

Badania symulacyjne silnika/generatora (mogena) PM BLDC w magazynie energii kinetycznej

Streszczenie. W pracy przedstawiono badania dotyczące innowacyjnej metody zwiększenia ilości energii odzyskiwanej z kinetycznego magazynu energii zbudowanego na bazie trójfazowego silnika/generatora (mogena) PM BLDC z tyrystorowym prostownikiem 6T w obwodzie odzyskiwania energii. Układ sterowania prostownika stabilizuje napięcie wyjściowe dla napięcia wejściowego AC (wyjściowego AC (wyjściowego mogena) o zmiennej amplitudzie i częstotliwości oraz dla zmiennego obciążenia. W artykule opisano układ prostownika 6T oraz zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych działania układu sterowania podczas rozładowywania magazynu.

Abstract. The paper presents research conducted towards an innovative system of increasing the amount of energy recovered from a kinetic (flywheel) energy storage based on a three-phase PM BLDC motor/generator (mogen) with a 6T thyristor rectifier in the energy recovery circuit. The task of the rectifier control system is to stabilize the output voltage for input voltage (output from the mogen) of variable amplitude and frequency and for varying load. The article describes the 6T rectifier and present simulations of the rectifier control system operation during the storage discharge. (Simulation research of motor/generator PM BLDC in kinetic energy magazine)

Słowa kluczowe: prostownik tyrystorowy 6T, kinetyczny magazyn energii, silnik/generacja PM BLDC

Keywords: 6T thyristor rectifier, flywheel energy storage, PM BLDC motor/generator

Wstęp

W związku z odchodzeniem od paliw kopalnych jednym z najważniejszych problemów technologicznych w energetyce jest magazynowanie dużych partii energii do dalszego wykorzystania jako energii elektrycznej. Przykładem może tu być wytwarzanie energii elektrycznej nocą przy zmniejszonym zapotrzebowaniu odbiorców. Aby producenci energii nie byli zmuszeni do znacznego ograniczania wytwarzanej mocy, co powoduje trudności techniczne i spadek efektywności. Zmagazynowaną energię nocą można pobierać z magazynów w ciągu dnia przy zwiększonym zapotrzebowaniu. Jako cele magazynowania energii elektrycznej należy wymienić [1]:

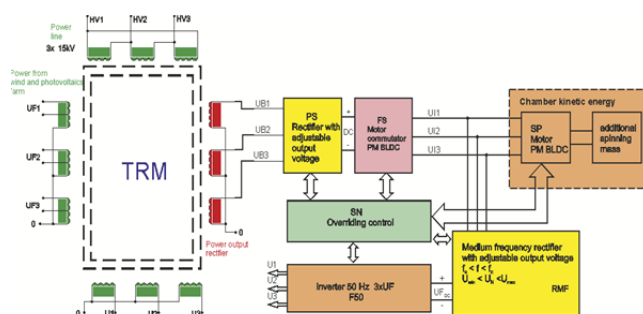
- poprawę efektywności wytwarzania energii, szczególnie w zakresie OZE,
- lepszą sprawność zarządzania systemami produkcji i przesyłania energii,
- zapewnienie szybkiego ładowania pojazdów elektrycznych,
- poprawę jakości energii,
- lepsze wykorzystanie odnawialnych źródeł energii,
- niezawodność zasilania (źródła dodatkowej energii, ilość akumulowanej energii),
- zapewnienie ciągłości dostaw energii elektrycznej.

Biorąc pod uwagę sprawność technologii magazynowania energii, jedną z najlepszych opcji stanowią kinetyczne magazyny energii (flywheel, FES).

W artykule opisywany jest magazyn, w którym energia gromadzona jest w formie energii kinetycznej masy wirującej rozpędzanej przez elektryczny trójfazowy silnik PM BLDC, czyli maszynę bezszczotkową prądu stałego z magnesami trwałymi. Rozpatrywany magazyn kinetyczny z silnikiem PM BLDC o konstrukcji typu *outrunner* jest rozwiązaniem opatentowanym w Polsce [2] i najkorzystniejszym spośród magazynów tego typu. Sprawność takiego systemu oscyluje w granicach 92-93%, a liczba cykli ładowanie-rozładowanie dochodzi do 10 milionów.

Odzyskiwanie energii z wykorzystaniem prostownika 6T

Schemat blokowy układu odzyskiwania energii z tyrystorowym prostownikiem 6T, zaprojektowanego dla omawianego magazynu kinetycznego, został przedstawiony na rysunku 1.

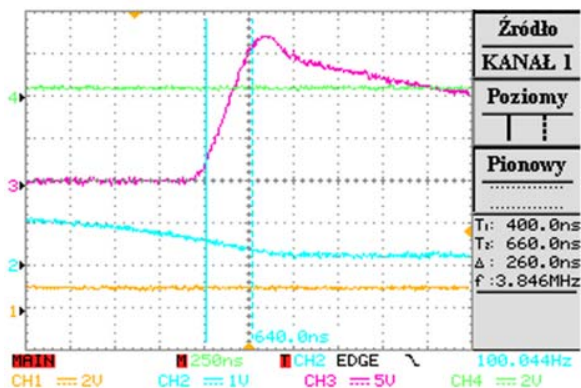


Rys. 1. Schemat blokowy magazynu w tym toru odzyskiwania energii przez prostownik RMF, na bazie silnika PM BLDC zastrzeżonego w patencie [2].

Podczas rozładowywania magazynu układ prostownika RMF przedstawiony na rysunku 1 jest zasilany trójfazowym napięciem trapezowym z mogenu, którego napięcie i częstotliwość zmniejszają się wraz ze spadkiem prędkości obrotowej. Napięcie wyjściowe jest regulowane poprzez zmianę kąta wysterowania szybkich tyrystorów mostka 6T. W związku z trudnymi warunkami pracy tyrystory są wyzwalane specjalnymi sterownikami bramkowymi spełniającymi warunek $di_g/dt < 300ns$ dla przyrostu prądu bramkowego i_g . Górny wykres (kanał 3) na rysunku 2 przedstawia przebieg impulsu bramkowego ze zboczem di_g/dt o czasie trwania 260 ns, zapewniający prawidłowe i bardzo szybkie załączenie całej struktury półprzewodnikowej tyrystora dla 300Hz.

Konfiguracja i specyficzne szczegóły pracy prostownika 6T oraz układy synchronizacji wyzwalania, zapewniające bardzo precyzyjne dopasowanie momentu przejścia sygnałów synchronizujących przez zero, zostały opatentowane. Zależności czasowe sygnałów synchronizacji są przedstawione na rysunku 3, gdzie kanały 1 i 2 (od góry) przedstawiają odpowiednio przebiegi napięcia i prądu, kanał 3 pokazuje sygnał synchronizujący z czujnika Halla dla jednej z faz napięcia wyjściowego z mogenu, a kanał 4 – napięcie międzyfazowe. W układzie istnieje też możliwość przesunięcia – w pewnym zakresie – rozmieszczenia czujników Halla, a w konsekwencji

opóźnienie lub przyspieszenie impulsów synchronizujących w stosunku do przebiegu napięciowego danej fazy.

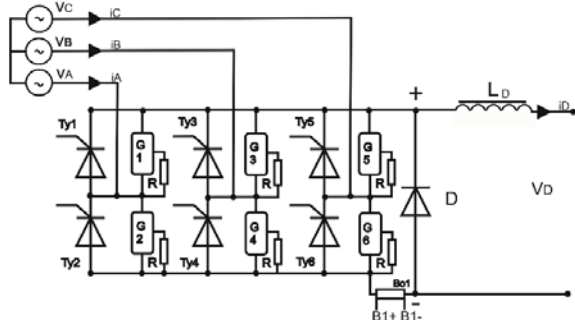


Rys. 2. Rzeczywista zmierzona wartość di_g/dt dla impulsu bramkowego 260ns [opracowanie własne]



Rys. 3. Przebiegi prądów i napięć o kształcie trapezowym w prostowniku RMF obwodu odzyskiwania energii [opracowanie własne]

Odpowiednie wystawianie prostownika RMF pracującego przy zmieniającym się napięciu wejściowym i częstotliwości w pełnym zakresie pracy tak reguluje przesunięciem impulsów bramkowych, aby utrzymywać na wyjściu stałe napięcie DC przy stałe zmieniającej się wartości prądu obciążenia jest problemem samym w sobie dość skomplikowanym. Dodatkowo należy wziąć pod uwagę wpływ dynamiki zastosowanego w magazynie energii kinetycznej bezwładnika (masy wirującej) na jakość regulacji.



Rys. 4. Struktura tyrystorowego mostka prostowniczego 6T wykorzystana w symulacjach [opracowanie własne].

Napięcie wyjściowe prostownika RMF (rysunek 4) z uwzględnieniem indukcyjności L_{out} po stronie wyjściowej jest związane z częstotliwością napięcia wejściowego [3]:

$$(1) \quad V_{out} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{in, l-l} \cos \alpha - 6f i_{out} L_{out}$$

gdzie: $V_{in, l-l}$ - napięcie wejściowe międzyfazowe mostka, i_{out} - prąd wyjściowy mostka, $\omega = 2\pi f$ - częstotliwość pracy mostka.

Badania symulacyjne

Celem badań symulacyjnych była analiza działania układu sterowania mostka 6T w obwodzie odzyskiwania energii podczas rozładowywania magazynu kinetycznego. Zadaniem układu sterowania polega na stabilizacji napięcia wyjściowego DC zasilającego rezystancyjne obciążenie, które może się zmieniać, poprzez zmianę kąta wyzwalania tyrystorów α . Podobny problem strategii sterowania rozładowywaniem magazynu kinetycznego, ale z mostkiem tranzystorowym 6T jest rozpatrywany w [4].

Przedstawione dalej wyniki pokazują w szczególności:

- 1) jak długo magazyn jest w stanie stabilizować wyjściowe napięcie DC V_{load} dla stałej mocy pobieranej przez obciążenie (czas zmiany kąta wyzwalania tyrystorów α od 60° do 0°) przy danej początkowej prędkości obrotowej masy wirującej ω_0 (czyli poziomie naładowania magazynu energii),
- 2) procent początkowej energii kinetycznej E_{0kin} przekształcaną na energię elektryczną E_{load} zasilającą obciążenie w okresie utrzymywania stałego napięcia wyjściowego,
- 3) właściwości dynamiczne zaproponowanej metody regulacji dla skokowej zmiany mocy obciążenia.

Symulacje zostały przeprowadzone w środowisku MATLAB/SIMULINK z wykorzystaniem bloków z biblioteki Simscape Electrical Toolbox [5]. Model blokowy układu odzyskiwania energii jest przedstawiony na rysunku 5. Część silnopiętowa składa się z silnika PM BLDC pracującego jako generator, mostka prostowniczego 6T oraz wyjściowego obwodu obciążenia. Oprócz tego na schemacie widoczny jest układ regulacji kąta wyzwalania z regulatorem PI, blokiem generowania liniowego przebiegu kąta elektrycznego ωt , którego nachylenie jest proporcjonalne do częstotliwości napięcia wejściowego, synchronizowany sygnałem z czujnika Halla, oraz blok generowania impulsów wyzwalających tyrystory mostka.

Silnik (mogen) BLDC jest opisany następującymi równaniami różniczkowymi [5,6,7]:

$$(2) \quad \frac{di_a}{dt} = \frac{1}{3L_s} [2v_{ab} + v_{bc} - 3R_s i_a + \lambda p \omega_m (-2\Phi'_a + \Phi'_b + \Phi'_c)]$$

$$(3) \quad \frac{di_b}{dt} = \frac{1}{3L_s} [-v_{ab} + v_{bc} - 3R_s i_b + \lambda p \omega_m (\Phi'_a - 2\Phi'_b + \Phi'_c)]$$

$$(4) \quad i_c = -(i_a + i_b)$$

$$(5) \quad T_e = \lambda p (\Phi'_a i_a + \Phi'_b i_b + \Phi'_c i_c)$$

gdzie: R_s - rezystancja uzwojeń wirnika, L_s - indukcyjność uzwojeń wirnika, i_a, i_b, i_c - prądy fazowe, $\Phi'_a, \Phi'_b, \Phi'_c$ - fazowe siły elektromotoryczne EMF o przebiegach trapezowych, w jednostkach p.u. względem amplitudy strumienia skojarzonego λ , v_{ab}, v_{bc} - napięcia międzyfazowe, ω_m - prędkość obrotowa wirnika (masy wirującej), λ - amplituda strumienia skojarzonego wytwarzanego przez magnesy stałe wirnika w fazach stojana, p - liczba par biegunów, T_e - moment elektromagnetyczny.

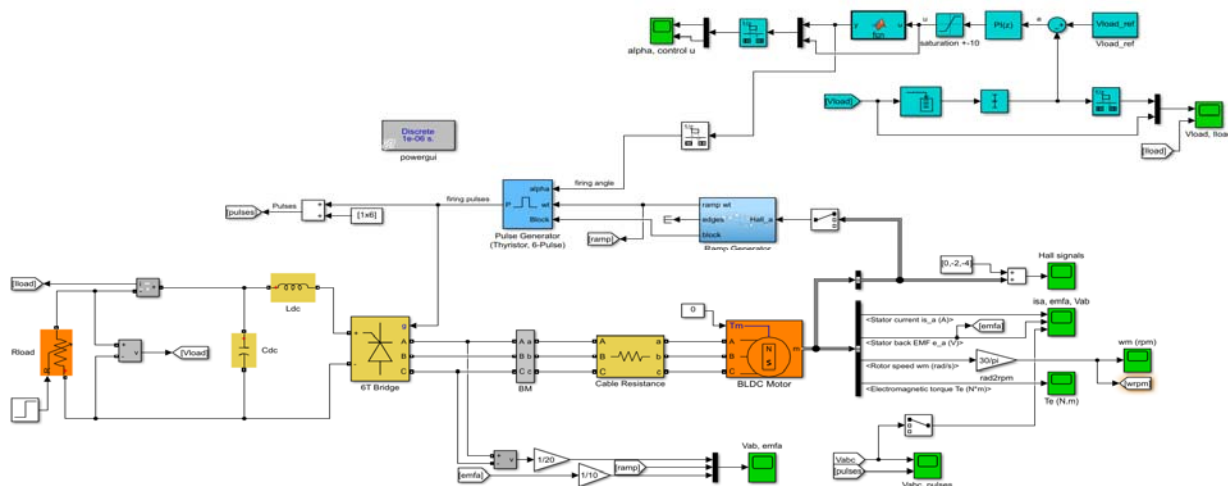
Symulacje przeprowadzono dla następujących wartości parametrów moga: $p = 1$, $R_s = 4,3 \cdot 10^{-3} \Omega$, $L_s = 69 \cdot 10^{-6} \text{ H}$, $\lambda = 0,69 \text{ V}\cdot\text{s}$, moment bezwładności wirnika *outrunner* z bezwładnikiem $J = 527,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, tarcie lepkie wirnika $B = 0,05 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$. Dla tyrystorów mostka 6T przyjęto następujące wartości parametrów: rezystancja obwodu snubbera $R_{snub} = 47 \Omega$, pojemność obwodu snubbera $C_s = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ F}$, rezystancja tyrystora w stanie przewodzenia $R_{on} = 0,001 \Omega$.

Indukcyjność i pojemność w obwodzie DC miały, następujące wartości: $L_{dc} = 10^{-3}$ H, $C_{dc} = 20,8 \cdot 10^{-3}$ F.

Symulacje cyklu rozładowania magazynu przeprowadzono dla określonej początkowej prędkości obrotowej ω_0 i wartości zadanej wyprostowanego napięcia obciążenia V_{load_ref} dobranej tak, aby początkowy kąt wyzwalania tyrystorów był równy 60° . W trakcie rozładowywania mogen zwalnia, co powoduje spadek amplitudy i częstotliwości wejściowego napięcia trójfazowego mostka. W celu zachowania stałego napięcia obciążenia V_{load} układ regulacji stopniowo zmniejsza kąt wyzwalania do zera.

Układ sterowania z regulatorem PI działa ze

sprężeniem zwrotnym od napięcia obciążenia i 50 razy na sekundę wyznacza potrzebny kąt wyzwalania α . Blok sygnału rampy kąta elektrycznego $\omega_m t$ generuje w zasadzie sygnał schodkowy przez okresowe (z okresem $T_{sc} = 20$ ms) zliczanie zboczy synchronizujących impulsów z czujnika Halla fazy α . Nachylenie zbocza dla kolejnego kroku regulacji, proporcjonalne do ω_m , jest wyznaczane na podstawie zliczenia zboczy w kroku poprzednim, co skutkuje jednokrokowym opóźnieniem sterowania. Ze względu na krótkie impulsy wyzwalające symulacje były przeprowadzane z fundamentalnym krokiem obliczeń równym $5 \mu s$.



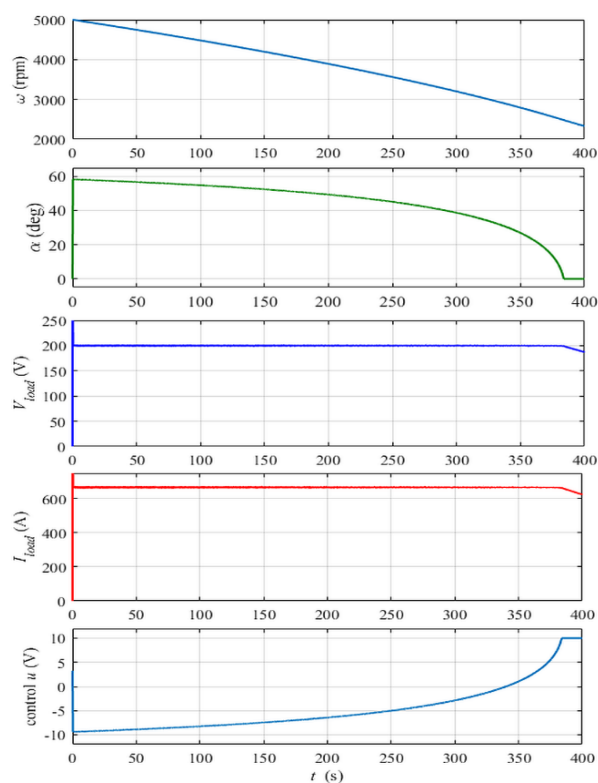
Rys. 5. Model SIMULINKa układu odzyskiwania energii z magazynu kinetycznego z mogenem BLDC, mostkiem prostowniczym 6T i obwodem obciążenia.

Wyniki symulacji dla $\omega_0 = 523,6$ rad/s, stałego obciążenia $R_{load} = 0,3 \Omega$ oraz zadanej napięcia obciążenia $V_{load_ref} = 200$ V są pokazane na rysunku 6. Napięcie obciążenia jest stabilizowane na zadanym poziomie przez $\tau \approx 380$ sekund, po czym zaczyna opadać. W okresie stabilizacji kąt wyzwalania zmienia się od 60° do 0° . Moc elektryczna obciążenia w tym okresie $P_{load} = V_{load}^2 / R_{load} \approx 133$ kW, a całkowita dostarczona energia elektryczna $E_{load} = P_{load} \tau \approx 14$ kWh, co stanowi około 70% początkowej energii kinetycznej magazynu $E_{0kin} = J\omega_0^2 / 2 \approx 20$ kWh.

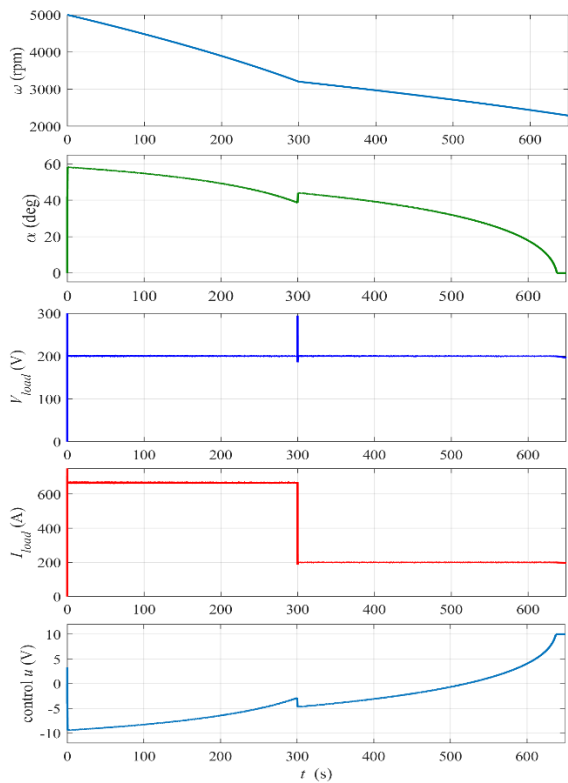
Rysunek 7 przedstawia cykl rozładowania dla skokowej zmiany mocy obciążenia ze 133 kW dla $R_{load} = 0,3 \Omega$ do 40 kW dla $R_{load} = 1 \Omega$ w chwili $t_{step} = 300$ s. Zmniejszenie obciążenia powoduje chwilowy impuls napięcia, spadek prądu obciążenia i spowolnienie zwalniania masy wirującej. Przebiegi napięcia i prądu obciążenia, kąta wyzwalania i sygnału sterującego regulatora PI w skali czasowej rozciągniętej wokół momentu zmiany obciążenia są pokazane na rysunku 8. Chwilowe oscylacje napięcia i prądu są spowodowane obecnością elementów RLC w obwodzie wyjściowym mostka. Czas ponownego ustalenia się napięcia na poziomie zadanym wynosi około 0,2 sekundy, a amplituda pulsacji napięcia wyprostowanego to około 2-3 V, co spełnia zakładane wymagania.

Wnioski

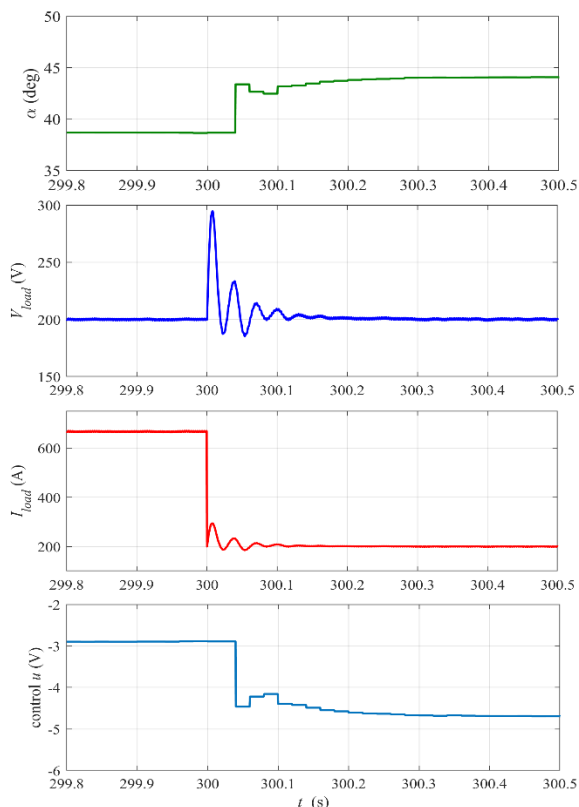
Przedstawione wyniki symulacji wskazują, że zaproponowany sposób stabilizacji napięcia wyjściowego mostka tyrystorowego w obwodzie odzyskiwania energii magazynu kinetycznego może stanowić proste i skuteczne rozwiązanie problemu. W przedstawionej wersji zadane napięcie obciążenia jest ustawiane "ręcznie" dla określonej prędkości obrotowej w celu uzyskania pełnego zakresu zmian kąta wyzwalania.



Rys. 6. Symulacja cyklu rozładowania magazynu kinetycznego dla $\omega_0 = 523,6$ rad/s, $R_{load} = 0,3 \Omega$ i napięcia zadanej $V_{load_ref} = 200$ V. Nastawy regulatora PI: $k_p = 0,03$, $k_I = 1$



Rys. 7. Symulacja cyklu rozładowania z $\omega_0 = 523,6$ rad/s i skokową zmianą obciążenia R_{load} od $0,3 \Omega$ do 1Ω . Napięcie zadane $V_{load_ref} = 200$ V, nastawy regulatora PI: $k_p = 0,03$, $k_I = 1$



Rys. 8. Przebiegi z rysunku 7 oraz sygnał sterujący w skali czasowej rozciągniętej wokół chwili skokowej zmiany obciążenia. Okres aktualizowania sygnału sterującego $T_{sc} = 20$ ms

Sam mostek tyrystorowy nie daje możliwości stabilizacji napięcia poza tym zakresem. Tym niemniej, nawet w tak prostym cyklu rozładowania można odzyskać około 70% zgromadzonej w magazynie energii kinetycznej, oczywiście ilość odzyskiwanej energii zależy od wartości napięcia wyjściowego i zmniejsza się wraz ze wzrostem tego napięcia. Przyjęty sposób synchronizacji z wykorzystaniem sygnałów hallotronowych pozwala na precyzyjne wyzwalanie nawet przy małych prędkościach obrotowych i niskim napięciu, ponieważ jakość i wielkość tych sygnałów nie jest zależna od częstotliwości i napięcia wejściowego mostka. Dalsze prace w tym zakresie będą kontynuowane w kierunku dalszego poszerzenia zakresu odzyskiwania zmagazynowanej energii oraz innych metod algorytmów sterowania mostkiem prostowniczym w torze odzyskiwania energii dla kinetycznych magazynów energii.

Autorzy: mgr inż. Patryk Gałuszkiewicz, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki, ul. J.H. Dąbrowskiego 69, 42-201 Częstochowa, e-mail: patryk.galuszkiewicz@pcz.pl;
mgr inż. Zbigniew Gałuszkiewicz, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki, ul. J.H. Dąbrowskiego 69, 42-201 Częstochowa, e-mail: zbigniew.galuszkiewicz@pcz.pl, MEGATECH Technology Sp. z o.o., ul. Powstańców Śląskich 4, 42-660 Kalety, e-mail: mttechnology@mttechnology.pl;
dr inż. Janusz Baran, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki, ul. J.H. Dąbrowskiego 69, 42-201 Częstochowa, e-mail: janusz.baran@pcz.pl.

LITERATURA

- [1] Całus D., Gałuszkiewicz Z., Gałuszkiewicz P., Porównanie systemów magazynowania energii elektrycznej, *ProEnergia – Możliwości i Horyzonty Ekoinnowacyjności – Energetyka Odnawialna i magazynowanie energii – Instytut Naukowo-Wydawniczy „Spatium”, Radom, 2016, 10-24*
- [2] Patent polski nr 225294, 2014
- [3] Rashid M.H., Ed., *Power Electronics Handbook*, 4th edition, Butterworth-Heinemann, USA, 2018
- [4] Zhang X., Yang J., An improved discharge control strategy with load current and rotor speed compensation for high-speed flywheel energy storage system. *Proc. 17th Int. Conf. on Electrical Machines and Systems*, Hangzhou, China, (2014), 318-324.
- [5] The Mathworks Inc., *Simscape Electrical. Reference*, R2022a; Natick, MA, USA, 2022
- [6] Bose B.K., *Power Electronics and Motor Drives. Advances and Trends*, 2nd edition, Academic Press, London, UK, 2021
- [7] Khan M.J. Iqbal M.T., Simplified modeling of rectifier-coupled brushless DC generators. *Proc. 4th Int. Conf. on Electrical and Computer Engineering*, Dhaka, Bangladesh, (2006), 349-352