

Witold Kobos, Radosław Sobieski
MARKEL Sp. z o. o., Piaseczno

INTELIĞENTNY HYBRYDOWY MAGAZYN ENERGII Z PRZEKSZTAŁTNIKAMI ENERGOELEKTRONICZNYMI WYKORZYSTUJĄCYMI WYSOKONAPIĘCIOWE, NISKOINDUKCYJNE MODUŁY MOCY SiC MOSFET

INTELLIGENT HYBRID ENERGY STORAGE WITH POWER ELECTRONIC CONVERTERS USING HIGH-VOLTAGE, LOW-INDUCTIVE SiC MOSFET POWER MODULES

Streszczenie: W artykule przedstawiono koncepcje magazynu energii charakteryzujący się wielowymiarową funkcjonalnością. Oprócz wieloźródłowego, dwukierunkowego transferu energii elektrycznej poprzez przekształtniki o podwyższonej sprawności dzięki zastosowaniu technologii SiC magazyn może stanowić źródło zielonego wodoru. W pracy zaproponowano kryteria optymalizacji doboru pojemności energetycznej baterii Li-ion, pojemności bloku superkondensatorowego oraz mocy przyłączonych elektrowni fotowoltaicznej i wiatrowej, a także mocy ogniwa paliwowego w zależności od parametrów przyłączonej sieci odbiorów sieci średniego i niskiego napięcia.

Abstract: The article presents the concept of energy storage with multidimensional functionality. In addition to multi-source, bidirectional electricity transfer through converters with increased efficiency due to SiC technology, the storage can be a source of green hydrogen. The paper proposes criteria for optimizing the selection of the energy capacity of a Li-ion battery, the capacity of a supercapacitor unit and the power of the connected photovoltaic and wind power plants, as well as the power of the fuel cell depending on the parameters of the connected medium and low voltage grid.

Słowa kluczowe: magazyn hybrydowy, superkondensator, bateria litowa, ogniwo paliwowe, energoelektronika mocy, półprzewodniki SiC, inteligentne transformatory.

Keywords: hybrid storage, supercapacitor, lithium battery, fuel cell, power electronics, SiC semiconductors, intelligent transformers.

1. Wstęp

Rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną oraz ograniczenia pojawiające się w systemie jej dystrybucji prowadzą do intensywnego poszukiwania skutecznych środków zaradczych. Podnoszenie sprawności urządzeń, czy też budowa i instalowanie odnawialnych źródeł energii OZE powinna być uzupełniona różnymi rozwiązaniami magazynów energii ME. Autorzy artykułu dzielą się swoją analizą problemu, w którym dochodzą do wniosku, iż zastosowanie nowoczesnych układów przekształtnikowych oraz algorytmów sterowania umożliwia podniesienie funkcjonalności ME, a także obniżenie kosztów całych instalacji. W bogatej, dostępnej literaturze technicznej: [1], [2], [3] można znaleźć charakterystyki techniczne i ekonomiczne różnych źródeł energii odnawialnej, czy też różnych urządzeń magazynujących energię. W krajowym systemie energetycznym wyróżnia się następujące ZOE:

biopaliwa stałe, energia wiatru, biopaliwa ciekłe, biogaz, energia wody, odpady komunalne, energia słoneczna, pompy ciepła, energia geotermalna [2]. Udział energii ze źródeł odnawialnych w pozyskaniu energii pierwotnej ogółem wynosi 14,46% tj.: 371 588 TJ [GUS]. W artykule uwaga została skierowana na te rozwiązanie, które z dużym prawdopodobieństwem znajdą zastosowanie w gospodarce krajowej. Ze względu na stosunkowo prosty proces inwestycyjny ogniwa fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe oraz ogniwa paliwowe są tymi OZE, które będą wykorzystywane przy budowie ME jako źródła energii pierwotnej. Spośród szerokiej gamy dostępnych sposobów magazynowania energii autorzy proponują zwrócić uwagę do tych, które w gospodarce krajowej będą z wysokim prawdopodobieństwem stosowane tj.: różnego typu ogniwa litowo-jo-

nowe, standardowe ogniwa kwasowe i zasadowe, superkondensatory, magazyny wodoru. Jednym z kluczowych zagadnień, które definiuje rzeczywiste wykorzystanie ME jest sposób wymiany energii między poszczególnymi elementami wewnątrz magazynu i otoczeniem. Efektywne zarządzanie energią podnosi sprawność energetyczną oraz zwiększa moc dostępną na zaciskach wyjściowych zasobnika, a także prowadzi do obniżenia kosztów inwestycyjnych budowy magazynu.

2. Energia odnawialna i urządzenia do magazynowania

Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę źródeł odnawialnych oraz wybranych urządzeń do jej gromadzenia. Ze względu na specyfikę problemu informacje zebrano na podstawie dostępnych krajowych danych oraz ofert technicznych nowo projektowanych inwestycji.

2.1 Energia wiatrowa

Koszt wytworzenia energii wiatrowej kształtuje się na poziomie 300 zł/MWh [4] natomiast koszt inwestycyjny wynosi 5-7 mln zł za 1 MW [6]. Sprawność efektywną generatora wiatrowego można przyjąć na poziomie 21%

2.2 Energia fotowoltaiczna

Szacunkowy koszt wytworzenia energii z paneli fotowoltaicznych to 750 zł/MWh przy założeniu 10 letniej bezawaryjnej eksploatacji, natomiast koszt zakupu wynosi ok 7,5 mln zł za 1 MW [5]. Sprawność maksymalną systemu fotowoltaicznego przyjmuje się w przedziale 12%÷14%.

2.3 Ogniwo paliwowe i wodór

Szacunkowy koszt zakupu kompletnego ogniwa paliwowego wynosi ok. 7,7 mln zł/1MW. Po 4 latach eksploatacji należy dokonać regeneracji, co stanowi ok 40% ceny zakupu nowego ogniwa. Maksymalna sprawność ogniwa nie przekracza 50%. Cena detaliczna (dystrybucyjna) wodoru kształtuje się na poziomie 10 EUR/1kg, wartość opałowa wynosi natomiast 33,3 kWh/1kg. Przy założeniu 50% sprawności ogniwa koszt wytworzonej energii wyniesie około 2700 zł/1MWh. Należy w tym miejscu nadmienić, iż Departament Energii USA estymuje obniżenie ceny wodoru do 1,5 \$/1kg do 2030 roku. Przy tym założeniu koszt wytworzenia energii znacząco spadnie do

330 zł/1MWh, co może mieć daleko idące skutki przy projektowaniu magazynów energii. Układ do wytwarzania czystego wodoru może stanowić podsystem ME, tak że pojawia się możliwość przetwarzania i magazynowania energii elektrycznej w postaci wodoru, a następnie przetworzenie energii wodoru w ogniwie paliwowym ponownie na elektryczną. Sprawność przekształcania energii elektrycznej w energię wodoru wynosi ok 60%. Ten sposób magazynowania energii; $El \rightarrow H_2 \rightarrow EL$ charakteryzuje się sprawnością $50\% \cdot 60\% = 30\%$.

2.4 Superkondensatory

Szacunkowy koszt zakupu kompletnego modułu superkondensatorowego jest bardzo wysoki i wynosi ok. 180 mln zł/1MWh [7] zgromadzonej energii. Natomiast jako źródło mocy koszt kształtuje się na poziomie 1,1 mln zł/1MW. Sprawność energetyczna osiąga wartość 95% [13].

2.5 Baterie litowe

Spośród wielu dostępnych rodzajów, wyodrębniono dwa typy baterii litowych: pierwszy to ogniwa LTO charakteryzujące się dużą żywotnością lecz drogie. Drugi typ to ogniwa NMC tańsze, jednak o zmniejszonej ilości cykli pracy. W zastosowaniach stacjonarnych magazynów energii pozostałe parametry (np. odporność na wibracje baterii) nie są tak istotne. Koszt zakupu kompletnego modułu baterijnego LTO to wydatek rzędu 8 mln zł/1MWh oraz 2 mln zł/1MW mocy. Natomiast przy zakupie modułu baterijnego NMC zapłacimy znacznie mniej, bo ok 4 mln zł/1MWh i 1,5 mln zł/1MW mocy, przy czym również zmaleje dwukrotnie dostępna ilość cykli pracy w stosunku do baterii LTO. Sprawność energetyczna obu typów baterii to około 91%.

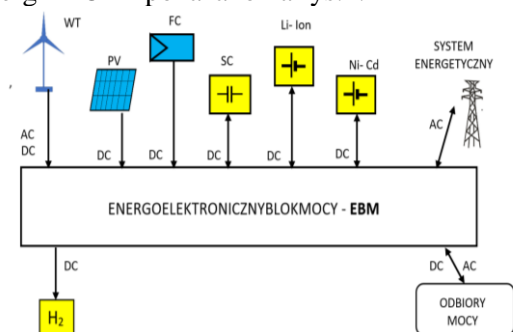
2.6 Baterie zasadowe

Zasobniki zbudowane z baterii zasadowych Ni-Cd stanowią interesującą alternatywę dla baterii litowych. Pod względem żywotności- ilości cykli pracy przewyższają trwałość baterii LTO. Koszt zakupu jest znacząco niższy w porównaniu do baterii NMC i wynosi ok 2 mln zł/1MWh. Ograniczeniem baterii Ni-Cd jest 10 krotnie mniejsza moc ładowania w stosunku do mocy rozładowania. W związku z powyższym koszt mocy rozładowania to około 0,5 mln zł/1MW, natomiast koszt mocy ładowania to już około 5 mln zł/1MW. Sprawność ener-

tyczna baterii Ni-Cd wynosi ok. 78% [1] i jest mniejsza niż baterii litowych.

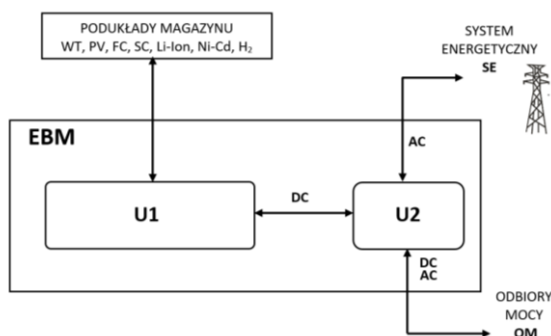
3. Energoelektroniczny blok przekształcania mocy

Uproszczony, przykładowy układ magazynu energii z OZE pokazano na rys.1.



Rys. 1. Magazyn energii z OZE

Energoelektroniczny blok mocy EBM zarządza przepływem energii między poszczególnymi podukładami magazynu, jak i systemem energetycznym oraz przyłączonymi odbiorami mocy. Człon U1 zarządza przepływem energii między podukładami magazynu, zaś człon U2 nadzoruje energię wymienianą między siecią energetyczną i odbiorami, jak to pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Energoelektroniczny blok mocy EBM

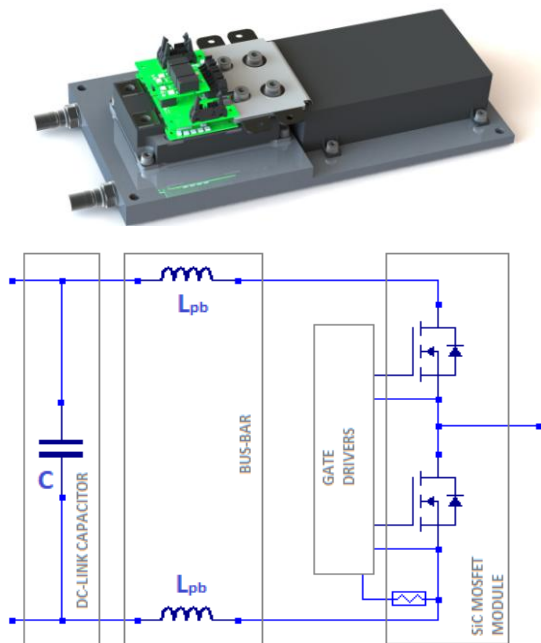
Ze względu na wymaganą dużą dynamikę regulacji przepływu energii oraz redukcję zakłóceń EMC konstrukcja EBM powinna wyróżniać się zwartą budową, zamkniętą w jednej bryle kontenera. Innym szczególnie ważnym parametrem jest minimalizacja gabarytów i kosztów oraz podniesienie sprawności torów silnoprądowych. Zastosowane niskoindukcyjne tranzystory mocy SiC MOSFET dopuszczają przełączanie prądu z częstotliwością 10÷50 kHz (50 kHz -przetwarzanie rezonansowe) nawet przy napięciu 4kV [8]. Wysoka częstotliwość pracy znacząco zmniejsza gabaryty oraz straty

w obwodach magnetycznych dużych mocy, co w konsekwencji przynosi wzrost sprawności i uzysk ekonomiczny. Układ EBM umożliwia sterowanie przepływem energii prądu stałego w obrębie źródeł DC [9], daje możliwość bezpośredniego zasilania odbiorników DC bez obciążania sieci energetycznej, zapewnia separację galwaniczną, jeśli istnieje takie wymaganie [10]. EBM zarządza również przepływem energii między ME a siecią energetyczną za pomocą dwukierunkowego przekształtnika AC/DC. Wszystkie przekształtniki EBM zostały zbudowane w oparciu o moduł mocy SiC (rys.3).

4. Właściwości przekształtników zbudowanych w wysokonapięciowej, niskoindukcyjnej technologii SiC

Rosnące wymagania rynkowe dotyczące sprawności całych systemów oraz jakości przekształcaniej energii w układach wysokiej mocy wymuszają stosowanie nowoczesnych technologii półprzewodnikowych, takich jak WBG (materiały o poszerzonym paśmie zabronionym). W grupie tych materiałów prym wiodzie węgiel krzemu (SiC), szczególnie w zastosowaniach energoelektronicznych XXI wieku. Dzięki dużym gęstościom mocy, krótkim czasom przełączania oraz wysokiej maksymalnej temperaturze złącza pozwala na redukcję gabarytów przekształtników oraz poprawę jakości przebiegów. Dużą popularność zyskał szczególnie w aplikacjach, gdzie wystarczające jest zastosowanie elementów o znamionowych napięciach do 1700V. Zdecydowanie mniejsza popularność technologii SiC w aplikacjach wymagających modułów 3300V jest spowodowana trudnościami technologicznymi w procesie produkcji struktur półprzewodnikowych o wyższych klasach nieścięciwowych (ma to bezpośredni wpływ na wysoką cenę) oraz mniejszą w stosunku do porównywalnych elementów krzemowych wytrzymałością zwarciową [11]. Potrzeby rynkowe wymuszają jednak zastosowanie elementów SiC o wyższych znamionowych napięciach np. moduł w niskoindukcyjnej obudowie 800A/3300V [8]. Istotną kwestią przy projektowaniu przekształtników z zastosowaniem elementów półprzewodnikowych mocy z węgla krzemu (szczególnie wysokonapięciowych) jest zachowanie bardzo niskich wartości indukcyjności pasożytniczych w obwodzie łączeniowym, dlatego efektywne wykorzystanie tych elementów było możliwe po wprowadzeniu na rynek nowoczesnej,

przemysłowej obudowy, która pozwala osiągać wartości indukcyjności pasożytniczych wewnętrznych na poziomie 10nH [12]. Jest to 3,5-krotna redukcja w stosunku do tradycyjnych rozwiązań. Szczególną uwagę należy również zwrócić na projekt połączeń mocy (bus-bar) oraz dobór kondensatora DC-Link. Wychodząc naprzeciw oczekiwaniom rynkowym firma Markel w ramach projektu *Energoelektroniczne bloki funkcjonalne bazujące na niskoindukcyjnych modułach z przyrządami mocy z węglika krzemu* współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego zaprojektowała blok mocy oparty o elementy SiC MOSFET o napięciu znamionowym 3300V (rysunek 3) pozwalający na łatwe skalowanie przekształtników oraz duże częstotliwości przełączeń przy niskich wartościach zaburzeń elektromagnetycznych.



Rys. 3. Moduł mocy SiC

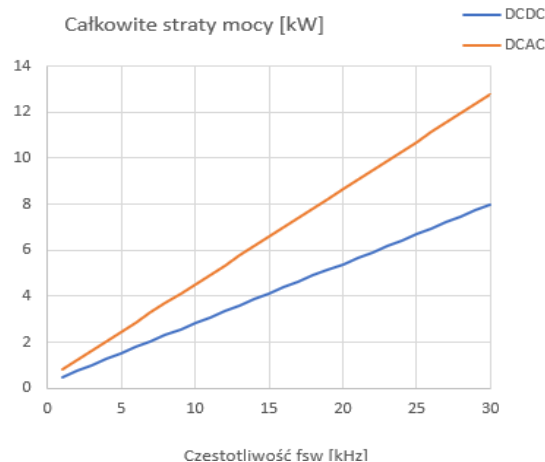
Moduł mocy zapewnia indukcyjność pasożytniczą w obwodzie łączeniowym na poziomie 65nH, konfigurację półmostka z możliwością łączenia równoległego, chłodzenie cieczowe oraz zabezpieczenia przeciwzwarceniowe oraz temperaturowe elementów półprzewodnikowych. Przy wykorzystaniu zaprezentowanego bloku mocy zostały zaprojektowane przekształtniki DC/DC oraz dwukierunkowy przekształtnik AC/DC. W artykule skupiono się na parametrach użytkowych przekształtników istotnych z punktu widzenia odbiorcy końcowego. Przy założeniu częstotliwości

przełączania na poziomie 20kHz osiągnięto redukcję gabarytów systemu przekształcania energii oraz masy o 35% (głównie za sprawą redukcji dławików oraz kondensatorów). Analiza wykazała również redukcję hałasu na poziomie 20%. Przy założeniu mocy 300kW obliczono straty mocy dla przekształtników podczas rozładowania magazynu z pełną mocą. Dla układu DC/DC straty całkowite wynosiły 8063W (w tym 5430W dla elementów półprzewodnikowych) oraz 12 950W dla układu AC/DC (w tym 8660W dla elementów półprzewodnikowych). Największy udział procentowy przypada dla strat łączeniowych diod i tranzystorów przekształtnika AC/DC obliczonych według [13]:

$$P_{SWT} = \frac{f_{sw} V_{DC} I_m}{\pi V_m} \left(\frac{E_{ON}}{I_{mon}} + \frac{E_{OFF}}{I_{moff}} \right) \quad (1)$$

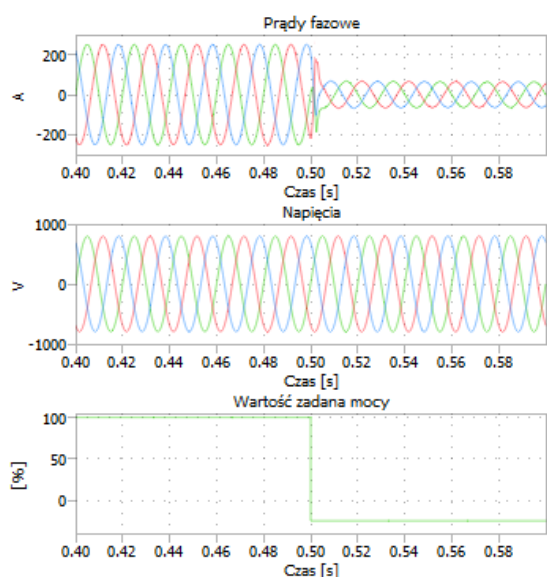
$$P_{SWD} = \frac{f_{sw} V_{DC} I_m E_{REC}}{\pi V_m I_{mon}} \quad (2)$$

Powyższe dane można przełożyć na sprawności na poziomie 97,31% dla przekształtnika DC/DC oraz 95,68% dla przekształtnika AC/DC. Straty mocy dla elementów półprzewodnikowych poszczególnych przekształtników w funkcji częstotliwości zostały przedstawione na rys. 4. Wysoka częstotliwość pracy przekształtników prowadzi do podwyższonych strat mocy. Z drugiej strony pozwala na redukcję elementów biernych oraz poprawę jakości przebiegów generowanych przez przekształtniki. Wybór optymalnej częstotliwości dla danego rozwiązania musi być kompromisem pomiędzy warunkowaniami termicznymi, czasem życia urządzenia oraz parametrami użytkowymi.



Rys. 4. Straty mocy przekształtników w funkcji częstotliwości

Na poniższych rysunkach przedstawiono przebiegi generowane przez dwukierunkowy przekształtnik AC/DC sprzęgający elementy układu DC z siecią energetyczną. Uzyskane przebiegi charakteryzują się niskimi wartościami THD. Zarówno dla napięcia jak i prądu współczynniki nie przekraczają 1,6%. Rysunki przedstawiają prądy fazowe, napięcia oraz wartość zadana mocy. W początkowej fazie przekształtnik pracuje w trybie falownikowym z pełną mocą (rozładowanie zasobnika). Po czasie 0,5s zachodzi zmiana na pracę prostownikową. Ładowanie odbywa się z mocą 75kW.



Rys. 5. Przebiegi przekształtnika ACDC

5. Inteligentny hybrydowy magazyn energii

Parametry podukładów magazynu energii pokazanego na rys. 1 są mocno zróżnicowane pod względem kosztów energii i mocy oraz sprawności i dynamiki, jak to przedstawiono w rozdziale 2. Ta różnorodność wraz z korzystnymi parametrami przekształtników energoelektronicznych przedstawionych w rozdziale 4 staje się potencjałem do poszukiwania efektywnych algorytmów sterowania przepływem energii [14]. Wysoka sprawność energetyczna przekształtników $\eta \geq 95\%$ oraz ich praktycznie nieograniczona dynamika w stosunku do stałych czasowych obiektów zasilanych (czas reakcji na poziomie kilku ms), a także możliwość przekierowania energii między kilkoma dowolnymi podukładami magazynu pozwala na znaczące uproszczenie algorytmu. Autorzy wskazują na dwa istotne kryteria, tj.: koszt budowy magazynu oraz dopuszczalną cenę energii dostarcza-

nej z ME do użytkowników. W tym celu można wykorzystać zależności (3) i (4) odpowiednio do szacowania kosztów zakupu mocy KM magazynu (3) i kosztów wytwarzania energii KE (4):

$$KM = \sum_{k=1}^n w_k^1 \cdot m_k \cdot M_k \quad (3)$$

gdzie: n – ilość składowych podukładów magazynu, w_k^1 – udział mocy danego podukładu, m_k – jednostkowy koszt zakupu mocy danego podukładu, M_k -moc danego podukładu;

$$KE = \sum_{k=1}^n w_k^2 \cdot e_k \cdot E_k \quad (4)$$

gdzie: n – ilość składowych podukładów magazynu, w_k^2 – udział energii pobranej z danego podukładu, e_k – jednostkowy koszt zakupu mocy danego podukładu, E_k - moc danego podukładu.

Wykorzystując informacje o aktualnych lub przewidywanych jednostkowych cenach zakupu mocy i energii mocy powyższe kryteria umożliwiają efektywną redukcję kosztów budowy nowego ME, jak i na modyfikacje algorytmu zarządzającego układem regulacji w już eksploatowanym ME w celu obniżenia kosztów energii do wymaganego poziomu.

6. Inteligentny i hybrydowy transformator

W zależności od wymagań technicznych danej instalacji ME konieczne jest stosowanie zasobników o różnych napięciach szyny DC. To z kolei przekłada się na wartość skuteczną generowanego napięcia AC. Elementem sprzęgającym sieć energetyczną z ME często jest transformator energetyczny. Zespolecie przekształtnika półprzewodnikowego z transformatorem jest nowym rozwiązaniem, z którym wiąże się określone korzyści, głównie redukcja gabarytów, przy przetwarzaniu energii prądu przemiennego. W inteligentnym transformatorze przetwarzanie energii zachodzi z częstotliwością podwyższoną, znacznie wyższą od 50 Hz. W związku z tym masa i gabaryty obwodu magnetycznego znacznie maleją. Gabaryt zespołu konstrukcji transformatora inteligentnego z uwzględnieniem przekształtników energoelektronicznych maleje 3,5 krotnie [15] w stosunku do klasycznego 50 Hz transformatora energetycznego. Ponadto pozwalają na stabilizację napięcia, kompensację mocy biernej, współpracę systemów o różnych częstotli-

ściach 50 Hz i 60 Hz. Hybrydowy transformator to zespolenie energetycznego transformatora 50 Hz z przekształtnikiem energoelektronicznym [16]. Umożliwia stabilizację napięcia eliminując jego zapady i przebiegi oraz pozwala na przesunięcie fazy napięć między stroną pierwotną i wtórną [17]. Prognozuje się jego zastosowanie w sieciach niskiego napięcia typu Smart Grid [18]. Oba typy transformatorów mogą zostać wbudowane w ME i stanowić jego podukład.

7. Podsumowanie

Inteligentny hybrydowy magazyn energii to złożone zagadnienie wymagające uwzględnienia wielu kwestii technicznych, ekonomicznych, ekologicznych oraz prawnych. Aktualne oraz prognozowane ceny zakupu OZE i urzędów magazynowania energii wpływają na wybór podukładów ME. Z kolei opracowanie efektywnego, samouczącego się algorytmu zarządzania przepływem energii w ME podnosi sprawność energetyczną oraz elastyczność adaptacji do zmian taryfowych i struktury obciążenia systemu energetycznego.

Natomiast, co jest bardzo istotne, wysoka dynamika przekształtników zbudowanych w wysokonapięciowej, niskoindukcyjnej technologii SiC zapewnia, niemal natychmiastową, milisekundową, reakcję ME na zmianę obciążenia w systemie energetycznym, co może wpłynąć na sposób ustalania taryf energetycznych. Dziś rozliczenie dokonuje się w kwantach czasowych 15 min, a pomiary mocy co 1 s. Celem prac nad zagadnieniem inteligentny hybrydowy magazyn energii, zdaniem autorów, jest opracowanie metody projektowej pozwalającej inwestorowi na powiązanie nakładów finansowych i oczekiwanych efektów ekonomicznych.

8. Literatura

[1]. Paska J., Kłos M., Samborski R.: „Przegląd najnowszych technologii magazynowania oraz rodzaje magazynów pozwalające na realizację strategii użytkownika, w tym parametry techniczne magazynów i energoelektroniki”. Konferencja Magazyny Energii, Kołobrzeg 6-7 listopad 2018r.
 [2]. Główny Urząd Statystyczny.: „Energia Źródeł odnawialnych w 2018r”. Warszawa 2019r.
 [3]. Leal-Arcas R., Greger M., Knigge H.: “Toward energy democratization”. Queen Mary University of London, School of Law Legal Studies Research Paper No. 308/2019.

[4]. <https://www.ekologicznaelektrownia.pl/obalamy-mity-koszt-energii-wiatrowej-a-energii-weglowe>.
 [5]. <https://www.instalacjebudowlane.pl/10162-77-12394-instalacja-fotowoltaiczna>
 [6]. <https://www.wnp.pl/energetyka/koszt-budowy-instalacji-wiatrowych-w-polsce-5-7-mln-zl-za-1-mw>,
 [7]. karta katalogowa Maxwell.
 [8]. karta katalogowa MSM800FS33AL.
 [9]. Markel Dokumentacja MPME-920-3000.
 [10]. Khan F., Tang Y., Gong Sicheng G.: “A Bidirectional Resonant DC-DC Converter for Electrical Vehicle Charging/Discharging Systems”. International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 177 – No.5, November 2017 20.
 [11]. X. Huang, L. Fursin, A. Bhalla, W. Simon and J. C. Dries, "Design and fabrication of 3.3kV SiC MOSFETs for industrial applications," 2017 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD), 2017, pp. 255-258, doi: 10.23919/ISPSD.2017.7988908
 [12]. D. Kawase, M. Inaba, K. Horiuchi and K. Saito, "High voltage module with low internal inductance for next chip generation - next High Power Density Dual (nHPD2)," Proceedings of PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2015, pp. 1-7.
 [13]. J. Rabkowski, and T. Płatek, “Comparison of the power losses in 1700V Si IGBT and SiC MOSFET modules including reverse conduction,” 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), Geneva, 2015, pp. 1-10.
 [14]. Radu P. V.: “Analiza celowości zastosowania zasobników energii w układach zasilania miejskiej trakcji elektrycznej”. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska. Warszawa 2021.
 [15]. Benysek G., Kazimierkowski M. P., Popczyk J., Strzelecki R.: “Power Electronic System as Crucial Part of a Smart Grid Infrastructure- A Survey”. Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences Technical Sciences, Vol. 59, No. 4, 2011 DOI: 10.2478/v10175-011-0058-2.
 [16]. Adamowicz M.: “Smart MV/LV distribution transformer for Smart Grid with active prosumer participation”. Acta Energetica 3/12 (2012)/ 4-9.
 [17]. Kaniewski J.: “Hybrydowe układy transformowania napięć przemiennych w systemach elektroenergetycznych”. Konferencja PTETiS, Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra 20.09.2013r.
 [18]. Kaniewski J.: „Transformator hybrydowy z dwubiegunowym przekształtnikiem AC/AC bez magazynu energii DC”. Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 94 NR 5/2018.