

Analiza prądów w stanach dynamicznych silnika indukcyjnego przy zwarciu dwufazowym na zaciskach uzwojenia

Streszczenie. W pracy zaprezentowano modelowanie matematyczne oraz analizę prądów w stanach dynamicznych silników klatkowych przy zwarciu dwufazowym. Otrzymane rezultaty na drodze obliczeń poddano następnie weryfikacji eksperymentalnej dla silnika indukcyjnego o mocy 1.5 kW. Model matematyczny silnika dla zwarcia dwufazowego opracowany został w środowisku MatLab przyjmując założenie wyprowadzenia równań dla nieruchomego układu współrzędnych $0-\alpha$, $0-\beta$ związanego ze stojanem.

Abstract. Paper presents mathematical modeling and analysis of currents during two-phase short-circuit of squirrel cage induction motors. Obtained by calculation results were then subjected to experimental verification for the induction motor of power 1.5 kW. Mathematical model of the motor for two-phase short circuit was developed in MatLab environment assuming equations for $0-\alpha$, $0-\beta$ type of coordinate associated with the stator. (Analysis of currents squirrel-cage motor in dynamic states during two-phase short circuit at the terminals of windings).

Słowa kluczowe: zwarcie dwufazowe, silnik indukcyjny, metoda zmiennych stanu.

Keywords: two-phase short-circuit, squirrel-cage motor, state variables method.

doi:10.12915/pe.2014.08.05

Wprowadzenie

W pracy zaprezentowano metodologię obliczeń zwarć dwufazowych pod kątem prądów zwarciovych dla silnika klatkowego. Przeprowadzono modelowanie matematyczne maszyny indukcyjnej w oparciu o metodę zmiennych stanu. W tego typu zwarciach istotne są udary prądów, które szczególnie są niebezpieczne dla uzwojenia maszyny oraz całego układu napędowego.

Zwarcie dwufazowe wpływa również na stronę zasilania i musi być rozpatrywane ze względu bezpieczeństwa. Niewłaściwie dobrane zabezpieczenia mogą wpłynąć nie tylko na układ napędowy, który przy zwarciu dwufazowym i tak ulega uszkodzeniu, ale przede wszystkim przenieść się dalej na stronę zasilającą powodując zagrożenie. Stan zwarcia dwufazowego w maszynie indukcyjnej występuje zazwyczaj w sytuacji uszkodzenia izolacji uzwojenia stojana przez przebicie do fazy sąsiedniej. Zwarcie między fazami (zwarcie dwufazowe) jest co do miejsca występowania losowe i nie można określić, w którym miejscu ono wystąpi. Zjawisk wystąpienia zwarcia dwufazowego zależy między innymi od:

- od anomalii (wtrąceń, zadr, naprężeń mechanicznych) występujących w izolacji uzwojenia silnika,
- warunków eksploatacji (częstość stanów nieustalonych, temperatury pracy izolacji), itp.

Z tego powodu w opracowywanym modelu maszyny zwarcia między uzwojeniami sprowadza się do stanu zwarcia dwufazowego na zaciskach zewnętrznych maszyny.

Model matematyczny silnika dla stanu zwarcia dwufazowego został opracowany w środowisku MatLab. Sformułowany został układ równań różniczkowych opisujących przebiegi elektromagnetyczne w równoważnym silniku indukcyjnym dwufazowym zastępując wektory przestrzenne odpowiednimi związkami między ich składowymi wzdłuż osi $0-\alpha$ i $0-\beta$ dla składowej zgodnej i analogiczny układ równań dla składowej przeciwnej. Należy zaznaczyć, iż w każdej iteracji układ składowej zgodnej i układ równań dla składowych przeciwnych posiadały ten sam stan na podstawie którego wyliczane były zmienne stanu. Zatem, w każdej iteracji wyznaczane były różne wartości zmiennych stanu (dla składowej zgodnej i przeciwnej) i na podstawie kroku poprzedniego oraz warunków zasilania danej składowej symetrycznej. Nie występuje superpozycja składowych.

W artykule przeprowadzono również analizę porównawczą przebiegu prądów dla silnika małej mocy dla tego typu zwarć.

Modelowanie dynamiczne dla zwarcia dwufazowego przeprowadzono przyjmując zależności równań dla zmiennych stanu obranych na podstawie składowych strumieni:

- stojana: $\psi_{s\alpha}(t)$, $\psi_{s\beta}(t)$,
- wirnika sprowadzonych na stronę stojana: $\psi_{r s\alpha}(t)$, $\psi_{r s\beta}(t)$,
- prędkości ω .

W każdej chwili czasowej iteracyjnie wyznaczono zmienne stanu stosując metodę Rungego-Kutty 4 rzędu dla składowych symetrycznych zgodnych i przeciwnych. Metoda Rungego-Kutty 4. rzędu jest powszechnie stosowana ze względu na prostotę implementacji, relatywnie proste wzory, dużą szybkość oraz wysoki rząd metody. Pozwala na uzyskanie zadawalających rezultatów obliczeń przy małym kroku iteracyjnym.

Model matematyczny maszyny asynchronicznej klatkowej dla stanu zwarcia dwufazowego

Stany przejściowe, które pojawiają się podczas dynamicznej pracy maszyny indukcyjnej klatkowej zdeterminowane są przez:

- warunki zasilania maszyny,
- zmiany dynamiki od strony zewnętrznego momentu przyłożonego do wału maszyny (ew. zmiany wypadkowego momentu bezwładności całego układu),
- wzajemnego oddziaływania na siebie strumieni magnetycznych w stanach przejściowych,
- przebiegi napięć i prądów w poszczególnych fazach uzwojeń stojana i wirnika,
- strumieni skojarzonych z tymi uzwojeniami.

W obliczeniach stanów nieustalonych należy w pierwszej kolejności opracować model maszyny z przyjętymi założeniami upraszczającymi, który pozwala na opis matematyczny silnika. W modelu takim formułuje się równania wiążące zależności przyjętych zmiennych stanu i rozwiązuje się układy równań różniczkowych przedstawiających równanie ruchu obrotowego wirnika w relacji z wymuszeniem w postaci napięć, prądów i strumieni magnetycznych oraz momentem obciążenia i bezwładności.

Ponieważ model matematyczny jest pewnym odwzorowaniem stanu rzeczywistej maszyny do analizy przyjmuje się założenia upraszczające, które z jednej strony pozwalają na uzyskanie rozwiązania w zadawalającym czasie, a z drugiej strony wpływają na dokładność uzyskanych obliczeń.

W opracowanym przez autorów modelu maszyny asynchronicznej przyjęto następujące założenia upraszczające:

- maszyna ma symetryczne pod względem budowy i rozłożenia uzwojenia stojana,
- w obliczeniach przyjęto blachę izotropową, która nie posiada pętli histerezy,
- w obliczeniach uwzględniono nasycenie obwodu magnetycznego jedynie w obszarach zębów,
- nie uwzględnione zostało wypieranie prądów w przewodach uzwojeń, które rzutuje na wartości rezystancji oraz indukcyjności własnych i wzajemnych uzwojeń stojana i wirnika,
- w równaniach różniczkowych, stanowiących model silnika, założono że maszyna asynchroniczna ma parametry rezystancji i indukcyjności o stałych skupionych ale o zmiennych, w każdej iteracji zależnych od stanu pracy tej maszyny.

Przyjęta postać równań stanu dla maszyny asynchronicznej klatkowej

Przyjęte równania stanu maszyny asynchronicznej klatkowej wyprowadzone zostały dla nieruchomego układu współrzędnych związanego ze stojanem, które opisują przebiegi elektromagnetyczne w równowaznym silniku indukcyjnym dwufazowym. W tym celu zastępuje się wektory przestrzenne odpowiednimi związkami między ich składowymi w osi 0- α i 0- β .

Taki nieruchomy układ współrzędnych związany ze stojanem pozwala na stosunkowo proste iteracyjne przeprowadzenia symulacji zwarcia dwufazowego. Dzięki temu można dla każdej iteracji z chwili poprzedniej wyznaczyć iterację następną dokonując wektorowego złożenia składowej zgodnej i przeciwnej modelowanej maszyny.

Należy zaznaczyć, że dla silnika indukcyjnego inny układ współrzędnych, który wiruje ze stałą lub zmienną prędkością związanych sztywno z wirnikiem powoduje znaczną komplikację równań i utrudniona analizę, ponieważ dla każdej iteracji dla obu składowych należałoby uwzględniać iż prędkość wirnika, w każdej iteracji, zmienia się wraz z poślizgiem, co utrudnia złożenie wektorów i ich przeliczanie.

Ogólna postać równań różniczkowych dla składowej zgodnej i przeciwnej zapisana jest wzorami 1, 2, 3, 4, 5. W równaniach tych wybrano pięć zmiennych niezależnych jako zmienne stanu:

- strumień stojana w osi α : $\psi_{s\alpha}(t)$,
- strumień stojana w osi β : $\psi_{s\beta}(t)$,
- strumień wirnika przeliczony na stronę stojana w osi α : $\psi_{r s\alpha}(t)$,
- strumień wirnika przeliczony na stronę stojana w osi β : $\psi_{r s\beta}(t)$,
- prędkość kątowna elektryczna ω .

Na wektor wymuszeń składają się napięcie stojana w osi α i napięcie stojana w osi β (wzór 11 i 12).

Wektor zakłóceń składa się z momentu obciążającego maszynę i sumarycznego momentu bezwładności, który do potrzeb analizy zwarcia dwufazowego przyjęty jest jako stała wartość. W związku z tym wektor zakłóceń jest skalarem (zadany moment obciążenia).

Sygnałem wyjściowym jest prędkość kątowna wału silnika Ω wyrażona jako prędkość kątowna elektryczna ω podzielona przez liczbę par biegunów p .

Opracowany model uwzględnia w obliczeniach zarówno możliwość zadawania stałego momentu obciążenia jak również momentu obciążenia w postaci charakterystyki wentylatorowej zależnej od prędkości obrotowej maszyny.

$$(1) \frac{d\psi_{s\alpha}(t)}{dt} = -\alpha\psi_{s\alpha}(t) + \alpha K_r \Psi_{r s\alpha}(t) + u_{s\alpha}(t); (2) \frac{d\psi_{s\beta}(t)}{dt} = -\alpha\psi_{s\beta}(t) + \alpha K_r \Psi_{r s\beta}(t) + u_{s\beta}(t)$$

$$(3) \frac{d\psi_{r s\alpha}(t)}{dt} = \beta K_s \psi_{s\alpha}(t) - \beta \Psi_{r s\alpha}(t) - \omega(t) \Psi_{r s\beta}(t); (4) \frac{d\psi_{r s\beta}(t)}{dt} = \beta K_s \psi_{s\beta}(t) - \beta \Psi_{r s\beta}(t) + \omega(t) \Psi_{r s\alpha}(t)$$

$$(5) \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{3p^2 K_r}{2\sigma L_s J} \psi_{s\alpha}(t) \Psi_{r s\beta}(t) - \frac{3p^2 K_r}{2\sigma L_s J} \psi_{s\beta}(t) \Psi_{r s\alpha}(t) - \frac{p}{J} M_z(t)$$

gdzie:

- wypadkowy wsp. rozproszenia (6) $\sigma = 1 - (L_m^2 / L_s L_r)$
- współczynnik sprzężenia stojana K_s : (7) $K_s = L_m / L_s$
- współczynnik sprzężenia wirnika K_r : (8) $K_r = L_m / L_r$
- współczynnik α : (9) $\alpha = R_s / \sigma L_s$
- współczynnik β : (10) $\beta = R_r / \sigma L_r$
- napięcie stojana w osi α (11) $u_{s\alpha}(t) = U_s \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$
- napięcie stojana w osi β : (12) $u_{s\beta}(t) = U_s \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$

Mając wyznaczone zmienne stanu w postaci strumieni możliwe jest obliczenie momentu elektromagnetycznego pochodzącego od składowej zgodnej i przeciwnej (wzór 13).

$$(13) M_e = \frac{3 \cdot p \cdot L_m}{2 \cdot (L_s \cdot L_r - L_m^2)} \cdot (\Psi_{s\beta}(t) \cdot \Psi_{r s\alpha}(t) - \Psi_{s\alpha}(t) \cdot \Psi_{r s\beta}(t))$$

Po obliczeniu strumieni magnetycznych możliwe jest wyznaczenie prądów stojana i wirnika zarówno w zastępczym silniku dwufazowym w osiach 0- α (wzór 14, 16) i 0- β (wzór 15, 17), a następnie w poszczególnych fazach silnika (wzór 18, 19, 20).

$$(14) i_{s\alpha}(t) = \frac{\psi_{s\alpha}(t) - K_r \Psi_{r s\alpha}(t)}{\sigma L_s}; (15) i_{s\beta}(t) = \frac{\psi_{s\beta}(t) - K_r \Psi_{r s\beta}(t)}{\sigma L_s}$$

$$(16) i_{r s\alpha}(t) = \frac{-K_r \psi_{s\alpha}(t) + \frac{K_r}{K_s} \Psi_{r s\alpha}(t)}{\sigma L_s}; (17) i_{r s\beta}(t) = \frac{-K_r \psi_{s\beta}(t) + \frac{K_r}{K_s} \Psi_{r s\beta}(t)}{\sigma L_s}$$

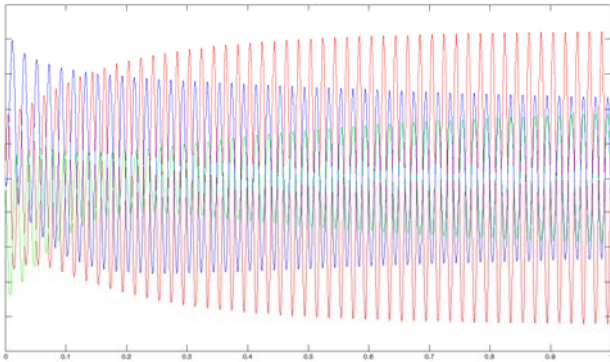
$$(18) i_{sI}(t) = i_{\alpha}(t)$$

$$(19) i_{s2}(t) = \frac{-i_{s\alpha}(t)}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{s\beta}(t); (20) i_{s3}(t) = \frac{-i_{s\alpha}(t)}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{s\beta}(t)$$

Analiza prądów w stanach dynamicznych silnika indukcyjnego przy zwarcu dwufazowym

Rozkłady wartości chwilowych prądów dla stanu zwarcia dwufazowego na zaciskach maszyny obliczone zostały dla przykładowych danych silnika indukcyjnego o mocy 1,5kW, liczby par biegunów $p=2$, napięciu zasilania 400V przy połączeniu w gwiazdę i częstotliwości zasilającej 50Hz. Parametry silnika (rezystancji, indukcyjności własnych i wzajemnych) uzyskane zostały na drodze pomiarowej (Rys. 3). Rozkłady prądów dla pierwszych okresów zwarcia dwufazowego zaprezentowane zostały na rysunku 1.

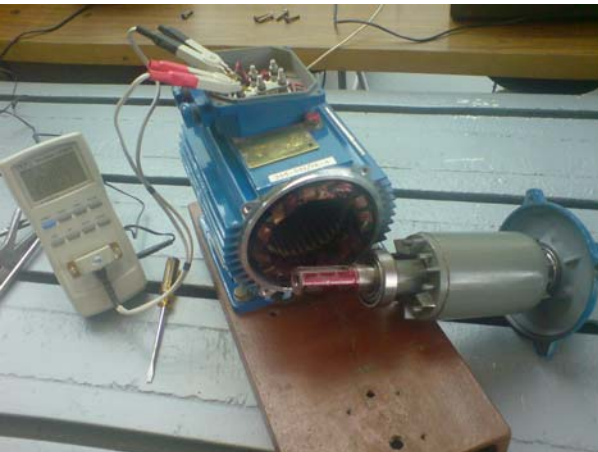
Jak można zauważyć udary prądów są w stosunku do prądów znamionowych o około 6 razy większe (weryfikacja eksperymentalna rysunek 4 potwierdza uzyskane rezultaty na drodze obliczeniowej).



Rys. 1. Rozkłady prądów dla pierwszych okresów zwarcia dwufazowego silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 1,5kW.



Rys. 2. Silnik z hamulcem histerezyowym w układzie pomiarowym do badania przebiegów podczas zwarcia 2-fazowych

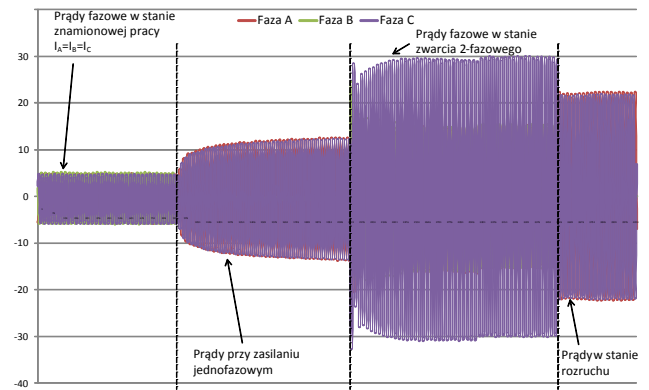


Rys. 3. Silnik indukcyjny o mocy 1.5 kW podczas pomiarów parametrów uzwojeń.

Weryfikacja eksperymentalna obliczeń

Układ pomiarowy (Rys. 2) do badania przebiegów prądów i momentu podczas zwarcia dwufazowego złożony był z badanego silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 1,5kW, hamulca histerezyowego, który pozwalał na utrzymywanie stałej wartości momentu na wale, przekładników prądowych i napięciowych LEM oraz kart pomiarowych firmy Ambex, komputera i programu umożliwiającego rejestrację wartości chwilowych sygnałów zadanych.

Przebiegi prądów w stanie nieustalonym zaprezentowane zostały na rysunku 3 dla każdej z faz.



Rys. 4. Przebiegi dynamiczne prądów dla stanu zwarcia 2-fazowego (przejście od pracy znamionowej przez pracę przy zasilaniu 1-fazowym do pracy przy zwarcu 2-fazowym)

Podsumowanie

Nieruchomy układ współrzędnych związany ze stojanem pozwala na stosunkowo proste iteracyjne przeprowadzenie symulacji zwarcia dwufazowego.

Uzyskane rezultaty na drodze obliczeń numerycznych pokrywają się z rezultatami w postaci pomiarów co świadczy o poprawności opracowanego modelu i przyjętych prawidłowych założeniach upraszczających.

LITERATURA

- [1] Arkan M., Kostic-Perovic D., Unsworth P.J., Modelling and simulation of induction motors with inter-turn faults for diagnostics, *Electric Power Systems Research* 75, 2005.
- [2] Jesper S. Thomsen, Carsten S. Kallesoe, Stator fault modelling of induction motors, *Int. Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Speedam 2006*.
- [3] Rosołowski E., Wieczorek M., Modelowanie silnika indukcyjnego do symulacji zwarc wewnątrznych, *Materiały X Konferencji Naukowo – Technicznej Petro Eltech 2009*, Soczewka, 20-22 maja 2009.
- [4] Antal L., Antal M., Zawilak J., Weryfikacja modelu obliczeniowego silnika klatkowego pomiarami statycznych i dynamicznych stanów pracy, Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych, PEMINE. Ustroń, 19-21 maja 2004, *Zeszyty Problemowe BOBRME Komel*, nr 69 2004, s. 99-104
- [5] Melero M.G., Cabanas M.F., Rojas C., Orcajo G.A., Cano J.M., Solares J., Study of an induction motor working under stator winding inter-turn short circuit condition, *Diagnostics for Electric Machines, SDEMPED*, 4th IEEE International Symposium on Power Electronics and Drives, 24-26 Aug. 2003 pp. 52 - 57,
- [6] Bacha K., Henaob H., Gossa M., Capolino G. A., Induction machine fault detection using stray flux EMF measurement and neural network-based decision, *Elsevier Electric Power Systems Research* 78 (2008), pp. 1247–1255.
- [7] Antal M., Antal L., Zawilak J., Badania uszkodzeń uzwojenia stojana klatkowego silnika indukcyjnego. *Zeszyty Problemowe BOBRME KOMEL*, Nr 76, 2007
- [8] Toumi D., Boucherit M.S., Tadjine M., Observer-based fault diagnosis and field oriented fault tolerant control of induction motor with stator inter-turn fault, *Archives of Electrical Engineering*, Vol. 61(2), 2012, pp. 165-188.
- [9] Nowak M., Pietrowski W., Research and application of artificial neural network to diagnostics of stator winding short-circuit of slip-ring induction motor. *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 9/2013
- [10] Kowalski C., Wolkiewicz M., Wierzbiński R., Modelowanie zwarc zwojowych silnika indukcyjnego zasilanego z przemiennika częstotliwości, *Przegląd Elektrotechniczny*, NR 04/2010

Autorzy: dr inż. Paweł Drzymala, Politechnika Łódzka, Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych, Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: pawel.drzymala@p.lodz.pl; dr inż. Henryk Welfle, Politechnika Łódzka, Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych, Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: henryk.welfle@p.lodz.pl.