

OPTIMALIZACJA KONSTRUKCJI SILNIKA INDUKCYJNEGO SEE90L-4 W WERSJI ENERGOOSZCZĘDNEJ KLASY „EFF1” WG CEMEP

Wstęp

W 1998 roku fabryki maszyn elektrycznych zrzeszone w Grupie Elektrim Motor (BESEL, INDUKTA, CELMA i EMIT), wspólnie z Instytutem Elektrotechniki oraz BOBRME KOMEL, rozpoczęły prace zmierzające do opracowania i uruchomienia produkcji nowej serii trójfazowych silników indukcyjnych wysokosprawnych typu SEE o poziomie sprawności co najmniej klasy *eff1* wg CEMEP. W INDUKCIE pracami tymi objęto silniki wielkości mechanicznej 90, 100, 112, 132, 160 i 180 dla $2p=2$ i 4. Dla silnika SEE90L-4 nie udało się uzyskać zadowalającego poziomu sprawności 85%, pomimo wykonania kilku prototypów dla różnych projektów. Zaszła potrzeba wykonania dodatkowych prac badawczych, obliczeń i prototypów. Zrealizowanie prac badawczych i projektowych zaproponowano AGH, natomiast INDUKTA wykonała prototypy i próbę typu. Artykuł przedstawia niektóre wyniki tych prac.

Opis cyklu badawczego

Postępowanie badawczo-obliczeniowe przebiegło według wcześniej opracowanego w AGH cyklu, tzn.:

1. zebranie informacji, ustalenie szczegółowych celów i warunków ich zrealizowania
2. wykonanie postępowania identyfikacyjnego w celu zapewnienia modelowi obliczeń projektowych odpowiedniej wiarygodności
3. obliczenia optymalizacyjne, weryfikacja w oparciu o wyniki obliczeń polowych
4. wykonanie prototypu oraz pomiarów próby typu

Wszystkie etapy były realizowane w ścisłej współpracy producenta z wykonującym obliczenia projektowe.

Optymalizacja dostarcza narzędzi formalnych, dzięki którym istnieje możliwość uzyskania optymalnych rozwiązań projektowych. Silnik wykonany w oparciu o taki projekt jest w najlepszym przypadku rozwiązaniem suboptymalnym w stosunku do rzeczywistego silnika optymalnego. O tym, jak bardzo silnik wyprodukowany różni się od pożądanego silnika

optymalnego w dużym stopniu decyduje model obliczeniowy. W skrajnym przypadku może się okazać, że otrzymany projekt optymalny nie tylko nie daje silnika optymalnego, ale rozwiązanie takie nie jest nawet użyteczne. Stąd uzasadnione są uwagi w [1], że wartość praktyczna uzyskanego rozwiązania ściśle zależy od wiarygodności modelu oraz sformułowanych ograniczeń projektowych. Ze względu na zawsze istniejący pewien margines niepewności, podjęte działania były w dużej mierze ukierunkowane na zminimalizowanie ryzyka błędnych wyników.

Niektóre czynniki wpływające na sprawność

Postępowanie formalne powinno być poprzedzone bardzo staranną analizą możliwości zredukowania strat w maszynie. Zagadnienie to jest złożone i nie do końca rozeznane, wskutek czego analiza obciążona jest niepewnością występującą tak w definicjach poszczególnych elementów strat, jak też ich współczynników. Zagadnienia te są szczególnie kłopotliwe w przypadku silników małych mocy, w których potęguje się wpływ technologii wykonania. W realizowanym programie badawczym analizowano i starano się uwzględnić w obliczeniach niektóre elementy wpływające na wyniki, ich dokładność i wielkość strat, m.in.:

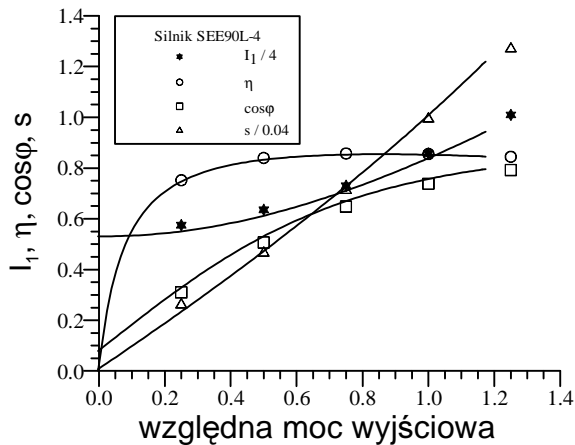
1. niedoskonałość bezpośredniego osadzenia pakietu wirnika na wale
2. wzajemną dyfuzję materiału aluminium i żelaza w czasie odlewania klatki
3. zniszczenie struktury krystalicznej blach w strefie zgniotu w czasie procesu wykrawania
4. proces obróbki powierzchni wewnętrznej pakietu stojana i zewnętrznej pakietu wirnika (wpływ tak na straty jak wartość efektywnej szczeliny powietrznej).
5. wpływ niesymetrii osadzenia pakietu wirnika w oknie stojana
6. niedoskonałą izolację między klatką i rdzeniem wirnika

Istotnym źródłem informacji o tym, jakie czynniki mogą być istotne i w jakiej intensywności mogą wystąpić, były wyniki pomiarów

przeprowadzonych na podobnych silnikach wykonanych w INDUKCIE wcześniej.

Identyfikacja modelu obliczeń projektowych

Dużą uwagę w działaniach poprzedzających właściwą optymalizację poświęcono identyfikacji modelu obliczeń projektowych. Wynika to ze znanej własności, że wyniki optymalizacji nie mogą być lepsze niż sam model, który jest w niej wykorzystany. Odniesieniem były wyniki prób typu dla istniejących silników tej samej wielkości. W próbach wykorzystano zestaw pomiarowy D5255M austriackiej firmy NORMA, którego okres legalizacji upływa w maju br. Samo postępowanie było modyfikacją procedury opisywanej we wcześniejszych pracach, np. [2-4]. W efekcie uzyskano wyniki, z których niektóre, dotyczące charakterystyk obciążeniowych, są zilustrowane na rys.1



Rys.1. Dopasowanie modelu silnika 1.5kW dla charakterystyk obciążeniowych jednego z prototypów: linie - obliczenia, punkty - pomiar.

W identyfikacji korygowano niektóre współczynniki eksperymentalne, które w literaturze podaje się zwykle jako wartości przeciętne dla pewnej klasy silników lub ich mocy. W przypadku wykorzystania do optymalizacji dokładność opisu uzyskana w ten sposób jest niewystarczająca. Zmodyfikowano m. innymi:

- wartość przewodności zastępczej aluminium dla 20°C
- obliczeniową geometryczną szczelinę powietrzną
- współczynniki strat w żelazie
- model nasycenia obwodów magnetycznych
- wartości współczynników definiujących długość połączeń czołowych uzwojenia stojana

Najistotniejsze informacje na temat prototypu i modelu dostarcza pomiar biegu jałowego. Był on m.innymi źródłem cennych informacji wskazujących na stopień symetrii wykonania

silnika. Opracowano procedurę obliczeniową pozwalającą ze znajomości mocy czynnej dla każdej z faz silnika z niesymetrią wyznaczyć wartość strat w żelazie w przypadku, gdyby silnik był wykonany prawidłowo. Ma to znaczenie np. przy ocenie źródeł rozbieżność wyników w stosunku do oczekiwanych. Pomiary biegu jałowego to źródło informacji m.innymi o stratach mechanicznych i w żelazie, charakterystyce B-H blachy, obwodzie magnetycznym oraz efektywnej szczelinie, a tym samym o jakości wykonania powierzchni rdzeni stojana i wirnika.

Model nasycenia był modyfikowany w oparciu o wyniki próby zwarcia. Wykorzystano stosowaną przez INDUKTĘ metodę pomiaru pozwalającą wyznaczyć dokładną temperaturę uzwojenia stojana dla każdego z napięć poprzez ekstrapolację krzywej stygnięcia.

Wielkościami odniesienia w identyfikacji były wyniki pomiarowe prądu stojana, mocy czynnej i napięcia z uwzględnieniem temperatury uzwojenia stojana, a przy próbie nagrzewania dodatkowo prędkości obrotowej, dla:

- biegu jałowego
- stanu zwarcia na postoju
- próby nagrzewania
- próby obciążenia

Sprawność wg. CEMEP

W celu poprawy sprawności energetycznej urządzeń oraz redukcji emisji CO₂ Komitet Europejski Producentów Maszyn Elektrycznych oraz Elektroniki Przemysłowej (CEMEP) zawarł porozumienie w celu wprowadzenia na terenie Europy trzech klas sprawności dla silników elektrycznych, nazwanych *eff1*, *eff2* i *eff3*. Od 1 stycznia 2000r. obowiązuje ono na terenie Unii Europejskiej i jest następstwem klasyfikacji EPAAct obowiązującej w USA już od 1 października 1997r. Porozumienie ma charakter dobrowolny, ale łatwo przewidzieć konsekwencje nie dostosowania się. Dotyczy 4- oraz 2-biegunowych, 3-fazowych silników indukcyjnych o danych znamionowych: 400V, 50Hz, tryb pracy S1, i zakresie mocy obejmujących największą część rynku, przyjętym w granicach 1.1-90kW. W szczególności dla optymalizowanego silnika 4-biegunowego o mocy 1.5kW wspomniane wyżej granice klas są:

- $\eta_N < 78.5\%$ - *eff3*
- $78.5\% \leq \eta_N < 85.0\%$ - *eff2*
- $\eta_N \geq 85.0\%$ - *eff1*

Wszystkie poziomy (klasy) sprawności są oparte o normy IEC 34-2 oraz 34-1, mające swój

odpowiednik w normie polskiej. Sprawność jest obliczana metodą strat poszczególnych z pewnymi zastrzeżeniami, m. innymi dotyczącymi temperatury obliczeniowej uzwojenia stojana. Najistotniejsze zastrzeżenie mające wpływ na procedurę obliczeń projektowych ma postać:

„Dla silników z rezerwą termiczną, których przyrost temperatury uzwojenia przy znamionowym obciążeniu leży więcej niż 10K poniżej dopuszczalnej wartości granicznej dla odpowiedniej klasyfikacji cieplnej, co jest regułą dla silników energooszczędnych, jako podstawową temperaturę odniesienia można przyjąć:

(rzeczywisty przyrost temperatury uzwojenia +15K)”

Nowe oznaczenia silników wynikające z porozumienia muszą być włączone do katalogów, a także wybite na tabliczkach znamionowych.

Wyszczególnione wyżej zalecenie jest korzystniejsze dla projektanta, ale wymaga opracowania niezawodnego i dokładnego modelu cieplnego. Klasyczne obliczenia zakładały stałą temperaturę obliczeniową uzwojenia stojana, przykładowo dla izolacji klasy B równą 75C.

W opracowanym modelu obliczeń projektowych znamionowy przyrost temperatury uzwojenia stojana jest liniową funkcją wszystkich składników strat mocy czynnej silnika, o współczynnikach zdefiniowanych przy pomocy parametrów konstrukcyjnych maszyny, stałych materiałowych, a także współczynników eksperymentalnych o wartościach skorygowanych poprzez odpowiednie wcześniejsze postępowanie identyfikacyjne.

Optymalizacja projektowa

Celem projektu było, aby sprawność znamionowa prototypu była co najmniej 85%, tzn. aby kwalifikowała silnik do klasy *eff1* wg. CEMEP. Założono, że w pierwszym etapie zostanie opracowany silnik przeznaczony do nawijania ręcznego.

Poszukiwany projekt silnika był wynikiem rozwiązania złożonego problemu programowania nieliniowego w postaci:

$$\max_x \eta_N \mid \mathbf{x} \in X \quad (1)$$

gdzie:

\mathbf{x} - wektor zmiennych optymalizacji

X - obszar dopuszczalny

η_N - sprawność znamionowa obliczana wg. zalecenia CEMEP

W obliczeniach było aktywnych 13 zmiennych optymalizacji reprezentujących głównie wymiary konstrukcyjne silnika. Istotny wpływ na wielkość wektora zmiennych oraz obszaru dopuszczalnego miały założenia projektowe narzucone przez producenta w celu zminimalizowania kosztu zmian technologicznych. Jednym z warunków opracowania projektu było pozostawienie niezmiennego oprzyrządowania w stosunku do stosowanego aktualnie w produkcji. W konsekwencji takie wielkości jak maksymalna długość pakietów, obie średnice wykroju blachy stojana i średnica wału były niezmienione. Warunki te w znacznym stopniu ograniczyły możliwość uzyskania założonego celu.

Program syntezy został napisany w języku FORTRAN 77. Opracowany algorytm jest znaczącym rozszerzeniem, tak odnośnie dokładności jak zakresu obliczeń projektowych, w stosunku do opisanego po raz pierwszy w pracy [5]. W badaniach wykorzystano wyniki wcześniejszych prac, m.innymi [6].

Wyniki

Obliczenia zostały przeprowadzone dla blachy 470-50A o stratności $p_{1.0/50}=2.0W/kg$ produkcji krajowej. Ich wyniki były weryfikowane m.innymi przy pomocy obliczeń polowych. Obliczenia te potwierdziły m.innymi, że dla dużych nasyceń w stanie zwarcia kształt sklepienia żłobka, a w pewnym zakresie zmian również wielkość szczeliny dla silników tej mocy mają mniejsze znaczenie. Wielkość szczeliny ma natomiast duże znaczenie, szczególnie dla mniejszych napięć, dla biegu jałowego. Są to rzeczy znane, niemniej wskazujące na możliwość wykorzystania m.innymi do weryfikacji założeń technologicznych.

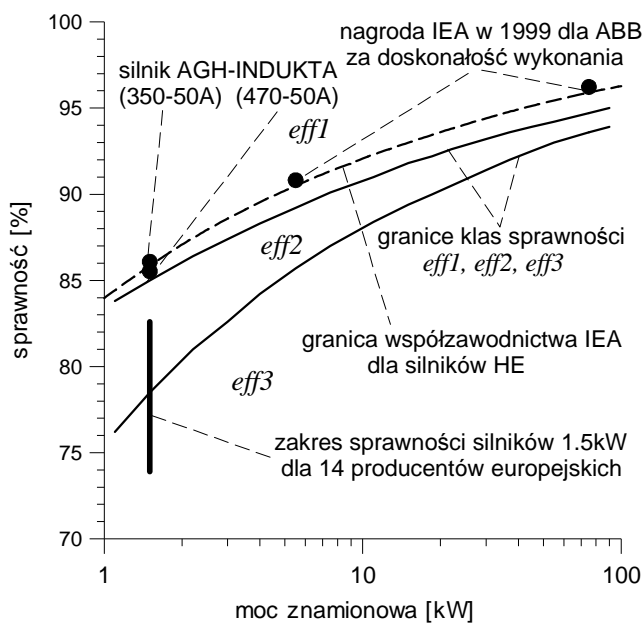
Osiągnięto wartość sprawności znamionowej liczonej zgodnie z zaleceniami CEMEP równą:

$$\eta_N = 85.53\%$$

co z naddatkiem spełnia założony cel optymalizacji.

Wyniki pomiarów próby biegu jałowego i nagrzewania potrzebne do wyznaczenia sprawności uzyskano za pomocą wspomnianego przyrządu firmy NORMA. Uzyskany wynik był wyższy niż w projekcie (85.15%). Przyczyną były: przyjęty zapas bezpieczeństwa obliczeniowego w stosunku do współczynników stałych występujących w definicjach składników strat czynnych, oraz niższe od założonych straty mechaniczne (o około 5W).

Uzyskany wynik przedstawiono na rys. 2.



Rys.2. Porównanie sprawności wykonanego prototypu z niektórymi silnikami produkowanymi za granicą

Porównanie uzyskanego wyniku z wynikami dla najlepszych trzech prototypów wykonanych w INDUKCIE wcześniej znajduje się w tabeli 1. Podana w niej sprawność nie uwzględnia strat mechanicznych, tzn:

$$\eta_N^* = \eta_N + 100\Delta P_{\text{mech}} / P_N$$

Tabela 1. Porównanie własności prototypów

Prototyp	Sprawność [%] (bez strat mech.)	Współczynnik mocy
I	83.70	0.748
II	84.99	0.737
III	83.18	0.720
AGH-INDUKTA	86.17	0.738

Zostały przeprowadzone obliczenia symulacyjne zamiany w prototypie gatunku blachy elektrycznej z 470-50A na blachę 350-50A o stratności katalogowej 1.5W/kg. Można zauważyć, że przesuwa to uzyskany wynik do strefy powyżej granicznej wartości współzawodnictwa IEA dla silników energooszczędnych, co kwalifikuje do związanej z tym nagrody.

Otrzymane wyniki zostały wykorzystane do opracowania projektu silnika przy założeniu nawijania maszynowego. Zostały utrzymane w mocy założenia dotyczące braku zmian oprzyrządowania technologicznego.

Wnioski

- 1 Przy narzuconych ograniczeniach technologicznych uzyskany wynik jest znaczący i potwierdzający skuteczność optymalizacyjnej procedury projektowej opracowanej w AGH; uzyskane wyniki (rys.2, tab.1) potwierdzają wnioski zawarte m.innymi w artykułach [7,8].
- 2 W przypadku dopuszczenia zmian możliwych do zrealizowania stosunkowo niewielkim kosztem oraz rozpoczęciu produkcji, zastosowana procedura optymalizacyjna stwarza szansę (rys.2) uzyskania nagrody IEA (IEA Award of Excellence Motors)

Literatura

- [1] Jażdżyński W. *Wpływ założeń projektowych na optymalne rozwiązania projektowe energooszczędnych silników indukcyjnych*. VII Seminarium Techniczne BOBRME „Komel”, 28-29 maj 1998, Ustroń Jaszowiec, str. 63-68
- [2] Jażdżyński, W. *Designing an Optimal Induction Motor with Central Ring in Rotor Cage*. Proceedings of the International Conference on Electrical Machines icema, Adelaide, Australia, 14-16 September 1993, s.76-80
- [3] Jażdżyński, W. *Metodyka projektowania optymalnych silników indukcyjnych w wykonaniu energooszczędnym*. Materiały konferencyjne XXX Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME'94, Kazimierz Dolny, 13-17 czerwiec 1994, s.177-182
- [4] W.Jażdżyński *Projektowanie maszyn elektrycznych oraz identyfikacja ich modeli z wykorzystaniem optymalizacji wielokryterialnej*. Wydawnictwa AGH, seria „Rozprawy i Monografie” nr.28, Kraków 1995.
- [5] Jażdżyński, W. *Multicriterial optimisation of squirrel-cage induction motor design*. Proc.IEE, Pt.B, 1989, 136, s.299-307
- [6] W.Jażdżyński *Factory-dependent optimal induction motors*. Proceedings of the International Conference on Electrical Machines ICEM 2000, vol. 3, Espoo, Finland, 28-30 August 2000, 1628-1632
- [7] W.Jażdżyński *Ocena efektów ekonomicznych stosowania optymalizacji w konstrukcji silników indukcyjnych powszechnego użytku i energooszczędnych*. Wiadomości Elektrotechniczne, 1999, nr.6, str. 294-300
- [8] W.Jażdżyński *Analiza porównawcza efektywności ekonomicznej konstrukcji silników indukcyjnych*. Wiadomości Elektrotechniczne, 1999, nr.12, str. 618-621