

Dariusz Borkowski

Politechnika Krakowska

Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej

Załącznik 3

Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko

Dariusz Borkowski

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

- 26.10.2006 Magister inżynier elektrotechniki, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, specjalność: inżynieria systemów elektrycznych, dyplom z wyróżnieniem;
- 2006-2007 Studia podyplomowe na kierunku: Komputerowe systemy sterowania i sterowanie cyfrowe, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki;
- 29.09.2010 **Doktor nauk technicznych** w dyscyplinie elektrotechniki, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, tytuł pracy: „Analiza pracy przekształtnika macierzowego jako łącznika w systemie elektroenergetycznym”, promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusz Sobczyk, recenzenci: prof. dr hab. inż. Maciej Siwceżyński, prof. dr hab. inż. Stefan Paszek, prof. dr hab. inż. Kazimierz Mikołajuk;
- 2011-2012 Studia podyplomowe na kierunku: Menedżer badań naukowych i prac rozwojowych, Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 2007-2011 Asystent – Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska;
- 2011- Adiunkt – Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.)**4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego:**

Osiągnięciem naukowym, zdobytym po otrzymaniu stopnia doktora, jest cykl publikacji powiązanych tematycznie zatytułowany:

„Układy generacji energii elektrycznej wykorzystywane w elektrowniach wodnych małej mocy”



4.2 Wykaz prac naukowych, składających się na osiągnięcie naukowe, stanowiące podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego:

Lp.	Autor/autorzy, rok wydania, tytuł publikacji, nazwa wydawnictwa, nazwa czasopisma, tom, strony	IF (MNiSW) Udział
P1	Borkowski D. , Węgiel T., 2013, <i>Small Hydropower Plant with Integrated Turbine-Generators Working at Variable Speed</i> , IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 28, no. 2, June 2013, pp. 452-459, doi: 10.1109/TEC.2013.2247605	3.353 (40 pkt) 50%
P2	Borkowski D. , 2015, <i>Control Strategy For Maximizing Conversion Efficiency Of Small Hydropower Plant</i> , Technical Transactions – Electrical Engineering, Issue 1-E, pp.15-24	- (13 pkt) 100%
P3	Borkowski D. , 2015, <i>Small Hydropower Plant as a Supplier for the Primary Energy Consumer</i> , 16 th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Brno, Republika Czeska, 20-22 Maj 2015, Materiały Konf., (ISBN 978-1-4673-6787-5) pp. 148-151	WoS (15 pkt) 100%
P4	Borkowski D. , 2016, <i>Voltage and frequency control of stand-alone induction generator using SVPWM converter in reservoir small hydropower plant</i> , Technical Transactions – Electrical Engineering, 3-E/2016, pp. 51-63, doi: 10.4467/2353737XCT.16.265.6064	- (13 pkt) 100%
P5	Borkowski D. , 2017, <i>Water level control of a small hydropower plant with a surge tank</i> , Journal of Hydraulic Research. vol. 55, no. 02, pp. 284 – 291, doi:10.1080/00221686.2016.1252800	2.076 * (30 pkt)** 100%
P6	Borkowski D. , 2017, <i>Maximum Efficiency Point Tracking (MEPT) for Variable Speed Small Hydropower Plant with Neural Network Based Estimation of Turbine Discharge</i> , in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 32, no. 3, pp. 1090-1098, Sept. 2017, doi: 10.1109/TEC.2017.2690447	3.767 * (35 pkt)** 100%
P7	Borkowski D. , 2017, <i>Average-value model of energy conversion system consisting of PMSG, diode bridge rectifier and DPC-SVM controlled inverter</i> , International Symposium on Electrical Machines (SME), Naleczow, Poland, 18-21 June 2017, Materiały Konf., doi: 10.1109/ISEM.2017.7993544	WoS (15 pkt)** 100%
P8	Borkowski D. , Węgiel T., 2018, <i>Energy-Recovery Pressure-Reducer in District Heating System</i> , Water, 2018, 10(6), 787; https://doi.org/10.3390/w10060787 (Open Access)	2.069 * (30 pkt)** 80%
P9	Borkowski D. , 2018, <i>Analytical Model of Small Hydropower Plant Working at Variable Speed</i> , in IEEE Transactions on Energy Conversion, on-line (early access), doi: 10.1109/TEC.2018.2849573	3.767 * (35 pkt)** 100%
P10	Borkowski D. , 2018, <i>Identification of the Optimal Control Characteristics of a Small Hydropower Plant Using Artificial Neural Networks and the Support Vector Machines Method</i> , Journal of Hydraulic Research, on-line, doi: 10.1080/00221686.2018.1522378	2.076 * (30 pkt)** 100%
	Sumaryczny IF Suma pkt Średni udział	17.108 (256 pkt) 93%

* w roku publikacji IF nie był określony; podany IF jest za rok 2017, tj. najbliższy poprzedzający publikację

** w roku publikacji punkty MNiSW nie były określone; podane punkty są za rok 2016, tj. najbliższy poprzedzający publikację

4.3 Omówienie celu naukowego w/w prac i osiągniętych wyników, wraz ze wskazaniem ich ewentualnego wykorzystania, w tym omówienie oryginalnych osiągnięć o charakterze konstrukcyjnym, technologicznym lub projektowym.

4.3.1 Omówienie tematyki badawczej i celu naukowego

Większość lokalizacji pozwalających na budowę elektrowni wodnych dużej mocy zarówno w Europie jak i na świecie została już wykorzystana. Ponadto, koszty budowy i negatywny wpływ na środowisko naturalne mocno ograniczyły liczbę nowo powstających inwestycji. W tej sytuacji obiekty małej mocy, tzn. do 10 MW zyskały na znaczeniu. Nowe rozwiązania konstrukcji turbin wodnych zmniejszyły koszty produkcji hydrozespołów, natomiast coraz bardziej powszechne przekształtniki energoelektroniczne zwiększyły możliwości produkcyjne tych obiektów.

Obecnie elektrownie wodne małej mocy nabrały nowego znaczenia z uwagi na ich możliwą pożyteczną rolę w systemie elektroenergetycznym. Podobnie jak inne typy źródeł odnawialnych, tj. ogniwa fotowoltaiczne czy elektrownie wiatrowe, stanowią one rozproszone źródła energii, które dywersyfikują rynek energii oraz zmniejszają straty przesyłowe. W dobie szybko narastającego udziału odnawialnych źródeł energii w produkcji całkowitej energii elektrycznej, negatywny wpływ źródeł o dużej dynamice zmian produkcji na pracę całego systemu jest coraz bardziej dostrzegalny. Może to powodować czasowe przeciążenia wybranych linii przesyłowych oraz problemy ze stabilnością pracy systemu. Elektrownie wodne natomiast charakteryzują się znacznie większą stabilnością produkcji energii elektrycznej od wcześniej wspomnianych źródeł odnawialnych, a obiekty zbiornikowe mają dodatkowo możliwość magazynowania energii.

Istotnym trendem w przemyśle jest odzysk energii z procesów technologicznych. Widoczny jest tu rosnący udział rozwiązań hydrotechnicznych, które pozwalają na produkcję energii elektrycznej wszędzie tam, gdzie istnieje możliwa do wykorzystania energia wody. Można tu wyróżnić m. in. takie instalacje jak: oczyszczalnie ścieków, sieci wody chłodzącej w procesach przemysłowych (np. instalacje petrochemiczne), sieci przesyłu wody użytkowej oraz centralnego ogrzewania.

Wskazane powyżej nowe funkcje oraz aplikacje elektrowni wodnych powodują różnorodność ich zadań w systemie elektroenergetycznym. W obiektach typu on-grid małej mocy istotnym staje się wysoka sprawność przetwarzania energii. W systemach wyspowych (off-grid) ważnym parametrem jest jakość energii elektrycznej. Dodatkowo można wyróżnić systemy kompensacji energii bazujące na elektrowni wodnej, gdzie wymagana jest produkcja określonej mocy czynnej i/lub biernej o zadanej dużej dynamice zmian.

Analiza pracy wybranych układów generacji energii elektrycznej wykorzystywanych w elektrowniach wodnych małej mocy oraz poprawa parametrów wytwarzanej energii elektrycznej stanowią cel naukowy w/w cyklu publikacji. W swoich pracach proponuję poprawę parametrów generowanej energii elektrycznej poprzez dobór odpowiednich rozwiązań technicznych oraz algorytmów kontroli. Pod uwagę biorę zarówno układy przetwarzania energii pracujące przy stałej prędkości obrotowej, jak i układy o zmiennej prędkości obrotowej. Często spotykane rozwiązanie w układach małej mocy bazujące na generatorze klatkowym pracującym przy stałej prędkości obrotowej jest

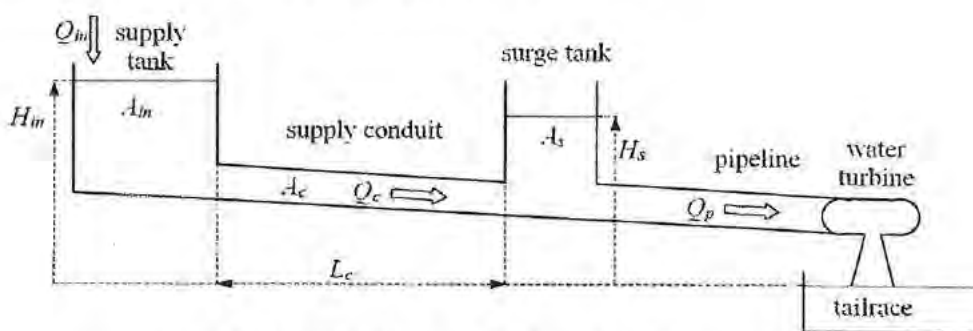
ekonomicznie uzasadnione, natomiast charakteryzuje się ograniczeniami zwłaszcza w układach typu off-grid. Aplikacja ta wymaga opracowania dedykowanego układu regulacji mocy czynnej i biernej, którego celem będzie stabilizacja częstotliwości oraz wartości skutecznej napięcia. Istotnym aspektem analizowanym przeze mnie jest uwzględnienie dodatkowego układu kontroli poziomu naładowania akumulatora sprzęgniętego z kierownicą turbiny. Największą uwagę poświęciłem jednak układom o zmiennej prędkości obrotowej, które charakteryzują się dużymi możliwościami regulacyjnymi i wysoką sprawnością w szerokim zakresie generowanej mocy. W elektrowniach wodnych najkorzystniejszy jest układ generacji energii elektrycznej składający się z generatora synchronicznego z magnesami trwałymi sprzęgniętego z przekształtnikiem energoelektronicznym. Dokładna analiza pracy takiego układu wymaga opracowania modeli uwzględniających straty mocy przekształtnika oraz obecności w jego strukturze regulatorów. Analizy takie są bardzo ważne pod kątem praktycznym. Kluczowe jest przygotowanie modeli i opracowane uniwersalnych algorytmów sterowania pracą układów generacji energii elektrycznej, które pozwolą na prowadzenie analiz użytecznych z eksploatacyjnego punktu widzenia. Zadaniem algorytmów w zależności od analizowanej aplikacji może być maksymalizacja sprawności lub generacja określonej wartości mocy czynnej czy biernej. Szerokie możliwości tego układu przetwarzania energii pozwalają na jego nowe aplikacje, m. in. w systemach odzysku energii elektrycznej z procesów przemysłowych, np. z redukcji ciśnienia w systemach dystrybucji wody. Rozwiązania takie wymagają dokładnej analizy współpracy poszczególnych elementów toru przetwarzania energii oraz jego oddziaływania na otoczenie, co również jest przedmiotem moich badań. Ważnym aspektem podczas analizy pracy elektrowni wodnych jest poprawna identyfikacja parametrów, jak również odpowiednie modelowanie układów przetwarzania energii. Większość opracowanych w literaturze modeli elektrowni wodnych przeznaczona jest do badań stabilności systemu elektroenergetycznego, układów regulacji częstotliwości czy mocy biernej. Modele te nie są odpowiednie dla obiektów małej mocy oraz układów pracujących przy zmiennej prędkości obrotowej, dlatego konieczne było przygotowanie nowych dedykowanych modeli. W modelach ważne są te właściwości procesów przetwarzania energii, które najbardziej oddziałują na dynamikę, zakres regulacji oraz sprawność elektrowni wodnych. Duży wpływ na właściwości generowanej energii elektrycznej przez elektrownie wodne ma system hydrauliczny oraz hydrozespół. Potwierdza to konieczność przygotowania dedykowanych modeli bazujących na prawach mechaniki płynów. Poprawne modelowanie elektrowni wodnych wymaga więc integracji modeli hydraulicznych oraz modeli układów przetwarzania energii mechanicznej na elektryczną.

4.3.2 Omówienie osiągniętych wyników, wraz z przedstawieniem ich ewentualnego wykorzystania, w tym omówienie oryginalnych osiągnięć o charakterze konstrukcyjnym, technologicznym lub projektowym.

Identyfikacja parametrów i modelowanie systemów hydraulicznych

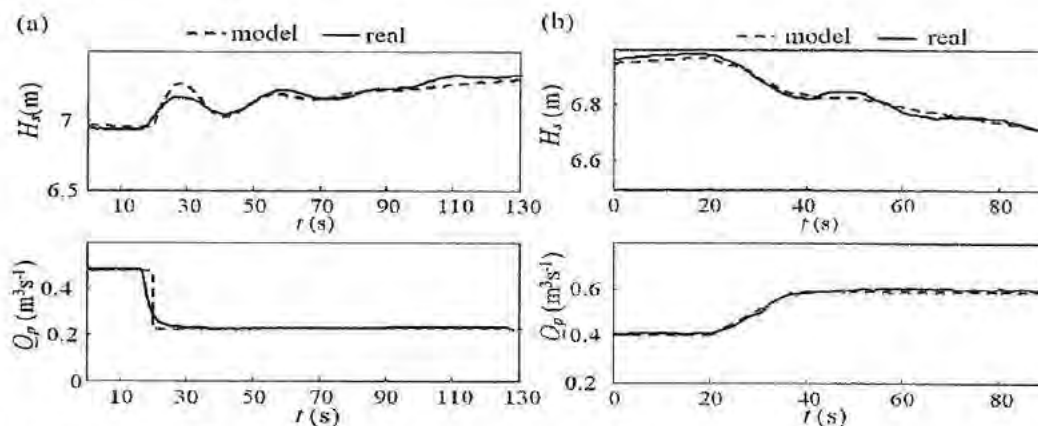
Istotnym elementem układu przetwarzania energii elektrowni wodnej jest system hydrauliczny, tj. kanały, rurociągi i zbiorniki wody, które doprowadzają wodę do turbiny. Charakteryzuje się on długimi stałymi czasowymi w porównaniu do innych elementów

obiekty, co determinuje dynamikę oraz możliwości produkcji energii elektrycznej. Dotyczy to szczególnie obiektów zasilanych z systemów hydraulicznych zawierających zbiorniki pośrednie, które mogą być źródłem oscylacji i niestabilnej pracy elektrowni. Rozwiązania takie są szczególnie często spotykane w systemach odzysku energii z procesów technologicznych, gdzie woda doprowadzana jest rurociągami ze zbiornikami pośrednimi niwelującymi uderzenie hydrauliczne. Mając na uwadze powyższe aspekty przygotowałem w pracy [P5] model systemu hydraulicznego dwuzbiornikowego (Rys. 1) w oparciu o układ trzech równań różniczkowych o stałych współczynnikach.



Rys. 1. System hydrauliczny ze zbiornikiem pośrednim [P5]

Głównym problemem podczas tworzenia takiego modelu jest wyznaczenie współczynników równania, które opisują wymiary oraz właściwości materiałów. Szczególnie trudne jest oszacowanie współczynnika strat hydraulicznych. Z tego względu zaproponowałem metodę identyfikacji parametrów na podstawie odpowiedzi systemu na skok jednostkowy przepływu wody. Ważną właściwością tej metody jest możliwość przeprowadzenia jej w rzeczywistych warunkach poprzez nagłe otwarcie dopływu wody do turbiny. Efekty wykorzystania zaproponowanego modelu zweryfikowałem dla rzeczywistej elektrowni wodnej o mocy 55 kW znajdującej się na zrzucie wody z oczyszczalni ścieków w Toruniu. Jako współprojektant oraz wykonawca systemu automatyki tego obiektu miałem możliwość przeprowadzenia dokładnych badań. Na podstawie testu skoku jednostkowego zidentyfikowałem parametry systemu hydraulicznego. Następnie porównałem odpowiedzi modelu i rzeczywistego systemu na skokowe i trapezowe wymuszenie przepływu wody, co potwierdziło poprawność opracowanego modelu (Rys. 2).



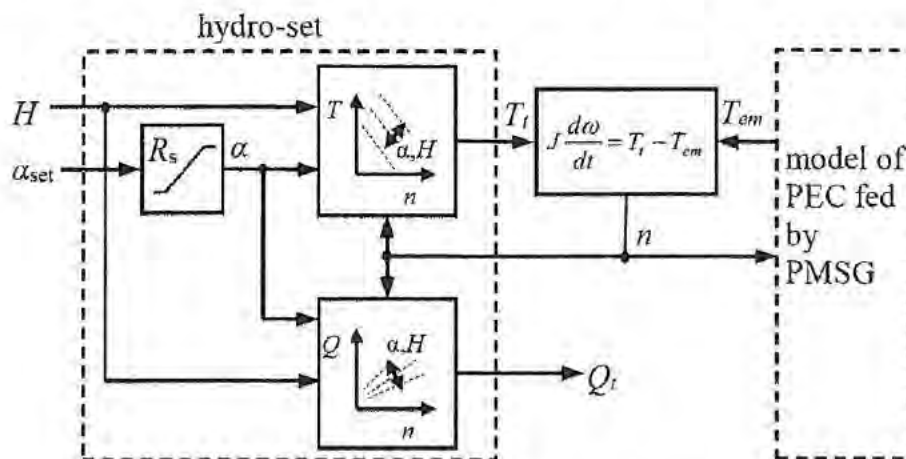
Rys. 2. Odpowiedzi modelu i rzeczywistego obiektu na skokowe i trapezowe wymuszenie przepływu wody [P5]

Identyfikacja parametrów i modelowanie hydrozespołów

Kolejnym elementem mającym kluczowe znaczenie w torze przetwarzania energii jest hydrozespół składający się najczęściej z aparatu kierowniczego (zwanego dalej kierownicą) oraz turbiny wodnej. Aparat kierowniczy turbiny ma wpływ na właściwości dynamiczne elektrowni i, z uwagi na fizyczną realizację układu napędowego kierownicy, jest najczęściej modelowany członem inercyjnym drugiego rzędu. Turbina wodna natomiast jest głównym elementem wpływającym na sprawność całego układu przetwarzania energii oraz determinuje możliwości regulacyjne generowanej mocy czynnej elektrowni. W zależności od właściwości sytemu hydraulicznego oraz rodzaju pracy turbiny można wyróżnić modele turbin o różnym stopniu uszczegółowienia, co przedstawiłem w swoich pracach.

W przypadku gdy spad wody (definiowany jako różnica poziomów zbiornika górnego i dolnego) jest stały oraz gdy turbina pracuje przy stałej lub prawie stałej prędkości obrotowej, model turbiny można uprościć do zależności liniowej przełyku turbiny (definiowanego jako objętość wody przepływającej przez turbinę w określonym czasie) od kąta otwarcia kierownicy, co pokazałem na przykładzie turbiny Francisza w pracy [P5].

W elektrowniach wodnych małej mocy, które są najczęściej obiektami o niskim spadzie wody, występują istotne zmiany spadku. Dodatkowo, gdy analizuje się pracę przy zmiennej prędkości obrotowej, np. z wykorzystaniem układów przekształtnikowych, dokładny model turbiny wodnej jest konieczny. W pracy [P9] przedstawiłem model turbiny bazujący na funkcjach zmian momentu i przełyku turbiny od prędkości obrotowej, zależnych dodatkowo od kąta otwarcia kierownicy oraz spadku wody (Rys. 3).

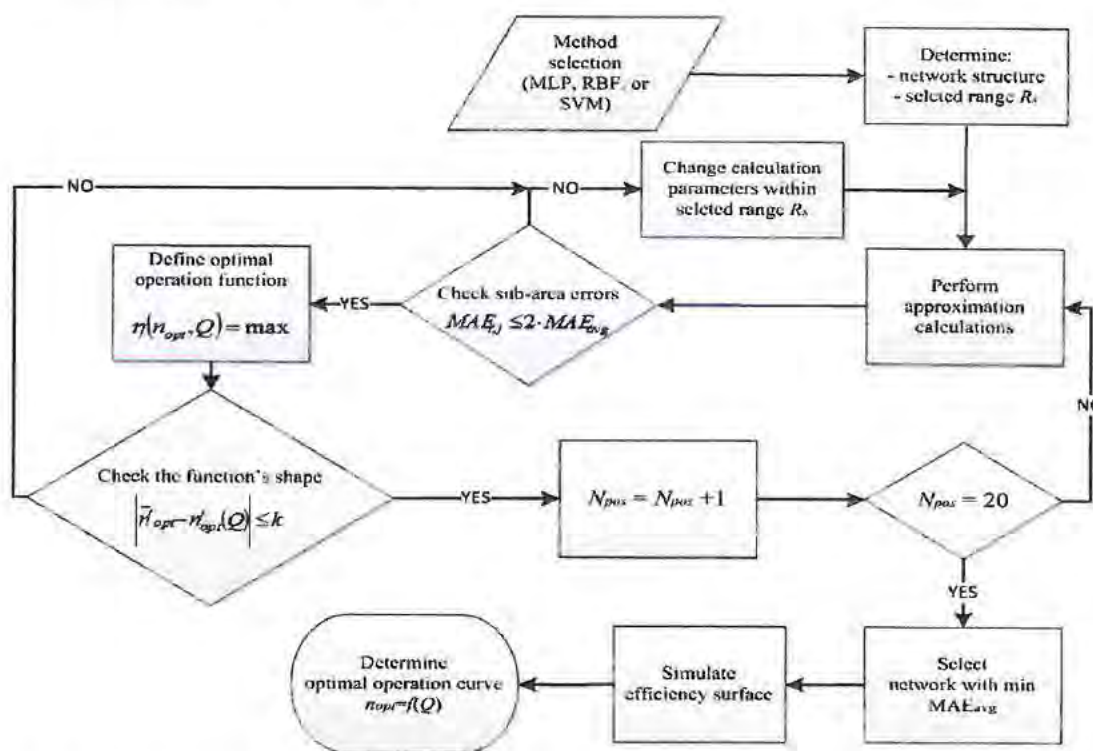


Rys. 3. Model hydrozespołu [P9]

Istotną cechą tego modelu jest możliwość identyfikacji jego parametrów na podstawie charakterystyki uniwersalnej turbiny, która przedstawia izolnie sprawności na płaszczyźnie przełyku i prędkości obrotowej. Tego typu charakterystyki są wyznaczane przy badaniach modelowych turbin, wobec tego są dostępne w literaturze. Niestety właściwości turbin wodnych mogą ulec zmianie w trakcie ich eksploatacji z uwagi na procesy starzeniowe (np. kawitację) czy zanieczyszczenie kanałów wodnych. Ponadto, jak pokazałem w [P9], wpływ innych elementów układu przetwarzania energii (tj. generatora, przekształtnika energoelektronicznego) na całościową sprawność jest znaczący, wobec tego analiza pracy

elektrowni wodnej powinna obejmować całość układu przetwarzania energii. Powoduje to konieczność przeprowadzenia badań identyfikacyjnych na rzeczywistym obiekcie. Zadanie to jest pracochłonne i wymaga użycia precyzyjnych urządzeń pomiarowych, co w małych elektrowniach wodnych może okazać się nieekonomiczne. Z tego powodu opracowałem metodę dedykowaną do wyznaczenia charakterystyki sprawności układu przetwarzania energii oraz krzywej optymalnej pracy, tzn. krzywej punktów pracy z maksymalną sprawnością przetwarzania energii. Główną zaletą metody opisaną w [P10] jest możliwość dokonania dokładnej identyfikacji przy ograniczonej liczbie dostępnych punktów pomiarowych. Algorytm identyfikacji (Rys. 4) bazuje na wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji, tj. sieci neuronowej MLP (multi-layer perceptron), RBF (radial basis function) lub metodzie SVM (support vector machines) oraz dedykowanych współczynników oceny aproksymacji.

Jak pokazały testy algorytmu na rzeczywistych danych pomiarowych, metoda ta pozwala ograniczyć liczbę punktów pomiarowych do 25% przy zachowaniu dużej dokładności aproksymacji optymalnej krzywej pracy.

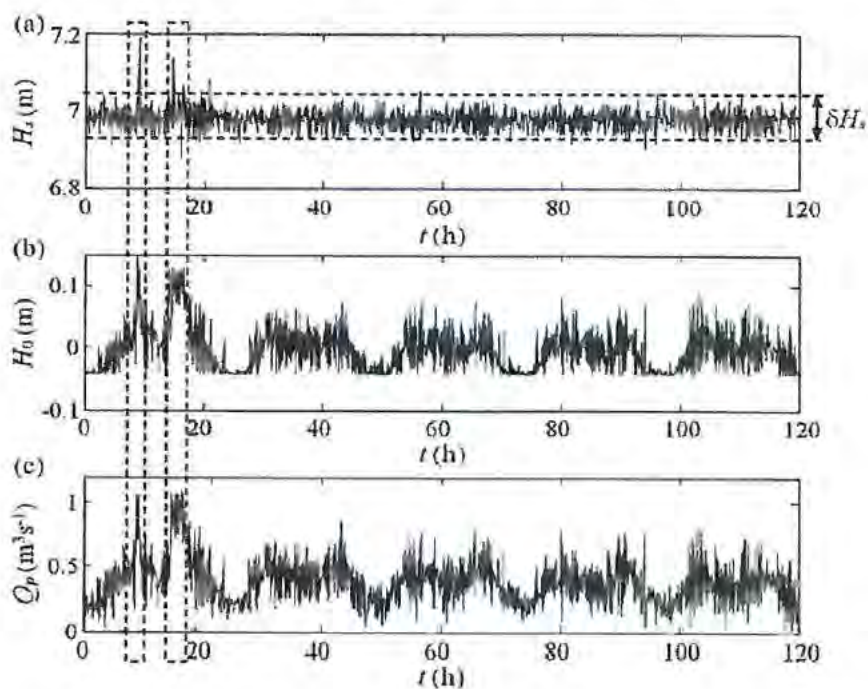


Rys. 4. Algorytm identyfikacji charakterystyki uniwersalnej i optymalnej krzywej pracy układu przetwarzania energii elektrowni wodnej [P10]

W dalszej kolejności, wykorzystując opisane powyżej modele hydrozespołów z systemem hydraulicznym, przedstawiłem metody poprawy wybranych parametrów wytwarzanej energii elektrycznej dla typowych układów przetwarzania energii instalowanych w elektrowniach wodnych małej mocy.

Systemy generacji energii elektrycznej pracujące przy stałej prędkości obrotowej z generatorem indukcyjnym klatkowym

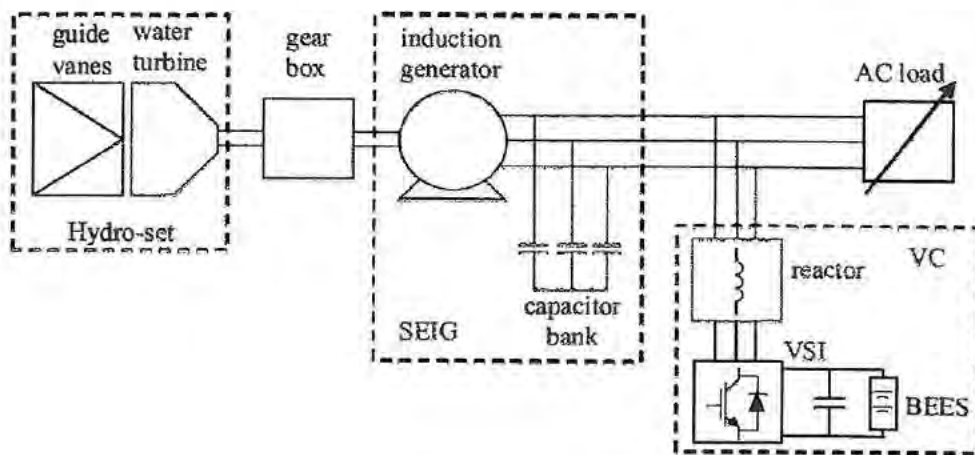
Systemy generacji energii elektrycznej bazujące na generatorze indukcyjnym klatkowym pracującym przy stałej prędkości obrotowej przedstawiłem w pracach [P4] i [P5]. Układ generacji współpracujący z systemem elektroenergetycznym (on-grid), którego głównym zadaniem jest maksymalizacja produkcji energii elektrycznej zaprezentowałem w [P5]. Głównym problemem podczas opracowywania systemu regulacji był dobór parametrów regulatora poziomu wody w zbiorniku wyrównawczym zapewniającym stabilną pracę elektrowni. Model elektrowni opisałem za pomocą transmitancji, a parametry regulatora wyznaczyłem na podstawie metody linii pierwiastkowych. Weryfikacja nastaw na rzeczywistym obiekcie elektrowni wykazała poprawną pracę układu regulacji poprzez utrzymywanie poziomu wody w zadanych granicach zmian (Rys. 5).



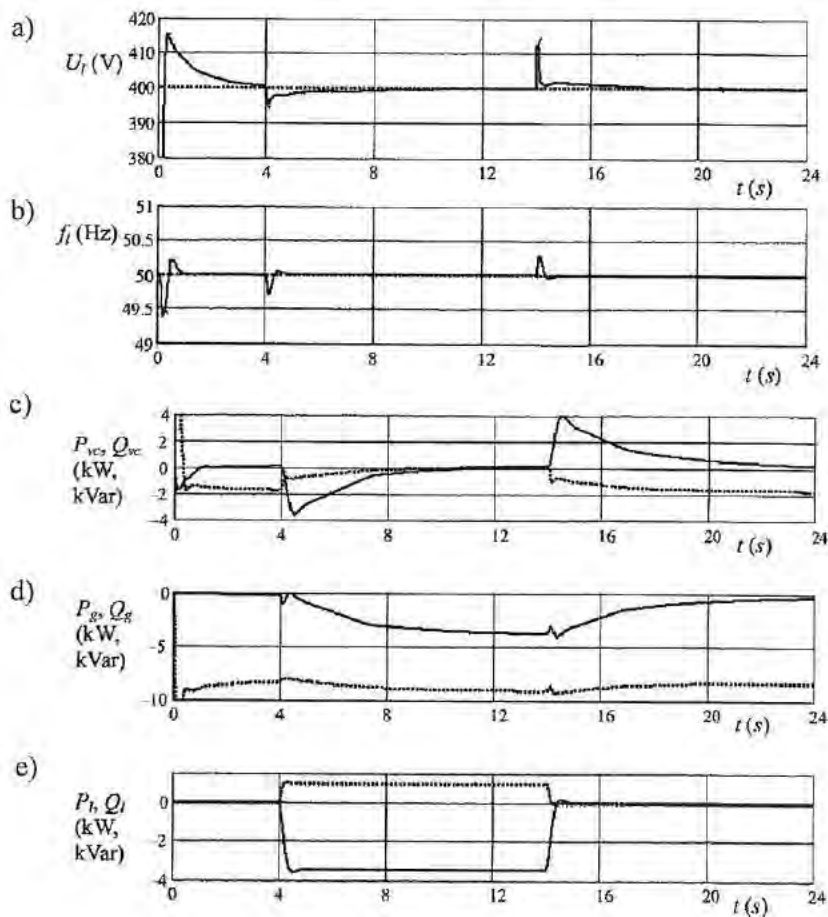
Rys. 5. Przebiegi poziomu wody w zbiorniku wyrównawczym (a) i wody dolnej (b) oraz przepływu turbiny (c) elektrowni przepływowej [P5]

System generacji energii elektrycznej bazujący na elektrowni zbiornikowej pracujący na wyspę (tzw. off-grid) z dedykowanym układem kontroli częstotliwości oraz wartości skutecznej napięcia zaproponowałem w [P4] (Rys. 6). Głównymi problemami w takim systemie są niekorzystne właściwości maszyny indukcyjnej klatkowej w trybie generacyjnym oraz niska dynamika regulacji mocy czynnej turbiny. Zapewnienie określonych parametrów energii elektrycznej w takim systemie z uwagi na zmienność obciążenia jest szczególnie trudne. Problem ten rozwiązałem za pomocą dodatkowego układu składającego się z falownika napięcia z baterią w obwodzie DC pełniącego rolę regulowanego źródła mocy czynnej i biernej. Zaproponowałem układ regulacji składający się z regulatora mocy biernej (regulacja wartości skutecznej napięcia), wzorca częstotliwości (regulacja częstotliwości) oraz regulatora kierownicy turbiny w zależności od poziomu naładowania baterii. Badania

symulacyjne w pakiecie Matlab/Simulink prezentowanego układu potwierdziły poprawną stabilizację wartości skutecznej napięcia oraz częstotliwości w przypadku nagłych zmian wartości obciążenia (Rys. 7).



Rys. 6. System off-grid układu generacji energii elektrycznej z dedykowanym układem kontroli częstotliwości oraz wartości skutecznej napięcia [P4]

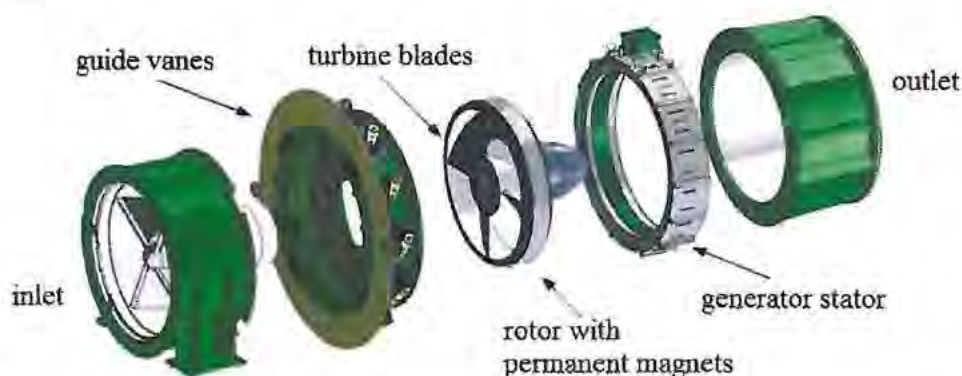


Rys. 7. Przebieg wartości skutecznej napięcia (a), częstotliwości systemu (b), mocy czynnej i biernej układu energoelektronicznego (c) i generatora (d), systemu off-grid z układem stabilizacji przy nagłym załączeniu i wyłączeniu obciążenia (e) [P4]

du

Systemy generacji energii elektrycznej pracujące przy zmiennej prędkości obrotowej z generatorem synchronicznym z magnesami trwałymi i przekształtnikiem energoelektronicznym

Metoda zmiennej prędkości obrotowej, znana obecnie głównie z układów generacji z turbinami wiatrowymi, stanowi poważną alternatywę dla tradycyjnych elektrowni wodnych pracujących przy stałej prędkości obrotowej. Regulacja prędkości obrotowej daje możliwość dopasowania parametrów pracy hydrozespołu o prostej konstrukcji do aktualnych warunków hydrologicznych. Jest to szczególnie ważne w obiektach małej mocy, gdzie można znacząco obniżyć koszty inwestycji oraz eksploatacji. Najkorzystniejszym jest wykorzystanie prostej konstrukcji turbiny śmigłowej o stałych łopatkach wirnika. Dopasowanie prędkości do aktualnych warunków poszerza zakres pracy hydrozespołu oraz zwiększa jego sprawność w punktach pracy oddalonych od znamionowych. W ten sposób można zwiększyć produkcję energii elektrycznej elektrowni. Rozwiązanie takie wymaga jednak wykorzystania układu energoelektronicznego dopasowującego parametry generowanej energii do wymagań systemu elektroenergetycznego. Obecność przekształtnika w torze przetwarzania energii powoduje jednak zmniejszenie całościowej sprawności. Z drugiej strony pozwala on wykorzystać generator synchroniczny z magnesami trwałymi (PMSG), który wpływa na poprawę całościowej sprawności poprzez swoją wysoką sprawność w szerokim zakresie obciążenia. Dodatkową zaletą takiego generatora jest możliwość konstrukcji posiadającej dużą liczbę par biegunów, co pozwala wyeliminować przekładnię mechaniczną. Układ taki pozwala również dokonać integracji turbiny wodnej z generatorem poprzez umieszczenie łopatek turbiny wewnątrz wirnika generatora (Rys. 8). Rozwiązanie takie charakteryzuje się istotną innowacyjnością w skali europejskiej i nie zostało do tej pory wystarczająco rozeznane i opisane w literaturze naukowej.

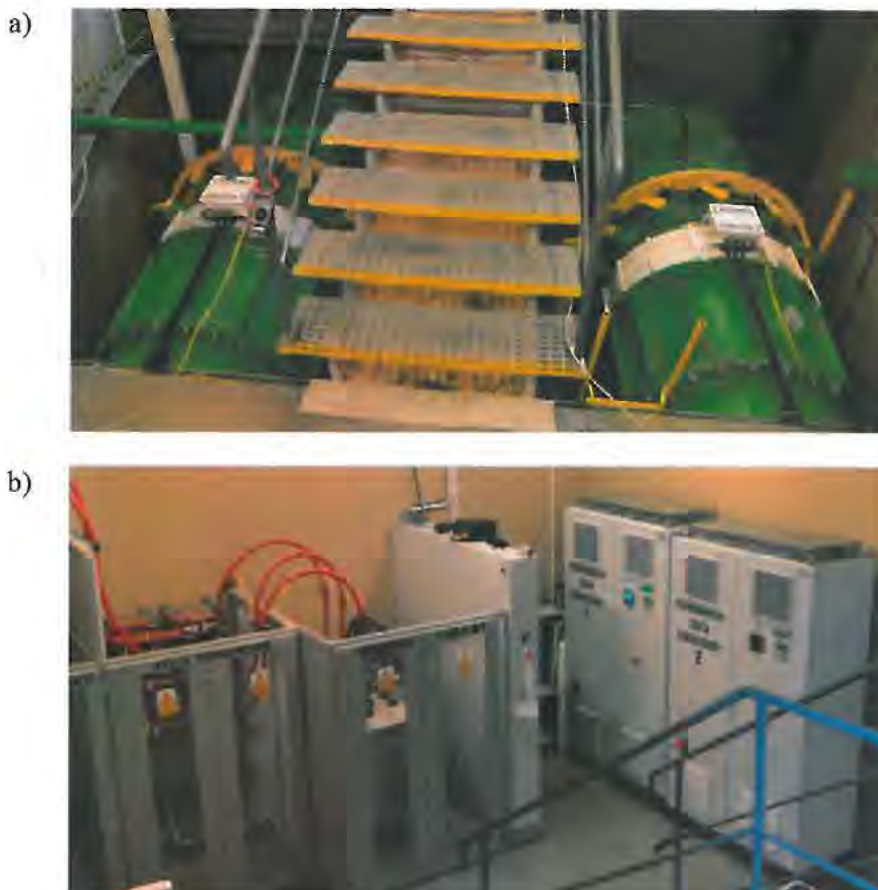


Rys. 8. Integracja turbiny wodnej z generatorem synchronicznym z magnesami trwałymi [P1]

Wykorzystanie przekształtnika energoelektronicznego daje ponadto dodatkowe możliwości regulacji mocy czynnej lub momentu hydrozespołu oraz mocy biernej systemu elektroenergetycznego, a więc i jej kompensacji.

Wymienione powyżej zalety wzbudziły moje szersze zainteresowanie układem przetwarzania energii z turbiną śmigłową, która napędza PMSG sprzęgnięty z systemem elektroenergetycznym poprzez przekształtnik energoelektroniczny. Pierwsze badania na ten temat prowadziłem jako wykonawca w projekcie badawczo-rozwojowym finansowanym przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego pt. "Układ do wytwarzania energii

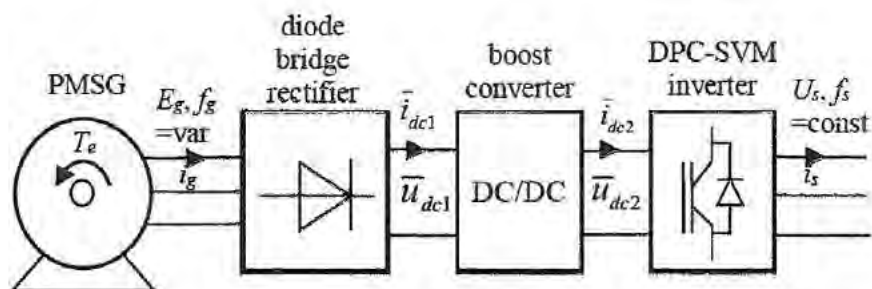
elektrycznej dla małych elektrowni wodnych z generatorem wzbudzonym magnesami trwałymi, pracującym przy zmiennej prędkości obrotowej” w latach 2009-2012. Natomiast kluczowe znaczenie w rozwoju tej tematyki w mojej pracy naukowej miał udział w procesie projektowania, budowy, uruchomienia oraz eksploatacji małej elektrowni wodnej „Akwa” z innowacyjnymi hydrozespołami o zintegrowanej konstrukcji turbiny śmigłowej z PMSG. Elektrownia ta zlokalizowana jest na rzece Biała Głucholańska w Nysie koło Opola (Rys. 9).



Rys. 9. Wyposażenie MEW „Akwa” na rzece Biała Głucholańska w Nysie koło Opola: a) dwa zintegrowane hydrozespoły, b) układ przetwarzania energii elektrycznej [P6]

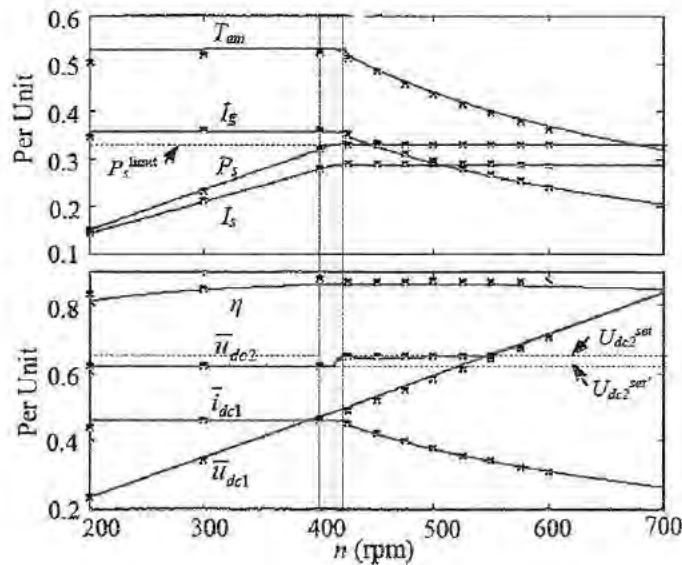
Wyjątkowość tego obiektu wynika dodatkowo z zainstalowania dwóch hydrozespołów o łącznej mocy 150 kW pracujących równolegle na rzece oraz z podłączenia dwóch niezależnych odbiorców energii elektrycznej: dystrybutora systemu elektroenergetycznego oraz ujęcia wody dla miasta Nysy. Przez cały czas pracy elektrowni (od 2011 do 2018 roku) byłem odpowiedzialny za jej poprawną eksploatację, co umożliwiło mi przeprowadzenie badań i implementację różnych algorytmów zarządzania energią elektryczną. Wynikiem tych badań jest szereg publikacji, z których pięć reprezentatywnych, dotyczących tej tematyki znajduje się w w/w wykazie stanowiącym osiągnięcie naukowe [P1, P3, P6, P9, P10].

W celu przeprowadzenia dokładnych analiz pracy elektrowni wodnych o zmiennej prędkości obrotowej przygotowałem w [P7] model układu przetwarzania energii (Rys. 10). składający się z PMSG oraz układu energoelektronicznego AC/AC sterowanego metodą DPC-SVM (direct power control with space vector modulation).



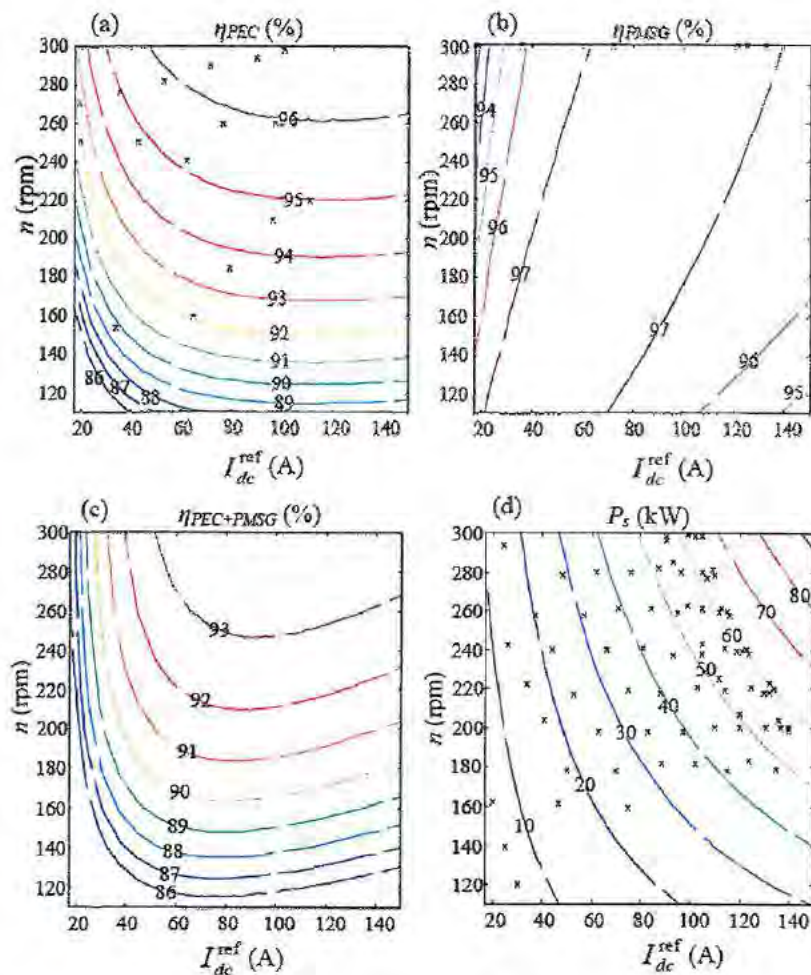
Rys. 10. Schemat blokowy układu przetwarzania energii elektrowni wodnej pracującej ze zmienną prędkością obrotową z PMSG oraz przekształtnikiem energoelektronicznych [P7]

Z uwagi na długie stałe czasowe systemu hydraulicznego wykorzystanie dokładnego modelu przekształtnika energoelektronicznego, który wymaga krótkich kroków całkowania, było nieuzasadnione. Z tego względu wykorzystałem metodę modelowania wartości uśrednionych AVM (average value modelling), która pomija wyższe harmoniczne w sygnałach AC oraz uśrednia sygnały DC w okresie cyklu przełączania. Bazując na reprezentacji układów energoelektronicznych w postaci źródeł sterowanych przygotowałem schematy zastępcze poszczególnych elementów systemu. Istotnym zadaniem było zdefiniowanie warunku pracy prostownika diodowego mostkowego w trybie 1 (dla kąta komutacji mniejszego od 60°) zasilonego z PMSG. Pozwoliło to określić zakres prędkości generatora, dla którego uproszczony model jest poprawny. Okazało się, że niskie wartości reaktancji PMSG zapewniają wystarczająco niską graniczną prędkość obrotową stosowalności modelu. Podczas budowania modelu zwracałem szczególną uwagę na uwzględnienie strat mocy w celu uzyskania możliwie dokładnej wartości sprawności układu w funkcji prędkości obrotowej i obciążenia. Drugą ważną właściwością zaproponowanego podejścia jest uwzględnienie wszystkich regulatorów obwodu DC oraz falownika tak, aby nie ograniczać funkcjonalności układu. Przygotowane zależności analityczne pozwoliły przedstawić układ w postaci funkcji, dla której argumentami jest napięcie sieci oraz prędkość obrotowa, natomiast wartościami funkcji są moment elektromagnetyczny generatora oraz prąd sieci. Weryfikację modelu przeprowadziłem na stanowisku laboratoryjnym o mocy 37 kW, które zawiera wszystkie elementy analizowanego układu przetwarzania energii. Przygotowany model pozwolił uzyskać dużą zgodność z laboratoryjnym układem również dla kryterium sprawności, które warunkuje przydatność modelu w analizie algorytmów sterowania układem (Rys. 11). Poza oceną stanów ustalonych pracy układu dokonałem również weryfikacji wybranych stanów dynamicznych. W [P7] pokazałem przykład porównania odpowiedzi układu na skok jednostkowy prądu w obwodzie DC. Pomimo znacznych uproszczeń modelu właściwości dynamiczne są porównywalne z układem rzeczywistym.



Rys. 11 Charakterystyki stanów ustalonych modelu układu przetwarzania energii składającego się z PMSG oraz przekształtnika energoelektronicznego (linia ciągła) porównane z pomiarami laboratoryjnymi (punkty x) [P7]

Analiza charakterystyk momentów turbiny śmigłowej i przekształtnika energoelektronicznego (w różnych trybach sterowania) wykazała, że w pewnych obszarach pracy przebiegi momentów mogą się przecinać pod bardzo małym kątem. Powodować to może oscylacje prędkości obrotowej i niestabilną pracę układu, co potwierdziły doświadczenia eksploatacyjne. W celu wyeliminowania tego zagrożenia ograniczyłem możliwości regulacyjne do sterowania prądem DC przekształtnika, który jest proporcjonalny do momentu elektromagnetycznego PMSG. Możliwość sterowania prądem DC w szerokim zakresie ogranicza napięcie układu podbijającego DC, które zwiększyłem do wartości odpowiadającej napięciu wyprostowanemu generatora w stanie znamionowym. Założenia te pozwoliły mi znacznie uprościć model układu przetwarzania energii poprzez eliminację wszystkich regulatorów przekształtnika poza regulatorem DC, który w tym trybie pracy jest dominujący i odpowiada za zakres regulacji i jego dynamikę. Tak zmodyfikowany i uproszczony model przedstawiłem w [P9]. Wyniki obliczeń modelu porównałem z pomiarami na Elektrowni „Akwa”. Zgodność porównania oceniłem przy użyciu wartości odchylenia standardowego błędu względnego odniesionego do danych znamionowych (Rys. 12). Sprawność przekształtnika zweryfikowałem poprzez 17 pomiarów a otrzymany błąd to 0.5%. Do porównania sprawności PMSG użyłem 7 punktów pomiarowych podanych przez producenta generatora uzyskując zbieżność na poziomie 0.2%. Natomiast charakterystykę mocy oceniłem wykorzystując 80 punktów pracy układu, uzyskując błąd na poziomie 4%. Istotna różnica wartości mocy wynikała z pominięcia wyższych harmonicznych w sygnałach prądu i napięcia generatora. Biorąc jednak pod uwagę niepewność pomiaru, którą oszacowałem na 2%, uzyskany wynik jest na zadawalającym poziomie.



Rys. 12. Charakterystyki pracy na płaszczyźnie prędkości obrotowej oraz prądu DC: a) sprawność przekształtnika energoelektronicznego, b) sprawność PMSG, c) sprawność przekształtnika łącznie z PMSG, d) moc czynna układu [P9]

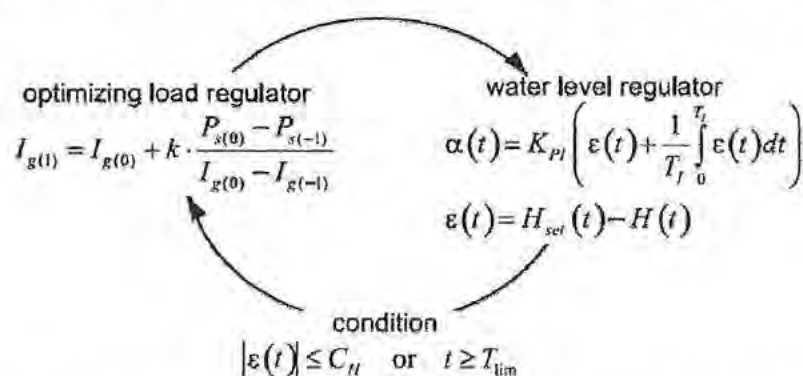
Algorytmy kontroli dla MEW

Opisane powyżej modele elektrowni wodnych będących połączeniem systemu hydraulicznego oraz hydrozespołu o zmiennej prędkości obrotowej wykorzystaliśmy do badań algorytmów kontroli elektrowni.

Najważniejszym zadaniem elektrowni wodnych małej mocy pracujących on-line jest uzyskanie efektów ekonomicznych, a więc dąży się do maksymalizacji sprawności przetwarzania energii. Jednak ich nadrzędną funkcją jest kontrola określonych parametrów hydrologicznych. Najczęściej jest to poziom wody górnej, który w elektrowniach zbiornikowych musi być kontrolowany, natomiast w elektrowniach przepływowych jest zadany na stałym poziomie. Z uwagi na długie stałe czasowe oraz zafalowanie, pożądane jest wykorzystanie oddzielnego regulatora PI o długim czasie całkowania dla regulatora wody. Drugim regulatorem jest regulator obciążenia generatora, za pomocą którego zadawana jest prędkość hydrozespołu. Regulator ten jest zależny od wielu parametrów elektrowni, takich jak: prędkość obrotowa, spad wody, kąt otwarcia kierownicy. Najprostszym sposobem regulacji jest tzw. **metoda pośrednia** wykorzystująca bazy danych o charakterystykach hydrozespołu pozyskanych z pomiarów oraz badań modelowych. Sposób implementacji tej

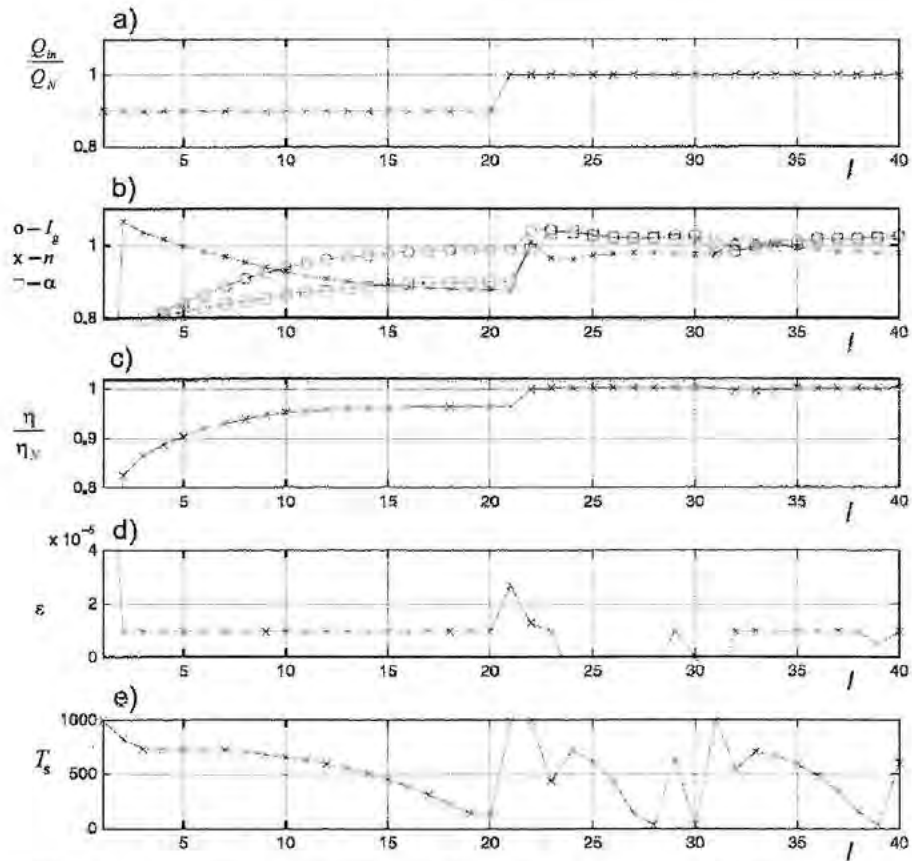
metody przedstawiłem w [P1], gdzie charakterystyka obciążenia generatora opisana jest krzywą zależną od spadku wody oraz prędkości obrotowej. Metoda ta charakteryzuje się dużą dynamiką sterowania. Z uwagi na fakt, że właściwości hydrozespołu mogą ulec zmianie, zwłaszcza w obiektach o niskich spadach, metoda ta wymaga okresowej weryfikacji charakterystyk hydrozespołu. Standardowa identyfikacja charakterystyk hydrozespołu, jak wcześniej wspomniałem, jest pracochłonna i wymaga specjalistycznego sprzętu pomiarowego, co dla obiektów małej mocy jest nieopłacalne.

Alternatywnym sposobem jest wykorzystanie **metody bezpośredniej**, która bazuje na algorytmach adaptacyjnych, tzn. poszukiwaniu optymalnego sterowania. W swoich badaniach wykorzystałem metodę gradientu prostego, w której funkcją celu jest sprawność. Dla wyliczenia sprawności całościowego układu przetwarzania energii elektrowni wodnej konieczna jest znajomość aktualnego przepływu wody. Pomiar ten wymaga kosztownego układu pomiarowego i w wielu przypadkach jest niedokładny, co pokazałem w [P6]. Dlatego zaproponowałem w [P2] zastąpienie wartości przepływu wody aktualną mocą czynną elektrowni. Taki zabieg jest możliwy przy założeniu wolnozmienności przepływu wody w rzece i określeniu dodatkowych warunków aktywujących działanie algorytmu, tzn. granicznej wartości błędu regulatora PI oraz warunku czasowego (Rys. 13).



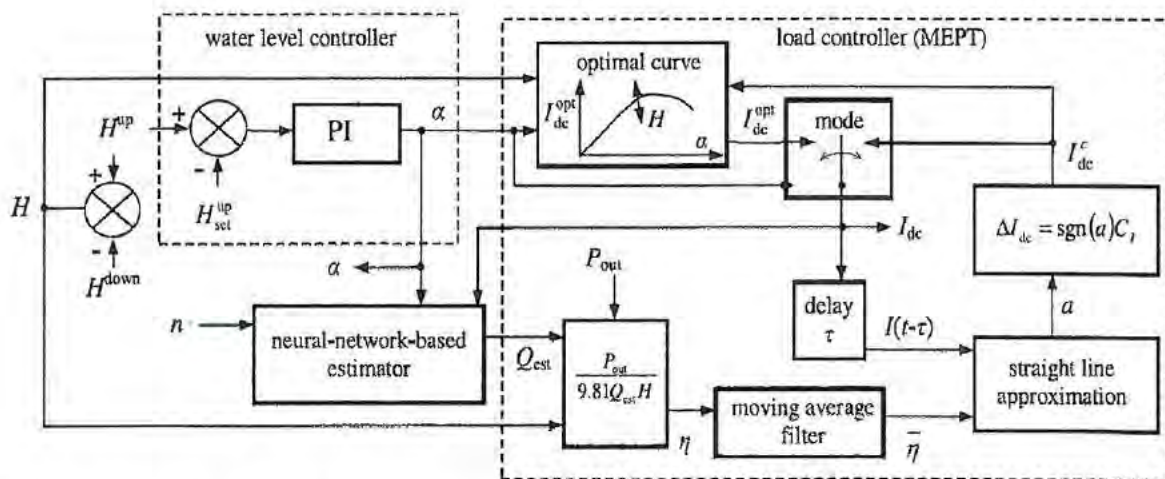
Rys. 13. Algorytm adaptacyjny gradientowy ze zmodyfikowaną funkcją celu [P2]

Badania symulacyjne przeprowadzone przeze mnie w pakiecie Matlab/Simulink potwierdziły poprawność działania algorytmu również przy skokowych zmianach przepływu wody (Rys. 14). Wykazałem, że algorytm ten może adaptować prędkość obrotową generatora poprzez prąd w obwodzie DC do aktualnych warunków pracy elektrowni maksymalizując jej sprawność. Istotną wadą tego rozwiązania jest powolny proces ustalania się sterowania oraz zapewnienie warunku stałości przepływu, co w praktyce może być trudne do spełnienia.



Rys. 14. Przebiegi przedstawiające działanie zmodyfikowanego algorytmu adaptacyjnego: a) przepływ wody względny, b) prąd i prędkość generatora oraz kąt otwarcia kierownicy, c) sprawność względna, d) błąd regulatora, e) czas oczekiwania algorytmu dla danego cyklu sterowania [P2]

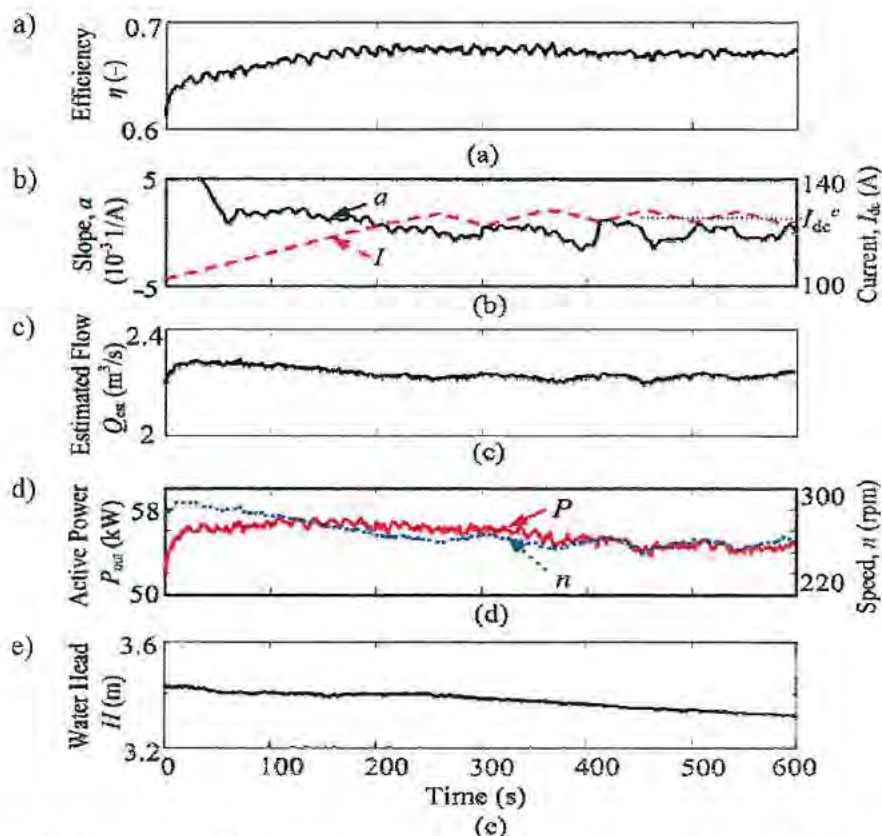
W celu rozwiązania tego problemu w [P6] zaproponowałem tzw. **metodę hybrydową**, w której wykorzystałem estymator przepływu bazujący na sieci neuronowej MLP. Wykorzystałem tu zarówno bazę wiedzy potrzebną do nauczenia estymatora (metoda pośrednia) jak i człon adaptacji parametrów sterowania (metoda bezpośrednia) (Rys. 15).



Rys. 15. Hybrydowy algorytm sterowania parametrami pracy elektrowni wodnej przy wykorzystaniu estymatora przepływu wody [P6]

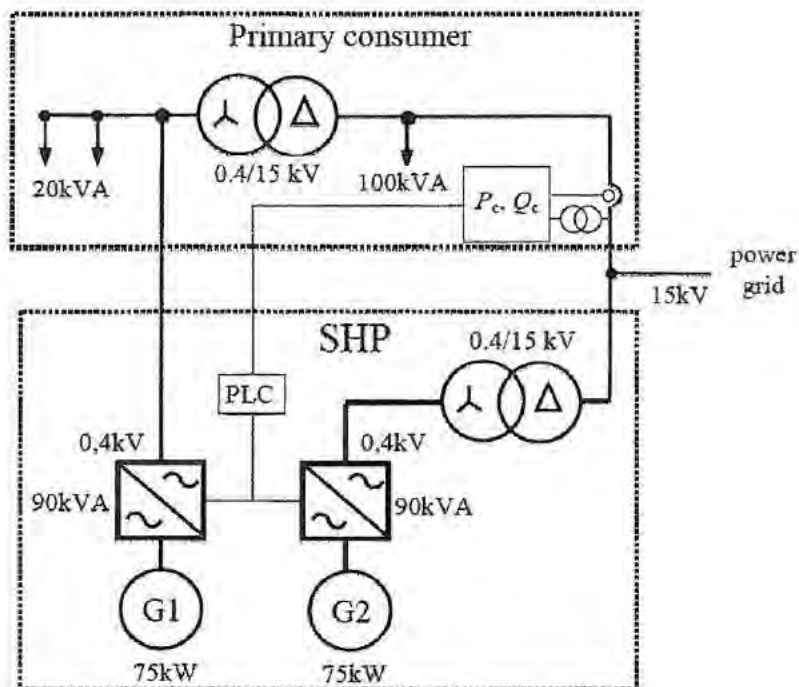
gbr

Budowę estymatora przepływu wody rozpocząłem od analizy korelacji parametrów pracy hydrozespołu z wartością przepływu. Wykorzystałem metodę PCA (principal component analysis), w której na podstawie dwóch współrzędnych ortogonalnych dokonałem oceny zależności wybranych parametrów. Wyniki jednoznacznie wskazały, że wartość spadku wody posiada najmniejszy udział we współrzędnej zgodnej z wektorem przepływu i w celu uproszczenia estymatora może zostać pominięta. Prosta struktura oraz dobre właściwości aproksymacyjne spowodowały, że estymator zrealizowałem na bazie sieci MLP (multi-layer perceptron), z relatywnie małą liczbą neuronów w warstwie ukrytej (3 neurony) z uwagi na dużą niepewność pomiarową analizowanych parametrów. Regulator obciążenia generatora tak jak poprzednio bazuje na metodzie gradientu prostego ze sprawnością jako funkcją celu. Przy opracowywaniu algorytmu sterowania szczególną uwagę zwróciłem na odpowiednie przygotowanie sygnałów poprzez m. in. filtrację. Zaproponowałem również wykorzystanie parametru nachylenia prostej aproksymującej punkty pomiarowe jako współczynnika do oceny przyrostu sprawności. W celu poprawy właściwości dynamicznych algorytmu wykorzystałem krzywą optymalną obciążenia generatora, która w trakcie pracy algorytmu przy określonych warunkach jest na bieżąco modyfikowana. Rozwiązanie to pozwoliło wyeliminować podstawowe wady metod bezpośrednich (niska dynamika sterowania) i pośrednich (brak adaptacji do aktualnych warunków). Powyżej opisany algorytm zaimplementowałem w elektrowni „Akwa” i przeprowadziłem testy poprawności działania. Przykładowe przebiegi analizowanych parametrów znajdują się na Rys. 16.



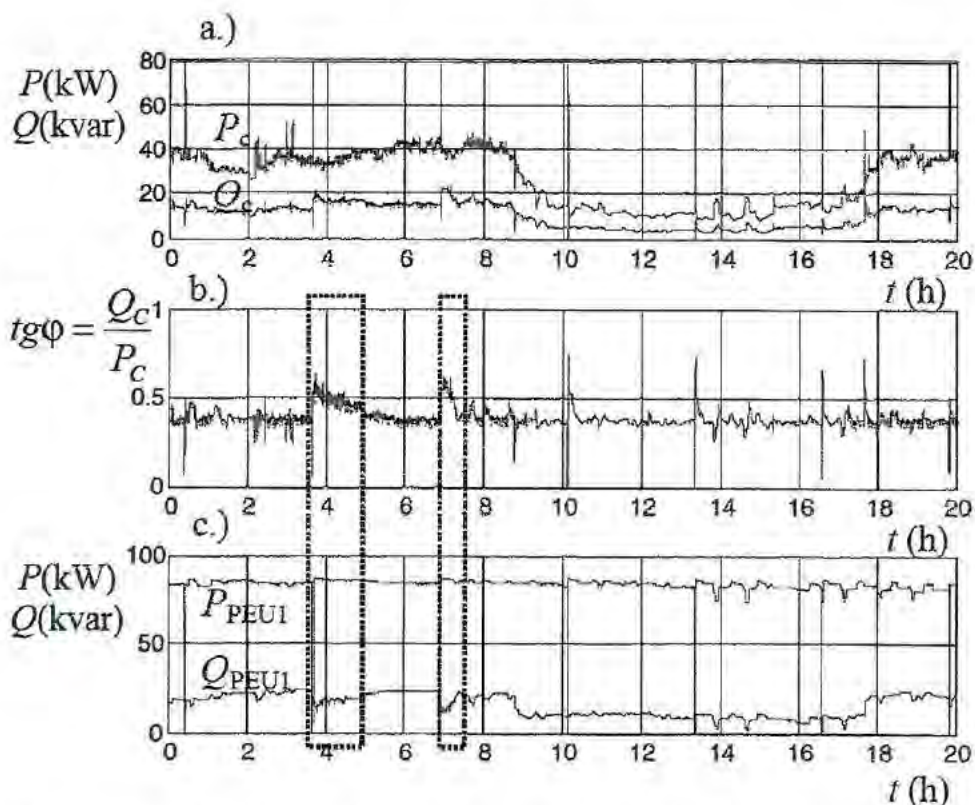
Rys. 16. Przebiegi parametrów elektrowni „Akwa” z hybrydowym systemem kontroli: a) sprawność całościowa, b) współczynnik oceny przyrostu sprawności oraz prąd DC, c) estymowany przepływ, d) moc czynna oraz prędkość, e) spadek wody [P6]

Kolejną istotną funkcją elektrowni wodnych wyposażonych w przekształtniki energoelektroniczne jest kompensacja energii, tzn. produkcja określonej energii czynnej i/lub biernej o zadanej dynamice zmian. Analizę pracy tego typu obiektu przedstawiłem w [P3] na przykładzie elektrowni „Akwa”, która ma możliwość przesyłu energii bezpośrednio do odbiorcy, którym jest stacja uzdatniania wody dla miasta Nysy. Przeanalizowałem przypadek, w którym jeden z hydrozespołów zasila odbiorcę, natomiast drugi oddaje nadwyżkę energii do systemu elektroenergetycznego (Rys. 17).



Rys. 17. Topologia instalacji elektrycznej mocy elektrowni „Akwa” pełniącej rolę producenta energii na potrzeby wybranego odbiorcy [P3]

Głównym zadaniem elektrowni w tej roli jest zapewnienie energii elektrycznej (mocy czynnej i biernej) zgodnej z aktualnym zapotrzebowaniem odbiorcy. Z uwagi na wolną dynamikę zmian regulatora kierownicy turbiny oraz brak magazynu energii zmiana mocy czynnej wymaga określonego czasu. Braki i nadwyżki mocy są wyrównywane przez system elektroenergetyczny. Na podstawie analizy pracy elektrowni oraz profilu zapotrzebowania energetycznego odbiorcy zaprojektowałem oraz zaimplementowałem na sterowniku PLC algorytm sterowania mocą czynną i bierną. Przykładowe rzeczywiste przebiegi mocy czynnej i biernej generowanej przez elektrownię oraz u odbiorcy w miejscu przyłączenia do systemu elektroenergetycznego są przedstawione na Rys. 18. Pokazałem tu przykład skuteczności kompensacji mocy biernej instalacji odbiorcy. W tym układzie priorytetową jest produkcja mocy czynnej, więc w przypadku przekroczenia mocy pozornej przekształtnika energoelektronicznego algorytm zmniejsza najpierw moc bierną (zakreskowane obszary). W przedstawionym przykładzie aktualna produkcja mocy czynnej jest niewystarczająca, wobec czego odbiorca pobiera braki energii z systemu elektroenergetycznego.

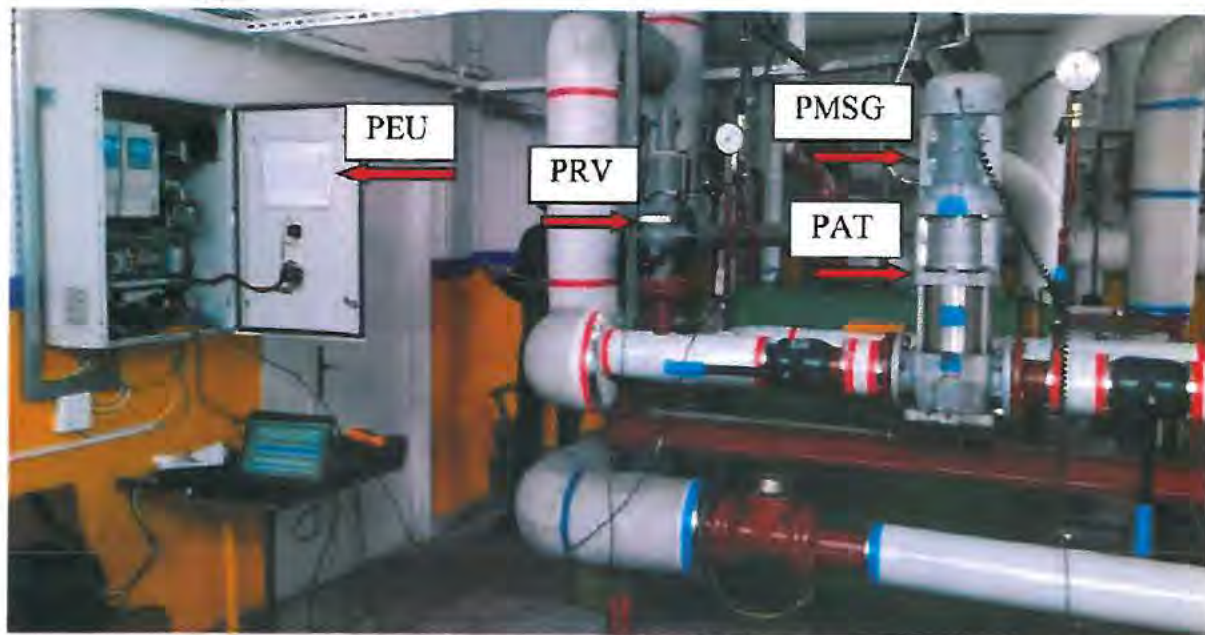


Rys. 18. Przebiegi parametrów elektrowni jako dostawcy energii do odbiorcy: a.) moc czynna i bierna odbiorcy, b.) tangens kąta mocy odbiorcy, c.) moc czynna i bierna elektrowni [P3]

Odzysk energii elektrycznej z procesu redukcji ciśnień w sieci ciepłowniczej

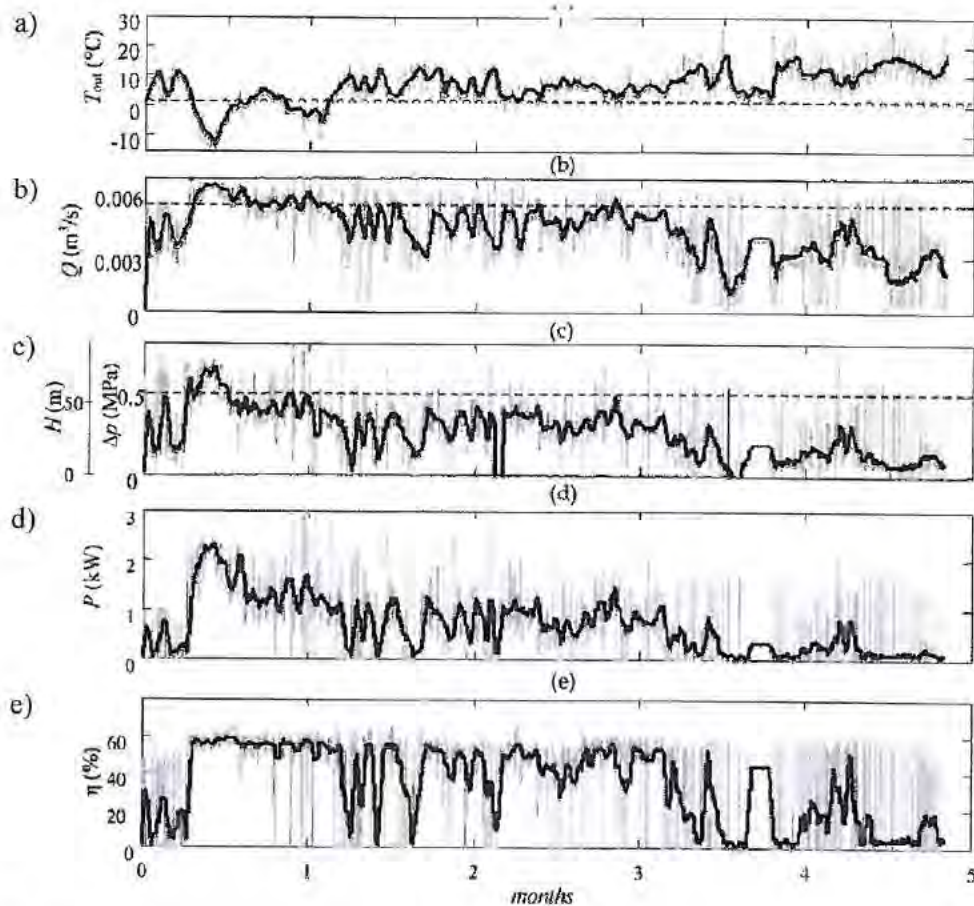
Nową gałęzią rozwoju układów przetwarzania energii stosowanych w elektrowniach wodnych jest odzysk energii z istniejących systemów dystrybucji wody. W systemach dużej mocy, np. w głównych magistralach sieci przysyłu wody, stosuje się klasyczne rozwiązania hydrozespołów pracujących ze stałą prędkością obrotową oraz podwójnym układem mechanicznej regulacji turbiny. Układy mikrogeneracji (o mocy od kilku do kilkudziesięciu kW) natomiast wymagają nowych rozwiązań technicznych obniżających koszty inwestycyjne i eksploatacyjne. Rozwiązaniem spełniającym te wymagania jest wcześniej opisany układ przetwarzania energii bazujący na PMSG oraz przekształtniku energoelektronicznym. Udział w projekcie dotyczącym analizy możliwości oraz praktycznej realizacji odzysku energii z sieci ciepłowniczej miasta Krakowa pozwolił mi przeprowadzić badania i zweryfikować je w rzeczywistym układzie. Najważniejsze wyniki tych prac zawarłem w [P8]. Istotnym aspektem była teoretyczna ocena lokalizacji punktów redukcji ciśnienia i wartości energii możliwej do odzyskania w postaci energii elektrycznej. W przygotowanej ekspertyzie dla MPEC Kraków wykazaliśmy wraz z innymi wykonawcami duży potencjał energetyczny na poziomie 2000 GWh rocznej produkcji energii elektrycznej oraz oszacowaliśmy czas zwrotu inwestycji na około 6 lat. W dalszej kolejności przeprowadziłem wraz z innymi członkami zespołu analizę techniczną realizację projektu układu redukcji z odzyskiem energii. Zaproponowaliśmy strukturę układu podstacji sieci ciepłowniczej z wymiennikiem ciepła zapewniającą odpowiednie warunki regulacyjne oraz bezpieczeństwo pracy systemu. Moim wkładem w te badania była analiza współpracy układu przetwarzania energii (PMSG

z przekształtnikiem energoelektronicznym) z pompo-turbiną. Na podstawie charakterystyk pracy pompo-turbiny oraz parametrów hydraulicznych podstacji o mocy cieplnej 1,7 MW opracowałem sposób oraz zakres optymalnej pracy układu redukcji. Testy przeprowadzone na prototypowym układzie (Rys. 19) wykazały poprawność pracy reduktora.



Rys. 19. Podstacja sieci ciepłowniczej miasta Krakowa z zainstalowanym prototypowym układem redukcji ciśnienia wody z odzyskiem energii elektrycznej [P8]

W dalszej części badań przeprowadziłem analizę oddziaływania reduktora na system elektroenergetyczny, system hydrauliczny oraz otoczenie. Badania zawartości harmonicznych w sygnałach elektrycznych, drgań mechanicznych w różnych punktach instalacji oraz hałasu pozwoliły ocenić właściwości pracy reduktora i opracować zalecenia dotyczące poprawy jego technicznego wykonania. Ponadto, przeprowadziliśmy monitoring pracy reduktora przez cały sezon grzewczy w wybranej wymiennikowni i zweryfikowaliśmy oszacowany wcześniej efekt ekonomiczny. Przebiegi podstawowych parametrów instalacji w analizowanym sezonie grzewczym (5 miesięcy) przedstawiłem na Rys. 20.



Rys. 20. Przebiegi parametrów podstacji sieci ciepłowniczej miasta Krakowa z prototypowym reduktorem: a) temperatura zewnętrzna, b) wartości przepływu wody, c) wartość ciśnienia redukowanego, d) generowana moc czynna, e) sprawność reduktora

Podsumowanie

Opisany powyżej cykl publikacji zawiera kompleksową analizę wybranych układów generacji energii elektrycznej wykorzystywanych w elektrowniach wodnych małej mocy. Na wstępie przygotowałem dedykowane modele systemów hydraulicznych oraz hydrozespołów o różnym stopniu złożoności. Następnie zaproponowałem różne rozwiązania układów mających na celu poprawę wybranych parametrów generowanej energii elektrycznej. Uwzględniłem tu zarówno tradycyjne rozwiązania powszechnie stosowane w obiektach małej mocy bazujące na stałej prędkości obrotowej z generatorem indukcyjnym, jak i nowoczesne układy z generatorem synchronicznym (PMSG) oraz przekształtnikiem energoelektronicznym pracujące ze zmienną prędkością obrotową. Opracowałem algorytmy sterowania głównie dla układów o zmiennej prędkości obrotowej mających na celu maksymalizację sprawności przetwarzania energii oraz kompensację mocy czynnej i/lub biernej odbiorcy energii elektrycznej. Dodatkowo, zaprezentowałem aplikację układu o zmiennej prędkości obrotowej pełniącego rolę reduktora ciśnienia w sieci ciepłowniczej miasta. Opracowałem sposób kontroli, przeanalizowałem zakres regulacji oraz pracę prototypowego układu w rzeczywistej wymiennikowni miejskiej sieci ciepłowniczej.

4.3.3 Określenie wkładu autora w rozwój dyscypliny

Przedstawiony cykl publikacji zawiera badania dotyczące układów generacji energii elektrycznej stosowanych w elektrowniach wodnych małej mocy. Badania dotyczą zarówno układów pracujących przy stałej jak i zmiennej prędkości obrotowej generatora. Jednak z uwagi na lepsze właściwości regulacyjne większy nacisk położyłem na układy o zmiennej prędkości obrotowej współpracujące z przekształtnikiem energoelektronicznym. Jak wykazały badania oraz doświadczenia eksploatacyjne elektrowni wodnych małej mocy, system hydrauliczny oraz właściwości turbiny wodnej mają istotny wpływ na dynamikę oraz zakres regulacji generowanej energii elektrycznej. Konieczne było więc przygotowanie interdyscyplinarnych modeli bazujących zarówno na prawach mechaniki płynów, jak i na prawach elektrotechniki. Większość zaproponowanych przeze mnie modeli oraz algorytmów sterowania przebadalem na rzeczywistych obiektach, co pozwoliło ocenić ich praktyczną przydatność.

Wykaz dokonań autora przedstawionych w cyklu publikacji, który stanowi osiągnięcie naukowe i wpisuje się w rozwój dyscypliny (wg ważności):

- opracowanie analitycznego modelu układu przetwarzania energii składającego się z generatora synchronicznego z magnesami trwałymi oraz przekształtnika energoelektronicznego [P7, P9];
- opracowanie i weryfikacja algorytmów sterowania maksymalizujących sprawność przetwarzania energii elektrowni wodnej o zmiennej prędkości obrotowej [P2, P6];
- opracowanie systemu off-grid dla generacji energii elektrycznej z generatorem indukcyjnym napędzanym turbiną wodną oraz dedykowanym układem kontroli częstotliwości i wartości skutecznej napięcia [P4];
- analiza możliwości kontroli prędkości obrotowej turbin wodnych za pomocą układu przetwarzania energii składającego się z generatora synchronicznego z magnesami trwałymi oraz przekształtnika energoelektronicznego [P1];
- opracowanie, implementacja i analiza pracy systemu kompensacji mocy bazującego na elektrowni wodnej zasilającego indywidualnego odbiorcę energii elektrycznej [P3];
- analiza oraz badania układów mikrogeneracji energii elektrycznej odzyskujących energię podczas redukcji ciśnienia wody w sieci ciepłowniczej miasta [P8];
- opracowanie unikatowych modeli systemu hydraulicznego oraz hydrozespołów na potrzeby analiz układów generacji energii elektrycznej wykorzystywanych w elektrowniach wodnych [P5, P9];
- opracowanie metod identyfikacji parametrów modeli elektrowni wodnych na potrzeby analizy generowanej energii elektrycznej [P10].

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

Układy generacji energii elektrycznej wykorzystywane w elektrowniach wodnych stanowią obecnie mój główny temat badawczy, który rozwijam od 2011 roku. Natomiast moje istotne prace naukowe są również związane z kontynuacją badań zapoczątkowanych w ramach pracy doktorskiej dotyczącej układu przekształtnika macierzowego. Dodatkowo, będąc członkiem zespołu maszyn elektrycznych najpierw jako asystent (od 2007 do 2011 r.), a następnie adiunkt (od 2011 r.) miałem możliwość uczestnictwa w pracach naukowo-badawczych katedry. Były to liczne prace badawcze, ekspertyzy, opracowania zewnętrzne itp., które poszerzyły moje zainteresowania naukowe. Mogę tu wyróżnić następujące tematy: generator tarczowy, hybrydowe systemy zasilania, diagnostyka maszyn elektrycznych czy systemy kontroli zasilania. Wspomniane obszary, w których posiadam pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze, omówiłem poniżej.

Przekształtnik macierzowy

Przekształtnik macierzowy to obiekt, od którego rozpocząłem moją pracę naukową. Badania układów sterowania, modelowanie układu w dziedzinie częstotliwości oraz analiza procesów komutacyjnych były przedmiotem mojej pracy doktorskiej obronionej w 2010 roku. Po obronie doktoratu kontynuowałem badania w celu poprawy warunków komutacyjnych poprzez impulsy prądowe podawane w chwilach komutacji. Dodatkowo, uprościłem sposób zapisu macierzowego złożonych układów za pomocą czwórnikowego zapisu przekształtnika macierzowego jak i układów systemu elektroenergetycznego. Rezultaty badań opublikowałem wraz z promotorem mojej rozprawy doktorskiej, prof. dr. hab. Tadeuszem Sobczykiem w dwóch artykułach:

1. Borkowski D., Sobczyk T.J., 2011, *Influence of commutation conditions on steady states in matrix converter*, Archives of Electrical Engineering, vol. 60(1), pp. 77-83;
2. Borkowski D., Sobczyk T.J., 2013, *Description of matrix converter in frequency domain*, Archives of Electrical Engineering, vol. 62(3), pp. 387-400.

Rezultaty badań dotyczących przekształtnika macierzowego zebrałem i podsumowałem w monografii napisanej w języku angielskim i opublikowanej trzy lata po obronie doktoratu, tj. w 2013 roku:

Borkowski D., 2013, *Matrix Converter As Power Flow Controller In Transmission Line – Operation Analysis In Frequency Domain*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Monografia nr 428, ISSN 0860-097X, Kraków 2013.

Generator tarczowy

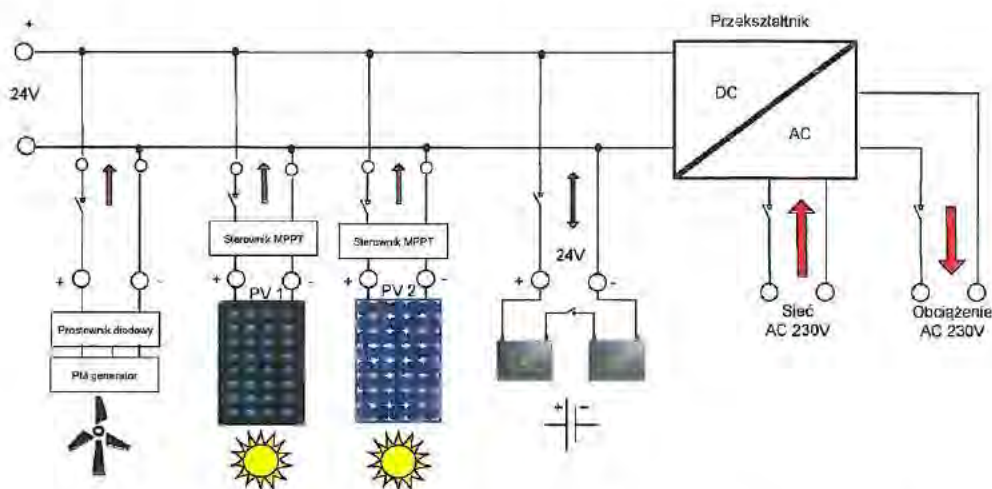
Badania generatora o wzbudzeniu osiowym, tzw. tarczowego rozpocząłem podczas stażu w ramach programu „Innowacyjny Transfer” organizowanego przez Agencję Rozwoju Innowacji SA w 2015 roku. Na zlecenie przedsiębiorcy MM Hybrid Sp. z o.o. brałem udział w projektowaniu oraz testach generatorów tarczowych małej mocy dedykowanych do turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu. Badania dotyczyły przede wszystkim optymalizacji

konstrukcji układu cewek bezrdzeniowego stojana oraz magnesów trwałych na tarczach wirnika. W ramach tych działań powstało stanowisko laboratoryjne pozwalające na testy generatorów do mocy 3 kW. Po zakończeniu stażu badania były kontynuowane z moim udziałem i miały na celu poprawę parametrów generatorów tarczowych poprzez dobór odpowiedniego kształtu magnesów. Obecnie kontynuuję ten temat w roli promotora pomocniczego pani mgr. inż. Natalii Radwan-Pragłowskiej, której temat rozprawy doktorskiej brzmi: „Modelowanie generatorów tarczowych wzbudzanych magnesami trwałymi”. Wspólnie z promotorem głównym, dr. hab. Tomaszem Węgłem opublikowaliśmy wstępne efekty tych prac między innymi w AEE:

Radwan-Pragłowska N., Węgiel T., Borkowski D., 2018, *Parameters identification of coreless axial flux permanent magnet generator*, Archives of Electrical Engineering, vol. 67, no. 2, pp. 391-402.

Hybrydowe systemy zasilania

Zainteresowanie hybrydowymi systemami zasilania bazującymi na odnawialnych źródłach energii zapoczątkowane było ekspertyzą z 2016 r. dla firmy AiR s.c. pt. „Przeprowadzenie badań weryfikujących efektywność systemu generacji i zarządzania energią elektryczną dla obiektu usługowego, opartego o wykorzystanie najnowszych rozwiązań technicznych do pozyskiwania energii elektrycznej z energii słońca oraz wiatru”. Jako główny wykonawca tej ekspertyzy przygotowałem analizy zapotrzebowania energetycznego obiektu stacji paliw wraz z budynkami usługowymi. Wykonałem szacunkowe obliczenia produkcji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii oraz zaproponowałem różne warianty pracy systemu biorąc pod uwagę niezależność energetyczną obiektu oraz efekt ekonomiczny. Ważnym osiągnięciem było również wykonanie stanowiska laboratoryjnego umożliwiającego badania hybrydowych układów generacji i magazynowania energii elektrycznej (Rys. 21 i 22).



Rys. 21. Schemat ideowy modelu laboratoryjnego hybrydowych systemów zasilania



Rys. 22. Widok stanowiska laboratoryjnego hybrydowych systemów zasilania

Diagnostyka maszyn elektrycznych

Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, a w szczególności Katedra Diagnostyki Maszyn Elektrycznych Politechniki Krakowskiej, której jestem pracownikiem, posiada duże doświadczenie w diagnostyce maszyn elektrycznych. Liczne prace badawcze oraz zlecenia przemysłowe pozwoliły mi na aktywność badawczą również i w tej tematyce. Brałem udział w dwóch ekspertyzach:

1. Sułowicz M., Weinreb K., Węgiel T., Borkowski D., Zieliński P., Szaraniec E., 2014, *Laboratory tests of synchronous machine*, ekspertyza dla ABB Corporate Research PT Forskargränd, 721 78 Västerås, N/A, SWEDEN, Politechnika Krakowska, (umowa nr. E-2/207/2014/P);
2. Sułowicz M., Weinreb K., Borkowski D., Ryszka J., Zieliński P. 2015, *Innowacyjna diagnostyka silników elektrycznych*, ekspertyza dla Korporacyjnego Centrum ABB, Politechnika Krakowska, (umowa nr. E-2/464/2015/P).

Systemy kontroli zasilania

W ramach ekspertyzy pt: „Badania układu kontroli ciągłości linii zasilających silnika indukcyjnego klatkowego” dla firmy IPID Sp. z o.o. brałem również udział w projektowaniu oraz testach laboratoryjnych prototypowego układu. Badany układ był przeznaczony do kontroli linii zasilających silniki indukcyjne w systemach automatyki pożarowej. Wyniki badań pozwoliły zweryfikować poprawność działania układu oraz dokonać modyfikacji poprawiających jego działanie. Z uwagi na fakt objęcia tajemnicą wyników badań przez firmę zlecającą, osiągnięcia badawcze nie zostały opublikowane.

6. Tabelaryczne zestawienie dorobku

Baza Web of Science (na dzień 08.11.2018):

- Liczba publikacji: **14**,
- H-Index: **4**,
- liczba cytowań (z wyłączeniem autocytowań): **60 (47)**,
- sumaryczny Impact Factor: **17.35**.

Baza Scopus (na dzień 08.11.2018):

- liczba publikacji: **19**,
- H-Index: **4**,
- liczba cytowań (z wyłączeniem autocytowań): **77 (60)**.

Publikacje	Przed doktoratem			Wszystkie		
	Liczba publikacji	Punkty MNiSW	IF (WoS)	Liczba publikacji	Punkty MNiSW	IF (WoS)
Autorstwo						
Samodzielne	0	0	-	14	241	11.686 (5)
Główny autor	1	0	-	12	106	5.422 (2)
Współautor	8	25	0.242 (3)	20	121	0.242 (7)
Suma	9	25	0.242 (3)	46	468	17.350 (14)

Typ publikacji	Liczba publikacji przed doktoratem	Liczba wszystkich publikacji
Monografie	0	1
Rozdziały w monografiach	0	2
Artykuły w czasopiśmie z IF	1	7
Artykuły w czasopiśmie bez IF	3	20
Materiały konferencyjne	5	16
Suma	9	46

.....*D. Borkowski*.....
Dariusz Borkowski