

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko

Marek Tomasz Jasiński

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania, tytułu rozprawy doktorskiej i nazwisk osób, które pełniły funkcje promotora i recenzentów

Dyplom uzyskania stopnia doktora nauk technicznych w zakresie elektrotechniki za rozprawę doktorską w języku angielskim:

"*Direct Power and Torque Control of AC-DC-AC Converter-Fed Induction Motor Drives*", rok 2005, Warszawa, stron 154, *Politechnika Warszawska*, **(wyróżniona w konkursie ABB w edycji 2006/2007)**

Promotor: prof. dr hab. inż. Marian P. Kaźmierkowski,

Recenzenci: prof. nzw. dr hab. inż. Andrzej Sikorski, prof. dr hab. inż. Roman Barlik.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Od 2008 roku do chwili obecnej zatrudniony w *Instytucie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej – PW-ISEP* na stanowisku adiunkta.

W 2009 roku przez 3 miesiące zatrudniony w *Aalborg University, Dania* jako naukowiec wizytujący w ramach projektu *Vestas Power Program*.

W latach 2006-2008 pracował w *PW-ISEP* na stanowisku konstruktora.

W latach 1999-2000 był asystentem stażystą w *PW-ISEP*.

4. Wskazanie osiągnięcia naukowego, uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiącego znaczny wkład w rozwój dyscypliny elektrotechniki¹⁾ zgodnie z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki (wg pkt. 1.2 niniejszych Zasad prowadzenia postępowań habilitacyjnych)

a) tytuł osiągnięcia naukowego (zgodnie z wnioskiem),

Cykl 12 publikacji powiązanych tematycznie:

„Sterowanie przekształtników energoelektronicznych służących do integracji rozproszonych źródeł energii z siecią elektroenergetyczną i do poprawy jakości energii elektrycznej”

b) wykaz prac naukowych (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, nazwa czasopisma, tom, strony)ⁱⁱ⁾ dokumentujących osiągnięcie (osiągnięcia) naukowe, stanowiące podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego,

- [12] N. Müller, S. Kouro, M. Malinowski, C. A. Rojas, **M. Jasinski** and G. Estay, "Medium-Voltage Power Converter Interface for Multigenerator Marine Energy Conversion Systems," in **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 64, no. 2, pp. 1061-1070, Feb. 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2615276.

(IF= 7.168; pkt. wg MNiSW: 50; cytowania: wg WoS= 0, wg Scopus= 0, wg Google Scholar= 0).

*(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu podstawowych założeń do układu odprowadzania energii z elektrowni na fale morskie (Rys.2-5); analizie przeprowadzonych badań symulacyjnych i laboratoryjnych (Rys.8-16); konsultacji i weryfikacji zawartości merytorycznej całości artykułu oraz opracowaniu i korekcie tekstu. **Mój udział procentowy szacuję na: 25%**).*

- [11] **M. Jasinski**, P. Majtczak and A. Malinowski, "Fuzzy logic in decision support system as a simple Human/Internet of Things interface for shunt active power filter", *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. Volume 64, Issue 4, Pages 877–886, ISSN (Online) 2300-1917, doi: <https://doi.org/10.1515/bpasts-2016-0096>, December 2016.

(IF= 1.156 pkt. wg MNiSW: 20; cytowania: wg WoS= 0, wg Scopus= 0, wg Google Scholar= 0)

*(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu warstwy logiki rozmytej oraz systemu wspomagającego decyzje – DSS do metody sterowania RDPC-SVM; opracowaniu planu i struktury artykułu; opracowaniu tekstu, rysunków 1-3 i ich korekcie (Rys. 4-10); opracowaniu planu badań; opracowaniu założeń oraz analizie i weryfikacji wyników badań zilustrowanych na rysunkach 12-14. **Mój udział procentowy szacuję na: 70%**).*

- [10] K. Antoniewicz, **M. Jasinski**, M. P. Kazmierkowski and M. Malinowski, "Model Predictive Control for Three-Level Four-Leg Flying Capacitor Converter Operating as Shunt Active Power Filter," in **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 63, no. 8, pp. 5255-5262, Aug. 2016. doi: 10.1109/TIE.2016.2536584.

(IF= 7.168; pkt. wg MNiSW: 50; cytowania: wg WoS= 1, wg Scopus= 1, wg Google Scholar= 5)

*(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu planu badań i struktury artykułu, zdefiniowaniu założeń do modelu symulacyjnego; analizie i weryfikacji wyników badań zilustrowanych na rysunkach 6 i 7; kierowaniu rozbudową stanowiska laboratoryjnego i badaniami laboratoryjnymi; opracowaniu wymagań dla funkcji kosztu; pisaniu i korekcie tekstu oraz kierowaniu projektem naukowym obejmującym badania opisane w tej pracy. **Mój udział procentowy szacuję na: 40%**).*

- [9] K. Antoniewicz, **M. Jasiński**, S. Styński, „Flying Capacitor Converter as a wind turbine interface – modulation and MPPT issues”, *Przegląd elektrotechniczny*, R. 88 nr 12a/2012, pp. 23-29.

(IF= 0.244; pkt. wg MNiSW: 14; cytowania: wg WoS= 3, wg Scopus= 0, wg Google Scholar= 0)

*(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu planu badań; wyborze metody sterowania 3-poziomowego przekształtnika AC-DC-AC składającego się z przekształtnika: z diodami poziomującymi NPC oraz z kondensatorami o zmiennym potencjale FCC; opracowaniu planu artykułu; analizie wyników badań oryginalnego sterowania uwzględniającego zależności pomiędzy algorytmem śledzenia punktu mocy maksymalnej MPPT i sprzężenia od mocy czynnej „w przód” APFF (Rys. 1); zdefiniowaniu założeń i kierowaniu rozbudową stanowiska laboratoryjnego; analizie wyników badań laboratoryjnych (Rys. 9-14); kierowaniu projektem naukowym obejmującym badania opisane w tej pozycji. **Mój udział procentowy szacuję na: 30%**).*

- [8] S. Piasecki, **M. Jasiński**, "Aktywny przekształtnik sieciowy dedykowany dla źródeł rozproszonych z funkcją kompensacji wyższych harmonicznych" (*ang. Grid connected converter with harmonics compensation functionality for distributed systems*), *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 2012, nr 12b, str.279-283.

(IF= 0.244; pkt. wg MNiSW: 14; cytowania: wg WoS= 0, wg Scopus= 0, wg Google Scholar= 0)

(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu planu artykułu, opracowaniu – zaprojektowanej pod kątem OZE - nowej metody sterowania RDPC-SVM (Rys.2); opracowaniu oryginalnych modeli symulacyjnych, analizie wyników badań symulacyjnych (Rys. 5-6); opracowaniu i analizie badań laboratoryjnych z wykorzystaniem platformy dSPACE i przekształtników 2-poziomowych 5 kW (Rys. 7-9); weryfikacji zawartości merytorycznej artykułu i sformułowaniu wniosków; kierowaniu projektem naukowym obejmującym badania opisane w tej pozycji. Mój udział procentowy szacuję na: 50%).

- [7] P. Zielonka, **M. Jasiński**, M. Bobrowska-Rafał, A. Sikorski, „Sterowanie przekształtnika sieciowego AC-DC podczas zapadów napięcia w sieci elektroenergetycznej” (*ang. Control of AC-DC converter when voltage dips in supply line occurs*), *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 2011, nr.6, str. 79-84.

(IF= 0.244; pkt. wg MNiSW: 14; cytowania: wg WoS= 0, wg Scopus= 0, wg Google Scholar= 0)

(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu struktury artykułu i planu badań; opracowaniu algorytmu sterowania DPTC-SVM uodpornionego na zapady i zaniki napięcia sieci; kierowaniu budową stanowiska laboratoryjnego; opracowaniu założeń oraz kierowaniu badaniami przedstawionymi w artykule; analizie wyników badań (Rys. 9-13); korekcie tekstu i rysunków 2-13; kierowaniu projektem naukowym, w ramach którego przeprowadzono opisane prace. Mój udział procentowy szacuję na: 40%).

- [6] M. P. Kazmierkowski, **M. Jasinski** and G. Wrona, "DSP-Based Control of Grid-Connected Power Converters Operating Under Grid Distortions," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 2, pp. 204-211, May 2011, doi: 10.1109/TII.2011.2134856.

(IF= 2.99; pkt. wg MNiSW: 45; cytowania: wg WoS= 105, wg Scopus= 124, wg Google Scholar= 153)

(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu nowego algorytmu sterowania dla sprzęgu energoelektronicznego bazującego na przekształtniku AC-DC do zastosowań w rozproszonych źródłach energii (Rys. 1-8) na potrzeby modelu symulacyjnego i laboratoryjnego; kierowaniu budową stanowiska laboratoryjnego i przeprowadzeniu badań w oparciu o 2-poziomowe przekształtniki sterowane procesorami DSP stało i zmiennoprzecinkowymi z rodziny Piccolo i Delfino (Rys. 9, Tab. 1); konsultacji treści rysunków (Rys. 10, 11); opracowaniu planu badań oraz weryfikacji wyników (Rys. 12-13); opracowaniu struktury artykułu; opracowaniu struktury modeli symulacyjnych, opracowaniu stanu wiedzy na podstawie bieżącej literatury; analizie uzyskanych wyników i sformułowaniu wniosków oraz wyborze docelowej jednostki DSP (Tab. II). Mój udział procentowy szacuję na: 40%).

- [5] G. Wrona, **M. Jasiński**, M. P. Kaźmierkowski, M. Bobrowska-Rafał, M. Korzeniewski, „Procesory zmiennoprzecinkowe serii TMS320F28xx w systemach sterowania przekształtników dla energetyki odnawialnej”, (*ang. "Floating Point DSP TMS320F28xx in control systems for Renewable Energy Sources RES"*), *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 87, issue.6, pp. 73-78, 2011.

(IF= 0.244; pkt. wg MNiSW: 14; cytowania: wg WoS= 0, wg Scopus= 1, wg Google Scholar= 2)

(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu struktury artykułu, analizie i wyborze jednostki DSP, zdefiniowaniu wymagań oraz kierowaniu budową modelu symulacyjnego i stanowiska laboratoryjnego (2-poziomowe przekształtniki 3kW sterowane za pomocą DSP TMSF28335) (Rys. 10); kierowaniu przeprowadzeniem badań symulacyjnych i laboratoryjnych; opracowaniu założeń, kryteriów oraz analizie wyników badań (Rys. 11-13); korekcie tekstu i rysunków (Rys. 1-3 oraz Rys. 6-9); kierowaniu projektem naukowym obejmującym zaprezentowane badania. Mój udział procentowy szacuję na: 30%).

- [4] S. Piasecki, **M. Jasiński**, K. Rafał, M. Korzeniewski, A. Milicua, „Higher Harmonics Compensation in Grid-Connected PWM Converters for Renewable Energy Interface and Active Filtering”, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 87, issue. 6, pp. 85-90, 2011.

(IF= 0.244; pkt. wg MNiSW: 14; cytowania: wg WoS= 4, wg Scopus= 7, wg Google Scholar= 11)

(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu planu i struktury artykułu; opracowaniu struktury optymalizowanego pod kątem odnawialnych źródeł energii algorytmu sterowania DPC-SVM z modułem kompensacji wyższych harmonicznych; opracowaniu i budowie struktury algorytmu modelu symulacyjnego oraz laboratoryjnego na platformę dSPACE; opracowaniu założeń oraz analizie wyników badań (przekształtniki 2-poziomowe 5 kW oraz

7,5 kW); opracowaniu planu i kierowanie badaniami przedstawionymi w artykule (Rys. 7-10, 15); korekcie tekstu i rysunków 3-10; kierowaniu rozbudową stanowiska laboratoryjnego (Rys. 14); kierowaniu projektem naukowym obejmującym badania opisane w tej pracy. **Mój udział procentowy szacuję na: 30%**).

- [3] S. Piasecki, **M. Jasiński**, A. Milicua, "Brief view on control of grid-interfacing AC-DC-AC converter and active filter under unbalanced and distorted voltage conditions", *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 30 issue: 1, pp.351 - 373, 2011, doi: <http://dx.doi.org/10.1108/03321641111091601>.

(IF= 0.301; pkt. wg MNiSW: 15; cytowania: wg WoS= 9, wg Scopus= 10, wg Google Scholar= 13)

*(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu struktury artykułu i jego korekcie; sprawdzeniu i korekcie rysunków 4-14; opracowaniu algorytmu bezpośredniego sterowania mocą i momentem maszyny z dodatkowymi modułami kompensacji wyższych harmonicznych oraz zapadów napięcia przekształtnikiem AC-DC-AC (Rys. 6), opracowaniu założeń zgodnych z rzeczywistymi, panującymi w docelowym miejscu cumowania elektrowni na fale morskie oraz analizie i weryfikacji wyników badań symulacyjnych i laboratoryjnych (Rys. 19-23) pod kątem zgodności z przyjętymi założeniami i wymaganiami; opracowaniu planu i harmonogramu oraz kierowaniu badaniami metod sterowania przekształtnikiem AC-DC-AC; kierowaniu pracami przy rozbudowie modeli symulacyjnych oraz stanowiska laboratoryjnego; krytycznej ocenie uzyskanych wyników i zdefiniowaniu kierunku rozwoju opracowanej metody sterowania. **Mój udział procentowy szacuję na: 45%**).*

- [2] G. Spagnuolo, G. Petrone, S.V. Araujo, C. Cecati, E. Friis-Madsen, E. Gubia, D. Hissel, **M. Jasinski**, W. Knapp, M. Liserre, P. Rodriguez, R. Teodorescu, P. Zacharias, "Renewable Energy Operation and Conversion Schemes: A Summary of Discussions During the Seminar on Renewable Energy Systems," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 38-51, March 2010, doi: 10.1109/MIE.2010.935863.

(IF= 1.844; pkt. wg MNiSW: 45; cytowania: wg WoS= 56, wg Scopus= 72, wg Google Scholar= 95).

*(Mój wkład w powstanie tego artykułu polegał na: opracowaniu i podsumowaniu rozwiązania zaproponowanego w ramach projektu Wave Dragon MW (rys. 11-13 oraz Tabela 1); wyłonieniu w drodze badań symulacyjnych i laboratoryjnych topologii i metod ich sterowania (spełniającej wszystkie założenia i ograniczenia projektowe) (Rys.12) części energoelektronicznej układu odprowadzania energii z elektrowni na fale morskie; opracowaniu nowego stanowiska laboratoryjnego umożliwiającego emulację pracy z odkształconym i niesymetrycznym napięciem sieci przy podwyższonej impedancji w punkcie przyłączenia - PCC; przygotowaniu, opracowaniu oraz korekcie tekstu rozdziału „Wave Dragon MW Offshore Wave Energy Converter” i rysunków 11-13; przeprowadzeniu badań porównawczych zaproponowanego sterowania trzema rodzajami maszyn i zestawieniu wyników w Tabeli 1; wyborze prądnicy spełniającej założenia projektowe; weryfikacji i korekcie artykułu; Zaproponowaniu autorskiej metody sterowania uwzględniającej charakterystykę turbiny, tryb pracy przekształtnika sieciowego - GC w sprzężeniu pomiędzy sterowaniem przekształtnika GC i przekształtnika maszynowego - MC (Rys. 13). **Mój udział procentowy szacuję na: 15%**).*

- [1] M. P. Kaźmierkowski, **M. Jasinski**, Hans Ch. Sorensen, „Ocean Waves Energy Converter - Wave Dragon MW”, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, vol. 84 issue: pp. 8-13, 2008.

(IF_{JCR2011}= 0.244; pkt. wg MNiSW: 14; cytowania: wg Web of Science (WoS)= 1, wg Scopus= 3, wg Google Scholar= 7).

*(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu stanu wiedzy w temacie pozyskiwania energii z fal morskich oraz analitycznym opisie zjawiska, opracowaniu koncepcji części energoelektronicznej układu odprowadzania energii (ang. Power Take Off - PTO); opracowaniu modeli symulacyjnych i stanowiska laboratoryjnego modelującego elektrownię Wave Dragon MW; napisaniu i korekcie tekstu artykułu; analizie uzyskanych wyników badań; opracowaniu planu i zakresu badań w projekcie; przeprowadzeniu badań porównawczych wybranych topologii przekształtników AC-DC-AC oraz maszyn elektrycznych. **Mój udział procentowy szacuję na: 90%**).*

Sumaryczne podsumowanie współczynników dokumentujących osiągnięcie :

<i>Dane cyklu 12 publikacji powiązanych tematycznie:</i>	
<i>Sumaryczny Impact Factor (IF)</i>	22.091
<i>Suma punktów MNiSzW</i>	309
<i>Liczba cytowań Web of Science (WoS)</i>	190
<i>Liczba cytowań Web of Science (WoS) - bez autocytowań</i>	184
<i>Liczba cytowań Scopus</i>	218
<i>Liczba cytowań Google Scholar</i>	286
<i>Sumaryczny udział procentowy:</i>	42.08%
<i>Indeks Hirsha</i>	5 (7 dla wszystkich publikacji kandydata od roku 2006)

c) omówienie celu naukowego w/w prac i osiągniętych wyników, wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Wstęp

Celem naukowym w/w prac było opracowanie metod **sterowania przekształtników energoelektronicznych służących do integracji rozproszonych źródeł energii z siecią elektroenergetyczną i do poprawy jakości energii elektrycznej** w punkcie przyłączenia PCC ze szczególnym uwzględnieniem odnawialnych źródeł energii OZE [1] – [3], [12] oraz ich rozwój i implementacja w tanim *mikroprocesorze sygnałowym DSP* umożliwiając wdrożenie do produkcji [5] – [7]. Ponieważ temat jest stosunkowo nowy i dynamicznie się rozwija (głównie rozwój technik obliczeniowych i półprzewodników mocy, stwarza możliwości, które 10 lat temu były nie do osiągnięcia). Wnioskodawca prowadzi prace nad nowymi rozwiązaniami wymagającymi znacznie większych mocy obliczeniowych mikroprocesorów tj. sterowanie predykcyjne [10] oraz wymagającymi rozbudowanej komunikacji w ramach Internetu rzeczy *IoT*, *Internetu wszystkiego IoE*¹ oraz *Enernetu*² [11].

Na osiągnięcie wnioskodawcy składa się, cykl 12 publikacji na temat opracowania i przygotowania do wdrożenia sterowania przekształtników AC-DC oraz AC-DC-AC w różnych topologiach: dwu i trójpoziomowych z *diodami poziomującymi NPC* oraz z *kondensatorami o zmiennym potencjale FCC*.

¹ E. de Matos, L. A. Amaral, F. Hessel, "Context-Aware Systems: Technologies And Challenges In Internet Of Everything Environments", 1-25, DOI: 10.1007/978-3-319-50758-3_1, ISBN: 978-3-319-50756-9 (Print) - <https://www.researchgate.net/publication/312417790>.

² S. E. Collier, "The Emerging Enernet: Convergence of the Smart Grid with the Internet of Things," in IEEE Industry Applications Magazine, vol. 23, no. 2, pp. 12-16, March-April 2017. doi: 10.1109/MIAS.2016.2600737

Oryginalność opracowanej, modułowej metody sterowania polega na uwzględnieniu większości czynników mających istotne znaczenie dla prawidłowej i niezawodnej pracy *rozproszonych źródeł energii elektrycznej DES*. Opracowane modułowe sterowanie cechują następujące właściwości:

- odporność na zapady napięcia w *PCC*,
- kompensacja wyższych harmonicznych prądu w *PCC*,
- estymacja impedancji sieci w *PCC* i możliwość pracy w warunkach podwyższonej impedancji,
- możliwość kompensacji wyższych harmonicznych prądu nieliniowych odbiorników połączonych równoległe do *przekształtnika sieciowego GC* – funkcja aktywnej filtracji,
- uwzględnienie charakterystyki *aktywnego obciążenia AL* w sterowaniu *przekształtnikiem maszynowym MC* i *sieciowym GC*,
- adaptacyjne sprzężenie „w przód” pomiędzy przekształtnikami *GC* i *MC* w zależności od trybu pracy: sieciowej lub autonomicznej,
- wyposażenie w *system wspomagania decyzji DSS* ułatwiający komunikację z użytkownikiem,
- modułowy charakter pozwalający, w stosunkowo prosty sposób na dostosowanie do wymagań danej aplikacji, lub zmodernizowanie poszczególnych modułów algorytmu sterowania.

Wnioskodawca opracował metodę sterowania sprzęciem ogólnie pojętych rozproszonych źródeł energii (np. aktywnych obciążeń czy *OZE*). Nowość polega na tym, iż opracowane sterowanie, może zawierać wszystkie wymienione powyżej zagadnienia oraz z sukcesem może być wykorzystane w typoszeregach z dwu lub trójpoziomowymi przekształtnikami *AC-DC-AC*, uwzględniając przy tym charakterystykę źródła energii i kierunek przepływu energii, czy tryb pracy sieciowej i autonomicznej (**rozwiązanie to opatentowano**: „*Układ sterowania przekształtnikiem AC-DC-AC*”, PL401702-A1, PAT.223775, 2014).

Opracowana metoda sterowania pozwoliła na stabilną i niezawodną pracę dwukierunkowego, aktywnego przekształtnika *AC-DC*. Ponadto, jej modułowa konstrukcja daje możliwość stosunkowo prostej rekonfiguracji, rozbudowy i dostosowania do specyficznych potrzeb jakie cechują poszczególne aplikacje np. *OZE*, napędy w przemyśle górniczym, zasilacze komór plazmowych stosowanych w przemyśle półprzewodnikowym oraz równoległe filtry aktywne (**rozwiązanie to opatentowano**: „*Układ sterowania sieciowym przekształtnikiem AC-DC z dwukierunkowym przesyłem energii*”, PL410949-A1, PAT.226667, 2016).

Z sukcesem opracowano, rozwinięto i zweryfikowano pracę poszczególnych modułów układu sterowania z najbardziej popularnymi metodami sterowania takimi jak: *sterowanie napięciowo zorientowane VOC*, *bezpośrednie sterowanie mocą z modulatorem wektorowym DPC-SVM* (dla przekształtników *GC*); *sterowanie strumieniowo zorientowane FOC*, *bezpośrednie sterowanie momentem z modulatorem wektorowym DTC-SVM* (dla przekształtników *MC*) czy dla 2 lub

3 poziomowych przekształtników AC-DC-AC oraz AC-DC współpracujących z dowolnym, rozproszonym źródłem energii elektrycznej.

Powyższe zagadnienia wnioskodawca zweryfikował opracowując modele analityczne oraz badając symulacyjnie i eksperymentalnie poszczególne rozwiązania. W miarę upływu lat opracowano drugą wersję algorytmu sterowania eliminując wady wersji pierwszej i znacznie poprawiając parametry układu przekształtnikowego. Do prac symulacyjnych wykorzystano specjalistyczne narzędzia *Matlab* i *Saber*, dające możliwość bardzo dokładnego odwzorowania obiektów rzeczywistych. Natomiast implementację laboratoryjną, mając na uwadze konieczność wdrożenia do produkcji seryjnej, podzielono na dwa etapy: 1 etap prac z wykorzystaniem platformy *dSPACE* (jednostka dająca możliwość szybkiej weryfikacji algorytmu, lecz nienadająca się do produkcji seryjnej) – wstępne uruchomienie i usunięcie problemów; 2 etap procesory stało i zmiennoprzecinkowe *DSP* (stosowane w produkcji seryjnej, lecz nie tak wygodne w warunkach badawczych) – czasochłonne dopracowanie szczegółów i kodu algorytmu sterowania. Tak zaplanowany proces badawczy jest wykorzystywany przez wnioskodawcę również obecnie. Daje on bardzo dobre rezultaty w praktyce.

Zagadnienie pozyskiwania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych habilitant podjął na początku roku 2006 w ramach *VI Programu Ramowego Unii Europejskiej*, któremu poświęcono pozycje [1] – [3], [12] z wymienionych prac dokumentujących osiągnięcie naukowe wnioskodawcy. Projekt był realizowany przez konsorcjum międzynarodowe w skład, którego wchodził *Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej PW-ISEP*. Już wtedy wnioskodawca rozpoczął pracę nad sposobem przekształcania, sterowania przepływem oraz doprowadzenia energii elektrycznej do sieci elektroenergetycznej. Ze względu na brak podobnych badań w literaturze dotyczących płynących elektrowni pozyskujących energię elektryczną z fal morskich wymagało to dogłębnej analizy. Ograniczenie mocy w *PCC*, w *Walli* (docelowym miejscu luźno-cumowanej elektrowni) wynosiło ok. 200 kVA podczas gdy moc znamionowa elektrowni *Wave Dragon MW* planowana była pomiędzy 4 a 7 MW. Ograniczenie to wynikało z podwyższonej impedancji sieci w *PCC*. Większość źródeł energii rozproszonej powinna brać ten czynnik pod uwagę. W związku z tym impedancja sieci w *PCC* stała się istotnym warunkiem brzegowym i uwzględniono ją w dalszych badaniach pod kątem występowania następujących zaburzeń w linii: wyższe harmoniczne, zapady napięcia oraz zjawisko migotania światła. Ten ostatni współczynnik okazał się najważniejszy z punktu widzenia operatora sieci w *Walli* (*Engineering & Facility Management Ltd. ESB*) odpowiedzialnej za zapewnienie przyłącza i odbiór energii elektrycznej z platformy elektrowni na fale morskie.

Należało zatem znaleźć odpowiedź na pytanie, który ze sposobów przekształcania energii elektrycznej będzie najkorzystniejszy pod względem niezawodności, jakości energii, sprawności energetycznej i ceny. Przeprowadzono badania porównawcze różnych topologii przekształtników dwu i trójpoziomowych oraz typów prądnic. Wnioskodawca dokonał wyboru topologii przekształtnika *MC*, obwodu prądu stałego DC, topologii przekształtnika *GC* oraz topologii całego systemu odprowadzania energii *PTO*. Do wybranej topologii zaproponował i opracował algorytmy sterowania i przeprowadził badania łącznie z testami eksperymentalnymi, niezwykle istotnymi w przypadku weryfikacji prawidłowej pracy w trakcie trwania zapadów i zaników napięcia oraz obecności wyższych harmonicznych czy podwyższonej impedancji sieci w *PCC*. Dodatkowo, urządzenia mające pracować w trudnych i wymagających warunkach morskich muszą być niezawodne, ponieważ dostęp do nich jest znacznie utrudniony i kosztowny. W związku z tym wnioskodawca, wraz z zespołem *PW-ISEP* zakupił (jako jedna z pierwszych uczelni krajowych) emulator systemu elektroenergetycznego umożliwiający

zaawansowane badania przy odkształconym i niesymetrycznym napięciu zasilania w warunkach laboratoryjnych (rok 2007).

Tematyka podjęta w 2006 roku pomimo upływu lat jest nadal bardzo aktualna, a ciągły rozwój technologii zarówno w dziedzinie energoelektroniki (redukcja cen klasycznych elementów półprzewodnikowych oraz rozpowszechnienie nowych elementów półprzewodnikowych, z *węglika krzemu SiC* czy też z *azotku galu GaN*) jak i wyboru sposobu przetwarzania informacji *IoT* i sieci inteligentnych [11] stwarzają większe możliwości i perspektywy dla upowszechnienia rozporozyszonych źródeł energii elektrycznej i poprawy jej jakości, stawiając równocześnie nowe wyzwania dla algorytmów sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi.

Wnioskodawca w swojej pracy zawodowej zwraca uwagę na fakt, że oprócz poszukiwania sposobu na pozyskiwanie energii elektrycznej ze źródeł rozporozyszonych należy zapewnić możliwie najwyższą jej jakość oraz efektywność energetyczną i niezawodność w już istniejących systemach [3], [4], [8], [10], [11]. Z kolei w nowo powstających sprzęgach energoelektronicznych powinno się zapewnić możliwie wysoką uniwersalność i wszechstronność, łącząc zalety różnych topologii przekształtników oraz metod sterowania [9]. Można to osiągnąć poprzez implementację nowoczesnych metod sterowania oraz zastosowanie czterokwadrantowych przekształtników *AC-DC*, które równocześnie mogą pracować jako równoległe filtry aktywne [10], [11] bądź też mogą zostać wykorzystane jako zamienniki dla jednokierunkowych, powszechnie stosowanych prostowników diodowych. To ostatnie rozwiązanie tzn. wymiana przekształtników sieciowych diodowych na czterokwadrantowe przekształtniki tranzystorowe (prostowniki aktywne), pozostawiając bez zmian gabaryty urządzenia (i jego cenę końcową) jest bardzo trudnym wyzwaniem. Temu zagadnieniu został poświęcony projekt n.t. „*Typoszereg wysokoczęstotliwościowych zasilaczy bipolarnych na bazie elementów z węglika krzemu o zwiększonej odporności na zakłócenia i zaniki napięcia zasilającego oraz regulowanym przebiegu napięcia wyjściowego*”. W ramach tego projektu zespół złożony z naukowców *Politechniki Warszawskiej* (z udziałem wnioskodawcy) oraz przedstawicieli firmy *TRUMPF Huettinger*, wykorzystał zdobytą wiedzę i doświadczenie wnioskodawcy w dziedzinie zaawansowanych metod sterowania. **Zaadoptowano tutaj modułową metodę sterowania opracowaną przez wnioskodawcę, w ramach wcześniejszego projektu rozwojowego *NCBiR* [6] do najnowszej technologii przyrządów energoelektronicznych wykonanych z węglika krzemu *SiC*.**

Dzięki wieloletniej pracy nad udoskonalaniem metod sterowania w chwilach zapadów, zaników i innych zaburzeń napięcia w *PCC* aktywny przekształtnik sieciowy *AC-DC* może w sposób znaczący poprawić jakość energii elektrycznej po stronie AC jak i DC [3], [5] – [9].

Niezależnie od wybranej topologii czy wybranego typu przyrządu mocy zasadniczą rolę odgrywa algorytm i metoda sterowania oraz sposób jego implementacji w mikroprocesorze. Przemysłany dobór środowiska informatycznego zastosowanego w sprzęgu energoelektronicznym ma wpływ nie tylko na jakość energii elektrycznej, ale również na cenę produktu końcowego. Bazując na zdobytej dotąd wiedzy na temat przekształtników *AC-DC-AC* i ich sterowania wnioskodawca opracował nowy algorytm sterowania umożliwiający niezakłóconą pracę podczas zapadów napięcia sieci, kompensację wyższych harmonicznych przy podwyższonej impedancji w *PCC*. Przykładem zastosowania opracowanej metody sterowania jest przekształtnik *AC-DC-AC* (150 kW-800 kW), pracujący w szerokim zakresie zmian amplitudy napięcia zasilającego Polskiej firmy *TWERD* wykorzystujący nowy, opracowany przez wnioskodawcę, **wyposażony w moduł kompensacji zapadów**

napięcia DiP algorytm *bezpośredniego sterowania mocą i momentem z modulacją wektorową - DPTC-SVM*.

Zasadnicze wyniki prac badawczych prowadzonych przy współudziale wnioskodawcy, zostały przedstawione w ponad siedemdziesięciu publikacjach, z **których wybrano 12 jako składających się na osiągnięcie naukowe, stanowiące podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego**.

Tematyka prac dotyczy sterowania przekształtników energoelektronicznych służących do integracji rozproszonych źródeł energii z siecią elektroenergetyczną i do poprawy jakości energii elektrycznej w PCC. Można w nich dostrzec trzy, wzajemnie przenikające i uzupełniające się wątki:

- 1) pozyskiwania energii elektrycznej z energii fal morskich (pozycje [1] – [3], [12]),
- 2) uzdatniania energii elektrycznej i integracja z nieidealną siecią elektroenergetyczną (pozycje [3] – [9]),
- 3) poprawy jakości energii w już istniejących systemach elektroenergetycznych (pozycje [3], [10], [11]).

Ad 1. Pozyskiwanie energii elektrycznej z energii fal morskich (pozycje [1] – [3], [12]).

W artykule „*Ocean wave energy converter – Wave Dragon MW³*” (nr [1] w wykazie osiągnięć) wnioskodawca przedstawia stan wiedzy, wymagania wobec elektrowni przetwarzającej energię zgromadzoną w falach morskich na energię elektryczną oraz propozycję realizacji części energoelektronicznej układu odprowadzania energii. W pozycji tej pokazano podstawowe możliwości rozwiązań układu przekształtnikowego oraz wybór odpowiedniego typu maszyny elektrycznej. Przekształtnik AC-DC-AC składający się z dwóch przekształtników AC-DC i DC-AC połączonych obwodem prądu stałego przedstawiono za pomocą dwóch bloków przekształtnikowych AC-DC traktując pojedynczy przekształtnik AC-DC jako *podstawowy energoelektroniczny moduł mocy PEBB*. Dzięki takiemu podejściu możliwe było zastosowanie skalowalnego systemu odprowadzania energii, co w przypadku elektrowni na fale morskie (jak również większości rozproszonych źródeł energii) odgrywa zasadniczą rolę. Moc znamionowa nie była zdefiniowana w sposób stały, ale była podana jako zakres mocy od 4 MW do 7 MW w zależności od warunków falowych panujących w miejscu cumowania elektrowni. Przedstawiono tu propozycję zastosowania różnych topologii przekształtnika AC-DC zarówno GC jak i MC oraz przeprowadzono analizę porównawczą na podstawie badań symulacyjnych dla następujących przypadków przekształtnika sieciowego GC: 2-poziomowego lub 3-poziomowego NPC połączony z przekształtnikiem maszynowym MC: 2-poziomowym tranzystorowym lub diodowym z układem podwyższającym napięcie w obwodzie pośredniczącym prądu stałego [12]. Jako prądnicę rozważono maszynę indukcyjną klatkową z przekładnią mechaniczną oraz wolnoobrotową maszynę synchroniczną z magnesami trwałymi. Wnioskodawca opracował modele symulacyjne dla

³ L. Christiansen, E. Friis-Madsen, J. P. Kofoed, "Worlds Largest Wave Energy Project 2007 in Wales", PowerGen 2006

wszystkich powyższych przypadków, w których zaimplementowano prototypową metodę sterowania oraz modele prądnic na podstawie oferty producentów (385 kW przy prędkości 275 obr./min.).

W artykule rozpoczynającym cykl publikacji przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych mające na celu pokazanie bardzo wysokiej precyzji i dynamiki układu sterowania zapewnionej przez metodę sterowania *DPTC-SVM*. Użycie przekształtnika diodowego *MC* prowadzi do konieczności zastosowania przekształtnika podwyższającego napięcie oraz do znacznego pogorszenia jakości regulacji momentu elektromagnetycznego maszyny.

Algorytm sterowania przekształtnikiem *GC*, ze względu na ograniczenia panujące w *PCC*, wymagał nowego opracowania. Wnioskodawca był zmuszony do opracowania nowej, uodpornionej metody sterowania na zapady napięcia, wyższe harmoniczne oraz podwyższoną impedancję sieci w *PCC*.

Do najważniejszych osiągnięć płynących z publikacji [1] wnioskodawca zalicza:

- wyłonienie w drodze porównawczych badań symulacyjnych topologii oraz metody sterowania części energoelektronicznej układu odprowadzania energii *PTO*, która zapewni prawidłową pracę dla większości wymagań elektrowni na fale morskie,
- zbudowanie modeli symulacyjnych uwzględniających rzeczywiste parametry obiektu. Weryfikację metody sterowania uwzględniającej charakterystykę turbiny pozwalającej na kontrolę prędkości turbiny zapobiegając zjawisku kawitacji,
- potwierdzenie, prawidłowej pracy wybranych typów prądnic dając możliwość zastosowania tańszej prądnicy indukcyjnej zamiast droższej z magnesami trwałymi.

W kolejnych latach temat pozyskiwania i uzdatniania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych zaczął przyciągać uwagę coraz to większej liczby naukowców. W 2009 roku wnioskodawca został zaproszony w roli eksperta do udziału w badaniach przy realizacji projektu *Vestas Power Program*. Część badań symulacyjnych oraz laboratoryjnych nad metodami sterowania przekształtnikami *GC* i *MC* wnioskodawca, przeprowadził w laboratoriach odnawialnych źródeł energii i napędów na *Uniwersytecie w Aalborgu, w Danii* na wydziale *The Faculty of Engineering and Science, Department of Energy Technology, Power Electronic Systems*. Wyniki przeprowadzonych prac wnioskodawca zaprezentował w tym samym roku na seminarium „*Seminar on Renewable Energy System (SERENE)*”. Tytuł zaproszonego referatu: „*Wave Dragon MW offshore wave energy converter*”. W wyniku dyskusji na seminarium *SERENE* na łamach ***IEEE Industrial Electronics Magazine*** ukazała się przeglądowa publikacja „*Renewable Energy Operation and Conversion System*” [2], w której uczestnicy seminarium przedstawili najważniejsze zagadnienia z prowadzonych projektów badawczych, syntetyczne wnioski i propozycję na rozwój tematyki. Wnioskodawca opisał wymagania dla modułowych układów sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi dla *przelewowej (ang. overtopping)*, pływającej i *luźno cumowanej (ang. slack-moored)* elektrowni na fale morskie przy założeniu topologii układu *PTO*, zapewniającej modułowość i wysoką niezawodność zgodną z ideą *PEBB*. W wyniku ograniczeń w *PCC* (ograniczenie mocy maksymalnej dostarczanej do systemu elektroenergetycznego na poziomie około 200 kVA, podwyższonej impedancji wewnętrznej sieci) pojawiła się konieczność zabezpieczenia przed chwilowymi wahaniami mocy powodującymi zjawiska migotania światła. Jako efekt, została opracowana przez wnioskodawcę i przedstawiona propozycja

nowego (w stosunku do opisanej w pozycji [1]), zaawansowanego algorytmu sterowania czterokwadrantowym przekształtnikiem AC-DC-AC, uwzględniającego większość możliwych stanów pracy układu energoelektronicznego, w zastosowaniu do OZE tj.:

1. detekcja i tryb pracy autonomicznej,
2. estymacja impedancji sieci oraz składowej zgodnej i przeciwnej napięcia w PCC wykorzystywanej w kompensacji negatywnego wpływu zaników i zapadów napięcia,
3. kompensacja wyższych harmoniczných prądu w PCC.

Projekt, budowa, badania oraz implementacja algorytmu sterowania, który uwzględnia powyższe wymagania stał się podstawą do dalszych prac badawczo-rozwojowych wnioskodawcy.

W wyniku powyższych rozważań wnioskodawca i inni członkowie Zespołu badawczego *PW-ISEP* rozpoczęli publikacje na arenie międzynarodowej w zakresie uzdatniania energii elektrycznej pochodzącej z OZE. Zdobyte doświadczenie (duży międzynarodowy zespół naukowców pochodzących zarówno ze środowiska akademickiego oraz z przemysłu) pozwoliło na skuteczne kontynuowanie tej tematyki do dnia dzisiejszego. Członkowie zespołu badawczego *PW-ISEP* w tym wnioskodawca systematycznie rozwijają zdobytą wiedzę wdrażając (z partnerami z przemysłu) nowe urządzenia do produkcji oraz uzyskując nowe projekty badawczo-rozwojowe. Opracowany warsztat naukowy tj. sposób modelowania symulacyjnego oraz sposób przeprowadzania testów laboratoryjnych zaproponowany przez wnioskodawcę dla odnawialnych źródeł energii okazał się trafny i jest nadal stosowany i rozwijany w *PW-ISEP* i przez absolwentów pracujących w przemyśle elektrotechnicznym/energoelektronicznym.

Wyniki badań symulacyjnych, wykonane w oparciu o parametry rzeczywistych prądnic pozwoliły na krytyczne porównanie następujących typów prądnic: z magnesami trwałymi, indukcyjnej klatkowej zarówno szybko i wolnoobrotowej, uwzględniając przy tym wszystkie ograniczenia wynikające ze specyfiki obiektu pływającego.

Do najważniejszych osiągnięć przedstawionych w publikacji [2] wnioskodawca zalicza:

- opracowanie przez wnioskodawcę dokładnych modeli symulacyjnych i laboratoryjnych pozwalających na precyzyjne modelowanie elektrowni *Wave Dragon MW*, dając możliwość precyzyjnego określenia i uwzględnienia charakterystyk stosowanych turbin niskiego spadku w funkcji wysokości słupa wody,
- uwzględnienie ograniczeń wynikających z umiejscowienia PCC dla elektrowni typu *ang. „off-shore”* (takie jak sieć o podwyższonej impedancji, ochrona naturalnego środowiska morskiego i tego na wybrzeżu w okolicy PCC),
- wyłonienie algorytmu sterowania czterokwadrantowym przekształtnikiem AC-DC-AC zapewniającego wysoką jakość energii elektrycznej w PCC,
- opracowanie i badania nowego, modułowego algorytmu sterowania zapewniającego pracę w warunkach rzeczywistych podwyższając dokładność sterowania i jakość energii dostarczanej do PCC. Jednakże, pomimo że struktura algorytmu została

zaproponowana to opracowanie poszczególnych modułów algorytmu sterowania oraz sposób ich implementacji w praktyce nie został zdefiniowany (na tamtym etapie badań).

Pierwsze próby implementacji nowej metody sterowania uodpornionej na zapady napięcia, kompensującej wyższe harmoniczne prądu, estymującej impedancję sieci oraz umożliwiającej regulację mocy biernej w PCC a przy tym uwzględniającej charakterystykę DES zaproponowano w artykule „*Brief view on control of grid-interfacing AC-DC-AC converter and active filter under unbalanced and distorted voltage conditions*” [3]. Wnioskodawca opisał zagadnienie sterowania przekształtnikiem AC-DC-AC oraz filtrem aktywnym w warunkach niesymetrycznego i zakłóconego napięcia w PCC.

W artykule przedstawiono i omówiono sposób wyodrębniania składowej zgodnej/przeciwnej, a następnie odporny na zakłócenia nowatorski i niewymagający dużej mocy obliczeniowej sposób implementacji wykorzystania tych składowych w algorytmie sterowania i formowaniu napięć zadanych *modulatora szerokości impulsów MSI*.

Opracowane algorytmy kompensacji wyższych harmonicznych prądu HHC oraz negatywnego wpływu zapadów napięcia DiP w PCC zaimplementowano w opracowanej przez wnioskodawcę metodzie sterowania DPTC-SVM.

Podstawowy algorytm uzupełniono o algorytm ekstrakcji składowej zgodnej i przeciwnej napięcia sieci, oraz algorytm kompensacji wyższych harmonicznych prądu dostarczanego przez przekształtnik GC do PCC. Zaproponowano tu nowy sposób (w czasie ukazania się publikacji) wyeliminowania problemów powodowanych przez nagłe niesymetryczne zapady napięcia w PCC takie jak: oscylacje napięcia w obwodzie prądu stałego DC, niesymetryczność i odkształcenie prądów AC oraz pulsacji chwilowych mocy czynnej i biernej. Wnioskodawca zaproponował zadawanie mocy czynnej na podstawie iloczynu prądu i modułu rzeczywistego napięcia sieci oraz estymację mocy czynnej i biernej wyłącznie na podstawie składowej zgodnej napięcia w PCC. Przebieg składowej przeciwnej napięcia w PCC został skierowany i dodany bezpośrednio na wejście MSI.

Kompensację wyższych harmonicznych zrealizowano przy wykorzystaniu regulatorów całkujących. Zaproponowany algorytm DPTC-SVM z kompensacją negatywnego wpływu zapadów napięcia symetrycznych i niesymetrycznych oraz wyższych harmonicznych pracował bez czujników napięcia po stronie napięcia AC oraz bazował na teorii wirtualnego strumienia sieci elektroenergetycznej.

Były to jedne z pierwszych wyników prac wnioskodawcy, a pomimo to ich jakość (współczynnik THD_i oraz płynność przejść pomiędzy różnymi stanami pracy była bardzo obiecująca, wymagała jednak dalszych prac rozwojowych).

W stanach statycznych uzyskano odpowiednio redukcję zawartości wyższych harmonicznych prądu dla badań symulacyjnych (Rys. 19 w pozycji [3]): z THD_i= 10% (bez HHC) do THD_i= 5,9% (z HHC); dla badań laboratoryjnych (Rys. 22 w pozycji [3]): z THD_i= 16,5% (bez HHC) do THD_i= 4,8% (z HHC).

W stanach dynamicznych pokazujących reakcję algorytmów na zapady napięcia uzyskano dla badań symulacyjnych (Rys. 21 w pozycji [3]): przy głębokości zapadu jednofazowego Typu B do 40% napięcia znamionowego redukcję pulsacji chwilowej mocy biernej z q_{p-p} = 4 kVar (bez DiP) do ok.

$q_{p-p} = 500$ kVar (z *DiP*). Należy zaznaczyć, że w przypadku układu bez *DiP* oscylacje na mocach chwilowych czynnej i biernej utrzymywały się przez cały okres trwania zapadu podczas gdy w przypadku włączenia algorytmu *DiP* oscylacje na mocach chwilowych zostały wygaszone w czasie krótszym niż 25 ms. Po tym czasie obserwowano oscylacje chwilowej mocy biernej q_{p-p} mniejsze od 500 Var wynikające z asymetrii prądów AC przekształtnika *GC*. Ponieważ przy tak głębokim zapadzie prądy AC przekształtnika *GC* bez *DiP* przekraczały dwukrotnie wartość prądu znamionowego w warunkach laboratoryjnych (Rys. 23 w pozycji [3]) zmniejszono głębokość zapadu do wartości 70% napięcia znamionowego, w przypadku pracy z włączonym modułem *DiP* głębokość zapadu wynosiła tyle samo co w trakcie badań symulacyjnych. Dla tak zdefiniowanych warunków uzyskano odpowiednio pulsacje mocy biernej na poziomie $q_{p-p} = 1$ kVar (bez *DiP*) oraz $q_{p-p} = 500$ kVar (z *DiP*) podobnie jak miało to miejsce w trakcie badań symulacyjnych.

Artykuł był odpowiedzią na pojawiające się zarzuty, że proponowany układ może być nieopłacalny w produkcji seryjnej (jak pokazał czas i rozwój techniki obecnie zarzut ten jest zupełnie nieaktualny), dlatego pokazano w nim, że w zależności od budżetu inwestora przekształtnik *GC* może pełnić dwie funkcje tzn. może pracować jako przekształtnik *GC* w przekształtniku *AC-DC-AC* lub/i jako filtr aktywny dla równolegle połączonych odbiorników nieliniowych. Taka uniwersalność zdaniem wnioskodawcy przyczynia się do zmniejszenia kosztów produkcji i daje więcej stopni swobody przy konfiguracji nowych układów uzdatniania energii lub modyfikacji starych, w których występują aktywne obciążenia nieliniowe tzw. odbiorniki niespokojne i niesymetryczne⁴. Niewątpliwą wadą przedstawionej, pierwszej wersji metody sterowania [3], uodpornionej na zaburzenia napięcia w *PCC*, była jej skomplikowana budowa, co skutkowało, zdaniem wnioskodawcy zbyt dużymi przeregulowaniami w stanach przejściowych (spowodowane opóźnieniami wynikającymi z estymacji wirtualnego strumienia) oraz niezbyt dokładną kompensacją wyższych harmonicznych prądu. Dlatego w dalszym etapie prac wnioskodawca podjął próbę zbudowania od podstaw całego algorytmu sterowania, zapewniającego poprawną pracę przekształtnika przy zaburzeniach napięcia w *PCC*. Szczególny nacisk położono na pracę przekształtnika sieciowego w trybie falownikowym przy odkształconym i niesymetrycznym napięciu sieci współpracującego z *OZE*. Dodatkowo, przy opracowywaniu drugiej wersji algorytmu sterowania, wnioskodawca zwrócił szczególną uwagę na szybkość działania, modułowość i niezawodność oraz redukcję wymagań obliczeniowych powstającego kodu programu.

Do najważniejszych osiągnięć przedstawionych w publikacji [3] wnioskodawca zalicza:

- zaproponowanie przez wnioskodawcę nowych algorytmów modułów *HHC* oraz *DiP* i ich skuteczna implementacji w metodzie sterowania *DPTC-SVM*,
- udowodnienie ich prawidłowej pracy w stanach dynamicznych przy odkształconym i niesymetrycznym napięciu w *PCC*,
- opracowanie modeli symulacyjnych. Ich dokładność została zweryfikowana i potwierdzona dobrą zbieżnością wyników laboratoryjnych z wynikami badań symulacyjnymi,

⁴ Z. Hanzelka, „Jakość dostawy energii elektrycznej, zaburzenia wartości skutecznej napięcia”, ISBN: 978-83-7464-566-9, strony: 596, 2013.

- zaproponowanie uniwersalnego systemu przekształtnika *AC-DC* mogącego pełnić funkcję przekształtnika *GC* przystosowanego do pracy przy zaburzonym napięciu w *PCC* i równoległego filtra aktywnego,
- zidentyfikowanie słabych punktów przedstawionej w publikacji metody sterowania (w wersji pierwszej) tj. zbyt skomplikowany algorytm, konieczność powrotu do pomiaru napięcia *AC* przekształtnika *GC* ze względu na zwiększenie niezawodności w trakcie zapadów napięcia w *PCC*. Możliwość rezygnacji z obliczeń wirtualnego strumienia (redukcja wymagań obliczeniowych, uproszczenie algorytmu i przyśpieszenie reakcji w stanach dynamicznych). Na tej podstawie wnioskodawca wytyczył szczegółowy plan badań opracowanego algorytmu sterowania, który systematycznie i konsekwentnie realizował w dalszej działalności naukowo-badawczej.

Ostatnia publikacja wnioskodawcy nawiązująca do tematyki pozyskiwania energii z fal morskich dotyczy poszukiwań umożliwiających zredukowanie przede wszystkim kosztów produkcji elektrowni, zachowując przy tym wysoką jakość energii elektrycznej dostarczanej do *PCC* oraz modułowość układu *PTO*. W artykule „*Medium-Voltage Power Converter Interface for Multi-generator Marine Energy Conversion Systems*” (*IEEE Transactions on Industrial Electronic*) [12], wnioskodawca, wraz z chilijskimi naukowcami na bazie wcześniejszych doświadczeń (sterowanie topologią przedstawioną w publikacji 0 na Rys. 7c) rozważa sterowanie nową, bardziej ekonomiczną topologią przekształtnika *AC-DC-AC*.

Badaniom poddano następujący przypadek: przekształtnik *MC* zbudowany za pomocą prostownika diodowego z przekształtnikiem *DC-DC* podwyższającym napięcie współpracującym z maszyną synchroniczną z magnesami trwałymi. Przekształtniki *MC* współpracują z wielopoziomowym przekształtnikiem *GC*, zapewniającym sterowanie przepływem energii do sieci na poziomie średniego napięcia. Rozpatrywany przypadek różni się od wcześniej analizowanego w [1], tym, że zaproponowano podział przekształtników *MC* wraz z prądnicami na gałęzie nr 1 i nr 2, gdzie każda z gałęzi pracuje na ½ napięcia prądu stałego *DC* redukując napięcie znamionowe przekształtnika podwyższającego (znacząco zmniejszając obciążenie tranzystorów w przekształtniku podwyższającym napięcie). Dzięki takiej topologii zachowano wszystkie zalety przekształtnika wielopoziomowego *GC* tj. praca z wyższą sprawnością, redukcja stosunku dv/dt , niższa zawartość wyższych harmonicznych, niższa przekładnia transformatora sieciowego oraz mniejszy filtr sieciowy. Układ i stosunkowo prosta metoda sterowania oparta na klasycznej metodzie sterowania zorientowanego napięciowo - *VOC* zapewnia prawidłową pracę przy 20%-owym niezrównoważeniu mocy pomiędzy gałęziami nr 1 i nr 2 a napięcia kondensatorów obwodu *DC* pozostają zrównoważone. Topologia ta po wymianie prostownika diodowego na dwu-poziomowy aktywny przekształtnik *MC* umożliwia również wykorzystanie maszyny indukcyjnej.

Do najważniejszych osiągnięć przedstawionych w publikacji [12] wnioskodawca zalicza:

- opracowanie, przedstawienie i zweryfikowanie prawidłowej pracy taniej alternatywy do kompleksowych rozwiązań przedstawionych w innych publikacjach wnioskodawcy stosując maszyny niskiego napięcia oraz przekształtnik średniego napięcia z prostą metodą sterowania.

Ad. 2 Uzdatnianie energii elektrycznej i integracja z nieidealną siecią elektroenergetyczną (pozycje [3] – [9])

Bazując na wnioskach z wcześniejszych prac, wnioskodawca skupił się nad pracą przekształtnika *GC* w nieidealnych warunkach panujących w *PCC* tj. możliwością wystąpienia zaników i zapadów napięcia, obecnością wyższych harmonicznych w napięciu sieci, czy też podwyższoną wartością impedancji sieci elektroenergetycznej [3] – [9]. Wnioskodawca kierował w ramach projektów badawczego i rozwojowego grupą badawczą specjalizującą się w sterowaniu przekształtnikami *AC-DC-AC*, oraz był jednym z wykonawców w projektach kierowanych przez *Politechnikę Białostocką* oraz przedstawiciele przemysłu (firmy: *TRUMPF Huettinger* oraz *TWERD*) wymieniając doświadczenia i wzbogacając swój warsztat naukowy. Zwiększyło to znacząco szanse na implementację i wdrożenie opracowanych rozwiązań w praktyce. Prace wnioskodawcy były ukierunkowane na uogólnienie prowadzonych wcześniej badań. Celem naukowym było opracowanie modułowego algorytmu sterowania oraz jego weryfikacja w różnych topologiach przekształtników energoelektronicznych (dwu oraz trójpoziomowych) dla typoszeregu mocy 3-800 kW. Mając równocześnie na uwadze takie opracowanie kodu algorytmu aby umożliwić jego zastosowanie w urządzeniach produkowanych seryjnie wyposażonych w stało lub zmiennoprzecinkowe *DSP*.

Jednym z pierwszych kroków było gruntowne przeprojektowanie podstawowej struktury algorytmu sterowania, która uzyskała ujednoczone parametry zmiennych wejściowych i wyjściowych. Tak stworzone jądro algorytmu sterowania można w prosty sposób wymieniać i weryfikować pracę większości klasycznych metod sterowania takich jak *DPC-SVM*, *VOC*, czy też oddzielne sterowanie składową zgodną i przeciwną prądu sieci *DVCC* dla przekształtnika *GC*, oraz *DTC-SVM* lub *FOC* dla przekształtnika *MC*.

Do podstawowych metod sterowania należało sukcesywnie opracowywać nowe moduły realizujące dodatkowe funkcje takie jak: moduł kompensacji wyższych harmonicznych *HHC*, moduł kompensacji negatywnego wpływu zapadów *DiP*, moduł estymacji impedancji sieci *Est* oraz moduł sprzężenia w przód od chwilowej mocy czynnej i regulacji napięcia stałego *APFF*.

W artykule „*Higher harmonics compensation in grid-connected PWM converters for renewable energy interface and active filtering*” [4], wnioskodawca skupił się nad zagadnieniami związanymi z filtracją wyższych harmonicznych, przedstawiając dalsze wyniki badań nad algorytmem sterowania modułu *HHC*. Zbadano nowe wersje kompensatorów wyższych harmonicznych wykorzystujących zamiast regulatorów całkujących filtry pasmowo zaporowe oraz regulatory rezonansowe uwzględniające rzeczywistą częstotliwość wyższej harmonicznej. Implementację i prawidłową pracę kodu algorytmu sterowania zrealizowano na platformie *dSPACE DS1103* sterując przekształtnikami dwupoziomowymi o mocy 5 kW i 7,5 kW. Jakość opracowanych modułów *HHC* zweryfikowano z dwoma metodami sterowania: *DPC-SVM* oraz *DVCC*. Obie metody dały zadowalające wyniki, jednakże wskazywały one na konieczność zwiększenia odporności na zakłócenia generowane przez procesy łączeniowe w samym przekształtniku *GC*.

Do najważniejszych osiągnięć przedstawionych w publikacji [4] wnioskodawca zalicza:

- opracowanie struktury dwóch wersji modułu *HHC* oraz weryfikacja ich działania we współpracy z dwoma różnymi metodami sterowania.
- przygotowanie kodu algorytmu sterowania do dalszej implementacji na platformach z *DSP* stosowanych w urządzeniach produkowanych seryjnie.

W kolejnej pozycji „*Procesory zmiennoprzecinkowe serii TMS320F28xx w systemach sterowania przekształtników dla energetyki odnawialnej*” [5], (skierowanej do czytelników polskojęzycznych), zaprezentowano w sposób zwięzły najważniejsze parametry, konfigurację oraz implementację algorytmu sterowania *DPC-SVM* i wyniki badań laboratoryjnych z wykorzystaniem zmiennoprzecinkowej jednostki obliczeniowej *DSP TMS320F28335*, którą zaplanowano do przeprowadzenia części badań laboratoryjnych mających na celu umożliwienie wdrożenia do produkcji seryjnej opracowywanej metody sterowania oraz pomiaru czasu wykonywania poszczególnych funkcji i operacji programu. Całość algorytmu wykonywał się w czasie 36,4 μ s co przy założeniu czasu próbkowania na poziomie 100 μ s było wynikiem zadowalającym.

Równolegle do opracowanego stanowiska badawczego stworzono model symulacyjny aby stanowił on możliwie dokładne odzwierciedlenie powstałego, rzeczywistego układu laboratoryjnego umożliwiając tym samym bardzo szybką weryfikację poprawności opracowanych algorytmów sterowania. Zebrane wyniki potwierdziły wysoką zgodność badań symulacyjnych z laboratoryjnymi.

Do najważniejszych osiągnięć przedstawionych w publikacji [5] wnioskodawca zalicza:

- opracowanie platformy badawczej o wystarczająco dużej mocy obliczeniowej zapewniającej badania przekształtników *GC* w dowolnych stanach pracy. Przy czym, nadwyżka mocy obliczeniowej *DSP* została wykorzystana do sterowania przekształtnikiem pomocniczym, w tym przypadku *MC* emulującym pracę rozproszonych źródeł energii (sterowanie *DTC-SVM* z maszyną indukcyjną klatkową),
- uzyskanie bardzo dobrej zgodności wyników badań w modelu symulacyjnym *SABER* z układem laboratoryjnym opartym o jednostkę *DSP* stosowaną w przemyśle a tym samym, przygotowanie środowiska pracy do implementacji i testów nowych algorytmów sterowania uodparniających na zaburzenia napięcia w *PCC*.

Bazując na doświadczeniach dotyczących implementacji klasycznych algorytmów sterowania *VOC*, *DPC-SVM*, *FOC*, *DTC-SVM* w jednostkach *DSP* stało i zmiennoprzecinkowych podjęto zagadnienie implementacji nowego algorytmu sterowania na ekonomicznej platformie stałoprzecinkowej oraz droższej, ale znacznie wygodniejszej dla programisty i dokładniejszej platformie zmiennoprzecinkowej. W implementacji wykorzystano kod wstępnie zweryfikowany na platformie *dSPACE* [4], co znacznie ułatwiło uruchomienie nowych funkcjonalności algorytmu sterowania odpowiedzialnych za kompensację negatywnego wpływu zaburzeń napięcia w *PCC* na jakość energii elektrycznej.

Na dalszym etapie badań należało zweryfikować na ile opracowane algorytmy sterowania, pracujące w badaniach symulacyjnych i na wydajnej jednostce *dSPACE* spełnią swoje funkcje w warunkach narzuconych przez przemysł gdzie kluczową rolę odgrywa koszt. Dlatego, zagadnienia przedstawione w „*DSP-Based Control of Grid-Connected Power Converters Operating Under Grid Distortions*” [6] (opublikowanej na łamach *IEEE Transactions on Industrial Informatics IF=2.99*, ilość

cytowań wg: WoS: 105, Scopus: 124, Google Scholar: 153) w ostatnich latach cieszą się rosnącym zainteresowaniem wśród naukowców. Usystematyzowano w nim wiedzę i doświadczenia na temat opracowania i implementacji *odpornego, bezpośredniego sterowania mocą z modulacją wektorową RDPC-SVM*. Jest to nowy algorytm opracowany przez wnioskodawcę, w którym wykorzystano i podsumowano doświadczenia z badań przeprowadzonych w latach 2008 - 2011, bazując na klasycznej metodzie *DPC-SVM*, skutecznie zintegrowano z nią moduł kompensacji negatywnego wpływu zapadów napięcia - *DiP* i eliminacji wyższych harmonicznych prądu - *HHC*. Do weryfikacji poprawności działania *RDPC-SVM* w wersji stało i zmiennie-przecinkowej użyto stanowiska laboratoryjnego opisanego w artykule [5], gdzie bezpośrednio sterowanie momentem z modulacją wektorową - *DTC-SVM* przekształtnika *MC* odgrywało drugorzędną rolę precyzyjnego emulatora rozproszonych źródeł energii elektrycznej. Jednak należy zaznaczyć, że oba algorytmy zostały zaimplementowane w jednej jednostce sterującej *TMS320F28335*, 32-bitowym, zmiennoprzecinkowym *DSP* z rodziny *C2000 Delfino* firmy *Texas Instruments*. Badania porównawcze ze stałoprzecinkowym *DSP TMS320F2812* wykonano na podstawie trzech bibliotek dostępnych na platformie *TMS320F28335*: stałoprzecinkowej, zmiennoprzecinkowej *IQmath* (biblioteka emulująca operacje zmiennoprzecinkowe dla procesorów stałoprzecinkowych), oraz zoptymalizowanej zmiennoprzecinkowej biblioteki *fastRTS*. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że program najszybciej wykonuje się przy użyciu biblioteki *fastRTS* (24,99 μ s). W zależności od potrzeb (głównie ze względów na niższą cenę) można dobrać jednostkę sterującą stałoprzecinkową, która zapewnia wystarczającą precyzję sterowania, jednakże programowanie jest bardziej czasochłonne i czas wykonywania kodu programu dłuższy (63,31 μ s). W przypadku platformy *Piccolo TMS320F28027* moc obliczeniowa jest wystarczająca jedynie do implementacji algorytmu *RDPC-SVM* (bez możliwości implementacji sterowania przekształtnikiem *MC*). To rozwiązanie zweryfikowano na życzenie Polskiej Firmy *TWERD* (w tamtym okresie użycie droższych jednostek zmiennie-przecinkowych budziło zdecydowany opór producentów). Ze względu na kłopotliwą implementację np. regulatorów rezonansowych w logice stałoprzecinkowej pomimo wyższej ceny wnioskodawca na podstawie przeprowadzonych badań, przekonał firmy, z którymi realizuje wspólne projekty naukowo-badawcze do przejścia na platformę z mikrokontrolerem zmiennoprzecinkowym.

Do najważniejszych osiągnięć przedstawionych w publikacji [6] wnioskodawca zalicza:

- opracowanie nowej modułowej metody sterowania *RDPC-SVM* wyposażonej w moduły kompensacji negatywnego wpływu zapadów *DiP* oraz kompensacji wyższych harmonicznych *HHC*,
- potwierdzenie jej stabilnej pracy w warunkach zbliżonych do tych panujących w przemyśle.

W następnej pozycji więcej uwagi poświęcono na rozwój kodu algorytmu sterowania *RDPC-SVM* pod kątem szybkości wykonywania, uproszczenia i zwiększania skuteczności działania. W artykule „*Sterowanie przekształtnika sieciowego AC-DC podczas zapadów napięcia w sieci elektroenergetycznej*” [7], wnioskodawca skupił się wyłącznie na zapadach napięcia w *PCC*. A nacisk położono na dodatkowe badania przekształtnika *AC-DC-AC* zarówno w trybie pracy prądnicowej jak i silnikowej. Przedstawione rozwiązanie różni się od przedstawionego w publikacji [6] tym, że zbadano stabilność pracy algorytmu sterowania dla przypadku kiedy składowa przeciwna nie jest estymowana ale w sposób naturalny, na podstawie pomiaru, dodawana do wejścia modulatora *MSI* jako sprzężenie

„w przód” od całościowego (zawierającego składową zgodną i przeciwną) napięcia w *PCC*. Rozwiązanie takie upraszczało algorytm sterowania niemniej jednak powodowało większe przeregulowania prądów fazowych w stanach przejściowych: wchodzenia i wychodzenia z zapadów zapewniając przy tym bezударowe przejście z trybu pracy diodowej na tryb pracy aktywny przekształtnika *GC*. Zweryfikowano tu również inne możliwości skrócenia czasu wykonywania programu takich jak: eliminacja operacji dzielenia, sposób wyznaczania sektora w algorytmie *MSI* (redukcja czasu wykonywania z 7,08 μ s do 2,12 μ s), tablicowanie funkcji \arctg z podziałem na cztery przedziały dokładności tablicowania (redukcja czasu wykonywania z 5,64 μ s do 0,98 μ s) itp. Do dalszej analizy pozostały takie zagadnienia jak dynamika pracy z bardzo głębokimi zapadami oraz lepszy sposób odfiltrowania oscylacji 100 Hz w czasie zapadów niesymetrycznych.

Do najważniejszych osiągnięć uzyskanych w publikacji [7] wnioskodawca zalicza:

- zaproponowanie sposobu redukcji czasu wykonywania nowego algorytmu sterowania zachowując przy tym wysoką jakość prądu przemiennego przekształtnika *GC*.
- weryfikacja rozważań teoretycznych i symulacyjnych w warunkach laboratoryjnych [5] w dwóch trybach pracy maszyny indukcyjnej: prądnicowym (energia dostarczana do *PCC*) oraz silnikowym (energia pobierana z *PCC*).

Dzięki intensywnym i wszechstronnym badaniom w latach 2011-2012, mających na celu poprawę parametrów pracy nowej metody sterowania przekształtnikiem *GC* uzyskano: współczynnik zawartości wyższych harmonicznych prądu $THDi = 2\%$ oraz bezударowe wejście i wyjście z zapadów napięcia. Dużym nakładem pracy uszczegółowiono modele symulacyjne, w taki sposób aby w możliwie największym stopniu odwzorowywały warunki panujące w trakcie badań eksperymentalnych. Równolegle rozwijano prototypowe algorytmy sterowania w ramach badań laboratoryjnych i w warunkach rzeczywistych weryfikując ich skuteczną pracę dla typoszeregu 3-800 kW dwu i trójpoziomowych przekształtników. Opracowaną metodę sterowania zweryfikowano na dwóch platformach stała (*Piccolo TMS320F28027*) i zmiennie-przecinkowej (w wersji badawczej – *dSPACE DS1103* oraz w dwóch wersjach przemysłowych *Piccolo TMS320F28069*, *Delfino TMS320F28335*) co znacząco zwiększało czasochłonność badań szczególnie w przypadku platformy stałoprzecinkowej.

Częścią uzyskanych wyników podzielono się z polskojęzycznym czytelnikiem w artykule „Aktywny przekształtnik sieciowy dedykowany dla źródeł rozproszonych z funkcją kompensacji wyższych harmonicznych” [8]. Skupiono się tu nad nowoczesnym algorytmem modułu kompensacji wyższych harmonicznych *HHC* pracującym w sterowaniu *RDPC-SVM*. *HHC* zrealizowano za pomocą regulatorów rezonansowych, które na platformie zmiennie-przecinkowej zapewniają uproszczenie kodu algorytmu oraz prostą implementację przy zachowaniu dobrej precyzji filtracji. W przypadku badań symulacyjnych uzyskano prawie 10-krotną redukcję współczynnika $THDi$ z 41% do 4,2% (odpowiednio algorytm sterowania *RDPC-SVM* bez modułu *HHC* oraz z włączonym modułem *HHC*, Rys. 5 [8]). W przypadku badań laboratoryjnych uzyskano prawie 13-krotną redukcję współczynnika $THDi$ z 30,4% do 2,4% przy 66% mocy znamionowej dla pracy prostownikowej przekształtnika *GC* (Rys. 7 [8]) oraz 12-krotną redukcję współczynnika $THDi$ z 22,3% do 1,8% przy 74% mocy znamionowej dla pracy falownikowej (Rys. 8 [8]). Dzięki zastosowaniu do rozdzielania składowej zgodnej i przeciwnej nowego algorytmu modułu *DiP*, wykorzystującego podwójny, uogólniony integrator drugiego rzędu

*DSOGI*⁵ uzyskano zrównoważone prądy w czasie trwania zapadów a dodatkowo całkowicie wyeliminowano przeregulowania prądów AC w momencie wejścia i wyjścia z zapadu napięcia w *PCC*. Prezentowane wyniki miały charakter wstępny i zostały zrealizowane na platformie *dSPACE*, jednak w sposób jednoznaczny potwierdziły dobre parametry pracy układu i zadowalającą kompensację wyższych harmonicznych.

Do najważniejszych osiągnięć prezentowanych w publikacji [8] wnioskodawca zalicza:

- znaczącą poprawę jakości przebiegów prądów AC przekształtnika *GC* dzięki zastawianiu nowych rozwiązań algorytmicznych między innymi opracowanie i implementacja układu pętli synchronizacji fazowej wykorzystującej *DSOGI*, oraz nowego bloku *HHC* (**rozwiązanie opatentowano: „Układ sterowania sieciowym przekształtnikiem AC-DC z dwukierunkowym przesyłem energii, PL410949-A1**),
- opracowanie prototypowej wersji algorytmu sterowania *RDPC-SVM* na platformie *dSPACE* stanowiącej podstawę do jej finalnej implementacji w przemysłowych jednostkach *DSP* stało i zmiennie-przecinkowych.
- zaprezentowanie dwuetapowej implementacji laboratoryjnej regulatorów rezonansowych: w 1 etapie na platformie *dSPACE*, w 2 etapie na mikrokontrolerach stosowanych w przemyśle.

W kolejnym artykule „*Flying Capacitor Converter as a wind turbine interface - modulation and MPPT issues*” [9] przedstawiono rozważania dotyczące pośredniego przekształtnika *AC-DC-AC* w topologii wielopoziomowej, hybrydowej (trójpoziomowy przekształtnik z kondensatorami o zmiennym potencjale *FCC* połączony obwodem prądu stałego z trójpoziomowym przekształtnikiem, z diodami poziomującymi *NPC*). Układ taki łączy zalety przekształtników *FCC* i *NPC* i został wykorzystany jako sprzęg turbiny wiatrowej z siecią elektroenergetyczną. Wnioskodawca zaproponował kompleksowy algorytm metody sterowania pracującej w stanach pracy autonomicznej oraz sieciowej. Ponadto, opracowano i zaimplementowano nową koncepcję sprzężenia „w przód” (uwzględniając tryb pracy autonomicznej układu) zapewniając lepszą kontrolę napięcia DC. Jako szkielet programu wybrano metodę sterowania napięciowo zorientowanego *VOC* przekształtnikiem *GC* oraz sterowania pośrednio zorientowanego zgodnie ze strumieniem wirnika *IFOC* przekształtnikiem *MC*. Nowością jest opracowanie oraz implementacja i analiza współpracy pomiędzy algorytmem modułu sprzężenia od mocy czynnej „w przód” *APFF* oraz algorytmem śledzenia punktu mocy maksymalnej *MPPT*. Odpowiednia realizacja i konfiguracja tych algorytmów, w zależności od trybu pracy układu przekształtnikowego *AC-DC-AC* tj. autonomicznego lub sieciowego została opatentowana (**patent nr PL401702-A1, „Układ sterowania przekształtnikiem AC-DC-AC”**).

W przypadku pracy sieciowej sprzężenie od mocy „w przód” obliczane jest na podstawie zmierzonej prędkości prądnicy i estymowanego momentu elektromagnetycznego. Następnie uzyskany sygnał odpowiadający wartości mocy czynnej prądnicy podzielono przez moduł napięcia

⁵Teodorescu, R.; Liserre, M.; Rodríguez, P. “Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems”, vol., no., pp.416, Wiley-IEEE Press, 2011

AC przekształtnika *GC* uzyskując sygnał proporcjonalny do wartości prądu. W kolejnym etapie dodano uzyskany sygnał prądu do sumatora na wejściu regulatora składowej czynnej prądu sieci w algorytmie sterowania przekształtnikiem *GC* zapewniając tym samym bardzo wysoką dynamikę regulacji poziomu napięcia w obwodzie DC.

W przypadku pracy autonomicznej sprzężenie od mocy „w przód” obliczane jest na podstawie iloczynu napięcia i prądu w *PCC*. Powstały sygnał niesie informację o zapotrzebowaniu na moc czynną w *PCC*, który podzielony przez prędkość kątową maszyny dostarcza informacji o momencie elektromagnetycznym. W następnym etapie tak uzyskany sygnał dodawany jest do zadanego momentu elektromagnetycznego i podawany na wejście regulatora momentu (lub po przeskalowaniu regulatora składowej czynnej prądu stojana maszyny). Skuteczność zaproponowanej metody sterowania można poprawić poprzez dodanie do obwodu DC dodatkowego magazynu energii, który w chwilach nadwyżki produkcji energii przez prądnicę mógłby zapewnić jej odbiór i przechowywanie.

Tak opracowane sterowanie przebadano symulacyjnie i laboratoryjnie. W laboratorium do sterowania przekształtnika *NPC* 15 kVA i *FCC* 3 kVA użyto platformy *dSPACE DS1005*. Układ taki charakteryzuje się dużą uniwersalnością zastosowań. Z jednej strony przekształtnik *NPC* zapewnia możliwość pracy z modulacją blokową, natomiast z drugiej przekształtnik *FCC* umożliwia niezależną modulację każdej z gałęzi oraz eliminację redundantnych stanów łączeń.

Do najważniejszych osiągnięć przedstawionych w publikacji [9] wnioskodawca zalicza:

- zweryfikowanie prawidłowej pracy dwóch topologii przekształtników *NPC* i *FCC*, które dzięki zaproponowanej metodzie sterowania zapewniły redukcję strat na magnesowanie maszyny i skuteczną regulację napięcia DC w dwóch stanach pracy: autonomicznej i sieciowej. Ponadto, na podstawie przeprowadzonych badań, wnioskodawca zaplanował dalsze prace badawcze, uwzględniając fakt, że zdaniem wnioskodawcy, więcej korzyści można osiągnąć wykorzystując funkcjonalności przekształtnika *FCC* do pracy po stronie sieci elektroenergetycznej, gdzie przekształtnik *FCC* może pracować również jako równoległy filtr aktywny i kompensator przy niesymetrycznym obciążeniu niezależnie modulując napięcie w poszczególnych gałęziach,
- zaproponowanie nowego układu sterowania przekształtnikiem *AC-DC-AC* będącego podstawą do patentu nr PL401702-A1, który poprawia dokładność regulacji przepływu energii pomiędzy źródłem energii rozproszonej a systemem elektroenergetycznym lub odbiornikiem niepodłączonym do sieci elektroenergetycznej.

Ad. 3 Poprawa jakości energii w już istniejących systemach elektroenergetycznych (pozycje [3], [10], [11]).

Rola równoległych filtrów aktywnych mocy *SAPF* jest znacząca i zdaniem wnioskodawcy będzie rosła w miarę rozwoju energoelektroniki. Dlatego bazując na doświadczeniach i bardzo dobrych wynikach uzyskanych w trakcie badań przekształtników *FCC* [9] wnioskodawca rozpoczął badania trójpoziomowego, czterogałęziowego przekształtnika *FCC* o mocy 10 kVA sterowanego za pomocą algorytmu predykcyjnego. Zaproponowane sterowanie predykcyjne zapewnia bardzo wysoką dynamikę i daje możliwość pełnego wykorzystania naturalnej zalety przekształtników *FCC* jaką jest

niezależna modulacja poszczególnych gałęzi. W połączeniu z odpowiednio szybkim sterowaniem daje znaczące korzyści np. w filtracji wyższych harmonicznych. Wnioskodawca, jako kierownik projektu NCN, w latach 2014-2016 podjął prace badawcze na temat „*Badania algorytmu sterowania predykcyjnego czterogałęziowym, trójpoziomowym przekształtnikiem z kondensatorami o zmiennym potencjale pracującym jako równoległy filtr aktywny*”.

Uzyskane w ramach tego projektu wyniki okazały się na tyle nowatorskie i oryginalne, że opublikowano je na łamach czasopisma ***IEEE Transactions on Industrial Electronics (IF=7.168)*** w artykule nt. „*Model Predictive Control for Three-Level Four-Leg Flying Capacitor Converter Operating as Shunt Active Power Filter*” [10].

W artykule, zgodnie z wiedzą autorów po raz pierwszy w literaturze światowej przedstawiono pracę trójfazowego, czterogałęziowego przekształtnika FCC sterowanego za pomocą nowego oryginalnego algorytmu sterowania z ograniczoną liczbą stanów bazującego na modelu obiektu FS-MPC. Dzięki wykorzystaniu w nim modelu międzygałęziowego przekształtnika FCC możliwe stało się uproszczenie algorytmu sterowania. Co w połączeniu z zaproponowanym sposobem redukcji stanów łączy oraz kontrolą napięcia na kondensatorach FC znacznie zmniejszyło wymagania obliczeniowe. Dla rozpatrywanego przekształtnika ilość możliwych stanów łączy wynosi $4^4 = 256$ co w praktyce oznaczałoby, że w przeciągu jednego okresu próbkowania algorytm predykcji powinien być przeliczony 256 razy – stanowi to duże obciążenie dla procesora i stawia wysokie wymagania dla przetworników analogowo-cyfrowych w pomiarach prądów i napięć. Mając na uwadze konieczność weryfikacji laboratoryjnej badań symulacyjnych oraz ewentualnego wdrożenia do produkcji (w przyszłości) wnioskodawca położył nacisk na zmniejszenie ilości obliczeń zachowując przy tym wysoką dokładność, która jest priorytetem w przypadku kompensacji wyższych harmonicznych prądu. Równocześnie wnioskodawca zaproponował stabilizację częstotliwości łączy – jednak w przypadku SAPF modyfikacja ta zawsze wprowadzi pogorszenie jakości kompensacji wyższych harmonicznych prądu. Dodatkowo, ograniczenia sprzętowe podczas badań laboratoryjnych wprowadziły znaczne pogorszenie jakości kompensacji. Pomimo, że badania eksperymentalne wykonano na bardzo wydajnej platformie *dSPACE DS1006*, a obliczenia rozdzielono na dwa rdzenie procesora: cpu1 – realizował przetwarzanie pomiarów i cpu2 – obliczał cały algorytm predykcji, okazało się, że opóźnienie wynikające ze zbierania i przetwarzania danych wynosi 27 μ s. Ograniczyło to częstotliwość próbkowania do $f_s = 20$ kHz, przy takiej częstotliwości próbkowania zrezygnowano ze stabilizacji częstotliwości łączy gdyż wprowadzała zbyt duże pogorszenie kompensacji wyższych harmonicznych prądu.

Do najważniejszych osiągnięć przedstawionych w publikacji [10] wnioskodawca zalicza:

- przedstawienie nowej metody sterowania FS-MPC równoległym filtrem aktywnym bazującej na modelu międzygałęziowym przekształtnika FCC, ze zredukowaną ilością łączy co zmniejszyło ilość obliczeń i dało możliwość kontroli prądów międzyfazowych lub prądów faza-przewód neutralny oraz możliwość implementacji i weryfikacji laboratoryjnej,
- przedstawione badania symulacyjne i laboratoryjne potwierdziły słuszność założeń i wykazały dobre właściwości pracy czterogałęziowego przekształtnika FCC pracującego jako SAPF, który oprócz filtracji wyższych harmonicznych prądu działa jako

kompensator i symetryzuje prądy faz w przypadku niesymetrycznych obciążeń. Uzyskany współczynnik zawartości wyższych harmonicznych prądu THDi= 4,7% (symulacyjnie) i THDi= 5,1% (eksperymentalnie) w fazie dociążonej niesymetrycznie przez nieliniowe urządzenie.

- przygotowanie algorytmu do pracy z modułem stabilizacji częstotliwości łączeń. Przy założeniu, że częstotliwość próbkowania będzie znacznie wyższa niż $f_s = 20$ kHz.

Biorąc pod uwagę uzyskane parametry pracy powyżej przedstawionych algorytmów sterowania (niska zawartość wyższych harmonicznych prądu, praca w trakcie zapadów napięcia w PCC itp.) wnioskodawca bada możliwość ich zastosowania w rozwiązaniach łączących osiągnięcia z dziedziny informatyki i elektrotechniki takich jak *IoT*, *Energet*, *Sieci inteligentne*, *Przemysł 4,0* czy inne nieustandaryzowane jeszcze obszary aplikacji nowoczesnych układów przekształtnikowych. Poszukując odpowiedzi na pytanie: Czy możliwa jest implementacja przekształtników energoelektronicznych w systemie elektroenergetycznym w taki sposób, aby ułatwić operatorowi (często niebędącemu ekspertem w zakresie energoelektroniki) sterowanie, nie tylko przepływem informacji, ale też przepływem energii elektrycznej, który zapewni jej wysoką jakość i oszczędność?

Wcześniejsze badania wnioskodawcy dotyczące *logiki rozmytej*⁶ FL wydają się tutaj być naturalnym narzędziem do stworzenia *systemu wspomagającego decyzję DSS*, który połączy „warstwę” sterowania energią elektryczną, z „warstwą” przetwarzania informacji jaka stanowi podstawę *IoT*. W artykule „*Fuzzy logic in decision support system as a simple Human/Internet of Things interface for shunt active power filter*” [11], wnioskodawca przedstawia wstępne wyniki przeprowadzonych badań dla takiego rozwiązania.

Do badań wykorzystano wcześniej opracowany przez wnioskodawcę algorytm sterowania *RDPC-SVM* [6], [8] w wersji wyposażonej tylko w moduł kompensacji wyższych harmonicznych *HHC*. Bazując na modułowej budowie opracowanego algorytmu dodano do niego algorytm modułu *DSS* wykorzystujący teorię logiki rozmytej w celu ułatwienia komunikacji z operatorem (człowiekiem lub innym urządzeniem).

Nowość algorytmu polega na tym, że zaprojektowano i zaimplementowano go w taki sposób, iż algorytm *RDPC-SVM* stanowi jądro kodu i pracuje z częstotliwością próbkowania $f_{s1} = 10$ kHz, natomiast moduł *DSS* pracuje z częstotliwością próbkowania znacznie niższą, równą $f_{s2} = 2,5$ kHz. Ponadto, moduł *DSS* nie bierze bezpośredniego udziału w torze głównym regulacji mocy a stanowi jedynie przystawkę ułatwiającą wymianę informacji pomiędzy algorytmem sterowania przekształtnikiem *MSI* a otoczeniem zmieniając znaczenie zmiennych elektrycznych na *zmiennie językowe* zrozumiałe dla operatora niebędącego specjalistą. Takie podejście do tematu w odróżnieniu, do tego najczęściej spotykanego w literaturze przedmiotu, gdzie logika rozmyta włączana jest do głównego algorytmu sterowania, daje szereg zalet takich jak: nie może spowodować nieprawidłowej pracy przekształtnika, nie obciąża w dużym stopniu jednostki *DSP*, ma za zadanie jedynie ułatwić komunikację z urządzeniem operatorowi, który nie musi rozumieć skomplikowanych zależności pomiędzy regulowanymi wielkościami elektrycznymi. Moduł *DSS* ma za zadanie sprawować pieczę nad tymi zależnościami i wyciągać z nich niezbędne wnioski, bazując na wiedzy eksperckiej, którą

⁶ M. Jasinski, M. Liserre, F. Blaabjerg, M. Cichowlas, „Fuzzy Logic Current Controller for PWM Rectifiers”, In. Proc. of the IEEE IECON'02, Sevilla, Spain, na CD-ROM SF-006578, 5-8 listopada 2002 r

wprowadza się jednorazowo na etapie projektowania systemu. Zgodnie z wiedzą autorów artykułu, jest to pierwsza próba takiego podejścia do tematu integracji przekształtników energoelektronicznych w nowoczesnych systemach informatyczno–energoelektroniczno–elektroenergetycznych. Zamiana zmiennych fizycznych elektrycznych na językowe powinna doprowadzić do zmniejszenia ilości danych i operacji obliczeniowych wymaganych do komunikacji z otoczeniem w środowisku interdyscyplinarnym jakim jest z natury np. *IoT*. Ponadto, w chwili zmiany standardów lub wymagań dotyczących przepływu i jakości energii w systemie elektroenergetycznym dostosowanie urządzenia do nowych warunków może odbywać się w sposób niewymagający interwencji specjalisty-energoelektronika.

Prawidłową pracę *DSS* potwierdzono badaniami symulacyjnymi i eksperymentalnymi na przykładzie procedury doboru nastaw regulatorów w module kompensacji wyższych harmonicznych *HHC*. Zależności fizyczne pomiędzy takimi wielkościami jak napięcie, prąd, faza, czy częstotliwość zostały przedstawione za pomocą zmiennych językowych używanych potocznie. Dzięki temu, że sterowanie mocą *RDPC-SVM* jest realizowane niezależnie od *DSS* (stanowi jądro programu sterowania), niższa częstotliwość próbkowania *DSS* nie wywarła negatywnego wpływu na jakość i dynamikę regulacji prądu i nie obciąża niepotrzebnie jednostki *DSP*. Algorytm główny metody sterowania odwołuje się do algorytmu *DSS* za pomocą przerwania *ISR1* analizując aktualny stan pracy *SAPF* i informując operatora czy jego działania odnoszą oczekiwany skutek. Dzięki temu w kolejnych iteracjach współczynnik całkowitego odkształcenia prądu *THDi* zredukowano z 19,5% do 7,5% za pomocą kompensacji jedynie 5-tej harmonicznej. Stosując moduł *DSS* do 7-ej, 11-ej i 13-tej harmonicznej uzyskano wynik końcowy współczynnika $THDi = 2,94\%$ (dla przekształtnika *MSI* o mocy 4 kW sterowanego za pomocą jednostki *dSPACE1103*). Badania stanów dynamicznych potwierdziły dobrą dynamikę kompensacji wyższych harmonicznych prądu (ok. 3 okresów podstawowej harmonicznej).

Do najważniejszych osiągnięć przedstawionych w publikacji [11] wnioskodawca zalicza:

- zaproponowanie i opracowanie nowego, innowacyjnego podejścia do sterowania przekształtnikami *MSI* wykorzystującego system wspomaganie decyzji *DSS* umożliwiającego sterowanie przepływem energii i informacji jednocześnie osobom/urządzeniom niewyspecjalizowanym w kierunku energoelektroniki.
- weryfikację symulacyjną i laboratoryjną poprawności działania algorytmu modułu *DSS* we współpracy z algorytmem sterowania *RDPC-SVM*.

Podsumowanie i wnioski końcowe

Podsumowując, dotychczasowe prace wnioskodawcy skupiały się nad badaniami przekształtników *AC-DC* i ich aplikacji w sprzęgach rozproszonych źródeł energii z siecią elektroenergetyczną i zapewnieniu wysokiej jakości energii elektrycznej wykorzystując zaawansowane metody sterowania realizowane przez nowoczesne jednostki *DSP*. Jego prace zawierają pełen cykl badawczy od koncepcji, poprzez opracowanie analityczne, badania symulacyjne na weryfikacji laboratoryjnej skończywszy. Opracowane przez wnioskodawcę algorytmy sterowania zostały

z sukcesem zastosowane w przemyśle. **W trakcie badań powstały dwa patenty, z których jeden jest obecnie wdrażany do produkcji (PAT.226667).**

Wnioskodawca jest członkiem zespołu naukowego *PW-ISEP*, który nieustannie rozwija swoje kwalifikacje w tej dziedzinie. Ze względu na interdyscyplinarny charakter podejmowanych badań współpracuje z wieloma ośrodkami krajowymi i zagranicznymi reprezentującymi środowiska akademickie i przemysłowe. Przedstawione publikacje stanowią efekt tej współpracy.

Działalność naukowa wnioskodawcy znalazła również uznanie takich firm jak: *SIEMENS*; *ABB*, *TWERD* (firma wykorzystująca metodę sterowania *DPTC-SVM* ze sprzężeniem od mocy „w przód” w przekształtniku *MFC710 AC-DC-AC przystosowaną do pracy w warunkach symetrycznych zapadów napięcia*); oraz *TRUMPF Huettinger* (realizowany projekt wysokoczęstotliwościowego przekształtnika *GC* zbudowanego z półprzewodników mocy typu *SiC* o zwiększonej odporności na zakłócenia i zaniki napięcia zasilającego **implementowany algorytm sterowania stanowi rozwinięcie opracowanej metody *RDPC-SVM***).

Przedstawiony cykl publikacji zawiera opis wieloletnich badań wnioskodawcy, w ramach których opracował on modułowe metody sterowania odporne na zaburzenia występujące w sieci elektroenergetycznej. Opracowane algorytmy stosowane w modułach *DiP* oraz *HHC*, czy *Est* znacznie podwyższają jakość energii elektrycznej w *PCC* oraz niezawodność energoelektronicznych przekształtników sieciowych *GC* redukując tym samym ich negatywny wpływ na pracę innych urządzeń.

Wnioskodawca zaproponował również innowacyjny sposób połączenia „warstwy” sterowania informacją z „warstwą” sterowania przepływem energii np. w *Internecie wszystkiego IoE* za pomocą opartego na *logice rozmytej systemu wspomagającego podejmowanie decyzji DSS*. Zdaniem wnioskodawcy stoimy w przededniu opracowania sieci inteligentnych, w których przepływ energii elektrycznej będzie przetwarzany podobnie jak obecnie ma to miejsce z przetwarzaniem informacji w Internecie. Dlatego rola niezawodnej i prostej w strojeniu metody sterowania przepływem i jakością energii elektrycznej jest trudna do przecenienia. Świadczy o tym coraz większe zainteresowanie przemysłu opracowaną modułową, metodą sterowania, który zaczyna kłaść coraz większy nacisk na niezawodność i jakość energii pobieranej/dostarczanej z/do systemu elektroenergetycznego.

W listopadzie 2016 organizacja *Ocean Energy Europe* opublikowała raport ⁷, z którego wynika, że potrzebne są dalsze prace badawczo-rozwojowe w dziedzinie pozyskiwania energii z fal morskich. Między innymi ich kierunek powinien zawierać redukcję kosztu kWh np. poprzez przejście z konstrukcji stalowych na betonowe (*Wave Dragon MW* będzie miał konstrukcję betonową) oraz lepszą kontrolę jakości energii elektrycznej pozyskanej z alternatywnych źródeł energii (jej stabilizację i większą przewidywalność) dostarczonej do sieci elektroenergetycznej. To wszystko pokazuje, że zagadnienia podejmowane przez wnioskodawcę są nadal aktualne i istotne dla społeczeństwa.

Na podstawie uzyskanych wyników wnioskodawca planuje przeprowadzenie dalszych badań *SAPF*, który będzie pracował w realiach sieci i fabryk inteligentnych, gdzie coraz częściej pojawia się idea automatycznej wymiany informacji zgodnej z założeniami *IoE*, gdzie w strumieniu przepływu informacji pomiędzy urządzeniami kluczową rolę odgrywa osoba ludzka. Natomiast interdyscyplinarny

⁷ The European Technology and Innovation Platform for Ocean Energy, “Strategic Research Agenda for Ocean Energy European Technology and Innovation Platform for Ocean Energy”, strony: 63, Listopad 2016.

charakter i ogromna ilość przesyłanych informacji wymaga ujednoczenia i zredukowania co zdaniem wnioskodawcy umożliwi zaproponowane środowisko *DSS* wykorzystujące *FL*. Prace w tym kierunku są kontynuowane.

Wykorzystanie opracowanej modułowej metody sterowania i zaproponowanie nowoczesnego i innowacyjnego sposobu regulacji energii elektrycznej przetwarzanej przez przekształtniki energoelektroniczne zgodnie z najnowocześniejszymi trendami *loE* czy *Enernet* zdaniem wnioskodawcy są kluczowe dla dalszego rozwoju elektrotechniki.

Można przy tym zwrócić uwagę, że przekształtnik energoelektroniczny *MSI* z mikroprocesorową jednostką sterującą, coraz bardziej zaczyna przypominać mikrokomputer, którego funkcjonalność, w dużej mierze, zależy od oprogramowania (algorytmów sterowania) i zapewnia oprócz przetwarzania informacji także przetwarzanie/przekształcanie energii. Już obecnie przekształtniki sieciowe *GC* wyposażone w wyrafinowane oprogramowanie sterujące są stosowane w mikro-sieciach na pokładach największych statków pasażerskich i transportowych ⁸.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych wnioskodawcy, świadczących o istotnej aktywności naukowej habilitanta

Wnioskodawca w ramach swojej aktywności zawodowej współpracuje z krajowymi i zagranicznymi instytucjami naukowo-badawczymi oraz przemysłem uzyskując wymierne efekty swojej pracy. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych wnioskodawcy podzielono, analogicznie do „Wykazu opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy z instytucjami naukowymi i o działalności popularyzującej naukę” (Załącznik nr 3).

Publikacje naukowe w czasopismach z Bazy Journal Citation Reports (JCR)

Zawierają wybrane wyniki przeprowadzonych badań w ramach projektów badawczo rozwojowych oraz przemysłowych prowadzonych przez wnioskodawcę w *PW-ISEP*. We współpracy z *Politechniką Białostocką PB*, w ramach realizacji projektu finansowego przez *NCBiR* „Przekształtnik energoelektroniczny *AC-DC-AC* umożliwiający współpracę generatora asynchronicznego z turbiną wodną lub wiatrową”, przedstawiono wstępne wyniki badań dotyczących metod sterowania

⁸Danfoss, VACON® NXP Grid Converter,

przekształtnikiem *MC* z maszyną indukcyjną. We wspólnych artykułach porównano dwie metody sterowania tj. klasyczną metodę bezpośredniego sterowania momentem *DTC* z zaproponowaną przez *PB* metodą *DTC-3L-3A* wykorzystującą ideę podziału pola uchyby za pomocą trójkątów równobocznych zastosowaną do przekształtnika 3-poziomowego, pozwalającą na dokładniejszą regulację prądu stojana, a co za tym idzie momentu i strumienia. W zaproponowanej metodzie uzyskano możliwość redukcji strat mocy łączeniowych o 50%.

Z drugiej strony przeanalizowano symulacyjnie pracę predykcyjnych algorytmów sterowania trójfazowym przekształtnikiem *GC* bazujących na metodzie bezpośredniego sterowania mocą *DPC*, uwzględniając kąt przesunięcia δ wprowadzony przez indukcyjność filtra sieciowego oraz 3 wektory napięcia generujące najkrótsze pochodne prądu (podobnie jak w przypadku modulacji wektorowej) *DPC-3V- δ* - metoda opracowana przez *PB* – zapewniła minimalizację uchybu prądu sieci. Dzięki temu uzyskano możliwość wydłużenia okresu próbkowania, a tym samym wykorzystania tańszych mikroprocesorów sygnałowych oraz uzyskano stałą częstotliwość łączy.

Następnie przy współpracy z *Tallin University* oraz *Bradley University* wnioskodawca wraz z białostockimi naukowcami opisał system sterowania przekształtnikiem typu *podwójny mostek aktywny DAB* bazujący na połączeniu poprzez aplikację internetową wykorzystując niedrogą platformę *advanced RISC machine ARM*.

W ramach badań wspartych przez *Centrum Studiów Zaawansowanych PW* Projektem Unii Europejskiej z puli Funduszy Strukturalnych w artykule „*Grid Synchronization and Symmetrical Components Extraction with PLL Algorithm for Grid Connected Power Electronic Converters – A Review*” dokonano przeglądu i porównano na podstawie badań symulacyjnych i eksperymentalnych układy synchronizacji fazowej *PLL*.

Nawiązując współpracę z firmą *TRUMPF Huettinger*, w ramach projektu *MNiSW/NCBiR* opracowano innowacyjny produkt zasilacza prądu stałego, chłodzonego wodą do zasilania magnetronu (**opracowany produkt jest sprzedawany seryjnie i został wyróżniony w konkursie *Polski Produkt Przyszłości (Polish Product of the Future) 2012* oraz nominacją do *Godła „Teraz Polska” w 2013 roku***). Badania dotyczyły głównie obwodów wyjściowych DC i rodzaju chłodzenia. Jednak, z inicjatywy wnioskodawcy przeprowadzono szereg badań mających na celu określenie czy opracowany zasilacz spełnia rygorystyczne normy obowiązujące w przemyśle produkującym półprzewodniki (norma *SEMI F47-0706*). Wyniki badań potwierdziły prawidłową pracę urządzenia przy 50% zapadzie napięcia AC o czasie trwania 10 cykli. Jednakże, parametry wejściowe prądu AC oraz praca przy głębszych zapadach wymagała dalszych badań i analiz. Temat ten został podjęty przez wnioskodawcę w ramach obecnie biegnącego projektu *NCBiR INNOTECH*.

Ponieważ na każdym etapie badań pojawiały się pytania, czy dane rozwiązanie otrzymane na koniec realizacji projektu jest optymalne względem wymagań konkretnej aplikacji tj. w aplikacji przekształtnika *AC-DC* jako przekształtnik *GC*, lub jako równoległy filtr aktywny *SAPF*, podjęto nietłatwą tematykę optymalizacji wielokryterialnej projektowania przekształtnika *AC-DC*. Na badania uzyskano finansowanie w ramach grantu *NCN UMO-2012/05/B/ST7/01183* (charakter udziału wnioskodawcy: główny wykonawca). Zagadnienia optymalizacyjne znacznie wykraczały poza doświadczenia wnioskodawcy i *PW-ISEP* dlatego zaproszono do współpracy specjalistów z *Instytutu Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych IETiSIP PW*, z którymi zbudowano informatyczny

system projektowania i optymalizacji *DaOS*⁹, opisany na łamach *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences (IF=1.156)*. W publikacji wykorzystano synergię doświadczeń obu instytutów *PW* i opracowano zaawansowane narzędzie wykorzystujące algorytmy ewolucyjne do wyznaczania frontu *Pareto*, bazując na rozbudowanej bazie elementów w *MySQL* (doświadczenia *PW-IETiSIP*) oraz wiedzę ekspercką z zakresu budowy i sterowania przekształtnikami *AC-DC* (doświadczenia *PW-ISEP* w tym wnioskodawcy).

W ostatnim okresie wnioskodawca nawiązał współpracę z naukowcami indyjskimi, z którymi bada zaawansowane metody modulacji w zastosowaniu do napędów elektrycznych (wyniki współpracy opublikowano na łamach *IEEE Transactions on Industrial Electronics* w 2017 roku).

Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne

Wnioskodawca w ramach badań współpracuje z przemysłem. Głównymi jednostkami z którymi prowadzi projekty rozwojowe oraz celowe są: polska firma *TWERD* z Torunia, oraz firma *TRUMPF Huettinger* (nabywca polskiej firmy *Advanced Converters*).

We współpracy z firmą *TWERD* wnioskodawca specjalizuje się w zagadnieniach związanych z przekształtnikami *AC-DC-AC* pracujących w napędach przemysłowych. Jest członkiem zespołu badawczego, który w 2007 **został nagrodzony przez firmę Siemens nagrodą badawczą za „Opracowanie teorii i wdrożenie do produkcji seryjnej typoszeregu trójfazowych przekształtników tranzystorowych (1,5-315 kVA) ze sterowaniem wektorowym na bazie procesorów sygnałowych”**. Otrzymał za osiągnięcia wypracowane w ramach projektów celowych i badawczych w ścisłej współpracy z firmą *TWERD* za typoszereg przekształtników *MFC 710*.

Przekształtniki serii *MFC 710* są stosowane głównie jako przekształtniki *MC* (falowniki z wejściowym mostkiem diodowym). Dlatego w ramach dalszej współpracy wnioskodawca skupił się nad opracowaniem uodpornionego na zakłócenia napięcia przekształtnika *GC*. W ramach projektu rozwojowego *NCBiR* nr *N R01 0014 06/2009* wnioskodawca opracował rozwiązanie pozwalające na pracę przy nieidealnych warunkach panujących w *PCC*. **Rozwiązanie zostało opatentowane PL410949-A1**.

Następnie wnioskodawca uczestniczył w projekcie celowym finansowanym przez NOT *„Opracowanie i wdrożenie dwukierunkowego, trójpoziomowego przekształtnika AC-DC-AC z diodami poziomującymi (150 kW–800 kW), pracującego w szerokim zakresie zmian amplitudy napięcia zasilającego”*, nr *ROW-III-232/2012*, którego efekt został doceniony tytułem **„Lidera Innowacji Pomorza i Kujaw” dla Zakładu Energoelektroniki TWERD oraz „Laurem Innowacyjności 2013”**. W produkcji wykorzystano zaproponowaną przez wnioskodawcę metodę sterowania przekształtnikiem *AC-DC-AC DPTC-SVM* z algorytmem umożliwiającym poprawną pracę w czasie trwania zapadów napięcia w *PCC*.

Drugim równoległym wątkiem tematycznym są badania i wdrożenia z firmą *TRUMPF Huettinger* poświęcone zasilaczom wykorzystywanym w procesie napyłania magnetronowego. Początkowo dotyczyły one głównie opracowania nowej rodziny zasilaczy chłodzonych wodą (umowa

⁹ <http://acdc.iem.pw.edu.pl/acdc/>

nr 6 ZR6 2009C/07255), gdzie wnioskodawca rozszerzył zakres badań o zgodność z normą SEMI F47-0706. **Opracowany produkt został wyróżniony jako Polski Produkt Przyszłości 2012 w kategorii „Wyrób Przyszłości w Fазie Wdrożeniowej” oraz Godłem „Teraz Polska” w roku 2013.** W dalszym etapie współpracy wnioskodawca wraz z partnerami postanowili udoskonalić zarówno parametry wejściowe (od strony sieci – aktywny przekształtnik GC i jego sterowanie) jak i parametry wyjściowe (od strony komory plazmowej).

Biorąc pod uwagę udoskonalenie parametrów układu wyjściowego, zasilającego komorę plazmową wnioskodawca (jako kierownik ze strony PW-ISEP) rozpoczął projekt *HiPIMS, INNOTECH-K2/IN2/22/181994/NCBR/12*. Przekształtniki *HiPIMS* charakteryzuje duża moc i bardzo krótki czas trwania impulsu wyjściowego (maksymalna moc impulsu do 1000 kW, czas trwania impulsu wyjściowego do 1 ms, częstotliwość impulsów wyjściowych do 10 kHz, wyjściowa moc średnia do 20 kW). W czasie wykonywania projektu zaproponowano wiele innowacyjnych rozwiązań takie jak: zastosowanie nowych łączników mocy, opracowanie nowej metody sterowania oraz modyfikację topologii przekształtnika. Wszystkie rozwiązania z sukcesem zaimplementowano, a produkt jest obecnie sprzedawany seryjnie przez firmę *TRUMPF Huettinger* z Zielonki pod Warszawą. Produkcja firmy w niemal 100% nastawiona jest na eksport, a jej produkty znajdują zastosowanie w firmach wysokich technologii na całym Świecie np. Korea Południowa, USA czy Chiny. Produkt zaprezentowano również na konferencji *HIPIMS Days 2016* w Shieffield, Wielka Brytania.

Mając na uwadze rozwój i poprawę parametrów układu stopnia wejściowego (przekształtnika GC). Rozpoczęto projekt *„Typoszereg wysokoczęstotliwościowych zasilaczy bipolarnych na bazie elementów z węglika krzemu o zwiększonej odporności na zakłócenia i zaniki napięcia zasilającego oraz regulowanym przebiegu napięcia wyjściowego”*, nr *INNOTECH-K3/IN3/10/226139/NCBR/14*. W ramach tego projektu implementowany jest uodporniony algorytm sterowania opracowany przez wnioskodawcę i zespół naukowy *PW-ISEP* (na podstawie patentu PAT.226667).

Udzielone patenty międzynarodowe i krajowe

Pierwszy to *„Układ sterowania przekształtnikiem AC-DC-AC”* nr PL401702-A1, PAT.223775 w którym opatentowano nowy układ sterowania dedykowanego do pracy autonomicznej i pracy sieciowej przekształtnika *AC-DC-AC* łączącego elektrownię wiatrową z systemem elektroenergetycznym lub odbiornikiem lokalnym. Zaproponowane rozwiązanie oprócz wysokiej jakości energii (bez względu na głębokość zapadów napięcia i wyższych harmonicznych) po stronie przekształtnika GC i precyzyjnego algorytmu *MPPT* po stronie przekształtnika MC zapewnia płynne przejście pomiędzy trybami pracy: autonomicznym i sieciowym.

Drugi patent dotyczy *„Układu sterowania sieciowym przekształtnikiem AC-DC z dwukierunkowym przesyłem energii”*, PL410949-A1, PAT.226667, w którym wnioskodawca przedstawił modułowy układ sterowania przekształtnikiem zapewniający wysoką jakość energii po stronie AC i DC. Regulator napięcia DC i mocy chwilowych zapewnia odpowiednie proporcje pomiędzy zrównoważeniem prądów sieci a oscylacją napięcia DC (w czasie zapadów napięcia sieci i obecności wyższych harmonicznych napięcia w PCC).

Monografie, publikacje znajdujące się w czasopismach innych niż znajdujące się w bazie JCR

W ramach tego punktu wnioskodawca może przytoczyć trzy rozdziały w monografiach edytowanych przez międzynarodowy zespół edytorów oraz ośmioma pozycjami w czasopismach zagranicznych i krajowych.

Pierwszy rozdział to „*Fundamentals of AC-DC-AC Converters Control and Applications*” w „*The Industrial Electronics Handbook – Power Electronic and Motor Drives*” wydanym przez CRC Press, Taylor & Francis Group Boca Raton, w którym wnioskodawca przedstawił podstawy projektowania sterowania przekształtnikiem AC-DC-AC. Słuszność założeń upraszczających i dokładność otrzymanego modelu została zweryfikowana symulacyjnie i laboratoryjnie.

Drugi rozdział „*AC-DC-AC Converters for Distributed Power Generation Systems*” również dotyczy zagadnień związanych z przekształtnikami AC-DC-AC jednak bardziej zaawansowanych i ogólnych przypadków. Poruszono w nim zagadnienia związane z różnymi topologiami przekształtników. Rozdział jest częścią monografii „*Power Electronics For Renewable Energy Systems, Transportation, And Industrial Applications*” wydanej przez John Wiley & Sons, Ltd. Wnioskodawca przedstawia w nim parametry układów dwu i trzy poziomowych w wersjach klasycznych i w wersjach ze zredukowaną ilością łączników półprzewodnikowych.

Trzeci rozdział pt „*Control of Grid Connected Converter (GCC) Under Grid Voltage Disturbances*” będący częścią monografii „*Advanced And Intelligent Control In Power Electronics And Drives*”, Springer Book Series: Studies in Computational Intelligence traktuje o zagadnieniach związanych z odpornością układu przekształtnika GC na zapady, zaniki i zakłócenia wyższymi harmonicznymi napięcia sieci. Wnioskodawca przedstawił w nim nowatorskie rozwiązanie sterowania RDPC-SVM oraz metodologię badań przekształtników GC w warunkach zaburzonego napięcia i podwyższonej impedancji sieci w PCC.

W następnych publikacjach nawiązano do układu odprowadzania energii elektrycznej z elektrowni na fale morskie oraz sposobów jego sterowania. Jak również przedstawiono przegląd topologii oraz sposoby wykonania współczesnych systemów HVDC - przeglądowa pozycja „*Współczesne systemy przesyłu energii prądem stałym HVDC*” powstała w ramach współpracy z PSE Oparator S.A., która stanowiła część ekspertyzy zamówionej przez PSE w PW-ISEP.

W ostatnich trzech pozycjach została przedstawiona praca przekształtnika AC-DC jako przekształtnik GC oraz jako filtr aktywny. W „*AC-DC Converter with Asymmetrical Higher Harmonics Compensation Function in Sustainable AC Grid*” przedstawiono zagadnienie kompensacji wyższych harmonicznymi, niesymetrycznymi. W pozycji „*Design of AC-DC Grid Connected Converter using Multi-Objective Optimization*” opisano pokrótce sposób optymalizacji przekształtnika sieciowego pracującego jako przekształtnik GC lub jako równoległy filtr aktywny SAPF. Na zakończenie w publikacji „*Nowe sterowanie predykcyjne 3-poziomym 4-gałęziowym równoległym filtrem aktywnym - zastosowanie modelu o ograniczonej liczbie stanów*” omówiono zagadnienia związane z implementacją nowoczesnej metody sterowania predykcyjnego w równoległym filtrze aktywnym przedstawiając bardzo dobrą zgodność wyników symulacyjnych z eksperymentalnymi.

Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz

Wnioskodawca na zamówienie czterech firm opracował następujące ekspertyzy:

1. Dla polskiej firmy *AB Industry*, która w recenzowanym rozwiązaniu systemów sterowania sztankietami teatralnymi zaplanowała możliwość magazynowania i odzyskiwania energii. Firma zaproponowała zastosowanie przekształtników *AC-DC-AC* z dwukierunkowym przepływem energii renomowanej japońskiej firmy *Mitsubishi Electric*. Rozwiązanie to porównano z koncepcją konkurencyjną wykorzystującą jeden duży dwukierunkowy przekształtnik sieciowy ze wspólną szyną DC, do której podłączono przekształtniki *MC* małej mocy. Obie topologie zapewniały podobne funkcjonalności.

2. Firma *TRUMF Huettinger* zleciła przebadanie przekształtnika *GC* opartego na łącznikach mocy typu MOSFET. Częstotliwość łączy z zakresu od 30 kHz do 100 kHz. Badania przeprowadzono w laboratorium *PW-ISEP* pod kierownictwem wnioskodawcy.

3. Na zamówienie *PSE Operator S.A.* przygotowano opracowanie wskazujące na możliwości zastosowania układów *HVDC* opartych na tranzystorach IGBT w sprzęgu (wstawce) pomiędzy Polską a Litwą. W dokumentacji prac badawczych przeprowadzono optymalizację kosztową wstawki, biorąc pod uwagę topologie, elementy półprzewodnikowe mocy oraz elementy biernie po stronach AC i w obwodzie DC.

4. Firma *ABB* przedstawiła bardzo ciekawy problem badawczy do opracowania na podstawie badań symulacyjnych tj. wykorzystanie w nietypowy sposób przekształtnika *AC-DC*. W ramach badań opracowano i zbudowano model symulacyjny, przeprowadzono kompleksowe badania i przygotowano dokumentację z prac badawczych.

Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach

Wnioskodawca brał lub nadal bierze udział w 17 projektach badawczych krajowych i międzynarodowych z czego w 5 jako kierownik, w 5 jako główny wykonawca oraz w 7 jako wykonawca.

W projekcie „*Mobilny system zasilania statków napięciem średnim z nabrzeży portowych elementem zwiększenia ekologiczności i ekonomiczności transportu morskiego*”. Zespół *PW-ISEP* wraz z wnioskodawcą zaproponował rozwiązanie na synchronizację dwóch systemów elektroenergetycznych: statku z portowym systemem elektroenergetycznym – opracowano nową metodę synchronizacji przekształtnika *AC-DC* od strony statku.

Trzy projekty z firmą *TRUMPF Huettinger* stanowią cykl projektów badawczo rozwojowych poświęcony poprawom parametrów pracy zasilaczy wykorzystywanych do technologii napyłania magnetronowego.

Dwa projekty badawcze *NCN* oraz *MNiSW* poświęcone były badaniom sterowania predykcyjnego w zastosowaniu do przekształtników *AC-DC* pracującego jako trójpoziomowy, czterogaźziowy równoległy filtr aktywny mocy oraz jako dwupoziomowy przekształtnik *GC*.

W ramach projektu „Badania i rozwój procedur optymalizacji wielokryterialnej nowoczesnych przekształtników AC-DC w szczególności dla systemów energetyki odnawialnej/rozproszonej” zaproponowano sposób optymalizacji i projektowania przekształtników AC-DC w trzech różnych aplikacjach: przekształtnika sieciowego GC, przekształtnika spełniającego rolę pomocniczą w stosunku do przekształtnika diodowego większej mocy oraz równoległego filtra aktywnego mocy.

Siedem projektów tematycznie dotyczyło badań poświęconych przekształtnikom AC-DC-AC. W ramach tych projektów wnioskodawca doskonalił swój warsztat badawczy oraz rozwijał wiedzę na temat zagadnień związanych z topologiami oraz metodami sterowania przekształtnikami AC-DC-AC pracującym jako sprzęg pomiędzy aktywnym obciążeniem lub OZE a nieidealną siecią elektroenergetyczną.

Na zakończenie trzy projekty były poświęcone przekształtnikom AC-DC: jeden przekształtnikowi GC, oraz dwa projekty przekształtnikowi MC. W ramach tych badań wnioskodawca skupił się odpowiednio nad zjawiskami zachodzącymi w przekształtnikach GC oraz w przekształtnikach MC.

Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową

Wnioskodawca otrzymał szereg nagród i wyróżnień za działalność naukową:

- W 2017 roku **pierwsza nagroda za osiągnięcia naukowo-techniczne Prezesa Rady Ministrów** - został nagrodzony zespół, w skład którego wchodzi wnioskodawca: za nowoczesne przekształtniki energoelektroniczne dla odnawialnych źródeł energii i przemysłu wydobywczego. Jak czytamy w opisie opublikowanym na stronie Kancelarii Premiera Rady Ministrów: „Badania związane z opracowaniem metod sterowania dla układów energoelektronicznych są jednymi z najistotniejszych w obszarze elektrotechniki, ich wyniki wytyczają kierunki rozwoju energoelektroniki w zastosowaniach przemysłowych, często stanowiąc odpowiedź na globalne wyzwania związane z efektywnym wytwarzaniem i przetwarzaniem energii elektrycznej. **Rezultaty pracy zespołu mają istotne znaczenie nie tylko dla rozwoju nauki, ale także dla zrównoważonego rozwoju innowacyjnej gospodarki**”¹⁰.
- W tym **4 nagrody J.M. Rektora PW**: zespołową III-stopnia w 2015 r., zespołową I-stopnia w 2012 r., zespołową I-stopnia w 2011 r. oraz zespołową I-stopnia w 2007 r.
- Stypendium dla młodych uczonych „START” **Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej** 2007 r.
- Wyróżnienie i nagrodę od firm przemysłowych:
 - wyróżnienie w Konkursie o Nagrodę ABB edycji 2006/2007
 - nagrodę badawczą Siemens (zespołowa), w 2007 r.

¹⁰ <http://bip.kprm.gov.pl/download/75/19678/ListapracwyroznionychNagrodaPRM2017.docx>

- Również w 2007 roku dwie nagrody pieniężne za wyróżniającą postawę i pracę na rzecz Wydziału i Uczelni odpowiednio od Dziekana Wydziału Elektrycznego oraz Prorektora ds. Ogólnych.
- Dwa stypendia przyznawane w ramach konkursu przez Centrum Studiów Zaawansowanych PW: wyjazdowe na *Uniwersytet RWTH Aachen University E.ON Energy Research Center, Institute for Power Generation and Storage Systems* oraz stacjonarne.
- Dwie nagrody za najlepszą prezentację/artkuł w ramach międzynarodowych konferencji.

Wyłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych

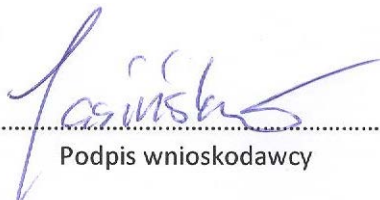
Łącznie na konferencjach zaprezentowano 43 (33 na międzynarodowych konferencjach tematycznych i 10 na krajowych) artykuły, w których wnioskodawca był współautorem lub autorem.

Trzy z nich zostały nagrodzone na konferencjach międzynarodowych. Na uwagę zasługuje również fakt, iż na dwa artykuły konferencyjne wnioskodawcy powołują się patenty na rynek USA.

W 12 (10 na międzynarodowych i 2 na krajowych konferencjach tematycznych) przypadkach wnioskodawca wziął udział w konferencji i wyłosił referat.

W 14 (12 na międzynarodowych i 2 na krajowych konferencjach tematycznych) przypadkach wnioskodawca wziął udział w konferencji a współautor wyłosił referat.

W 17 (11 na międzynarodowych i 6 na krajowych konferencjach tematycznych) przypadkach wnioskodawca nie wziął udział w konferencji, współautor wyłosił referat.



 Podpis wnioskodawcy

.....
 i) wybrać właściwe wg wniosku i uprawnień wskazanej jednostki (Wydział Elektryczny PW: automatyka i robotyka lub elektrotechnika

ii) w przypadku prac współautorskich należy wskazać (pod każdą pozycją) indywidualny, precyzyjnie określony przez habilitanta, merytoryczny i procentowy jego wkład w powstanie tych prac. Należy też obligatoryjnie **załączyć** oświadczenia każdego z pozostałych współautorów (minimum czterech, jeśli współautorów jest więcej niż pięciu), określające ich indywidualny, precyzyjnie określony wkład merytoryczny w powstanie tych prac – zaleca się podanie także wkładu procentowego. Wzór oświadczenia współautorów podano w załączniku nr 4 do niniejszych *Zasad prowadzenia postępowań habilitacyjnych*. Oświadczenia należy złożyć także w przypadku zespołowego oryginalnego osiągnięcia projektowego, konstrukcyjnego lub technologicznego,

2) przy każdej pozycji zaleca się podanie wskaźnika „impact factor” czasopisma, wg roku opublikowania pracy.