



1. Tytuł projektu:

Systemy przetwarzania, przekształcania i użytkowania energii

2. Instytucja finansująca (nr umowy)

Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (porozumienie)

3. Okres realizacji

01.01.2021-31.12.2021

4. Dofinansowanie (w tym w 2021)

324.934,00

5. Partnerzy

-

6. Kierownik projektu

Prof. dr hab. inż. Lech Grzesiak

7. Zespół projektowy

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Kamiński

Dr hab. inż. Grzegorz Iwański, prof. uczelni

Dr hab. inż. Bartłomiej Ufnalski, prof. uczelni

Dr hab. inż. Arkadiusz Kaszewski, prof. uczelni

Dr inż. Adam Biernat

Dr inż. Gennadiy Dauksha

Dr inż. Andrzej Gałdecki

Dr inż. Michał Gierczyński

Dr inż. Domiik Górski

Dr inż. Monika Jakubowska

Dr inż. Marek Michalczuk

Dr inż. Remigiusz Olesiński



Dr inż. Piotr Pura

Dr inż. Jan Szczypior

Doc dr inż. Wojciech Urbański

Mgr inż. Tomasz Bałkowiec

Mgr inż. Grzegorz Dziechciaruk

Mgr inż. Krzysztof Jackiewicz

Mgr inż. Emil Kupiec

Mgr inż. Andrzej Straś

Mgr inż. Tomasz Miazga

Mgr inż. Rafał Jakubowski

Mgr inż. Sebastian Wodyk

Mgr inż. Łukasz Ordyszewski

Mgr inż. Stanisław Hajnrych

8. Cel projektu (max. 1000 znaków)

9. Streszczenie (max. 1 strona)

Zakład Napędu Elektrycznego 2020/2021

Prace statutowe Zakładu Napędu Elektrycznego skupiają się wokół energoelektronicznych układów przekształcania energii ze szczególnym uwzględnieniem układów napędowych. W 2020 roku oraz w pierwszej połowie 2021, oprócz realizacji szeregu projektów badawczych finansowanych m.in. przez NCBiR oraz IDUB, pracownicy i doktoranci Zakładu prowadzili prace w obszarze napędów trakcyjnych pojazdów elektrycznych, kaskadowej bezszczotkowej prądnicy indukcyjnej dwustronnie zasilanej, interfejsów sieciowych, filtrów RF EMI falowników, przekształtników DAB oraz modelowania ogniw



litowo-jonowych. Poniżej przedstawiamy tytuły, opisy oraz publikacje związane z wybranymi zrealizowanymi zadaniami.

Badania dot. modelowania i syntezy układu regulacji dla przekształtnika DC/DC w topologii podwójnego mostka aktywnego

Celem zadania była analiza stanów ustalonych i przejściowych przekształtnika o topologii DAB oraz zaproponowanie struktury i metod sterowania umożliwiających uzyskanie pożądanych właściwości regulacyjnych. W szczególności zaproponowano metodę analitycznego wyznaczania nastaw regulatorów oraz autorski algorytm kompensacji negatywnych zjawisk występujących w stanach przejściowych w transformatorze o podwyższonej częstotliwości pracy (40kHz). Opracowane zostały modele matematyczne układu - po wprowadzeniu założeń upraszczających opis - tak aby możliwa była synteza układu regulacji. Przygotowano modele symulacyjne układu z wykorzystaniem programu PLECS oraz przeprowadzono wszechstronne testy komputerowe. W celu weryfikacji proponowanych rozwiązań zaprojektowano i zbudowano model laboratoryjny. Na podstawie badań laboratoryjnych udało się potwierdzić poprawność zaproponowanych rozwiązań. Zadanie badawcze zostało zwieńczone redakcją pracy doktorskiej:

[1] Michał Gierczyński, „Analiza pracy przekształtnika DC/DC o topologii DAB z filtrem prądu oraz synteza układu regulacji w przypadku modulacji z pojedynczym przesunięciem fazowym”, praca doktorska, promotor: prof. dr hab. inż. Lech M. Grzesiak, obrona rozprawy odbyła się 16 grudnia 2020 roku, 12.01.2021 nadano stopień naukowy i przyznano wyróżnienie

Opracowanie metody projektowania przekształtnika DC/DC w topologii podwójnego mostka aktywnego

Do odpowiedniego zwymiarowania elementów przekształtnika potrzebne jest gruntowne zrozumienie zasady działania tego układu oraz zależności wartości prądu w poszczególnych jego elementach w całym obszarze pracy przekształtnika. Korzystnie jest zwymiarować parametry układu tak, aby ograniczyć wartości skuteczne i szczytowe prądu transformatora. Wartość szczytowa prądu transformatora ma wpływ na rozmiar dodatkowego dławika w obwodzie strony pierwotnej oraz maksymalny prąd drenu tranzystorów (czyli wybór ich klasy prądowej). Wartość skuteczna z kolei ma wpływ na przekrój przewodów transformatora i dławika, wielkość układu chłodzenia modułów mocy oraz wielkość strat przewodzenia w układzie. Zaproponowano metodę projektowania, która zapewnia ograniczenie poszczególnych wskaźników opisanych powyżej, na podstawie trójwymiarowych płaszczyzn obrazujących w sposób znormalizowany rozkład ich wartości w całym obszarze pracy urządzenia. Metodę tą opisano w artykule:

[2] Michał Gierczyński, Lech Grzesiak, Arkadiusz Kaszewski, Tomasz Bałkowiec, Krzysztof Jackiewicz, Tomasz Miazga, Andrzej Straś, "Projekt przekształtnika DC/DC w topologii podwójnego mostka aktywnego (DAB) dla układu laboratoryjnego do badania baterii litowo-jonowych.", Przegląd Elektrotechniczny, 97, ISSN 0033-2097, pp. 77-81, Luty 2021, 2, DOI: 10.15199/48.2021.02.19;



Badania dot. modelowania i wyznaczenia krzywej momentu dla napędów trakcyjnych z silnikami PMSM o wysokim stopniu nasycenia obwodu magnetycznego

Na podstawie danych dostępnych w przestrzeni publicznej zrekonstruowano model połowy maszyn trakcyjnych z samochodów BMW i3 oraz Toyota Prius. Na podstawie tych modeli wyznaczono nieliniowe płaszczyzny strumieni skojarzonych dla obydwu maszyn oraz wyznaczono krzywe momentu dla obydwu napędów. Następnie porównano otrzymane wyniki z wynikami otrzymanymi za pomocą modelu zlinearyzowanego. Celem tego zadania było zbadanie hipotezy, czy na wczesnym etapie projektowania napędu możliwe jest przybliżenie charakterystyk momentu za pomocą stosunkowo prostego modelu liniowego, pomimo iż wiadomo jest że maszyna ma silnie nieliniowe charakterystyki obwodu magnetycznego. Hipoteza ta została potwierdzona tylko częściowo, otóż przybliżenie to zapewnia akceptowalną dokładność tylko dla napędów o skończonej prędkości maksymalnej. Wyniki analizy dla silnika z BMW i3 opublikowano w artykule:

[3] Gierczyński, M.; Grzesiak, L.M. Comparative Analysis of the Steady-State Model Including Non-Linear Flux Linkage Surfaces and the Simplified Linearized Model when Applied to a Highly-Saturated Permanent Magnet Synchronous Machine—Evaluation Based on the Example of the BMW i3 Traction Motor. *Energies* **2021**, *14*, 2343. <https://doi.org/10.3390/en14092343>

Badania dot. pracy układu regulacji napięcia dla przekształtnika DC/DC w topologii podwójnego mostka aktywnego w nieliniowym zakresie pracy

Na podstawie wcześniejszych analiz stwierdzono, iż przy dużych obciążeniach przekształtnik DAB staje się nieliniowym obiektem regulacji. Jest to szczególnie widoczne w pobliżu obszarów granicznych przestrzeni punktów pracy układu, gdy regulatory pracują w stanie nasyczonego wyjścia. Wiąże się to ze znacznym pogorszeniem właściwości dynamicznych układu regulacji nastrojonego w oparciu o liniowy model obiektu regulacji, gdy układ pracuje w ww. obszarach. Z punktu widzenia aplikacji przemysłowych istotnym jest, aby układ regulacji był w stanie pracować w pełnym obszarze pracy wynikającym ze specyfikacji urządzenia. Celem tego zadania było zbadanie pracy przekształtnika w pełnym zakresie obszaru roboczego i odpowiednia modyfikacja układu regulacji, tak aby umożliwić tą pracę przy zachowaniu odpowiednich właściwości dynamicznych układu. Osiągnięto to poprzez odpowiednie przestrojenie regulatora napięcia z wykorzystaniem metod opracowanych uprzednio dla liniowego obszaru pracy przekształtnika. Otrzymane wyniki zostaną opisane w artykule pt., „Cascaded Voltage and Current Control for a Dual Active Bridge Converter with Current Filters”, który jest obecnie w trakcie redakcji.

Redukcja tętnień kaskadowej bezszczotkowej prądnicy dwustronnie zasilanej oraz badanie stanów przyłączeniowych generatorów indukcyjnych

Prace prowadzone w obszarze sieciowej i wyspowej pracy generatorowej napędu elektrycznego dotyczyły eliminacji tętnień momentu maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej. W warunkach pracy z asymetrycznym napięciem sieci elektroenergetycznej badano strukturę kaskadowej bezszczotkowej prądnicy dwustronnie zasilanej. Opracowane zostało sterowanie zapewniające znaczącą redukcję oscylacji momentu elektromagnetycznego wywołanych składową przeciwną



strumienia maszyny. Wykonano badania symulacyjne i eksperymentalne potwierdzające poprawność metody. W przypadku pracy wyspowej prądnicy analizowany był układ prądnicy dwustronnie zasilanej pracującej jako generator napięcia stałego. Układ prądnicy wyposażony jest w prostownik diodowy po stronie stojana, który jako obciążenie nieliniowe wywołuje harmoniczne prądu stojana a co za tym idzie ma wpływ na tętnienia momentu elektromagnetycznego maszyny. Zaproponowano i przetestowano kilka metod bezpośredniego sterowania momentem oraz dokonano porównania z klasyczną metodą sterowania połowo-zorientowanego wskazując, że akurat w tym konkretnym układzie wytwarzania energii przewaga sterowania bezpośredniego momentem nad sterowaniem połowo-zorientowanym jest bardzo wyraźna. Innym rozwiązaniem analizowanym w kontekście generatora prądu stałego było wykorzystanie maszyny dwustronnie zasilanej o sześciofazowym stojanie. Wprowadzenie rozwiązania dwóch trójfazowych sekcji stojana przesuniętych o 30 stopni powoduje, że zastosowanie dwóch prostowników sześciopulsowych daje efekty prostownika dwunastopulsowego, którego cechą charakterystyczną jest znaczne zmniejszenie niekorzystnego oddziaływania na maszynę, a w konsekwencji eliminację oscylacji momentu o częstotliwości 6k, gdzie k jest liczbą nieparzystą.

Badano też przyłączenie do sieci generatora indukcyjnego klatkowego po uprzednim jego wzbudzeniu. Przyłączenie do sieci nastąpiło w chwili zgodności wektorów napięcia stojana generatora i sieci, tj. zgodności amplitud, kolejności faz i faz obu napięć, a braku zgodności częstotliwości. Badano wpływ różnicy częstotliwości generatora i sieci oraz różnicy w fazach obu napięć (np. opóźnienie stycznika, itp.) na stan przejściowy.

[4] G. Dauksha, G. Iwanski, "Indirect Torque Control of a Cascaded Brushless Doubly-Fed Induction Generator Operating with Unbalanced Power Grid," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 35, no. 2, pp. 1065-1077, 2020

[5] P. Maciejewski, G. Iwański, „Six-Phase Doubly Fed Induction Machine Based Standalone DC Voltage Generator”, Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences, vol. 69, no. 1, pp. 1-11, 2021

[6] P. Maciejewski, G. Iwański, „Study on Direct Torque Control Methods of a Doubly Fed Induction Machine Working as a Stand-Alone DC Voltage Generator, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 99, pp. 1-10, 2021

[7] Dominik A. Górski i Grzegorz Iwański, "Asynchronous Grid Connection of a Cage Induction Generator Excited by a Power Electronic Converter", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 2021

Optymalizacja topologii filtru RF EMI dedykowanego dla czterogałęziowego przekształtnika napięcia

W ramach zadania badawczego przeprowadzono analizę zakłóceń przewodzonych w czterogałęziowym przekształtniku napięcia SiC i wyjściowym filtrem LC. Przekształtnik ten stanowi stopień wyjściowy autonomicznego układu wytwarzania energii, którego czwarta aktywna gałąź jest połączona z przewodem ochronnym PE. W ramach badań przeprowadzono pomiary zakłóceń przewodzonych w układzie bez filtra. Następnie po przeprowadzeniu analizy numerycznej



zaproprowano topologię filtra RF EMI dla czterogałęziowego falownika napięcia SiC. Szczegółowy opis wyników pracy badawczej zamieszczono w publikacji

[8] Arkadiusz Kaszewski, Lech Grzesiak, Jan Sroka, „Topology Optimization of RF EMI Filter Dedicated to a 3-Phase 4-Leg VSI with Sinusoidal Output Voltage Based on SiC Power Electronic Devices” (International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU) 2020).

Modelowanie dynamiki ogniw litowo-jonowych

Przeprowadzono badania dotyczące modelowania ogniw litowo-jonowych. Zaproprowano autorski sposób modelowania dynamiki takiego ogniwa wykorzystujący model neuronowy. Wyniki przeprowadzonych badań opublikowano w

[9] G. Dziechciaruk, M. Michalczuk, B. Ufnalski, L.M. Grzesiak, "Dynamic model of a lithium-ion cell using an artificial feedforward neural network with dynamical signal preprocessing", Journal of Energy Storage, Volume 31, October 2020

10. Dotychczasowe osiągnięcia (max 2000 wyrazów)

11. Publikacje

12. Materiały graficzne