Seria: ELEKTRYKA z.126

Nr kol. 1168

Krzysztof Kluszczyński

Piotr Malicki

Instytut Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej

KOMPUTEROWA ANALIZA WPŁYWU PRĄDÓW POPRZECZNYCH W WIRNIKU INDUKCYJNEGO SILNIKA KLATKOWEGO NA MOMENTY PASOZYTNICZE

<u>Streszczenie</u>. Opierając się na modelu matematycznym maszyny asynchronicznej, uwzględniającym zarówno wyższe harmoniczne przestrzenne przepływu, jak i prądy poprzeczne w żelazie wirnika, opracowano program komputerowy, umożliwiający obliczanie momentów pasożytniczych, powstających w silniku. Przeanalizowano wpływ prądów poprzecznych pomiędzy prętami wirnika na amplitudy synchronicznych momentów pasożytniczych oraz na charakterystyki mechaniczne momentów asynchronicznych, związanych z wyższymi harmonicznymi przestrzennymi. Wyjaśniono, dlaczego prądy poprzeczne w żelazie wirnika osłabiają działanie skosu w odniesieniu do tłumienia momentów pasożytniczych.

COMPUTER ANALYSIS OF INFLUENCE OF TRANSVERSE CURRENTS IN ROTOR OF SQUIRREL-CAGE MOTOR ON PARASITIC TORQUES

Summary. Basing on a mathematical model of an asynchronous machine allowing for MMF space harmonics and transverse currents in rotor iron a computer program has been elaborated enabling us to calculate parasitic torques arising in a motor. Influence of transverse bar-to-bar currents on amplitudes of synchronous parasitic torques and on asynchronous torque-speed curves connected with higher space harmonics is considered. It is explained why transverse currents in rotor iron reduce suppressing influence of skewing on parasitic torques.

КОМПЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ТОКОВ В РОТОРЕ АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНУТОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ПАРАЗИТНЫЕ МОМЕНТЫ

<u>Резюне</u>. Опираясь на математическую модель асинхронной машины учитывающую как высшие пространственные гармоники магнитодвижущей силы, так и поперечные токи в роторе, была разработана программа, которая делает возможным вычисление паразитных моментов, возникающих в двигателе. Проанализировано влияние поперечных токов протекающих между стержнями ротора на амплитуды паразитных синхронных моментов и на механические характеристики асинхронных моментов связаных с высшими пространственными гармониками. Выяснено, почему поперечные токи в роторе ослабляют влияние скоса пазов на подавление паразитных иоментов.

1. WSTEP

W wyniku elektrodynamicznego oddziaływania wyższych harmonicznych przestrzennych pola magnetycznego powstają w maszynie indukcyjnej pasożytnicze momenty elektromagnetyczne, zniekształcające charakterystykę mechaniczną silnika odpowiadającą głównej harmonicznej przestrzennej. Pasożytnicze momenty synchroniczne są przyczyną zależności momentu rozruchowego silnika od kąta początkowego położenia wirnika, pogarszają własności dynamiczne maszyny przy rozruchu i nawrotach, wywołują drgania i wibracje korpusu i wału oraz generują hałasy magnetyczne.

Jedna z metod ograniczania synchronicznych momentów pasożytniczych w indukcyjnych silnikach klatkowych polega na wprowadzeniu skosu żłobków wirnika. W praktyce sposób ten nie jest jednak tak skuteczny, jak wynikałoby to z obliczeń. Nieizolowane pręty klatki wirnika, zwłaszcza wirnika zalewanego aluminium, przylegają bowiem bezpośrednio do powierzchni pakietu żelaza, w wyniku czego pomiędzy prętami wirnika pojawiają się prądy poprzeczne. Te właśnie prądy powodują, że oddziaływanie skosu żłobków na momenty pasożytnicze jest znacznie mniej efektywne.

Celem niniejszego artykułu jest przeanalizowanie wpływu prądów poprzecznych na momenty pasożytnicze synchroniczne i asynchroniczne oraz wskazanie, w jakim stopniu prądy poprzeczne mogą niweczyć działanie skosu żłobków w zakresie tłumienia momentów pasożytniczych.

Przykładowe obliczenia przeprowadzono dla silnika średniej mocy o następujących danych: $P_n = 3 kW$, $U_n = 380 V$, p=3, liczba żłobków stojana $Q_c = 36$, liczba żłobków wirnika $Q_r = 33$.

Silnik ten posiada w wykonaniu fabrycznym skos żłobków wirnika $b_{sk} = 0,45$ (b_{sk} - skos względny odniesiony do podziałki żłobkowej wirnika). W silniku tym powstaje pasożytniczy moment synchroniczny o znacznej amplitudzie w zakresie pracy hamulcowej przy prędkości (-90,9)obr/min oraz pasożytniczy moment synchroniczny o znacznie mniejszej amplitudzie w zakresie pracy silnikowej przy prędkości 45,5 obr/min. Pierwszy z tych momentów związany jest z parą harmonicznych przestrzennych (ν, ρ) = (3,69) (ν =3 - harmoniczna główna, ρ =69 - harmoniczna żłobkowa stojana o rzędzie określonym wzorem ρ =cQ_s-p dla c=2 i zarazem harmoniczna żłobkowa wirnika), drugi - z parami harmonicznych przestrzennych (ν_1, ρ_1) = (3,129), (ν_2, ρ_2) = (21,111) (ν_1 = 3 - harmoniczna główna, ρ_1 = 129 - harmoniczna żłobkowa wirnika, ν_2 = 21 - harmoniczna strefowa stojana niskiego rzędu, $\rho_2 = 111 - harmoniczna żłobkowa stojana określona równaniem <math>\rho=cQ_+p$ dla c=3).

Istotne znaczenie dla prawidłowego określenia wartości pradów poprzecznych posiada znajomość impedancji pomiedzy pretami wirnika. Impedancja ta ma praktycznie charakter czysto omowy, a o jej wartości w zasadniczy sposób decyduje rezystancja styku pomiędzy prętem a żelazem. Wartość ta w procesie technologicznym ustala sie w sposób przypadkowy (dla określonego procesu technologicznego można co najwyżej wskazać dość szerokie granice, w których zazwyczaj ta wartość się mieści), a ponadto - zmienia się wraz z czasem eksploatacji silnika. W prezentowanych obliczeniach przyjmowano przeważnie wartość rezystancji pomiędzy prętami R_{hh} = 30 $\mu\Omega$ (średnie wartości rezystancji dla prądów poprzecznych dla wirników zalewanych aluminium [1], [7]). W przypadku analizy wpływu pradów poprzecznych na charakterystyki mechaniczne asynchronicznych momentów pasożytniczych związanych z wyższymi harmonicznymi przestrzennymi przyjęto wartość R_{bb}= 0.6 mΩ, przy której to wartości charakterystyczna deformacja charakterystyk jest szczególnie wyraźna. Wartość tej rezystancji wpływa na wartości prądów poprzecznych, lecz nie oddziałuje w znaczący sposób na charakter przebiegów.

2. ROZKŁAD PRĄDÓW POPRZECZNYCH W WIRNIKU

Wykorzystując model silnika indukcyjnego opisany w pracy [5] zbadano rozkład wzdłuż osi wirnika prądów poprzecznych wypływających z pręta i płynących poprzez żelazo do sąsiednich prętów wirnika. Na rys. 1 i 2 przedstawiono rozkłady amplitud i kątów przesunięć fazowych gęstości liniowej prądów poprzecznych generowanych przez 3 (główną) i 69 (żłobkową) harmoniczną przestrzenną pola magnetycznego. W wirniku o żłobkach prostych amplitudy prądów poprzecznych są znacznie mniejsze niż w wirniku o żłobkach skośnych, przy czym w połowie długości wirnika są równe zeru (rys.1a). Wynika to z tego, że w maszynie o żłobkach prostych prądy poprzeczne są wymuszane wyłącznie przez spadki napięcia w odcinkach pierścienia zwierającego, zawartych pomiędzy rozważanymi prętami. Jeśli założyć, że spadek ten jest równy zero – prądy w żelazie przyjmują wartości zerowe. W maszynie o żłobkach skośnych prądy poprzeczne są przede wszystkim wynikiem tego, że siły elektromotoryczne, indukowane w poszczególnych odcinkach



Rys.1. Rozkład gęstości liniowej prądów poprzecznych od 3-ciej harmonicznej przestrzennej, a-amplituda, b-przesunięcie fazowe, s = 1, R_{bb} = 30 $\mu\Omega$ (klatka nieizolowana), b_{sk} = 0, 0.1, 0.5, 1

Fig.1. Distribution of linear density of transverse current connected with 3-rd space harmonic, a-amplitude, b-angle shift, s = 1, R_{bb} = 30 $\mu\Omega$ (uninsulated rotor), b_{sk} = 0, 0.1, 0.5, 1



Rys.2. Rozkład gęstości liniowej prądów poprzecznych od 69-tej harmonicznej przestrzennej, a-amplituda, b-przesunięcie fazowe, s = 1, R_{bb} = 30 $\mu\Omega$ (klatka nieizolowana), b_{sk} = 0, 0.1, 0.5, 1 Fig.2 Distribution of linean despity of t

Fig.2. Distribution of linear density of transverse current connected with 69-th space harmonic, a-amplitude, b-angle shift, s = 1, $R_{bb} = 30 \ \mu\Omega$ (uninsulated rotor), b = 0; 0.1, 0.5, 1

Komputerowa analiza wpływu....

prętów przez strumienie magnetyczne w szczelinie powietrznej, posiadają różne przesunięcie fazowe. Stąd też amplitudy oraz fazy prądów poprzecznych w wirniku o żłobkach skośnych zmieniają się w szerokich granicach wzdłuż osi wirnika. Zmiany fazy prądów poprzecznych wzdłuż osi wirnika są tym większe, im większy jest skos żłobków (rys.1b i 2b), zaś amplitudy prądów poprzecznych w zasadniczy sposób zależą od relacji pomiędzy długością fali harmonicznej przestrzennej, generującej te prądy poprzeczne, a wielkością skosu żłobków wirnika. Amplitudy prądów poprzecznych osiągają największe wartości, gdy podziałka skosu jest równa bądź porównywalna z długością fali harmonicznej przestrzennej, generującej te prądy. Taki przypadek przedstawiono na rys.2a, gdzie skos b_{sk}=0,5 odpowiada w przybliżeniu długości fali 69 harmonicznej przestrzennej.

3. WPLYW PRADÓW POPRZECZNYCH NA MOMENTY PASOŻYTNICZE

Opierając się na modelu silnika przedstawionym w pracy [5] oraz na wyprowadzonych w postaci całkowej wzorach na pasożytnicze momenty asynchroniczne i synchroniczne, przeanalizowano wpływ izolowania klatki na: - amplitudy pasożytniczych momentów synchronicznych,

- pasożytnicze momenty asynchroniczne (rys. 3, 4, 5, 6),
- wypadkową charakterystykę mechaniczną uwzględniającą pasożytnicze momenty synchroniczne i asynchroniczne (rys.7 i 8).

Rozważmy najpierw przypadek silnika z prostymi 'żłobkami wirnika. W rozważanej maszynie, przy założeniu że klatka jest idealnie izolowana $(R_{bb} \rightarrow \infty)$, dominujący moment synchroniczny o amplitudzie 27,8 Nm powstaje w zakresie pracy hamulcowej przy prędkości (-90,9) obr/min. W przypadku klatki nieizolowanej moment ten ma praktycznie taką samą amplitudę. Jak już wspomniano, dominujący moment pasożytniczy w zakresie pracy hamulcowej związany jest z parą harmonicznych (ν, ρ)=(3,69). Jego amplitudę można znacznie ograniczyć poprzez wprowadzenie skosu żłobków wirnika, powodującego, że siły elektromotoryczne indukowane wzdłuż pręta przez pole magnetyczne 69 harmonicznej wzajemnie zrównoważą się wskutek różnego przesunięcia fazowego i nie doprowadzą do powstania prądów, odpowiadających 69 harmonicznej. Po wprowadzeniu skosu żłobków wirnika b_{sk}=0,45 (taki skos odpowiada w przybliżeniu długości fali 69 harmonicznej maleje do wartości 0,062. Zgodnie z przewidywaniami, dzięki takiemu skosowi



Rys.3. Charakterystyka mechaniczna pasożytniczego momentu asynchronicznego od 21 harmonicznej przestrzennej, $R_{hh} = \infty$ (idealnie izolowana

klatka), $b_{sk} = 0, 0.45$

Fig.3. Asynchronous torque-speed curve for 21-st space harmonic, R_{bb} = m (fully-insulated rotor), b_{sk} = 0, 0.45



Rys.4. Charakterystyka mechaniczna pasożytniczego momentu asynchronicznego od 21 harmonicznej przestrzennej, $b_{sk} = 0.45$, $R_{bb} = \infty$ (idealnie izolowany wirnik) i $R_{bb} = 0.6 \text{ m}\Omega$ (nieizolowany wirnik)

Fig. 4. Asynchronous torque-speed curve for 21-st space $b_{sk} = 0$, $R_{bb} = \infty$ (fully-insulated rotor) and $R = 0.6 \text{ m}\Omega$ (non-insulated rotor)





Fig.5. Asynchronous torque-speed curve for 39-th space harmonic, $R_{bb} = \infty$ (fully-insulated rotor), $b_{cb} = 0$, 0.45



Rys.6. Charakterystyka mechaniczna pasożytniczego momentu asynchronicznego od 39 harmonicznej przestrzennej, b $_{sk}$ = 0.45, R_{bb} = ∞ (idealnie izolowany wirnik)i R_{bb} =0.6 m Ω (nieizolowany wirnik)

Fig.6. Asynchronous torque-speed curve for 39-th space $b_{sk} = 0$, $R_{bb} = \infty$ (fully-insulated rotor) and $R_{bb} = 0.6 \text{ m}\Omega$ (non-insulated rotor)



Rys.7. Wypadkowa charakterystyka mechaniczna,
b_sk = 0, R_{bb} = ∞ (idealnie izolowany wirnik)

Fig.7. Resultant torque-speed curve, $b_{sk} = 0$, $R_{bb} = \infty$ (fully-insulated rotor)





Fig.8. Resultant torque-speed curve, $b_{sk} = 0.45$, $R_{bb} = \infty$ (fully-insulated rotor) and $R_{bb} = 30 \ \mu\Omega$ (non-insulated rotor)

Komputerowa analiza wpływu...

w silniku z klatką idealnie izolowaną następuje ograniczenie amplitudy momentu pasożytniczego do wartości 1,02 Nm. Jednak w przypadku silnika z klatką nieizolowaną wprowadzenie takiego skosu żłobków pociąga za sobą znaczne powiększenie wartości prądów poprzecznych (rys.2a), na skutek czego amplituda momentu pasożytniczego maleje tylko do wartości 5,54 Nm. Tak więc wprowadzenie skosu żłobków wirnika spowodowało w maszynie z klatką izolowaną ok. 27-krotne, a w maszynie z klatką nieizolowaną - tylko ok. 5-krotne zmniejszenie wartości synchronicznego momentu pasożytniczego. Jak widać - prądy poprzeczne w silniku z klatką nieizolowaną w istotny sposób osłabiają skuteczność działania skosu żłobków w odniesieniu do tłumienia pasożytniczych momentów synchronicznych.

Dominujace pasożytnicze momenty asynchroniczne są związane z harmonicznymi przestrzennymi strefowymi niskich rzędów, np. v = 5p, 7p, 11p, 13p,..., oraz harmonicznymi żłobkowymi stojana v=cQ_±p [10]. Przykładowo, za pośrednictwem 21 harmonicznej przestrzennej pola magnetycznego powstaje w analizowanej maszynie pasożytniczy moment asynchroniczny przedstawiony na rys. 3 1 4. zaś za pośrednictwem 39 harmonicznej przestrzennej - pasożytniczy moment asynchroniczny przedstawiony na rys. 5 i 6. W maszynie z klatką izolowaną (rys. 3 i 5) wprowadzenie skosu żłobków wirnika powoduje znaczne (kilkakrotne) ograniczenie tego momentu w całym zakresie charakterystyki. Natomiast w maszynie z klatką nieizolowaną w wyniku wprowadzenia skosu żłobków wirnika następuje - wręcz przeciwnie - powiększenie wartości momentów asynchronicznych w dużym zakresie prędkości obrotowych oraz silne zniekształcenie charakterystyki, polegające na pojawieniu się charakterystycznych "garbów", a pomiędzy wartościami krytycznymi momentów a garbami szerokich siodeł. Takie oddziaływanie prądów poprzecznych na charakterystykę momentu asynchronicznego zostało opisane w pracy [2].

Na rys. 7 przedstawiono wypadkową charakterystykę mechaniczną w przypadku prostych żłobków wirnika, zaś na rys. 8 - w przypadku skośnych żłobków (b_{sk}=0,45). Wprowadzenie skosu żłobków wirnika, przy założeniu że wirnik jest idealnie izolowany, powoduje znaczne ograniczenie momentów pasożytniczych (rys. 8, R_{bb}->∞). Uwzględnienie prądów poprzecznych w silniku z klatką nieizolowaną prowadzi jednak znów do znacznego uwydatnienia pasożytniczych momentów asynchronicznych i synchronicznych (rys. 8, R_{bb}=30µΩ). Charakterystyka mechaniczna ulega znacznemu podniesieniu w zakresie pracy hamulcowej. Taki wpływ nieizolowania klatki na charakterystykę potwierdzają wyniki badań laboratoryjnych prezentowane w pracy [7].

4. PODSUMOWANIE

Wprowadzenie skosu żłobków wirnika prowadzi jedne j Z stronv do pomniejszenia wartości momentów pasożytniczych na skutek osłabienia sprzężenia elektromagnetycznego pomiędzy uzwojeniami stojana i wirnika dla wybranych harmonicznych przestrzennych, z drugiej zaś strony powoduje znaczne zwiększenie wartości prądów poprzecznych płynących poprzez żelazo pomiędzy prętami wirnika. Prądy poprzeczne prowadzą do uwydatnienia momentów pasożytniczych i są przyczyną znacznego osłabienia skuteczności oddziaływania skosu żłobków w odniesieniu do momentów pasożytniczych.

LITERATURA

- Heller V., Hamata V.: Harmonic Field Effects in Induction Machines Academia Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences, Praque 1977.
- Jordan H., Weis M.: Nutenschragung und ihre Wirkungen. ETZ-A Bd.88 (1967), H.21.
- Kluszczyński K.: Momenty pasożytnicze w maszynach asynchronicznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka, Gliwice 1986, z.102.
- Kluszczyński K.: Graphical method of choice of the number of slots in asynchronous machines. Proc. of ICEM, 88, Pisa, Italy 1988 pp. 447-452.
- Kluszczyński K., Malicki P.: Model matematyczny irdukcyjnego silnika klatkowego uwzględniający prądy poprzeczne w wirniku. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka, Gliwice 1992, z.126.
- Kluszczyński K., Malicki P.: Influence of bar-to-bar transverse currents on parasitic torques in squirrel cage motor. Proc. of CICEM-91, Wuhan, China 1991.
- Krzymiński L.: Wpływ nieizolowania klatki na asynchroniczne momenty pasożytnicze w silnikach indukcyjnych. Prace Instytutu Elektrotechniki, Warszawa 1963, z.32.
- Pawelec Z.: Wpływ prądów upływu do pakietu blach wirnika na parametry modelu matematycznego silnika indukcyjnego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka, Gliwice 1990, z.110. s.55-71.

- Sobczyk T.: Analiza procesów stacjonarnych maszyn elektrycznych. Zeszyty Naukowe AGH, Elektryfikacja i Mechanizacja Górnictwa i Hutnictwa, Kraków 1977, z.97.
- Śliwiński T., Głowacki A.: Parametry rozruchowe silników indukcyjnych.
 PWN, Warszawa 1982.
- Wach P.: Niesymetrie wewnętrzne maszyn indukcyjnych. Zeszyty Naukowe WSI, z.19, Opole 1982.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Piotr Wach Wpłyneło do Redakcji dnia 4 listopada 1991.

COMPUTER ANALYSIS OF INFLUENCE OF TRANSVERSE CURRENTS IN ROTOR OF SOUIRREL-CAGE MOTOR ON PARASITIC TORQUES

Abstract

In the paper the influence of transverse bar-to-bar currents in a rotor of a squirrel-cage motor on parasitic torques is considered. Analysis is based on a mathematical model of a squirrel-cage motor allowing for both MMF space harmonics and for transverse currents in rotor iron, which is described and solved at steady-state in [5]. According to this model a computer program is elaborated which enables us to calculate the distribution of transverse bar-to-bar currents along a bar as well as amplitudes of synchronous parasitic torques and parasitic asynchronous torque-speed curves for different space harmonics.

In the motor in point, which has the following ratings: $P_n = 3 \text{ kW}$, $U_n = 380V$, p=3, 36/33 slots - the predomonant synchronous torque arises in the brake region at the speed $\omega = -90$ rpm and the less synchronous torque is generated in the motor region at the speed $\omega = 45,5$ rpm. The first of them is connected with the pair of space harmonics $(\nu, p) = (3, 69)$ and the second of them - with the pair of harmonics $(\nu_1, \rho_1) = (3, 129)$, $(\nu_2, \rho_2) = (21, 111)$.

In Fig.2 and 3 the distributions of linear density of transverse currents connected with 3-rd and 69-th space harmonic are presented, respectively. As seen the bigger skewing of rotor bar, the larger values of transverse currents. In Fig.3-6 asynchronous torque-speed curves related to 21-st and to 39-th space harmonic for fully-insulated and for non-insulated rotor are

shown. It results from these characteristics that transverse currents cause an increase in values of asynchronous torques and give reason for very peculiar distortion of curves.

The resultant torque-speed curves taking into account both asynchronous and synchronous parasitic torques are presented in Fig.7 (unskewed rotor slots) and in Fig.8 (skewed bars, fully-insulated and non-insulated rotor). Comparing the curves for the motor with insulated bars ($R_{bb} \rightarrow \infty$) and with uninsulated bars ($R_{bb} = 30 \ \mu\Omega$), we can see that transverse currents increase the amplitudes of parasitic synchronous torques and cause a substantial rise of the resultant torque-speed curve in the braking range.

The basic conclusion is that in squirrel-cage motor with uninsulated bars the skewing which is one of the most commonly used means for suppressing parasitic torques is much less effective then in the motor with insulated bars because of considerable bar-to-bar transverse currents.
