

Sterowanie tolerujące uszkodzenia w bateryjnym systemie redukcji mocy szczytowej podstacji trakcyjnej

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję sterowania tolerującego uszkodzenia przy sterowaniu wielołańcuchowym bateryjnym systemem magazynowania energii systemu dynamicznej redukcji obciążenia podstacji trakcyjnej. Głównym zadaniem przedstawionego systemu jest ciągłość utrzymania zredukowanego poziomu zakontraktowanej mocy szczytowej, uśrednionej 15-minutowo przy uszkodzeniu lub odłączeniu jednego łańcucha ogniw magazynu energii lub przekształtnika układu konwersji mocy. Zaproponowana koncepcja oparta jest na wielozadaniowym algorytmie sterowania uwzględniającym dwuprogowe ograniczenie mocy redukccyjnej oraz jednoprogowe ograniczenie mocy dyspozycyjnej. Przedstawiona koncepcja sterowania pozwala na zachowanie kosztów operacyjnych podstacji trakcyjnej związanych z wysokością opłat za moc kontraktowaną.

Abstract. This paper introduces the concept of fault-tolerant control in the control of a multi-string battery energy storage system for the dynamic reduction of traction substation load. The main task of the proposed system is the continuity of maintaining a reduced level of contracted demanded power, averaged 15-minutes in the event of damage or disconnection of one chain of cells of energy storage or one converter of the power conversion system. The proposed concept strategies based on a multi-task control algorithm taking into account a two-threshold limitation of power reduction and one-threshold limitation of available power. The presented control strategies concept allows to keep the operating cost of the traction substation related to the amount of charges for the contracted power. (**Fault-tolerant control in the battery peak power reduction system of a traction substation**).

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

Keywords: traction substation, battery energy storage system, two-threshold limitation, fault-tolerant control.

Wstęp

Podstawowym kosztem płatniczym poniesionym przez operatora podstacji trakcyjnej (PT) jest opłata za zużyta energię [1], natomiast opłata za zapotrzebowanie na moc szczytową 15-minutową $P_{Kon_AC_avg(15-min)}^{lim}$ jest to stały koszt eksploatacyjny uwarunkowany od zakontraktowanej mocy przyłączeniowej [2]. Opłata za energię i zapotrzebowanie może być również obciążona operatorów PT w Korei.

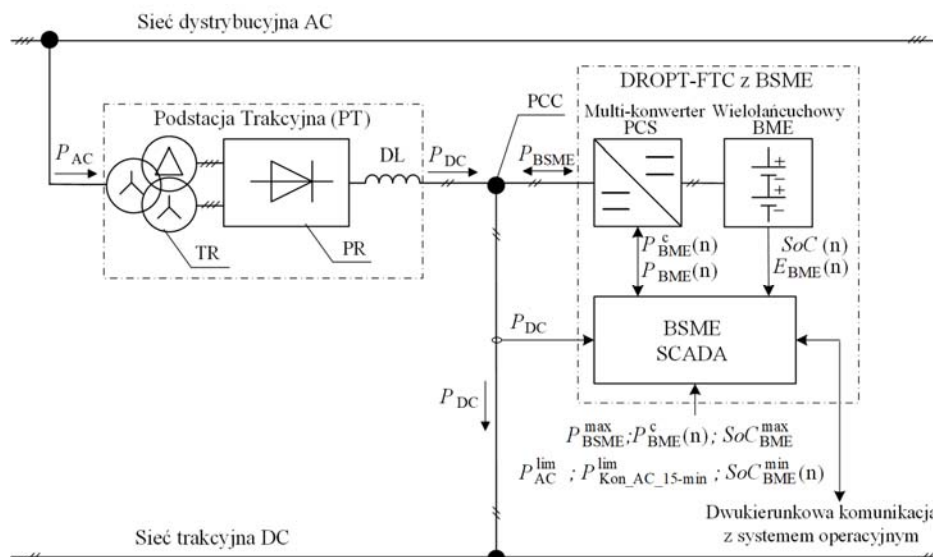
Dobrym sposobem na redukcję zapotrzebowania szczytowego PT może być implementacja przydrożnych systemów magazynowania energii (ang. Wayside Energy Storage System – WESS) [4], a bardzo ważnym aspektem jest ich wymiarowanie i lokalizacja [5]. Autorzy artykułu [6] przedstawili podstacyjny system magazynowania energii, który poza częściowym ograniczeniem mocy szczytowej może służyć do magazynowania energii odzyskowej, a w skrajnych przypadkach do zasilania rezerwowego. Autor artykułu [7] przedstawił i porównał wyniki badań dwóch różnych koncepcji magazynowania energii w układach redukcji szczytowego obciążenia PT, układ składający się z technologii superkondensatorowej (SC) oraz układ składający się z SC i baterii LFP (LiFePO₄). Z kolei w artykule [8] przeanalizowano wpływ implementacji systemów magazynowania energii oraz kilka strategii sterowania wpływające na obniżenie opłat za moc szczytową. W celu maksymalnego zmniejszenia mocy szczytowej PT i lepszego wykorzystania pojemności baterijnego systemu magazynowania energii (BSME) w miejskim transporcie kolejowym, autorzy artykułu [9] zaproponowali strategię sterowania opartą na dynamicznej regulacji transferu energii bazującej na regulacji *SoC* (ang. State of Charge). W artykule [10] przedstawiona została metoda wymiarowania bazująca na dwustopniowej redukcji mocy w procesie określania mocy BSME, pozwalająca na jej stopniowe zminimalizowanie, natomiast w artykułach od [1] do [9] zastosowano algorytmy jednoprogowe w ramach, których moc systemów magazynowania energii pozwala na redukcję mocy szczytowej i zredukowanie maksymalnych

wartości chwilowych. Wadą tego typu rozwiązania w przypadku systemów z krótkotrwałym obciążeniem udarowym o znacznych mocach szczytowych i niewielkiej energii jest konieczność przewymiarowania parametrów znamionowych zasobnika i przekształtnika, ze względu na wartość mocy będącej różnicą mocy szczytowej obciążenia i przyjętego progu mocy ograniczenia.

W niniejszym artykule przedstawiono koncepcję systemu dynamicznej redukcji obciążenia podstacji trakcyjnej (DROPT) opartym na BSME z dwuprogowym ograniczeniem mocy redukccyjnej i jednoprogowym ograniczeniu mocy dyspozycyjnej ze sterowaniem tolerującym uszkodzenia (ang. Fault-Tolerant Control – FTC). Przedstawiona koncepcja sterowania oparta na wielozadaniowym algorytmie sterowania pozwala na spełnienie głównego zadania, czyli utrzymanie na zakładanym poziomie ograniczenia zapotrzebowania na moc szczytową 15-minutową przy uszkodzeniu modułu systemu konwersji mocy PCS (ang. Power Conversion System) lub łańcucha ogniw baterijnego magazynu energii (BME). Następnie przedstawione zostały wyniki badań symulacyjnych na podstawie, których dokonano analizy technicznej. Artykuł kończy podsumowanie i przedstawienie wniosków.

Struktura systemu redukcji mocy szczytowej podstacji trakcyjnej ze sterowaniem tolerującym uszkodzenia

Struktura systemu DROPT-FTC z możliwością dwuprogowego ograniczenia mocy redukccyjnej oraz jednoprogowego ograniczenia mocy dyspozycyjnej przedstawiona została na rysunku 1. Podstawowymi blokami tego układu są wielosegmentowy BSME (rys. 5) składający się z wielomodułowego PCS i wielołańcuchowego BME oraz nadrzędny sterownik tego systemu, BSME-SCADA. Jedną z funkcji realizowanych przez nadrzędny sterownik jest adaptacja i realizacja sterowania zgodnie z algorytmem decyzyjnym (rys. 4). System DROPT-FTC oraz PT przyłączone są w punkcie PCC (ang. Point of Common Coupling) do szyny DC zasilającej sieć trakcyjną.



Rys.1. Uproszczony schemat podstacji trakcyjnej z systemem DROPT-FTC

Tabela 1 przedstawia podstawowe parametry systemu DROPT-FTC oraz PT.

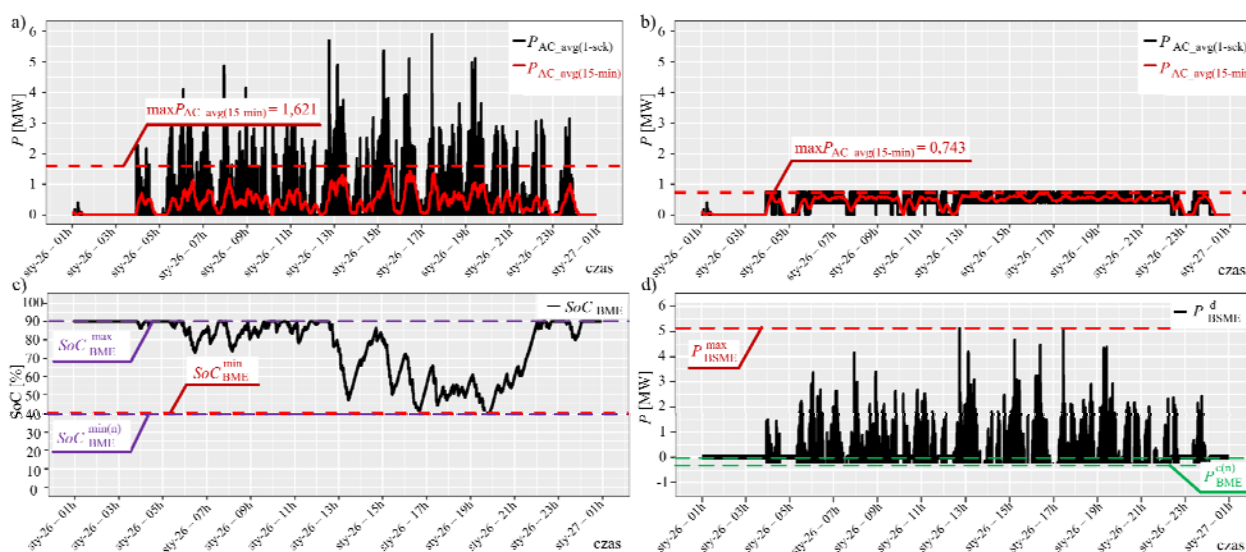
Tabela 1. Podstawowe parametry podstacji trakcyjnej i systemu dynamicznej redukcji obciążenia podstacji trakcyjnej

Parametr	PT	DROPT-FTC
U_{AC} [kV]	20,000	-
U_{DC} [kV]	3,000	3,000
P_{TS}^R [MW]	6,300	-
$P_{Kon_AC_avg(15-min)}^{lim}$ [MW]	0,750	-
$P_{BSME}^{DROPT-FTC}$ [MW]	-	5,500
$E_{BME}^{DROPT-FTC(R)}$ [MWh]	-	1,800
$E_{BME}^{DROPT-FTC(max)}$ [MWh]	-	0,900
SoC_{BME}^{max} [%]	-	90,000
SoC_{BME}^{min} [%]	-	40,000

Analiza obiektu

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych na rzeczywistych danych pomiarowych, wybranego obiektu. Wybrano jeden, szczególny dzień z całego okresu pomiarowego, w którym wartości chwilowe $P_{AC_avg(1-sek)}$ osiągnęły najwyższą wartość (rzędu 6 [MW]).

Na rysunku 2a) przedstawiono 1-dniowy okres profilu mocy P_{AC} z nieaktywnym DROPT-FTC, natomiast na rysunku 2b) przedstawiono 1-dniowy okres profilu mocy P_{AC} z aktywnym DROPT-FTC. Jak wynika z rysunku 2a) maksymalna wartość mocy średniej 15-minutowej to 1,621 [MW], natomiast w pełni dostępna moc dyspozycyjna BSME (rys. 2d) pozwala na ograniczenie mocy średniej 15-minutowej do poziomu 0,743 [MW] (rys. 2b)), co spełnia kryterium określone wartością mocy kontraktowanej $P_{Kon_AC_avg(15-min)}^{lim}$ równej 0,75 [MW]. W tym układzie, w szczytowym momencie zapotrzebowania na energię, zakładana minimalna wartość SoC (rys. 2c) nie została przekroczona.

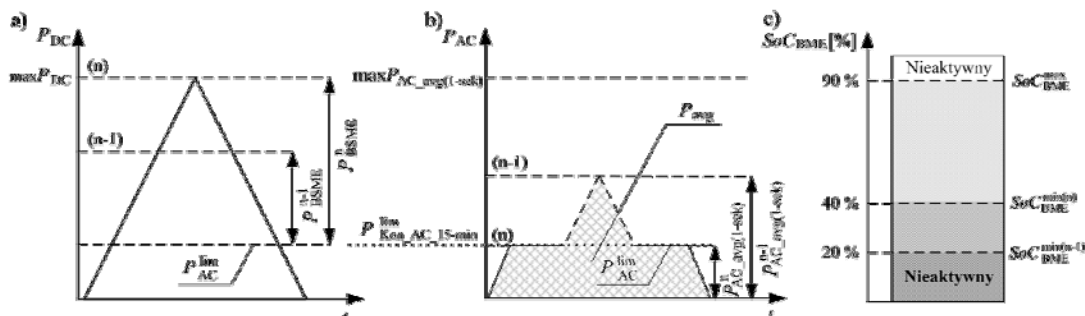


Rys.2. a) 1-dniowy okres profilu mocy P_{AC} z nieaktywnym DROPT-FTC b) 1-dniowy okres profilu mocy P_{AC} z aktywnym DROPT-FTC c) szacunkowa moc P_{BSME}^d pobrana z BSME d) szacowany poziom SoC_{BME}

Cel i strategia działania sterowania tolerującego uszkodzenia, przy sterowaniu systemu DROPT-FTC

Celem systemu DROPT-FTC z zaimplementowanym algorytmie sterowania o dwuprogowym ograniczeniu mocy redukcyjnej i jednoprogowym mocy dyspozycyjnej pozwalającym na ciągłość pracy tego systemu w stanach pracy awaryjnej, jest utrzymanie zredukowanego poziomu

kontraktowanej mocy $P_{Kon_AC_avg(15-min)}^{lim}$ na zakładanym poziomie. Proponowana metoda sterowania pozwala na ciągłość efektywnej pracy DROPT-FTC przy uszkodzeniu jednego przekształtnika systemu PCS lub jednego łańcucha ogniwi BME, a stan taki reprezentowany jest jako (n-1). Na rysunku 3 przedstawiono sposób adaptacji dwuprogowego ograniczenia mocy redukcyjnej.



Rys.3. Adaptacja maksymalnej mocy redukcyjnej systemu DROPT-FTC a) dwuprogowa adaptacja mocy b) ograniczenie mocy chwilowej po stronie zasilania podstacji trakcyjnej $P_{AC}(n)$ c) stan naładowania $SoC(n)$; $(n) \forall n, n-1$

W systemie DROPT-FTC wymienione parametry mają następujące znaczenie:

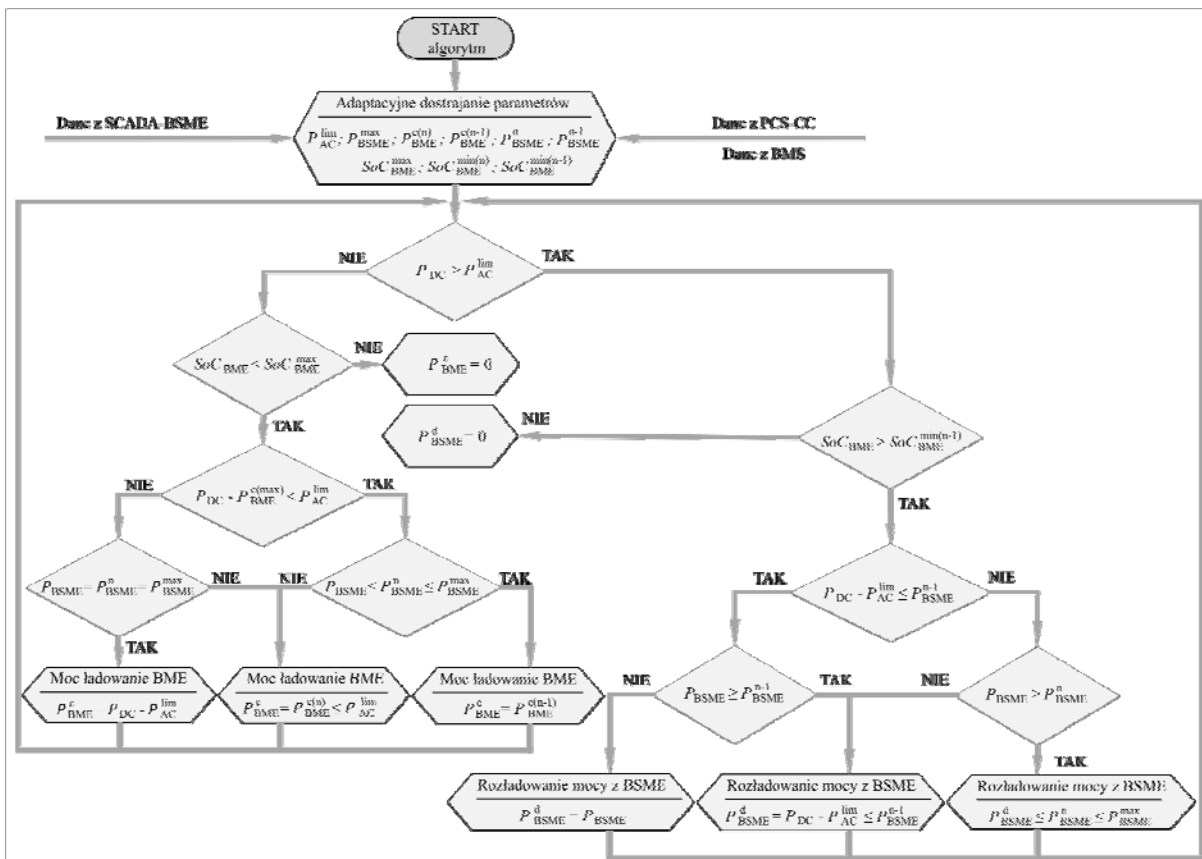
- P_{BSME}^n – moc redukcyjna jednoprogowego ograniczenia mocy – reprezentuje stan pełnej sprawności BSME;
- P_{BSME}^{n-1} – moc redukcyjna dwuprogowego ograniczenia mocy – reprezentuje stan ograniczonej dostępności BSME, przy uszkodzeniu jednego PCS lub łańcucha BME;
- P_{AC}^{lim} – limit mocy żądanej – reprezentuje parametr sterujący systemem DROPT-FTC, (w proponowanym

systemie limit ustawiony na wartość 0,75 [MW], czyli wartość równą wartości mocy kontaktowanej);

- $P_{AC_avg(1-sek)}^n$; $P_{AC_avg(1-sek)}^{n-1}$ – maksymalne moce chwilowe po stronie AC zasilnia PT w funkcji $f(n)$; $f(n-1)$.

Algorytm sterowania układu z sterowaniem tolerującym uszkodzenia

Uproszczony schemat algorytmu sterowania systemem DROPT-FTC przedstawia rysunek 4.



Rys.4. Uproszczony schemat blokowy nadrzędnego algorytmu sterowania systemem DROPT-FTC

Bazując na wiedzy o następujących zależnościach reprezentujących moc i energię dyspozycyjną

$$(1) \begin{cases} P_{BSME}^{DROPT-FTC} = f(P_{PCS}(n)); \forall n, n-1 \\ E_{BME}^{\max} = f(E_{BME}(n)); \forall n, n-1 \\ E_{BME}^{\max} = f(SoC_{BME}(n)); \forall n, n-1 \end{cases},$$

otrzymujemy wiedzę o stanie i kondycji systemu DROPT-FTC, czyli o parametrach dyspozycyjnych. Na podstawie tych informacji algorytm decyzyjny realizuje następujące funkcje:

$$(2) \begin{cases} P_{BME}^c = f(SoC_{BME}(n)); \forall n, n-1 \\ P_{BME}^c = f(P_{BSME}(n)); \forall n, n-1 \\ P_{BME}^d = f(P_{BSME}(n)); \forall n, n-1 \\ P_{BME}^d = f(SoC_{BME}^{\min}(n)); \forall n-1 \end{cases}$$

Strategia ta pozwala na działanie systemu przy uszkodzeniu, a energia dyspozycyjna BME kompensowana jest poprzez stopniową regulację stopnia ograniczenia minimalnego poziomu rozładowania SoC_{BME}^{\min} , i przedstawia się następująco:

$$(3) \begin{cases} SoC_{BME}^{\min} = 40\% SoC_{BME}^{\max(R)}; \forall n \\ SoC_{BME}^{\min} = 20\% SoC_{BME}^{\max(R)}; \forall n-1 \end{cases}$$

Strategia stopniowego ograniczenia minimalnego poziomu SoC_{BME}^{\min} z 40% do 20% pozwala na zwiększenie energii dyspozycyjnej E_{BME}^{\max} na czas odłączenia lub uszkodzenia jednego przekształtnika PCS lub łańcucha ogni BME. Działanie takie nie doprowadzi do znacznego zmniejszenia żywotności cyklicznej [11] ogni BME, dlatego, że stany awaryjne występują zazwyczaj rzadko, a czas reakcji serwisu na usunięcie usterki to 24 godziny i wynika bezpośrednio z umowy pomiędzy inwestorem a wykonawcą implementacji BSME. Algorytm sterowania

przewiduje kontrolę warunku, w którym nie dopuszcza się rozładowania BME poniżej 20%, co podobnie jak w przypadku SoC_{BME}^{\max} , czyli przekroczenie $90\% SoC_{BME}^{\max(R)}$, mogło by doprowadzić do trwałego uszkodzenia ogni [12]. A więc bardzo ważnym aspektem systemu DROPT-FTC jest dynamiczna zmiana parametru DoD (4) (ang. Depth of Discharge) co bezpośrednio przekłada się na wpływ maksymalnego poziomu energii dyspozycyjnej E_{BME}^{\max}

$$(4) DoD = SoC_{BME}^{\max} - SoC_{BME}^{\min}(n); \forall n, n-1.$$

Analiza implementacji wielosegmentowego BSME systemu DROPT-FTC z wielofunkcyjnym algorytmem sterowania odpornym na uszkodzenia

Na rysunku 5 przedstawiona została struktura trójsegmentowego BSME systemu DROPT-FTC o mocy 5,5 [MW], w skład, którego wchodzi trzy niesymetryczne gałęzie. Moc poszczególnych modułów PCS wynosi 2,0 [MW] i 1,5 [MW], zgodnie z podstawowym typoszeregiem produkowanych przekształtników DC/DC. W układzie tym całkowita moc dyspozycyjna systemu jest wprost proporcjonalna od sumy mocy dostępnych PCS, i przedstawia się następująco:

$$(5) P_{BSME}^{DROPT-FTC} = P_{PCS}(n),$$

gdzie:

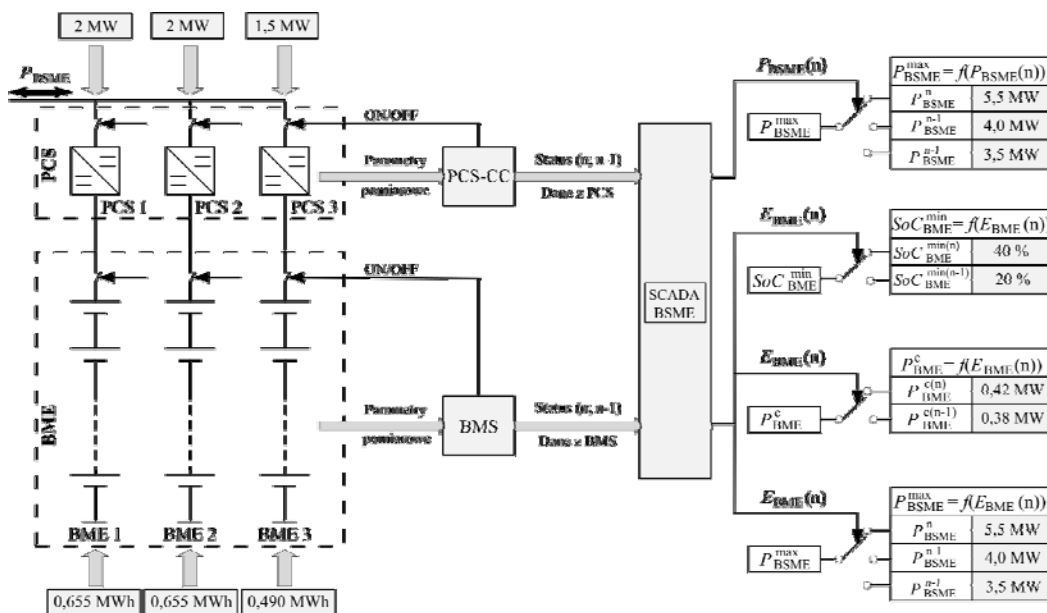
$$(6) P_{PCS}(n) = P_{PCS(1)} + P_{PCS(2)} + P_{PCS(3)}.$$

Analogicznie do zależności (5) i (6) przedstawia się energia dyspozycyjna (7), której wartość jest wprost proporcjonalna od sumy energii dostępnych aktywnych łańcuchów ogni BME (8) przyłączonych do poszczególnych modułów PCS

$$(7) E_{BME}^{DROPT-FTC} = E_{BME}(n),$$

gdzie:

$$(8) E_{BME}(n) = E_{BME(1)} + E_{BME(2)} + E_{BME(3)}.$$



Rys.5. Ilustracja uogólnionego programu adaptacji parametrów nadrzędnego algorytmu w sterowaniu tolerującym uszkodzenia w układzie wykonawczym z przykładowymi wartościami parametrów systemu DROPT-FTC dla trójsegmentowego BSME

Dodatkowo, energia dyspozycyjna poszczególnych łańcuchów BME podzielona została proporcjonalnie do mocy danego przekształtnika PCS, tak by zachować tą

samą wartość współczynnika cyklicznego ładowania/rozładowania C -rate, dla każdej gałęzi BSME

$$(9) \quad C - \text{rate} = \frac{P_{PCS}}{E_{BME}}$$

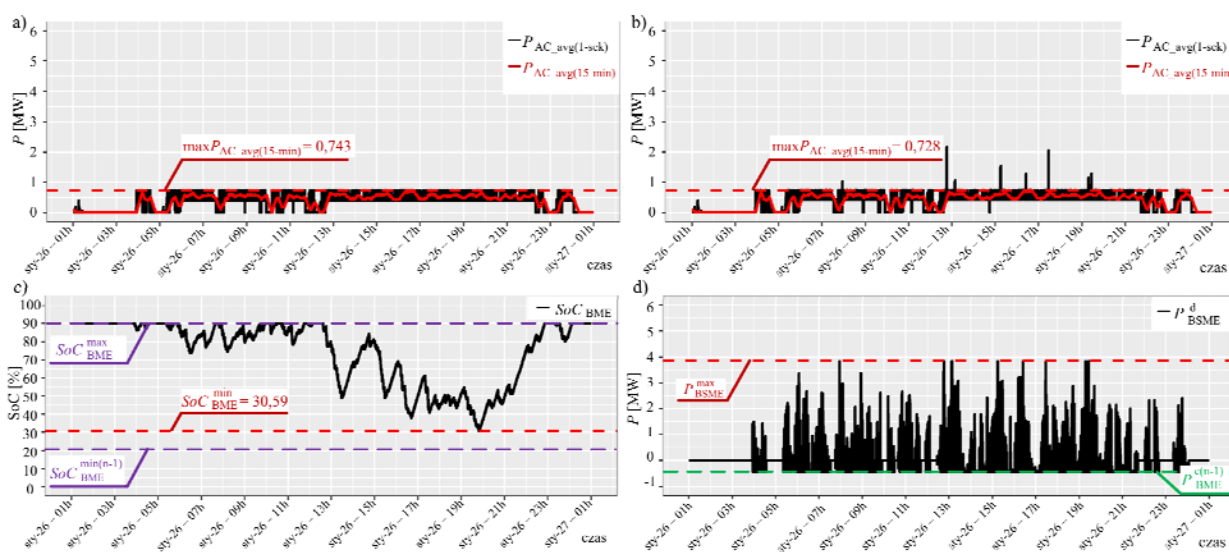
W tabeli 2 przedstawiono podstawowe parametry trójsegmentowego BSME systemu DROPT-FTC, które wykorzystane zostały w przeprowadzonych badaniach symulacyjnych. W przeprowadzonych badaniach uwzględniliśmy sprawność BSME na poziomie $\eta=96\%$, dlatego też, dla każdego badanego scenariusza ograniczyliśmy moc dyspozycyjną do poziomu 96%.

Stan (n) reprezentuje w pełni dostępną moc i energię dyspozycyjną, natomiast stan (n-1) reprezentuje uszkodzenie jednego segmentu PCS lub BME. Dla pracy układu w stanie awaryjnym rozważyliśmy dwa przypadki. Przypadek I reprezentuje stan, w którym nastąpiło uszkodzenie lub odłączenie segmentu o mocy 1,5 [MW], natomiast przypadek II reprezentuje stan uszkodzenia lub odłączenia segmentu o mocy 2 [MW]. Analogicznie do tego nastąpiła utrata dostępnej energii, którą zrekompensowano poprzez obniżenie SoC_{BME}^{\min} .

Tabela 2. Podstawowe parametry trójsegmentowego BSME wykorzystane w badaniach symulacyjnych

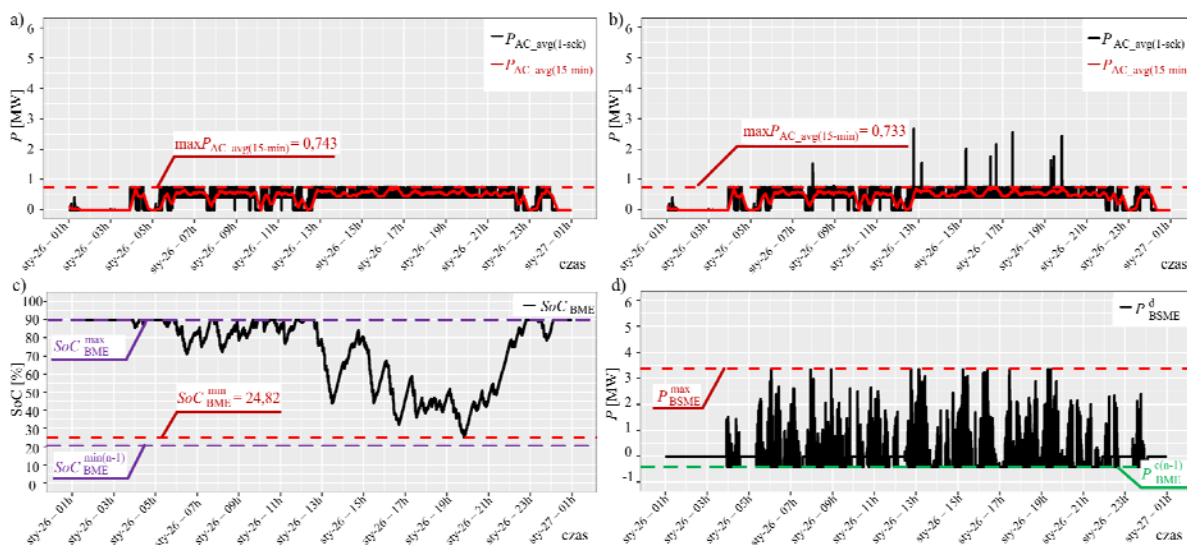
Parametr	Stan (n)	Przypadek I (n-1)	Przypadek II (n-1)
P_{BSME}^{\max} [MW]	5,260	3,840	3,360
E_{BME}^{\max} [MWh]	0,900	0,915	0,802
SoC_{BME}^{\max} [%]	90,000	90,000	90,000
$SoC_{BME}^{\min(n)}$ [%]	40,000	-	-
$SoC_{BME}^{\min(n-1)}$ [%]	-	20,000	20,000
$P_{BME(n)}^c$ [MW]	0,420	0,380	0,380

Na rysunku 6b), 6c), 6d) przedstawione zostały wyniki badań symulacyjnych przypadku I, które jednocześnie porównane zostały z 1-dniowym okresem profilu mocy P_{AC} systemu DROPT-FTC pracującego z w pełni dostępną mocą i energią dyspozycyjną BSME (rys. 6a)).



Rys.6. a) 1-dniowy okres profilu mocy P_{AC} z w pełni aktywnym DROPT-FTC b) 1-dniowy okres profilu mocy P_{AC} dla przypadku I przy (n-1) c) szacunkowa moc P_{BSME}^d pobrana z BSME d) szacowany poziom SoC_{BME}

Na rysunku 7b), 7c), 7d) przedstawione zostały wyniki badań symulacyjnych przypadku II.



Rys.7. a) 1-dniowy okres profilu mocy P_{AC} z w pełni aktywnym DROPT-FTC b) 1-dniowy okres profilu mocy P_{AC} dla przypadku II przy (n-1) c) szacunkowa moc P_{BSME}^d pobrana z BSME d) szacowany poziom SoC_{BME}

Analiza zachowania niezawodności systemu DROPT-FTC w przypadku pracy w stanach awaryjnych

W tabeli 3 przedstawiono wyniki przeprowadzonej analizy układu DROPT-FTC pracującego z ograniczoną mocą i energią dyspozycyjną. Poddano analizie układ dla stanu (n-1) dla dwóch przypadków, I i II.

Tabela 3. Wybrane wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych systemu DROPT-FTC pracującego w stanach awaryjnych

Parametr	Stan (n)	Przypadek I (n-1)	Przypadek II (n-1)
P_{BSME}^{max} [MW]	5,260	3,840	3,360
E_{BME}^{max} [MWh]	0,900	0,915	0,802
SoC_{BME}^{max} [%]	90,000	90,000	90,000
$SoC_{BME}^{min(n)}$ [%]	40,000	-	-
$SoC_{BME}^{min(n-1)}$ [%]	-	20,000	20,000
$P_{BME}^s(n)$ [MW]	0,420	0,380	0,380
P_{AC}^{lim} [MW]	0,750	0,750	0,750
$P_{Kon_AC_avg(15-min)}^{lim}$ [MW]	0,743	0,728	0,732

Jak wynika z rysunków 6 i 7 oraz podsumowujących danych przedstawionych w tabeli 3, możliwe jest utrzymanie głównego założenia, czyli utrzymanie poziomu zakontraktowanego zapotrzebowania na moc szczytową uśrednioną 15-minutowo $P_{Kon_AC_avg(15-min)}^{lim}$ badanej podstacji trakcyjnej na zakontraktowanym poziomie 0,75 [MW], dla obu zbadanych scenariuszy pracy systemu DROPT-FTC w stanach pracy awaryjnej BSME.

Podsumowanie

W ramach badań przedstawionych w tym artykule zaproponowano i zweryfikowano koncepcję systemu DROPT-FTC opartym na wielosegmentowym BSME z dwuprogowym ograniczeniem mocy redukcyjnej i jednoprogowym ograniczeniu mocy dyspozycyjnej oraz sterowaniu tolerującym uszkodzenia.

Zastosowanie sterowania opartego na przedstawionym, wielozadaniowym nadrzędnym algorytmie sterowania oraz trójsegmentowej budowie BSME pozwala na zachowanie głównego zadania, czyli utrzymanie na zakładanym poziomie 0,75 [MW] ograniczenia zapotrzebowania na moc szczytową 15-minutową PT przy uszkodzeniu modułu systemu konwersji mocy PCS lub łańcucha ogniów BME.

Przedstawiona koncepcja sterowania tolerującego uszkodzenia może być alternatywą dla sterowania wcześniej zaimplementowanych układów dynamicznej redukcji obciążenia podstacji trakcyjnych z baterijnymi systemami magazynowania energii, których BME ulegną stopniowej degradacji, lub dla których nie przewidziano wcześniej możliwości pracy przy uszkodzeniu.

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, mgr inż. Łukasz Pilimon, E-mail: lukasz.pilimon@gmail.com, Instytut Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki, Uniwersytet Zielonogórski, 65-516 Zielona Góra, ul. Prof. Z. Szafrana 2, Polska, dr inż. Szymon Wermiński, 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.

LITERATURA

- [1] Barrero R., Tackoen X., Van Mierlo J. *Improving energy efficiency in public transport: stationary supercapacitor based Energy Storage System for a metro network*, IEEE, 2008 Vehicle Power and Propulsion Conference. DOI: 10.1109/VPPC.2008.4677491
- [2] Jarnut M., Kaniewski J., Protsiuk V. *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
- [3] Kim H., Heo J-H., Park J-Y. and Yoon Y. T. *Impact of Battery Energy Storage System Operation Strategy on Power System: An Urban Railway Load Case under a Time-of-Use Tariff*, Energies, Published: 7 January 2017, DOI: 10.3390/en10010068
- [4] Khodaparastan M., Dutta O., Mohamed A. *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
- [5] Lamedica R., Ruvio A., Palagi A., Mortelliti N. *Optimal Siting and Sizing of Wayside Energy Storage Systems in a D.C. Railway line*, Energies 2020, 13, 6271, DOI: 10.3390/en13236271
- [6] Calderaro V., Galdi V., Graber G., Capasso G., Lamedica G., Ruvio A. *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
- [7] Jefimowski W. *Stationary energy storage system in 3 kV DC – the conception comparison*, MATEC Web of Conferences 180, 02013 (2018), DOI: 10.1051/mateconf/201818002013
- [8] Roch-Dupré D., López-López Á. J., Pecharrmán R. R., Cucala A. P., Fernández-Cardador A. *Analysis of the demand charge in DC railway systems and reduction of its economic impact with Energy Storage System*. Elsevier, Electric Power and Energy Systems 93 (2017) 459-467, DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.06.022
- [9] Qin Q., Guo T., Lin F., Yang Z. *Energy Transfer Strategy for Urban Rail Transit Battery Energy Storage System to reduce Peak Power of Traction Substation*, Transactions on Vehicular Technology (Volume: 68, Issue: 12, Dec. 2019), DOI: 10.1109/TVT.2019.2948766
- [10] Szott M., Wermiński Sz., Jarnut M., Kaniewski J., *Battery peak-power reduction system of traction substation with two-threshold limitation*. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY. 2020, ISSN 0033-2097, R. 96 NR 12/2020, DOI: 10.3390/en14030720
- [11] Chen L., Tong Y., Dong Z. *Li-Ion Battery Performance Degradation Modeling for the Optimal Design and Energy Management of Electrified Propulsion Systems*, Energies 2020, 13, 1629 DOI: 10.3390/en13071629
- [12] Wikner E., Thiringer T. *Extending Battery Lifetime by Avoiding High SOC*, Applied Sciences 2018, 8, 1825, DOI: 10.3390/app8101825