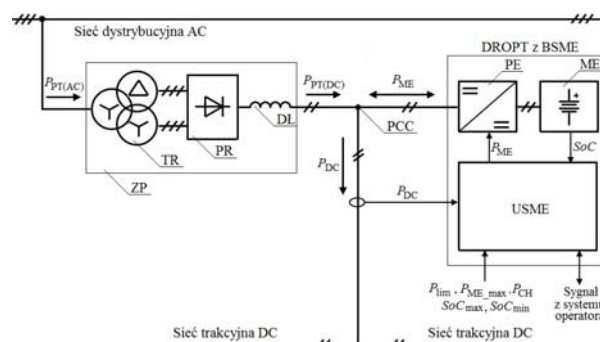
W rezultacie zarówno parametry zasobnika jak i przekształtnika wymiarowane są na wartość mocy wynikającej z różnicy wartości nastaw obu progów. Układ taki jest tańszy od układu z ograniczeniem jednoprogowym, a jak pokazały wyniki badań zamieszczone w artykule, umożliwia osiągnięcie podobnego skutku w ograniczeniu mocy średniej 15-minutowej.

W niniejszym artykule przedstawiono koncepcję systemu dynamicznej redukcji obciążenia podstacji trakcyjnej (DROPT) z dwuprogowym ograniczeniem mocy. Następnie przedstawione zostały wyniki badań symulacyjnych. Na podstawie uzyskanych wyników dokonano analizy technicznej i ekonomicznej oraz porównano koncepcję metody dwuprogowego ograniczenia mocy z metodą ograniczenia jednoprogowego. Artykuł kończy podsumowanie i przedstawienie wniosków.

### Struktura systemu redukcji mocy szczytowej podstacji trakcyjnej z ograniczeniem dwuprogowym

Struktura systemu DROPT z możliwością dwuprogowego ograniczenia mocy jest taka sama jak w przypadku układu z ograniczeniem jednoprogowym [6]. Podstawowym blokiem tego układu jest bateryjny system magazynowania energii (BSME) składający się z magazynu energii (ME) w technologii litowo-jonowej [8-10] oraz dwukierunkowego przekształtnika DC/DC (PE). W celu ograniczenia spadków napięć oraz strat mocy w

transformatorze  $\Delta P_{TR}$  i strat  $\Delta P_{PR}$  w dwunastopulsowym prostowniku AC/DC, układ DROPT wbudowany został po stronie DC podstacji trakcyjnej (rys.1).



Rys.1. Uproszczony schemat podstacji trakcyjnej z systemem DROPT

### Cel i strategia działania

Celem systemu DROPT z sterowaniem jednoprogowego ograniczenia mocy jest:

- redukcja mocy zamówionej i związanych z tym kosztów stałych PT,
- zachowanie woluminu energii transformowanej do sieci trakcyjnej DC,
- redukcja strat mocy w liniach zasilających AC,
- redukcja strat mocy w elementach podstacji,
- redukcja spadków napięć w PT i w liniach zasilających.

Sposób realizacji:

- redukcja szczytowych wartości mocy chwilowej obciążenia PT, a co za tym idzie także redukcja wahań mocy po stronie sieci dystrybucyjnej AC,
- redukcja mocy średniej 15-minutowej pobieranej z sieci AC.

Celem systemu DROPT z sterowaniem dwuprogowego ograniczenia mocy jest:

- zmniejszenie mocy znamionowej  $P_{BSME\_max}$ ,
- zmniejszenie kosztów inwestycyjnych  $CAPEX_{BSME}$ ,
- skrócenie czasu zwrotu inwestycji  $SPBT_{BSME}$ ,
- zachowanie celu postawionego dla systemu DROPT z sterowaniem jednoprogowym.

Sposób realizacji:

- modyfikacja algorytmu sterowania polegająca na wprowadzeniu ograniczenia wartości chwilowej mocy redukcyjnej  $P_{ME}$ .

Ograniczenie wartości mocy redukcyjnej  $P_{ME}$  do poziomu określonego parametrem  $P_{ME\_max}$  wprowadza się w celu zabezpieczenia elementów DROPT w stanach pracy normalnej, przed wystąpieniem zwarć w zasilanym odcinku sieci trakcyjnej oraz wewnętrznych uszkodzeń systemu DROPT.

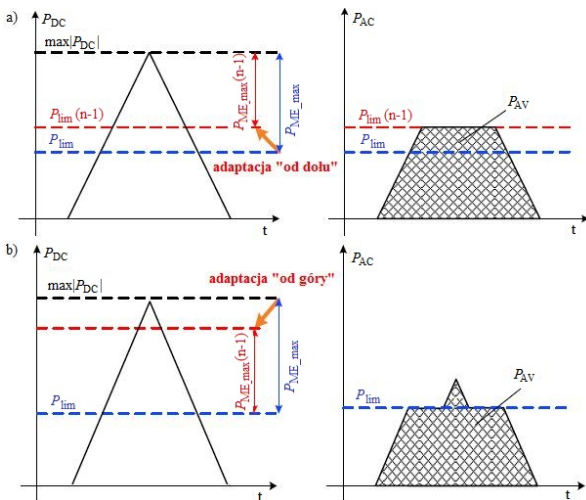
W przypadku systemu DROPT z jednoprogowym ograniczeniem mocy, wartość mocy redukcyjnej  $P_{ME}$  osiąga się poprzez zwiększenie wartości ograniczenia mocy chwilowej  $P_{lim}$  (1). Przykład takiego rozwiązania nazywa się inaczej ograniczeniem mocy redukcyjnej „od dołu” (rys.2a))

$$(1) \quad P_{ME} = \max |P_{DC}| - P_{lim}.$$

W przypadku systemu DROPT z dwuprogowym ograniczeniem mocy, osiągnięcie wymaganej mocy redukcyjnej  $P_{ME}$  odbywa się poprzez wprowadzenie ograniczenia wartości chwilowej mocy redukcyjnej na poziomie:

$$(2) \quad P_{ME\_max} = (P_{ME} \leq P_{ME\_max}).$$

Przykład tego rozwiązania przedstawiony został na rysunku 2b), a model takiego sposobu ograniczenia mocy redukcyjnej nazywa się adaptacją „od góry”.



Rys.2. Adaptacja maksymalnej mocy redukcyjnej systemu DROPT a) adaptacja „od dołu” b) adaptacja „od góry”

Jak można zauważyć na (rys.2) ograniczenie mocy redukcyjnej „od góry” ma zdecydowanie mniejszy wpływ na moc średnią  $P_{AV}$ .

### Algorytm sterowania układem z ograniczeniem jednoprogowym

Uproszczony schemat algorytmu działania systemu DROPT z jednoprogowym ograniczeniem mocy przedstawiono na rysunku 3.

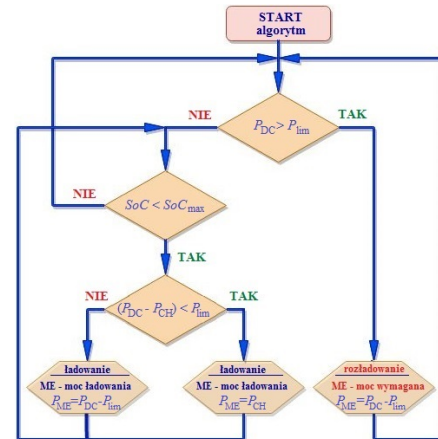
W celu zmniejszenia chwilowej mocy po stronie AC podstacji trakcyjnej, układ DROPT musi pobierać moc zgodnie z założeniem:

$$(3) \quad P_{ME} = P_{DC} - P_{lim}.$$

Jednak tylko w sytuacji, gdy moc obciążenia DC podstacji trakcyjnej przekroczy skorygowany limit  $P_{DC} > P_{lim}$  oraz, gdy stan naładowania ME pozostanie powyżej minimalnego poziomu  $SoC > SoC_{min}$ . W rezultacie moc po stronie AC podstacji, pomijając straty mocy w

transformatorze  $\Delta P_{TR}$  i prostowniku  $\Delta P_{PR}$ , można cyklicznie zmniejszać zgodnie z równaniem:

$$(4) \quad P_{AC} \cong P_{DC} - P_{ME}.$$



Rys.3. Graf algorytmu działania systemu DROPT z ograniczeniem jednoprogowym

Z zależności (4) wynika, że pobierając moc z ME (moc redukcyjną), zgodnie z zależnością (3), można zmniejszyć moc pobieraną z sieci AC, do wartości niższej niż skorygowany limit  $P_{lim}$ . Magazyn energii powinien być ładowany po każdym cyklu przekazywaniu energii do sieci DC, tak by w każdym momencie gotowy był do następnego cyklu redukcji. Ładowanie ME powinno odbywać się, wtedy, gdy  $P_{DC} < P_{lim}$ . W celu zredukowania 15-minutowej uśrednionej mocy AC podstacji trakcyjnej, moc ładowania  $P_{CH}$  ustawiona powinna być na możliwie najniższym poziomie i zarazem wielokrotnie niższym od mocy redukcji:

$$(5) \quad P_{ME} = P_{CH} \ll P_{DC} - P_{lim}.$$

Dodatkowo suma mocy ładowania  $P_{CH}$  i mocy obciążenia  $P_{DC}$  nie powinna przekraczać ustawionego limitu mocy po stronie AC:  $P_{CH} + P_{DC} < P_{lim}$ . W przeciwnym razie moc ładowania powinna być zmniejszona, tak by nie była większa niż:  $P_{ME} = P_{DC} - P_{lim}$ . Magazyn energii ładowany jest tylko do momentu uzyskania skorygowanego maksymalnego poziomu naładowania  $SoC \leq SoC_{max}$ , wówczas moc ładowania należy zmniejszyć do zera ( $P_{CH} = 0$ ).

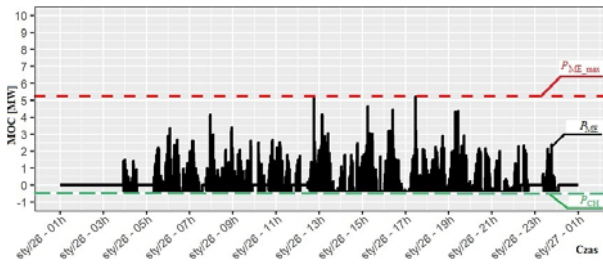
### Algorytm sterowania układem z ograniczeniem dwuprogowym

Uproszczony schemat algorytmu działania systemu DROPT z dwuprogowym ograniczeniem mocy przedstawiono na rysunku 4.

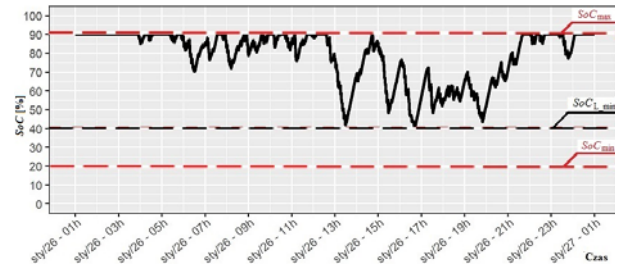
Algorytm ten przewiduje regulację mocy  $P_{ME}$  zasobnika energii w sposób ciągły dla obu kierunków przesyłu energii (ładowanie, rozładowanie ME). Kierunek przepływu energii zależy od chwilowego obciążenia mocą czynną  $P_{DC}$  podstacji trakcyjnej oraz od nastawy wartości ograniczenia mocy  $P_{lim}$  pobieranej z sieci dystrybucyjnej AC. W momencie, gdy  $P_{DC} > P_{lim}$  aktywowany jest tryb rozładowania ME mocą  $P_{ME}$  według zależności  $P_{ME} = P_{DC} - P_{lim}$ . W przypadku, gdy  $P_{DC} < P_{lim}$  aktywowany jest tryb ładowania zasobnika, w którym moc ładowania  $P_{ME}$  ograniczona jest na poziomie określonym parametrem  $P_{CH}$ , przy założeniu warunku  $P_{DC} - P_{CH} < P_{lim}$ . Warunek ten uwzględnia odwrócenie znaku mocy w trybie ładowania ME.



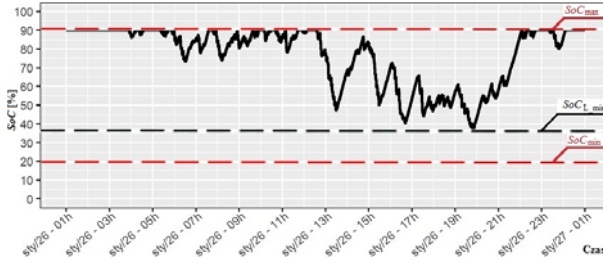




Rys.8. Szacowana moc  $P_{ME}$  pobierana z BSME systemu DROPT

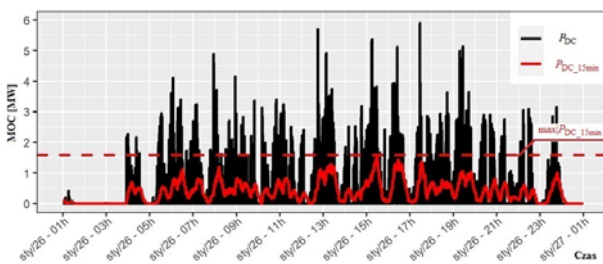


Rys.13. Szacowany poziom  $SoC$  naładowania magazynu energii

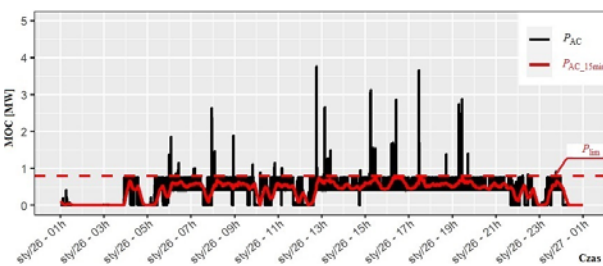


Rys.9. Szacowany poziom  $SoC$  naładowania magazynu energii

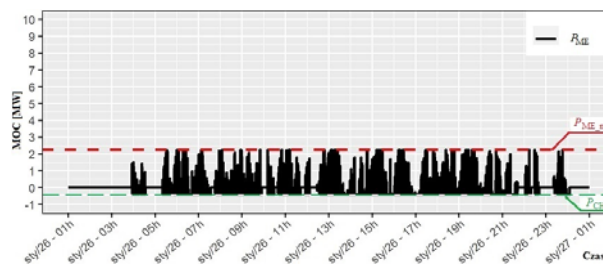
### Wyniki badań symulacyjnych układu z ograniczeniem dwuprogowym



Rys.10. Dzienny przepływ mocy obciążenia  $P_{DC}$  wybranej podstacji trakcyjnej



Rys.11. Szacowana moc  $P_{AC}$  wybranej podstacji trakcyjnej z systemem DROPT



Rys.12. Szacowana moc  $P_{ME}$  pobierana z BSME systemu DROPT

### Analiza wyników uzyskanych podczas badań symulacyjnych

Jak wynika z rysunków 7 i 11, zmniejszenie mocy chwilowej  $P_{AC}$  w połączeniu z odpowiednim ograniczeniem mocy ładowania  $P_{CH}$  (rys.8 i 12) prowadzi do zmniejszenia mocy średniej 15 minutowej  $P_{AC_{15min}}$ . Takie działanie wymaga odpowiedniej mocy (rys.8 i 12) i pojemności magazynu energii, ale zarazem takiej, by utrzymać wartość  $SoC$  na odpowiednim poziomie (rys.9 i 13). Jak wynika z przeprowadzonych badań symulacyjnych systemu DROPT z jednoprogowym ograniczeniem mocy, dla zachowania ustawionego limitu mocy, maksymalna wartość mocy ME wyniosła 5,26 [MW] (rys.8). W przypadku analiz systemu DROPT z ograniczeniem dwuprogowym do osiągnięcia zakładanego rezultatu wystarczy zasobnik o mocy 2,25 [MW] (rys.12). Jak wynika z rysunku 11 wartości chwilowe mocy  $P_{AC}$  przekraczają wartość ustawionego limitu, jednak czas ich trwania jest na tyle krótki, że nie wpływa znacznie na wartość mocy uśrednionej 15-minutowo.

Zredukowanie mocy  $P_{ME}$  z wartości 5,26 do 2,25 [MW] pozwala na zachowanie założenia ograniczenia mocy uśrednionej 15-minutowo przy jednoczesnym zmniejszeniu kosztów stałych ( $INCOME_{PT}$ ) podstacji trakcyjnej oraz inwestycyjnych podczas rozbudowy PT o bateryjny system magazynowania energii. Rozważając redukcje kosztów stałych, możemy posłużyć się zależnością (6):

$$(6) \quad INCOME_{PT} = 12 \cdot [P_{\text{kontraktowana}} - \max(P_{AC_{15min}})] \cdot 11000.$$

gdzie,  $P_{\text{kontraktowana}}$  – moc zakontraktowana przez operatora PT od operatora sieci dystrybucyjnej; 11000 [PLN/MW] – stawka stała za 1 [MW] mocy zakontraktowanej (dotyczy PT).

W przypadku kosztów inwestycyjnych  $CAPEX$  możemy mówić o obniżeniu kosztów związanych z energoelektronicznym dwukierunkowym przekształtnikiem, którego koszt  $CAPEX_{PE} \sim P_{PE}$ , a moc  $P_{PE} \sim P_{ME}$  systemu DROPT, oraz z kosztem magazynu energii. Koszt ME (7) jest zależny od technologii magazynowania energii (w rozważanym przypadku technologii Li-ion np. LiFePO<sub>4</sub>) oraz od skorygowanej pojemności energetycznej  $E_{ME(Tech)}$ .

$$(7) \quad CAPEX_{ME} = E_{ME(Tech)} \cdot$$

gdzie,  $E_{ME(Tech)} = \frac{P_{ME_{max}}}{C_{rate(Tech)}}$ ;  $C_{rate(Tech)}$  – współczynnik głębokości rozładowania; (Tech) – technologiczny.

Wskazane zależności wpływają bezpośrednio na czas zwrotu inwestycji  $SPBT_{BSME}$ . Przykładowo do wyznaczenia czasu zwrotu magazynu energii posłużono się zależnością:

$$(8) \quad SPBT_{ME} = \frac{CAPEX_{ME}}{INCOME_{PT}}.$$

Przykład korzyści wynikających z sytemu DROPT z dwuprogowym ograniczeniem mocy w stosunku do systemu o ograniczeniu jednoprogowym wskazano w tabeli 2.

Tabela 2. Wybrane wyniki optymalizacji systemu DROPT o ograniczeniu dwuprogowym w kontekście sytemu o ograniczeniu jednoprogowym

Parametr	Strategia		
	Ograniczenie jednoprogowe	Ograniczenie dwuprogowe	
$P_{ME\ max}$ [MW]	5,26	<b>2,25</b>	(↓)
$P_{CH}$ [MW]	0,4	<b>0,4</b>	(-)
$P_{lim}$ [MW]	0,75	<b>0,75</b>	(-)
$E_{ME(tech)}$ [MWh]	0,877	<b>0,7</b>	(↓)
$\max(P_{AC\ 15min})$ [MW]	0,74	<b>0,81</b>	(↑)
$INCOME_{PT}$ [mln PLN/r]	0,304	<b>0,294</b>	(↓)
$CAPEX_{PE}$ [mln PLN]	2,81	<b>1,21</b>	(↓)
$CAPEX_{ME}$ [mln PLN]	1,25	<b>1,03</b>	(↓)
$SPBT_{BSME}$ [lat]	16,1	<b>9</b>	(↓)

Trend zmian dla kontroli z ograniczeniem dwuprogowym: bez zmian (-); zwiększył się (↑); zmniejszył się (↓)

W przedstawionych rozważaniach wyniki danych parametrów estymowano na podstawie przybliżonych cen poszczególnych komponentów oraz kursu EUR. Jednostka [PLN/r] oznacza poniesione koszty stałe  $INCOME_{PT}$  na rok.

### Podsumowanie

W ramach badań przedstawionych w tym artykule zaproponowano i zweryfikowano koncepcję systemu DROPT z dwuprogowym ograniczeniem mocy, służącego do dynamicznej redukcji mocy szczytowej, do zredukowania kosztów stałych PT poprzez redukcję mocy średniej 15-minutowej oraz redukcję kosztów inwestycyjnych. Przy użyciu rzeczywistych danych pomiarowych przeprowadzono analizę techniczną i ekonomiczną, która w porównaniu do analizy systemu DROPT o jednoprogowym ograniczeniu mocy dała efektywne wyniki.

Zastosowanie zmodernizowanego algorytmu sterowania i kontroli systemem DROPT (rys.4) spełnia wszystkie założenia dotyczące celu i strategii działania. Algorytm dwuprogowego ograniczenia mocy pozwala na redukcję mocy maksymalnej DROPT z 5,26 do 2,25 [MW], redukcję kosztów stałych podstacji trakcyjnej poprzez zredukowanie o połowę mocy średniej 15-minutowej. Jednak największą korzyść stanowi skrócenie czasu zwrotu inwestycji ( $SPBT_{BSME}$ ) z 16 do 9 lat, na który największy wpływ ma zredukowanie o połowę mocy przekształtnika PE.

### Podziękowanie

Badania zostały przeprowadzone we współpracy z firmą PKP Energetyka S.A. i zostały współfinansowane ze środków Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020 oraz Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Sektorowego PBSE, nr grantu POIR.01.02.00-00-0230/16 pod tytułem "System dynamicznej redukcji obciążenia podstacji trakcyjnej, działający z wykorzystaniem zasobnika dużej mocy" (DROPT).

**Autorzy:** mgr inż. Marcin Szott, Instytut Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki, Uniwersytet Zielonogórski, 65-516 Zielona Góra, ul. Prof. Z. Szafrana 2, Polska, E-mail: [m.szott@iee.uz.zgora.pl](mailto:m.szott@iee.uz.zgora.pl), mgr inż. Szymon Werminiński, Instytut Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki, Uniwersytet Zielonogórski, 65-516 Zielona Góra, ul. Prof. Z. Szafrana 2, Polska, E-mail: [s.werminski@iee.uz.zgora.pl](mailto:s.werminski@iee.uz.zgora.pl), dr hab. inż. Marcin Jarnut, prof. UZ, Instytut Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki, Uniwersytet Zielonogórski, 65-516 Zielona Góra, ul. Prof. Z. Szafrana 2, Polska, E-mail: [m.jarnut@iee.uz.zgora.pl](mailto:m.jarnut@iee.uz.zgora.pl), dr hab. inż. Jacek Kaniewski, Instytut Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki, Uniwersytet Zielonogórski, 65-516 Zielona Góra, ul. Prof. Z. Szafrana 2, Polska, E-mail: [j.kaniewski@iee.uz.zgora.pl](mailto:j.kaniewski@iee.uz.zgora.pl)

### LITERATURA

- [1] Hyeongig Kim, Jae-Haegn Heo, Jong-Young Park and Yong Tae Yoon *Impact of Battery Energy Storage System Operation Strategy on Power System: An Urban Railway Load Case under a Time-of-Use Tariff*, MDPI, 24 October 2016, Accepted: 3 January 2017, Published: 7 January 2017
- [2] Vito Calderaro, Vincenzo Galdi, Giuseppe Graber, Alfonso Capasso, Regina Lamedica, Alessandro Ruvio *Energy Management of Auxiliary Battery Substation Supporting High-Speed Train on 3 kV DC Systems*, 2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), DOI: 10.1109/ICRERA.2015.7418603, <https://ieeexplore.ieee.org/document/7418603>
- [3] Mahdiyeh Khodaparastan, Oindirilla Dutta, Ahmed Mohamed *Wayside Energy Storage System for Peak demand Reduction in Electric Rail System*, Conference paper 2018 IEEE Industry Application Society Annual Meeting (IAS), DOI: 10.1109/IAS.2018.8544599
- [4] Kyoung-min Kwon and Jaeho Choi *Single-Phase 13-Level Power Conditioning System for Peak Power reduction of a High-Speed Railway Substation*, MDPI, DOI: 10.3390/en12234405, [www.mdpi.com](http://www.mdpi.com)
- [5] Włodzimir Jęfimiowski *Stationary energy storage system in 3 kV DC – the conception comparison*, MATEC Web of Conferences 180, 02013 (2018); <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818002013>
- [6] Marcin Jarnut, Jacek Kaniewski, Volodymyr Protsiuk *Energy storage system for peak-power reduction of traction substation*, 2018 Innovative Materials and Technologies in Electrical Engineering (i-MITEL), DOI:10.1109/IMITEL.2018.8370468; <https://ieeexplore.ieee.org/document/8370468>
- [7] Andres Ovalle, Julien Pouget, Seddik Bacha, Laurent Gerbaud, Emmanuel Vinot, Benoit Sonier *Energy storage sizing methodology for mass-transit direct-current wayside support: Application to French railway company case study*, Elsevier, Applied Energy, Volume 230, 15 November 2018, Pages 1673-1684, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.035>
- [8] Yi-Hsian, Wu-Yang Seanb, Chien-Hsun Wu, Chih-Yung Huangd *Development of a converterless energy management system for reusing automotive lithium-ion battery applied in smart-grid balancing*, Elsevier, Journal of Cleaner Production, Volume 156, 10 July 2017, Pages 750-756, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.028>
- [9] Xing Luo, Jihong Wang, Mark Dooner, Jonathan Clarke *Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation*, Elsevier, Applied Energy, Volume 137, January 2015, pages 511-536, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081> Get rights and content
- [10] Yan Jiangab, Jiuchan Jiangab, Caiping Zhangab, Yang Gaoab, Qiwei Gaoab *Recognition of battery aging variations for LiFePO4 batteries in 2<sup>nd</sup> use applications combining incremental capacity analysis and statistical approaches*, Elsevier, Journal of Power Sources, Volume 360, 31 August 2017, Pages 180-188, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.06.007>