

OPINIA

o rozprawie doktorskiej mgr inż. Piotra FALKOWSKIEGO pt. "Predykcyjne algorytmy sterowania przekształtnikiem AC/DC/AC"

1. Aktualność tematyki

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Falkowskiego obejmuje 160 stron i poświęcona jest algorytmom predykcyjnego sterowania przekształtników: sieciowego AC-DC (prostownik aktywny) oraz maszynowego DC-AC (falownik napięcia) tworzących w połączeniu kaskadowym topologię przemiennika AC-DC-AC z obwodem pośredniczącym napięcia stałego. Przekształtniki te stanowią ważną grupę układów energoelektronicznych, a ich zakres zastosowań rozciąga się od nawrotnych napędów przemysłowych AC średniej i wielkiej mocy poprzez urządzenia energetyki wiatrowej, aż do intensywnie rozwijanych ostatnio systemów Smart Grids w energetyce. Spośród wielu parametrów charakteryzujących przekształtniki AC-DC-AC projektanci dążą głównie do uzyskania wysokiej sprawności, minimalizacji ciężaru i gabarytów tzw. gęstości upakowania (ang. *power density*) i niezawodności, oczywiście przy zachowaniu innych parametrów szczegółowych związanych z konkretną funkcjonalnością urządzenia.

Przekształtniki AC-DC-AC pracują zazwyczaj w wielopętlowych układach regulacji zamkniętej i dla ich prawidłowego zaprojektowania niezbędne jest opracowanie odpowiednich modeli matematycznych oraz analiza ich właściwości statycznych i dynamicznych. Wśród stosowanych klasycznych metod sterowania silników AC najogólniej wyróżnić można:

- Sterowanie polowo-zorientowane (ang. *Field Oriented Control - FOC*),
- Bezpośrednia regulacja momentu (ang. *Direct Torque Control – DTC*),
- Bezpośrednia regulacja momentu z modulacją wektorową (ang. *Direct Torque Control with Space Vector Modulation – DTC-SVM*),

Metody te - po odpowiedniej - adaptacji stosowane są także w sterowaniu mocą czynną i bierną przekształtników sieciowych AC-DC, jako:

- Sterowanie napięciowo-zorientowane (ang. *Voltage Oriented Control - VOC*),

- Bezpośrednia regulacja mocy (ang. *Direct Power Control – DPC*),
- Bezpośrednia regulacja napięcia z modulacją wektorową (ang. *Direct Power Control with Space Vector Modulation – DPC-SVM*),

Ostatnio – dzięki wzrostowi mocy obliczeniowej kontrolerów na bazie DSP oraz FPGA – w energoelektronice intensywnie rozwijane jest nowoczesne sterowanie predykcyjne (ang. Model Predictive Control). Właśnie ta grupa jest przedmiotem analizy, badań i znacznego udoskonalenia prezentowanego w niniejszej rozprawie. Należy przy tym podkreślić, że Politechnika Białostocka należy do nielicznych ośrodków akademickich w kraju, które od lat zajmują się powyższą tematyką odnotowując ważne i oryginalne osiągnięcia (m. inn.: [50], [56], [95] – [101]), a prezentowana rozprawa wpisuje się w ten aktualny pozytywny nurt wnosząc oryginalne elementy.

2. Zakres i ogólna charakterystyka rozprawy

Autor rozprawy sformułował następującą tezę: „nowe predykcyjne algorytmy sterowania przekształtnikiem AC/DC oraz DC/AC pozwolą na:

- w odniesieniu do przekształtnika AC/DC – zastosowanie filtra LCL umożliwiającego:
 - zmniejszenie współczynnika odkształcenia prądu w stosunku do układu z filtrem typu L,
 - zmniejszenie parametrów filtra wejściowego (w stosunku do filtra typu L), przy zachowaniu takiego samego współczynnika odkształcenia prądu,
- w odniesieniu do przekształtnika DC/AC:
 - dobór współczynnika wagowego w funkcji kosztu umożliwiającego kontrolę tętnień momentu i strumienia”.

W pracy Autor konsekwentnie dąży do udowodnienia tezy posługując się metodami teoretyczno-analitycznymi oraz badaniami symulacyjnymi i eksperymentalnymi jako sposobem weryfikacji wyników.

W części poprzedzającej treść rozprawy Autor przedstawił Wstęp, Wykaz oznaczeń oraz Symboli i Skrótów. W treści samej rozprawy Rozdział 1 stanowi krótki, lecz rzeczowy przegląd literatury z podziałem na klasyczne metody sterowania wektorowego (*FOC*, *DTC*, *DTC-SVM*) i predykcyjnego (*FCS-MPC*, *CCS-MPC*). Rozdział 2 zawiera sformułowanie tezy, celu i zakresu rozprawy. W Rozdziale 3 przedstawiono na bazie teorii zespolonych wektorów przestrzennych kolejno model matematyczny przekształtnika AC-DC, filtra L oraz LCL, oraz model przekształtnika DC-AC zasilającego silnik indukcyjny klatkowy. Ważnym punktem tego rozdziału jest wprowadzenie definicji wektorów pochodnych prądu i wektorów kierunków wykorzystywanych w dalszej analizie.

Pięć różnych metod sterowania predykcyjnego przekształtnikiem AC-DC z filtrami sieciowymi typu L oraz LCL zaprezentowano w Rozdziale 4, przy czym Autor omawia kolejno wersje od

najprostszych (PCi) do zaproponowanych autorskich ulepszeń, bardziej skomplikowanych nazwanych $PCi_{i_2u_c}$ oraz $PCi_{i_2u_c-2steps}$ (tzn. ze zwiększonym horyzontem predykcji na dwa kroki do przodu). Ponadto zarówno właściwości statyczne ($THDi$ prądu sieci) jak też dynamiczne (czasy t_f oraz t_r) wszystkich omawianych metod zilustrował wynikami badań symulacyjnych, co pozwoliło na ocenę i porównanie ich przydatności. Przy czym Autor interesująco odnosi parametry dynamiczne omawianych metod do wyznaczonej wartości tzw. „dynamiki granicznej” na podstawie zależności (4.65) i (4.66).

Obszerny Rozdział 5 zawiera systematyczne badania laboratoryjne przeprowadzone na stanowisku z przekształtnikiem AC-DC 5 kW pracującym z jednostkowym współczynnikiem mocy. Pomiary $THDi$ w stanach ustalonych prowadzono przy napięciu sieci kolejno: symetrycznym i sinusoidalnym, odkształconym (5% harmonicznym 5 i 7 oraz 3% 11 i 13), zapadzie jednofazowym (25% o czasie trwania 40ms) oraz asymetrii napięcia w jednej i dwóch fazach. Badania stanów przejściowych w Podrozdziale 5.5 obejmują odpowiedzi na skokowe zmiany składowej czynnej i_x prądu sieci w obu kierunkach ($10,2A \rightarrow -5.1A$ i odwrotnie), a także dla takiego samego znaku ($10,2A \rightarrow 5.1A$ i odwrotnie). Badano także odporność algorytmów sterowania na zmiany parametrów filtra L oraz LCL (Podrozdział 5.6). W podsumowaniu badań Autor stwierdza, że zastosowanie filtra LCL pozwala na redukcję współczynnika $THDi$ prądu sieci w stosunku do filtra L. Opracowane algorytmy $PCi_{i_2u_c}$ oraz $PCi_{i_2u_c-2steps}$ wykazują się dużą odpornością na zaburzenia występujące w napięciu sieci oraz bardzo dobrymi właściwościami dynamicznymi: dynamika zmian prądu 20A/ms a czas nawrotu z pracy prostownikowej 5kW na falownikową -2.5kW poniżej 1ms. Również wpływ zmian parametrów filtra na pracę przekształtnika jest marginalny.

Zagadnienia realizacji sterowania predykcyjnego momentu i strumienia (PTFC) silnika klatkowego przedstawiono w Rozdziale 6 rozprawy. Autor stabilizuje i wyznacza strumień główny Ψ_m na podstawie estymacji strumienia wirnika Ψ_r z modelu prądowego. W sformułowanym wskaźniku jakości (6.13) występuje tylko jeden składnik wagowy w_{psi} , który jest także jedynym parametrem nastawianym w systemie regulacji predykcyjnej PTFC. Dlatego prezentowane badania laboratoryjne są skupione na wykazanie wpływu zmian wartości tej wagi na właściwości zarówno statyczne ($THDi$, ΔI_{RMS} oraz $\Delta \Psi_{mRMS}$) jak też dynamiczne (Podrozdział 6.2.2). Jak wykazano dynamika regulacji momentu jest ograniczona tylko przez wartość napięcia U_{DC} oraz parametry silnika indukcyjnego i w prezentowanych badaniach osiąga wartość 240Nm/us. Wykazano także, że algorytm jest odporny na zmiany całkowitej indukcyjności rozproszenia σL_s (Podrozdział 6.2.3).

Interesujące są rozważania i analiza problemów występujących przy praktycznej realizacji algorytmów predykcyjnych przedstawione w Rozdziale 7, takie jak: wpływ i kompensacja czasu martwego przekształtnika (Podrozdział 7.1), wpływ obrotu wektorów napięcia przekształtnika (Podrozdział 7.2), niezwykle ważny autorski sposób doboru współczynników wag w metodach sterowania predykcyjnego zarówno przekształtnika AC-DC jak też DC-AC (Podrozdział 7.3),

wrażliwość na zmiany parametrów obiektu sterowanego (Podrozdział 7.4) oraz wpływ i kompensacja czasu obliczeń procesora (Podrozdział 7.5).

Rozprawę kończą Rozdział 8 zawierający wnioski końcowe oraz następnie Wykaz Literatury obejmujący 125 pozycji książkowych i artykułów opublikowanych w czasopismach i materiałach konferencyjnych od 1986 do 2016 roku.

Ponadto Dodatek 1 zawiera opis części sterującej stanowiska laboratoryjnego, oraz Dodatek 2 prezentujący część silnopiędową wraz z parametrami silnika klatkowego.

3. Uwagi ogólne

Do uwag dyskusyjnych natury ogólnej jakie nasunęły mi się w czasie studiowania rozprawy należą:

- a) W sformułowanych wskaźnikach jakości regulatorów predykcyjnych Autor nigdzie nie uwzględnia składników zapewniających ograniczenia prądu przekształtnika oraz częstotliwości łączy, tak jak to przedstawiono np. w pracy:

D. Stando, M. P. Kaźmierkowski, P. Chudzik: "Sensorless predictive torque control of induction motor drive operating in wide speed range - Simulation study", *16th International Power Electronics & Motion Control Conference and Exposition (PEMC)*, 2014, pp. 521-526.

Jak więc według Autora zabezpieczony jest przekształtnik przy sterowaniu predykcyjnym nie zawierającym tych składników we wskaźniku jakości?

- b) Na str. 55 (nad rysunkiem) jest: „Dla współczynnika $w_{uc} = 2.0$ wartość THDi wzrosła do poziomu 3,33% (rys. 4.20), przy czym wyraźnie zwiększył się udział 5 i 7 harmonicznej”. Jak to wywnioskować z przebiegów na rys. 4.20?
- c) Dlaczego tylko dla metody PCi-AD (rys. 5.17 i 5.26) maleje prąd w fazie w której jest najniższe napięcie sieci?
- d) Jak wytłumaczyć, że w metodzie *PCi₁₂u_c-2steps* czas t_r jest znacząco dłuższy (Tabela 5.6 na str. 86) aniżeli w pozostałych metodach?
- e) Czy Autor rozważał zastosowanie strumienia wirtualnego w sterowaniu predykcyjnym przekształtnika sieciowego AC-DC?
- f) W regulatorze predykcyjnym silnika klatkowego PTFC (Podrozdział 6.1) Autor jako wielkość stabilizowaną przyjął strumień główny Ψ_m , a nie stojana Ψ_s . Czym uzasadnić taki wybór?

4. Uwagi szczegółowe

Redakcja Rozprawy jest wyjątkowo staranna i zawiera nieliczne pomyłki edytorskie i stylistyczne. Poniżej w tabeli podano niektóre z nich.

Nr strony	Linia lub nr równania	Uwagi
44 45 i dalej	1 od dołu	Oznaczenia t_f oraz t_r są niewyjaśnione i niezdefiniowane?
67	Równanie (4.64)	Równanie to uzyskuje się raczej z (3.14) i (3.16), a nie z (3.15) i (3.16)
86 i dalej	Tabela 5.6 i Fig. 5.30	Oscylogramy dynamiczne powinny być przedstawione w mniejszej skali czasu, wówczas można by dokładnie zaznaczyć t_f oraz t_r , co ułatwiłoby czytelnikowi weryfikację danych w Tab. 5.6.
114	2 od dołu	„...trajektoria wektora uchybu...”, powinno być: „...hodograf wektora uchybu...”
128	1 od dołu	Jest: błąd względny 0.76%, powinno być: 0.78%
138	Rys. 7.10	Dlaczego w metodzie PCi_2u_c wzrost L_2 powyżej 20% powoduje pogorszenie jakości prądu sieci $THDi$?
98	Pod rów. (6.26)	„... funkcja zwracająca...”?
149	[35]	„...Sikorsk ...”, powinno być „...Sikorski ...”

5. Ocena rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska ma charakter teoretyczno-eksperymentalny i stanowi pogłębienie teorii i praktyki predykcyjnej regulacji mocy pobieranej/oddawanej z sieci elektroenergetycznej oraz momentu elektromagnetycznego i strumienia silnika klatkowego przy zasilaniu z przekształtnika AC-DC-AC. Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością energoelektroniki i automatyki napędu oraz nowoczesnych metod sterowania cyfrowego na bazie systemów DSP oraz FPGA. Osiągnął sformułowany przez siebie cel, posługując się analizą teoretyczną oraz ilustrując wyniki rozważań wszechstronnymi i systematycznymi badaniami eksperymentalnymi na modelu laboratoryjnym z przekształtnikiem AC-DC-AC o mocy 5kW. Praca napisana jest niezwykle konsekwentnie w logicznej sekwencji poczynając od omówienia modeli matematycznych maszyny indukcyjnej klatkowej i przekształtnika AC-DC-AC oraz kolejnych, zaproponowanych przez Autora, algorytmów predykcyjnych. Autor dokonał dużego wysiłku, aby przedstawić skomplikowany materiał w sposób przejrzysty doskonale posługując się wyrazistymi ilustracjami. Stosowana terminologia jest precyzyjna i prawidłowa. Praca w stosunku do stanu wiedzy tej dziedziny wnosi szereg nowych sformułowań i wytycznych dotyczących realizacji regulatorów predykcyjnych, stanowiąc dojrzały dorobek osobisty Autora. Oceniam, że sformułowane na str. 15 tezy Rozprawy zostały udowodnione.

Za osiągnięcia własne Autora uznaję:

- Opracowanie, realizacja i badania własnych algorytmów sterowania przekształtnikiem AC-DC z filtrem LCL, w szczególności $PCi_1i_2u_c$ oraz $PCi_1i_2u_c-2steps$ (Podrozdziały 4.4 i 4.5.), charakteryzujących się lepszymi właściwościami aniżeli konwencjonalne (PCi , $PCi-AD$);
- Opracowanie metod wstępnego doboru wag w algorytmach predykcyjnego sterowania przekształtników AC-DC z filtrem LCL od strony sieci (Podrozdział 7.3.2);

- Opracowanie, realizacja i badania zmodyfikowanego algorytmu (kontrolującego składową Ψ_{md} strumienia głównego) sterowania predykcyjnego momentu i strumienia silnika klatkowego (PTFC) zasilanego z przekształtnika DC/AC (Rozdział 6);
- Autorski sposób wyznaczania wartości wagi w_{psi} zapewniającej minimalne odkształcenie prądu stojana w metodzie PTFC (Podrozdział 7.3.1);
- Opracowanie metod korekcji wpływu czasów martwych przekształtnika oraz czasów obliczeń w procesorze (Podrozdziały 7.1 oraz 7.5);
- Projekt, budowa, implementacja opracowanych algorytmów oraz badania modelu laboratoryjnego przekształtnika AC/DC/AC ze sterowaniem cyfrowym na bazie 32-bitowego procesora zmiennoprzecinkowego ADSP-21369 rodziny SHARC firmy Analog Devices oraz układu programowalnego FPGA (Spartan 3) firmy Xilinx.

W ostatecznej ocenie pragnę także podkreślić, że materiał merytoryczny rozprawy został opublikowany w 8 pracach, w tym jedna w języku angielskim.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa Mgr inż. Piotra FALKOWSKIEGO pt. **"Predykcyjne algorytmy sterowania przekształtnikiem AC/DC/AC"**, niezależnie od uwag podanych w punktach 3 i 4 niniejszej recenzji, stanowi samodzielny i istotny wkład doktoranta do teorii i praktyki sterowania predykcyjnego klasy przekształtników AC-DC-AC. Uzyskane rezultaty mają istotne znaczenie poznawcze i mogą być wykorzystane w dalszych pracach badawczych i aplikacyjnych w energoelektronice i automatyce napędu elektrycznego. Stanowi ona doskonały dowód opanowania teorii i praktyki w zakresie energoelektroniki, automatyki napędu i sterowania mikroprocesorowego oraz świadczy o dojrzałości naukowej Autora.

Na tej podstawie stwierdzam, że **opiniowana praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 13 pkt.1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65 poz. 595 z późn. zm.) a także w stosownych rozporządzeniach i przepisach wykonawczych. Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Falkowskiego do publicznej obrony przed Radą Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej.**

Ponadto z uwagi na wyjątkowo staranne i wnikliwe opracowanie oraz pełen cykl twórczy obejmujący analizę i oryginalną hipotezę rozwiązania problemów sterowania predykcyjnego oraz systematyczne badania symulacyjne i eksperymentalne, **wnoszę o wyróżnienie opiniowanej rozprawy.**

