

Recenzja Rozprawy Doktorskiej

Modelowanie maszyn indukcyjnych dwuklatkowych

na potrzeby diagnostyki

Autor: mgr. inż. Jarosław Tulicki

Niniejszą recenzję wykonano na podstawie uchwały nr 15/2024 Rady Naukowej dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej z dn. 3 lipca 2024 r.

I. Wybór tematu

Problem diagnostyki uszkodzeń w maszynach elektrycznych jest szczególnie istotny ze względu na możliwość jego praktycznego wykorzystania w warunkach przemysłowych. W przedstawionej pracy podjęto próbę zastosowania złożonych modeli poliharmonicznych maszyny indukcyjnej do identyfikacji uszkodzeń związanych z uzwojeniem wirnika które ma postać 2 klatek, pracy oraz rozruchowej. Wykorzystano w tym celu metodę bilansu harmonicznym. Wybór tej metody wydaje się być bardzo dobrze uzasadniony ze względu na możliwość przeprowadzenia badań diagnostycznych w stanie ustalonym.

II. Cel pracy – zakres i teza

Podstawowym celem pracy było opracowanie metod i algorytmów wspomagających diagnozowanie niesymetrii elektrycznej wirnika w silnikach indukcyjnych dwuklatkowych. Zagadnienie to obejmuje analizę ustalonych stanów pracy przy stałej oraz zmiennej prędkości kątowej za którą uważa się okresowe odchylenie tej wielkości względem wartości średniej. Zadanie to rozwiązano formując równania poliharmonicznego modelu obwodowego, zakładającego symetrię maszyny oraz liniowości obwodu magnetycznego. W pracy zastosowano metodę bilansu harmonicznym dla przypadku liniowego oraz jej postać dyskretną pozwalającą na uwzględnienie zmiennej prędkości obrotowej wokół wartości średniej.

W trakcie realizacji pracy doktorskiej autor postawił tezę, która brzmi następująco:
„Istnieje możliwość wykrycia i lokalizacji niesymetrii elektrycznej wirnika w silniku indukcyjnym dwuklatkowym w stanie ustalonym z uwzględnieniem oddziaływań elektromechanicznych”.

III. Charakterystyka pracy i metodyka badań

Rozprawa obejmuje pięć rozdziałów merytorycznych zawartych na 191 stronach, literaturę obejmującą 110 pozycji (tylko jedna publikacja współautorska doktoranta) oraz spisy Tabel i Rysunków.

W rozdziale pierwszym nakreślono ogólną charakterystykę problemów związanych z wykorzystaniem asynchronicznych dwuklatkowych w przemyśle oraz sformułowano główną tezę rozprawy i omówiono zawartość rozdziałów.

Rozdział drugi przedstawia sposób formułowania oraz implementacji modelu silnika asynchronicznego dwuklatkowego z teoretycznie nieskończonym spektrum harmonicznych przestrzennych za pomocą liniowych równań różniczkowych o okresowo zmiennych współczynnikach. Oparty na nim model komputerowy zaimplementowany w programie Matlab zastosowano następnie do analizy stanów pracy przy różnych asymetriach klatek wirnika oraz uzwojenia stojana (przerwa w jednej fazie). Pozwoliło to określić składowe charakterystyczne dla wybranych asymetrii {m.in. o pulsacji ($\Omega_s + 2p\Omega - f_s (3-2s)$)} która pozwala na ich rozróżnienie zarówno w prądzie (str.75) jak i w związanych z nimi składowych momentu elektromagnetycznego (str.84). Autor zwraca uwagę na liczne problemy które mogą mieć wpływ na wykorzystanie tych sygnałów diagnostycznych związane m.in. z rezonansami mechanicznymi (str.85) oraz harmonicznymi generowanymi przez układy przekształtnikowe (rozd.2.5.6).

Rozdział trzeci, stanowiący w mojej opinii największe osiągnięcie autora, zawiera opis metody, którą nazwano „dyskretnym bilansem harmonicznym”. Pozwala ona na uzyskanie rozwiązania w dyskretnych chwilach czasu przy ograniczonym paśmie harmonicznych przestrzennych z wykorzystaniem procedury iteracyjnej zapewniającej uzyskanie zbieżnego rozwiązania metodą Newtona-Raphsona. Analizowano m.in. wpływ wyboru odmiennych

punktów startowych algorytmu oraz dyskretyzacji skali czasu na szybkość uzyskania stanu quasi-ustalonego (rozd.3.4.3). Wykazano m.in. iż 15 iteracji wystarcza do uzyskania pełnej zbieżności wyników dla wszystkich składowych. Uwidoczniono również wpływ początkowego położenia wirnika na zbieżność algorytmu. Wyniki uzyskane tą metodą porównano z metodą całkowania numerycznego (3.4.4). Uzyskano zadawalającą zgodność (Tab.3.2,3.3). W celu porównania z metodą przedstawioną w rozdziale 2 dokonano wstecznej transformacji wyników do dziedziny częstotliwości (rozd.3.5). Porównanie wskazało na rozszerzenie pasma obserwowanych harmoniczných prądów i momentu elektromagnetycznego.

Rozdział czwarty opisuje część pomiarową pracy. Przedstawiono w nim budowę stanowiska pomiarowego, specjalnie zbudowanego wirnika testowego zastosowanego w stojanie silnika Sg-112M4 IE2-4kW firmy Tamel oraz wybrane wyniki pomiarów wraz z ich porównaniem z rezultatami adekwatnych obliczeń.

Rozdział piąty zawiera podsumowanie pracy i wskazuje na dalsze kierunki badań.

IV. Wartość merytoryczna pracy

W mojej opinii na bardzo wysoką ocenę przedstawionej pracy wpływa niezwykle skomplikowany charakter zastosowanych w niej modeli matematycznych. Ich implementacja komputerowa oraz potwierdzenie w dużej mierze ich poprawności wykazanej ich pomiarową weryfikacją pozwala na uznanie ich za skuteczne narzędzie analizy w ramach przedstawionej w pracy tematyki.

Do oryginalnych osiągnięć autora należy zaliczyć:

1. Przeanalizowanie praktycznie wszystkich istniejących modeli obwodowych dla analizowanej klasy maszyn i wskazanie różnic między nimi występujących,
2. Wskazanie efektów związanych z równaniem mechanicznym na otrzymane przebiegi przestrzenno-czasowe w przeciwieństwie do tradycyjnej opinii wiążącej je z asymetrią rezystancyjną w przypadku dwustronnej asymetrii elektrycznej (str.158). Było to możliwe dzięki rozwiązaniu modelu dyskretnej metody bilansu harmoniczných,

3. wnioski i wytknięcie problemów związane z przerwaniem 3 fazy w układzie wysokiego napięcia (str. 188 rozdz.4.4. – wskazanie na przerwane fazy w obwodzie stojana jako generujące mniejsze efekty zanurzeniowe niż powtórne załączenie),
4. Wykonanie stanowiska laboratoryjnego z równoczesną możliwością zmiany momentu bezwładności oraz stopnia asymetrii klatki wirnika.

V. Uwagi szczegółowe i edycyjne

1. częste błędy w formatowaniu osi współrzędnych np. rys.3.1a,3.2a,3.3a, 3.4a,c – odwrócenie uporządkowania osi „Numer iteracji” względem pozostałych; rys.3.9,3.10,3.11a,c – odwrócenie osi względem d,b; rys.4.6,4.7 – odwrócenie osi na b,c,d; rys 4.7,4.8 - błąd w opisie - jest po poślizgu a nie po momencie,
2. na rysunkach porównawczych wskazane byłoby użycie tej samej skali lub dodanie porównania tabelarycznego (np. Rys.2.9a,d),
3. częste opisy wykorzystujące slang np. str.7 „wyższych momentów asynchronicznych”; str.14 „wpływu momentu zewnętrznego i bezwładności”,
4. częste nadużywanie przecinka np. str.8 „Bardzo często klasyfikację maszyn dwuklatkowych, uzupełniają ... ”; str.9 „Zniszczenie mechaniczne połączeń tej części wirnika, zachodzi zwykle”; str.11 „Rozwiązanie nieliniowego układu równań różniczkowych można także, przeprowadzić w sposób przybliżony”; str.13 „Rozdział drugi, zakończono”; str. 14 „W dalszych podrozdziałach, zilustrowano wyniki” etc.,
5. Nieliczne błędy lingwistyczne np. str. 26 „sprężenia” a powinno być „sprężenia”,
6. Czy zapis macierzy w równaniu (2.56) jest poprawny gdyż powinna ona być symetryczna zgodnie z podanym warunkiem?.

W. D. Wróblewski

VI. Pytania i uwagi dyskusyjne

1. Czy autor próbował wykorzystać analizę symboliczną w celu uproszczenia wyrażeń algebraicznych?,
2. Jaki jest warunek na ograniczenie rozmiarów macierzy w przypadku modelu dla bilansu harmonicznego (równanie 2.25)?,
3. Ile wynosi tło widma (str.75) ?,
4. Jak zdefiniowano skalę decybelową [dB] ? Poziom odniesienia 10^{-5} (str.46),
5. Tab. 3.1. - czy te wartości prądów harmonicznego są wogóle mierzalne ? Prąd I_{50} na poziomie 150 A a te wartości na poziomie 0,06 A,
6. wynik przedstawiono na Rys. 3.12 i w Tab. 3.2,3.3. Widać tam niewielki udział tych prądów har. (fazowy 155 A a inne max 2 A). Zgodność jest bardzo dobra lub wręcz zbyt dobra. W przypadku momentu i prąd podstawowej składowej zgodność jest "idealna". Pewne rozbieżności (str. 133) dotyczą zakresu o małym znaczeniu,
7. Skąd biorą się te harmoniczne 3 harmoniczne w napięciu międzyfazowym? Czy to efekt użycia autotransformatora z pewną asymetrią zwojową?,
8. Jakie były parametry momentomierza (częst. przenoszona) i częstotliwość drgań własnych układu zwłaszcza że zamieniano moment bezwładności z użyciem kół masowych montowanych na stronie nieobciążonej wała maszyny (Rys, 4.1). Te rozbieżności powyżej 100 Hz mogą bowiem wynikać też z zachowania momentamierza i samego układu kinematycznego,
9. Jakie jest wypełnienie tych macierzy z (Tab.4.3)?.

W. B. W. W. W. W. W.

VII. Wnioski końcowe

Analizując całokształt wykonanej pracy należy podkreślić ogromną ilość zadań wykonanych w celu otrzymania bardzo ciekawych wniosków.

W ramach pracy zaimplementowano 3 modele silnika indukcyjnego 2-klatkowego. Stanowi to o bardzo dużej pracowitości pracy i dowodzi bardzo dużych umiejętności doktoranta w zakresie metod numerycznych. Również przeprowadzona weryfikacja pomiarowa z pełną świadomością występujących w tym zakresie problemów, szczególnie w odniesieniu do pomiarów momentu elektromagnetycznego i wpływu na nie budowy układu (m.in. drgania własne) zasługuje na bardzo wysoką ocenę.

Dokonana weryfikacja wykazała dobrą zgodność z rzeczywistym widmem harmonicznego prądu i momentu. Należy podkreślić, iż model dyskretny mimo wąskiego pasma harmonicznego przepływu (2 (rozd.3.3, Tab.4.3) względem 50 (Tab.2.1)) dla modelu ze stałą prędkością uzyskał wyraźną poprawę zgodności w uwzględnianym paśmie co świadczy o jego wyższości nad tradycyjnym modelem bilansu harmonicznego dla stałej prędkości obrotowej (Rys.4.4,4.5).

VIII. Podsumowanie

Należy zaznaczyć, że pytania i uwagi dyskusyjne nie umniejszają walorów merytorycznych tej pracy, a jedynie ubogacą dyskusję podczas publicznej obrony.

Zgodnie z uwagami doktoranta (rozd. V) część wyników wymaga dalszych analiz co może stanowić pole do kontynuacji prac. Moim zdaniem przygotowane narzędzia pozwalają na dokonanie pełnej obwodowej analizy pracy maszyny w stanie quasi-ustalonym z uproszczonym uwzględnieniem efektów elektromechanicznych. Brak porównawczej analizy MES/FEM w mojej opinii jest pewnym brakiem, gdyż mógłby stanowić etap pośredni między symulacjami obwodowymi a pomiarem, jednak był to świadomy wybór doktoranta.

Reasumując Rozprawa Doktorska pt. „Modelowanie maszyn indukcyjnych dwuklatkowych na potrzeby diagnostyki”, autora mgr inż. Jarosława Tulickiego w dyscyplinie dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne **spełnia** kryteria stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Jarosława Tulickiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

W. Białkowski

IX. Wyróżnienie pracy

Biorąc pod uwagę wysoce pozytywną recenzję rozprawy, jej wysoką wartość merytoryczną oraz dorobek publikacyjny i patenty uzyskane przez doktoranta wnosząc o wyróżnienie jego pracy doktorskiej. W zakresie wymogów które stawia pod tym kątem Rada Naukowa dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne WIEiK decydujące znaczenie ma współautorstwo doktoranta w dwóch patentach: PL 234715 B1 oraz PL 234714 B1.

[1]. Ludwinek K., Sułowicz M., Petryna J., Duda A., Tulicki J.: „Zestaw do pomiaru prędkości obrotowej i kątowej maszyn elektrycznych prądu przemiennego” - PL 234715 B1

[2]. Ludwinek K., Sułowicz M., Petryna J., Duda A., Tulicki J.: „Silnik prądu przemiennego z cewką do pomiaru strumienia magnetycznego” - PL 234714 B1



Dr hab. inż. Burlikowski Wojciech, Prof. Pol.Śl.