

Mirosław Dąbrowski
Politechnika Poznańska

ZALEŻNOŚĆ STRAT MECHANICZNYCH MASZyny ELEKTRYCZNEJ OD NAPIĘCIA I DOKŁADNOŚĆ ICH POMIARU

DEPENDANCE OF MECHANICAL LOSSES IN ELECTRIC MACHINE ON VOLTAGE AND UNREABILITY OF LOSS MEASUREMENTS

Abstract: The paper presents causes of dependences mechanical losses in electric machines on voltage. The attention has been paid to the effect on the non-load power losses in induction motors of the radial and axial magnetic pull as well as asynchronous torques produced by higher harmonics of magnetic field spatial distribution. In Fig. 1 an effect of radial and axial magnetic pull is shown. In chapter 3 an effect of parasitic asynchronous torques is studied and in chapter 4 additional losses are discussed. In conclusion author drawing attention to the complexity of the problem how to determine and reliably separate the no-load losses.

1. Wstęp

Starty mechaniczne maszyny elektrycznej są sumą strat tarcia w łożyskach, strat wentylacyjnych oraz strat tarcia wirnika o czynnik chłodzący. W klasycznych rozważaniach zjawisk w maszynach elektrycznych zakłada się, że straty te przy niezmienniej prędkości obrotowej nie zależą od napięcia zasilania. Na tym założeniu opiera się metoda rozdziału strat biegu jałowego, m.in. w silnikach indukcyjnych, na straty mechaniczne i straty w rdzeniu.

W literaturze oraz w normach dotyczących badań maszyn elektrycznych jest przedstawiony uproszczony sposób rozdziału strat biegu jałowego. Powszechnie przyjęta metoda polega na pomiarach napięcia, prądu oraz mocy pobieranej z sieci podczas biegu jałowego temperaturowo ustabilizowanego silnika indukcyjnego, zasilanego z sieci symetrycznym układem napięć o znamionowej częstotliwości. Wartość napięcia zmienia się np. od wartości $1,25 U_N$ w dół do wartości, przy której prąd zaczyna się zwiększać a prędkość obrotowa – maleć. Na podstawie pomiarów oblicza się straty jałowe:

$$P_o = P_{ino} - 3R_s I_{so}^2 \quad (1)$$

przy czym: P_{ino} – moc wejściowa przy biegu jałowym (tzw. straty biegu jałowego), R_s – rezystancja uzwojenia fazowego stojana w temperaturze pomiaru, I_{so} – prąd biegu jałowego.

Następnie przedstawia się graficznie zależność $P_o = (U^2)$, aproksymując ją linią prostą. W punkcie przecięcia tej linii z osią rzędnych

znajduje się straty mechaniczne P_m (przyjmowane jako wartość stała, niezależna od stanu pracy silnika). Odejmując straty P_m od strat jałowych P_{oN} przy napięciu znamionowym, znajduje się straty w rdzeniu P_{FeN} w warunkach znamionowych. W opisanej metodzie oraz w jej różnych wariantach, zmierzających do uwzględnienia odchyłeń proporcjonalności strat jałowych do kwadratu napięcia, przyjmuje się milcząco m.in. następujące założenia [2]:

- straty mechaniczne w silniku nie zależą od napięcia na zaciskach stojana;
- momenty asynchroniczne wywołane przez wyższe harmoniczne przestrzennego rozkładu pola magnetycznego są w silniku w stanie jałowym równe zero;
- straty dodatkowe wyższych częstotliwości w rdzeniu są w całości pokrywane bezpośrednio z sieci zasilającej silnik (albo są równe zero).

Założenia te nie są jednak spełnione. W tej pracy jest przedstawiony m. in. wpływ tych okoliczności na dokładność wyników rozdziału strat jałowych w silnikach. Zagadnienie to jest istotne także ze względu na brak jego rozpatrywania w literaturze.

2. Wpływ jednokierunkowego promieniowego naciągu magnetycznego na straty jałowe

Siłę promieniowego jednokierunkowego naciągu magnetycznego działającą na oba łożyska maszyny elektrycznej o wale poziomym można wyrazić wzorem (w układzie jednostek SI) [1]:

$$F_{mr} = \frac{\pi l_r d_r}{4\mu_0} B_m^2 \varepsilon = 62,5 l_r d_r B_m^2 \varepsilon 10^4 \quad (2a)$$

w maszynie o liczbie par biegunów $2p > 2$, oraz

$$F_{mr} = 31,25 l_r d_r B_m^2 \varepsilon 10^4 \quad (2b)$$

W zależnościach (2) oznaczają: l_r – długość rdzenia wirnika, d_r – średnica rdzenia wirnika, μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni, B_m – indukcja maksymalna w szczelinie, ε – względne mimośrodowe przesunięcie wirnika względem stojana wyrażone wzorem:

$$\varepsilon = \frac{e}{\delta} \quad (3)$$

przy czym: e – wypadkowe mimośrodowe przesunięcie wirnika względem stojana, δ – średnia wartość szczeliny między stojanem a wirnikiem.

Ponieważ indukcja w szczelinie jest proporcjonalna do siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu stojana, to można w przybliżeniu przyjąć jej proporcjonalność do napięcia. Wówczas siły promieniowego naciągu magnetycznego wg zależności (2) są proporcjonalne do kwadratu napięcia. Jednak w silnikach małej mocy, ze względu na bardzo duży prąd biegu jałowego i znaczną impedancję uzwojenia stojana, siła naciągu magnetycznego zwiększa się w nieco mniejszym stopniu niż kwadrat napięcia.

W maszynach elektrycznych z osiowo przesuniętym wirnikiem względem rdzenia stojana oraz ze skośnie przesuniętymi żłobkami wirnika lub stojana występuje naciąg magnetyczny osiowy. Podobnie, jak dla jednokierunkowego naciągu magnetycznego promieniowego, można wykazać, że osiowy naciąg magnetyczny jest w przybliżeniu proporcjonalny do kwadratu napięcia [3].

Całkowity naciąg magnetyczny działający na oba łożyska można zatem wyrazić wzorem:

$$F_m = F_{ma} \pm F_{mr} = a_a U^2 \pm a_r U^2 \quad (4)$$

w którym: a_a oraz a_r – parametry dotyczące naciągu magnetycznego odpowiednio osiowego oraz promieniowego.

Znaki minus oraz plus przed drugim składnikiem we wzorze (4) uwzględniają okoliczność

współdziałania lub przeciwdziałania naciągu magnetycznego promieniowego z siłą grawitacji (uwzględniono tylko dwa ekstremalne położenia mimośrodowego przesunięcia wirnika względem siły ciężkości).

Ponieważ mechaniczne straty mocy składają się m.in. ze strat w łożyskach, które są proporcjonalne do całkowitego ich obciążenia – zależnego także od sił pochodzenia magnetycznego, to można stwierdzić, że całkowite straty mechaniczne w silniku zależą od kwadratu napięcia wg zależności

$$P_m = P_{mo} + b_a U^2 \pm b_r U^2 \quad (5)$$

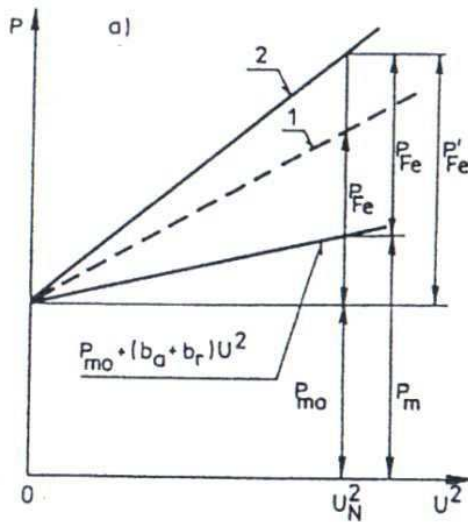
przy czym: P_{mo} – straty mechaniczne w silniku bez pola magnetycznego (wirującym ale odłączonym od sieci), b_a oraz b_r – parametry dotyczące strat mechanicznych w łożyskach pod wpływem naciągu magnetycznego odpowiednio osiowego oraz promieniowego.

Znak minus albo plus przed drugim składnikiem we wzorze (5) uwzględnia tę okoliczność, że siła naciągu magnetycznego promieniowego może być w różny sposób skierowana względem kierunku działania siły grawitacji (rozpatrywany jest silnik o wale poziomym) – np. z powodu różnego przypadkowego mimośrodowego przesunięcia wirnika względem stojana.

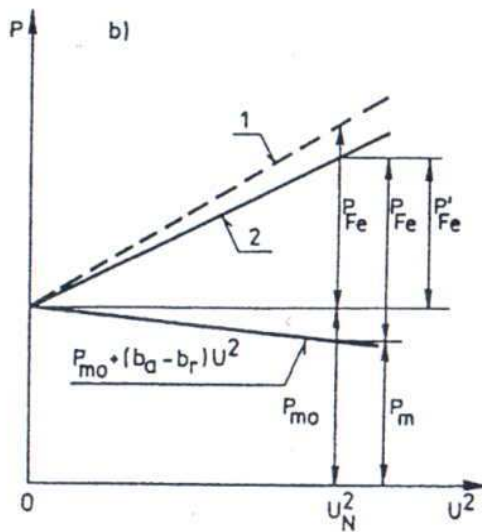
Wpływ naciągu magnetycznego na wyniki rozdziału strat jałowych wg ogólnie przyjmowanej metody wyjaśniono na rys. 1a,b. Wyniki pomiaru charakterystyki $P_o = f(U^2)$ silnika z zerowymi, a więc idealnie zrównoważonymi promieniowymi i osiowymi siłami magnetycznymi przedstawia linia 1. Jeżeli natomiast występuje naciąg osiowy oraz naciąg promieniowy o zwrocie zgodnym z siłą grawitacji, to charakterystyka ta ma przebieg jak linia 2 na rys. 1a; jeśli zaś zwroty tych sił są przeciwne, to charakterystykę przedstawia linia 2 na rys. 1b.

Eksperymentator nieświadomy występowania naciągów magnetycznych uznaje, że straty mechaniczne w warunkach znamionowych są w obu przypadkach takie same – równe P_{mo} . Dochodzi on zatem do wniosku, że straty w rdzeniu są większe niż w silniku bez naciągów magnetycznych i wyrażają się odcinkiem P'_{Fe} – rys. 1a, albo, że są mniejsze – rys. 1b. W rzeczywistości to straty w rdzeniu nie ulegają zmianie i są w obu przypadkach równe P_{Fe} ; natomiast straty mechaniczne przy napięciu znamionowym są równe P_m , a więc odpowied-

nio większe – rys. 1a, albo mniejsze – rys. 1b niż straty P_{mo} .



Rys. 1a. Charakterystyki strat jałowych z uwzględnieniem wpływu naciągu magnetycznego skierowanego zgodnie z grawitacją



Rys. 1b. Charakterystyki strat jałowych z uwzględnieniem wpływu naciągu magnetycznego skierowanego przeciwie do siły grawitacji

Należy zauważyć, że wpływ naciągów magnetycznych na wyniki rozdziału strat jałowych jest w maszynach małej mocy większy niż w maszynach dużych. Wynika to z następujących rozważań dotyczących tylko, bardziej znaczącego, naciągu promieniowego.

Dzieląc siłę jednokierunkowego promieniowego naciągu magnetycznego wg wzorów (2) przez siłę grawitacji wynikającą z masy wirnika:

$$G_r = \pi d_r^2 l_r g \gamma_r \quad (6)$$

przy czym: l_r oraz d_r – odpowiednio długość oraz średnica rdzenia wirnika, g – przyspieszenie grawitacyjne ziemskie, γ_r – zastępcza gęstość wirnika, otrzymuje się zależności:

$$\frac{F_{mr}}{G_r} = \frac{62,5}{\pi g d_r \gamma_r} B_m^2 \varepsilon 10^4 \quad (7a)$$

dla silnika o liczbie biegunów $2p > 2$, oraz

$$\frac{F_{mr}}{G_r} = \frac{31,25}{\pi g d_r \gamma_r} B_m^2 \varepsilon 10^4 \quad (7b)$$

dla silnika dwubiegunowego.

Przyjmując przyspieszenie grawitacyjne $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ oraz gęstość zastępczą wirnika w przybliżeniu taką, jak dla stali $\gamma_r = 7,8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, otrzymuje się odpowiednio przybliżone zależności:

$$\frac{F_{mr}}{G_r} \approx 2,6 \frac{1}{d_r} B_m^2 \varepsilon \quad (8a)$$

dla silnika o liczbie biegunów $2p > 2$, oraz

$$\frac{F_{mr}}{G_r} \approx 1,3 \frac{1}{d_r} B_m^2 \varepsilon \quad (8b)$$

dla silnika dwubiegunowego.

Z zależności (7) oraz (8) wynika, że udział naciągu magnetycznego w całkowitej sile promieniowej działającej na łożyska jest tym większy, im mniejsza jest średnica wirnika. Jeżeli np. w silniku czterobiegunowym występuje w warunkach znamionowych indukcja $B_m = 0,5 \text{ T}$, mimośrodowość względna jest równa $\varepsilon = 0,15$ a średnica wirnika $d_r = 0,05 \text{ m}$, to promieniowy naciąg magnetyczny jest ok. dwa razy większy od ciężaru wirnika.

3. Wpływ momentów asynchronicznych na rozdział strat jałowych

Silniki indukcyjne, to w przeważającej większości maszyny o wirniku klatkowym, w których – w przeciwieństwie do maszyn o wirniku pierścieniowym – występują znaczne asynchroniczne momenty obrotowe, wywołane przez wyższe harmoniczne przestrzennego rozkładu pola magnetycznego w szczelinie. W obszarze poślizgów bliskich $s = 1$ (np. w silniku nieruchomym), momenty obrotowe powstające pod wpływem harmonicznych rzędu $\nu = 2m_s - 1$ działają w kierunku przeciwnym do ruchu wirnika wywołanego przez moment harmonicznej podstawowej, natomiast momenty harmonicznych rzędu $\nu = 2m_s + 1$ działają w zgodzie z ruchem wirnika [4].

Jednak w obszarze poślizgów bliskich $s = 0$, a więc np. podczas próby biegu jałowego, wszystkie momenty asynchroniczne wywołane przez wyższe harmoniczne pola magnetycznego działają zgodnie w kierunku przeciwnym do momentu obrotowego harmonicznej podstawowej. Hamujące działanie tych momentów jest równoważne dodatkowym mechanicznym stratom mocy w silniku.

Ogólnie, charakterystyka mechaniczna asynchronicznego momentu obrotowego wywołanego przez harmoniczną pola rzędu ν wyraża się zależnością

$$M_V(s) = \frac{m_s}{30} n_s \nu \frac{R'_{r\nu} X_{m\nu}^2 I_s^2}{s_\nu \left[\left(\frac{R'_{r\nu}}{s_\nu} \right)^2 + (X_{m\nu} + X_{\sigma r\nu})^2 \right]} \quad (9)$$

w której: m_s – liczba faz stojana, n_s – synchroniczna prędkość obrotowa pola magnetycznego podstawowej harmonicznej w obr/min, $R'_{r\nu}$ – rezystancja uzwojenia wirnika dla ν -tej harmonicznej sprowadzona do uzwojenia stojana, $X_{m\nu}$ – reaktancja główna dla ν -tej harmonicznej, $X_{\sigma r\nu}$ – reaktancja rozproszeniowa uzwojenia wirnika dla ν -tej harmonicznej sprowadzona do uzwojenia stojana, I_s – prąd stojana. Przy czym poślizg s_ν dla ν -tej harmonicznej:

$$s_\nu = 1 \pm \nu(1 - s) \quad (10)$$

Znak minus dotyczy harmonicznych rzędu: -5 ; -11 ; $-(6k - 1)$, zaś znak plus – rzędu $+7$; $+13$; $+(6k + 1)$; k – liczba naturalna, s – poślizg wir-

nika względem podstawowej harmonicznej pola magnetycznego [2].

Przyjmując przy biegu jałowym poślizg $s \approx 0$, otrzymuje się z zależności (10) poślizg

$$s_\nu = 1 \pm \nu,$$

a więc np. dla piątej harmonicznej: $s_5 = 6$ (moment obrotowy jest hamujący), zaś dla siódmej harmonicznej: $s_7 = -6$ (efekt hamujący wynika z pracy prądnicowej). W obu przypadkach otrzymuje się z wzoru (9) ujemną wartość momentu obrotowego. Dla harmonicznych pola jeszcze wyższych rzędów otrzymuje się jeszcze większe bezwzględne wartości poślizgów s_ν . Asynchroniczne momenty obrotowe występujące przy tych poślizgach w silnikach o mocy znamionowej większej od kilku kilowatów są wprawdzie małe, ale teoretycznie występuje ich nieskończenie wiele. Natomiast w silnikach małej mocy mogą one mieć wartości istotnie większe i bardziej wpływać na dokładność wyznaczania strat jałowych. Wynika to z następujących okoliczności:

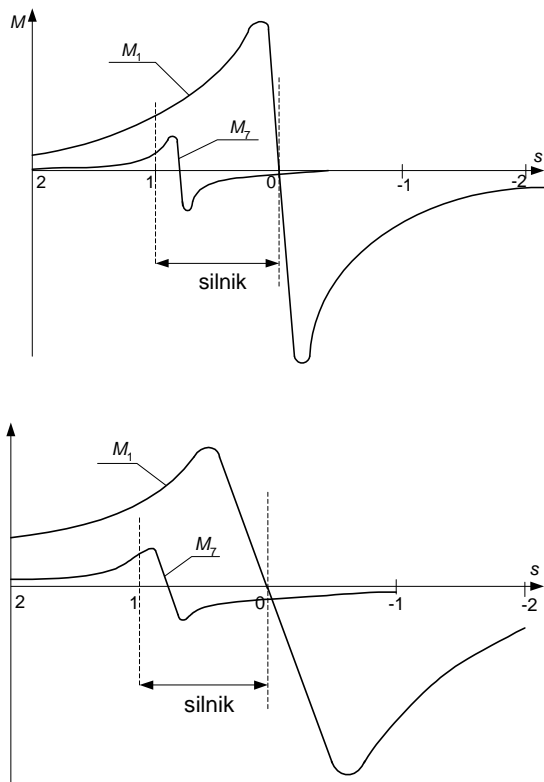
A. Rezystancje uzwojeń stojana i wirnika są w silnikach małej mocy znacznie większe niż w silnikach dużych. Rezystancje te wyrażone w wartościach względnych zależą bowiem od mocy znamionowej wg przybliżonych wzorów:

$$r_s = \frac{R_s I_{sN}}{U_{sN}} = \frac{P_{ws}}{S_N} \approx 0,4 \frac{1}{\sqrt[4]{S_N}} \quad (11a)$$

$$r'_r = \frac{P_{wr}}{S_N} \approx 0,36 \frac{1}{\sqrt[4]{S_N}} \quad (11b)$$

w których: $r_{s(r)}$ – rezystancja uzwojenia stojana lub wirnika w wartościach względnych, $P_{ws(r)}$ – straty mocy w uzwojeniu stojana lub wirnika w W, S_N – moc pozorna silnika w warunkach znamionowych w VA. W silniku o mocy 100 VA rezystancja r_r jest równa aż 0,113. Z tego powodu „pochylenie” charakterystyki momentu dla wyższej harmonicznej jest w silniku małej mocy większe – rys. 2b – niż w silniku dużej mocy – rys. 2a.

Zatem, wartość asynchronicznego momentu hamującego, wywołanego przez wyższą harmoniczną pola przy poślizgu $s = 0$, jest w silniku małej mocy większa niż w silniku dużej mocy.



Rys. 2. Porównanie charakterystyk momentu obrotowego podstawowej oraz siódmej harmonicznej w silniku indukcyjnym a) dużej mocy, b) małej mocy

B. Liczba żłobków na biegun i fazę w silnikach małych jest z reguły $q \leq 2$ i jest mniejsza niż w silnikach dużych. Z tego powodu rzędy tzw. harmonicznych żłobkowych są niskie a udział momentów asynchronicznych od wyższych harmonicznych znacznie większy niż w silnikach dużej mocy.

C. W silnikach małej mocy z reguły stosuje się w stojanie uzwojenia jednowarstwowe, w których współczynnik skrótów jest dla wszystkich harmonicznych równy jedności. Nie można zatem skutecznie stłumić wyższych harmonicznych pola magnetycznego i wywołanych przez nie momentów obrotowych tak, jak to jest możliwe w maszynach dużych z uzwojeniami dwuwarstwowymi.

D. Prąd magnesujący, tj. podstawowa składowa prądu w stanie jałowym, jest w silnikach małej mocy znacznie większy niż w silnikach dużych. W niektórych małych maszynach jest on praktycznie równy prądowi znamionowemu. Z tego powodu występujący w liczniku wzoru (9)

czynnik $x_{m\nu}^2 I_s^2$ można zastąpić członem proporcjonalnym do U^2 :

$$x_{m\nu}^2 I_s^2 = \left[\frac{1}{\nu^2} \left(\frac{k_{ws\nu}}{k_{ws1}} \right)^2 X_m \right]^2 I_s^2 \approx \left[\frac{1}{\nu^2} \left(\frac{k_{ws\nu}}{k_{ws1}} \right)^2 \right]^2 U^2 \quad (12)$$

przy czym $k_{ws\nu}$ oraz k_{ws1} – współczynnik uzwojenia stojana odpowiednio dla ν -tej oraz dla pierwszej harmonicznej. Z zależności (12) wynika, że hamujące momenty obrotowe od wyższych harmonicznych pola są w stanie jałowym silników małej mocy w przybliżeniu proporcjonalne do kwadratu napięcia. A zatem pod ich wpływem charakterystyka $P_o = f(U^2)$ zmienia położenie tak, jak pod wpływem jednokierunkowego promieniowego naciągu magnetycznego o kierunku zgodnym z siłą grawitacji – rys. 1a. Zwiększają się przy tym pomierzone straty w stanie jałowym. Posługując się powszechnie przyjętą metodą rozdziału strat, tj. przyjmując, że straty mechaniczne są równe P_{mo} wg rys. 1, otrzymuje się zawyżone straty w rdzeniu. W rzeczywistości zwiększone straty jałowe, wywołane opisanym zjawiskiem, powstają w uzwojeniu wirnika pod wpływem prądów wyższych harmonicznych.

4. Straty dodatkowe w rdzeniu podczas biegu jałowego

Straty w rdzeniu wyznaczane podczas próby biegu jałowego są sumą następujących składników:

- strat podstawowych w rdzeniu stojana powstających pod wpływem przemagnesowywania o częstotliwości sieciowej f_s ;
- strat dodatkowych wywołanych przez zjawisko nasycenia rdzenia; największe znaczenie ma w przestrzennym rozkładzie pola trzecia harmoniczna nasyceniowa która wywołuje w rdzeniu stojana straty pod wpływem przemagnesowywania z częstotliwością $3f_s$;
- straty dodatkowe w rdzeniu stojana wywołane przez wyższe harmoniczne rozkładu pola na skutek rozwarć żłobków wirnika;
- straty dodatkowe w rdzeniu wirnika wywołane przez wyższe harmoniczne rozkładu pola na skutek rozwarć żłobków stojana oraz nieciągłym rozkładem przepływu uzwojenia stojana. Ponadto, w otrzymanych „stratach w rdzeniu” mogą wystąpić składniki tylko pozornie przypisywane zjawiskom w stali a wywołanych przyczynami opisanymi w punktach 2 i 3.

Istnieją dwa ujęcia bilansu strat mocy w silniku indukcyjnym. W jednym przyjmuje się, że wszystkie składniki strat – podstawowych i dodatkowych – są dostarczane bezpośrednio z sieci. W drugim ujęciu, bardziej zbliżonym do rzeczywistości występujących zjawisk w silniku, przyjmuje się, że straty dodatkowe od wszystkich wyższych harmonicznym pola (nasyceńowych, reluktancyjnych oraz przepływowym) są dostarczane „z wału” w wyniku wtórnego mechaniczno-elektrycznego przetwarzania energii. Na tak przyjętym bilansie mocy jest oparta metoda rozdziału całkowitych strat w rdzeniu na straty podstawowe oraz dodatkowe, w której badany silnik napędza się z prędkością synchroniczną za pomocą wywzorcowanego silnika pomocniczego. W celu wyeliminowania momentu histerezy oraz ewentualnie występującego momentu reluktancyjnego wykonuje się pomiary przy prędkościach około synchronicznych (w podsynchronizmie i nadsynchronizmie) w sposób przedstawiony w pracy [5]. W tej metodzie przyjmuje się, że moc na wale silnika pomocniczego jest równa sumie strat dodatkowych w rdzeniu oraz strat mechanicznych silnika badanego w stanie jałowym. Jednak, jak wykazuje dokładna analiza bilansu strat mocy w silniku indukcyjnym, straty dodatkowe w rdzeniu są dostarczane zarówno bezpośrednio z sieci jak i „z wału”. Niemożliwość dokładnego rozdziału tych składników wynika z tego, że straty dodatkowe powstają pod wpływem wielu harmonicznym pola, natomiast podział na straty dostarczane z sieci oraz od strony wału jest dla każdej harmonicznym inny [4]. Zatem moc wyznaczana na wale pomocniczego silnika napędowego nie zawiera całkowitych strat dodatkowych w rdzeniu. Jednak w mocy tej mogą znajdować się także składniki nie związane ze stratami w stali, a wynikające z bilansowania hamującego działania asynchronicznych momentów od wyższych harmonicznym pola. Przedstawione tu zagadnienia mają szczególne znaczenie w lokalizacji pomiarowo wyznaczonych składników strat mocy i w obliczeniach przyrostów temperatury elementów silnika.

5. Wnioski

Dokładna analiza strat jałowych w silnikach indukcyjnych jest zadaniem złożonym. Trudności wynikają nie tylko z trudności pomiarowych, ale głównie z tego, że straty mechaniczne w tych silnikach mogą w znaczący sposób zależeć od napięcia zasilania. Dlatego ogólnie przyjęta metoda rozdziału strat jałowych na straty w rdzeniu i na straty mechaniczne przedstawiona w literaturze oraz w przepisach na badanie maszyn elektrycznych, może prowadzić do błędnych wniosków – np. co do przyczyn rozrzutu wyników pomiarów wykonanych na zbiorze silników tego samego typu. Duży wpływ naciągów magnetycznych na obciążenie łożysk oraz duży udział asynchronicznych momentów obrotowych od wyższych harmonicznym pola wyraźnie te trudności zwiększają. Oddzielnym złożonym zagadnieniem jest rozdział strat w rdzeniu na podstawowe oraz dodatkowe. W punkcie 4. Zwrócono uwagę na to, że dokładne (w pełni teoretycznie uzasadnione) rozdzielenie tych składników jest niemożliwe. Założenie, że straty dodatkowe w rdzeniu są dostarczane tylko w wyniku wtórnego mechaniczno-elektrycznego przetwarzania energii jest bliski prawdy dla większości maszyn.

Literatura

- [1] Dąbrowski M: *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, WNT, Warszawa, 1988
- [2] Dąbrowski M., Dąbała K.: *Rozszerzony bilans mocy w silniku indukcyjnym*, Przegląd Elektrotechniczny, 1997, LXXIII z. 12
- [3] Del Pedro M.: *Achsiale Kräfte in Asynchronmaschinen*, Bulletin Oerlikon, 1957, Nr 325
- [4] Dubicki B.: *Maszyny elektryczne. T. III. Silniki indukcyjne*, PWN, Warszawa, 1964
- [5] Krzemiński L., Owczarska M.: *Pomiar strat dodatkowych jałowych w silnikach klatkowych metodą eliminacji momentów*, Prace Instytutu Elektrotechniki, 1969, Nr 57

Autor

Prof. Mirosław Dąbrowski Politechnika Poznańska,
ul. Piotrowo 3A 60-963 Poznań, e-mail:
miroslaw.dabrowski@put.poznan.pl

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Zakrzewski