

고속용 전동기에 사용되는 실리콘 규소 강판의 철손 계수 산정

장석명, 조성국, 조한욱, 양현섭*
 충남대학교 전기공학과, 삼성 테크윈*

Iron Loss Coefficient Calculation of the Silicon Steel for High Speed Motor

Seok-Myeong Jang, Seong-Kook Cho, Han-Wook Cho, Hyun-Sub Yang*
 Chungnam Nat'l University, Samsung Techwin Co.*

Abstract - For electrical machine designers, core loss data are usually provided in the form of tables or curves of total loss versus flux density or frequency. The aim of this work is to propose a mathematical model for the iron losses prediction in soft magnetic materials with any frequency and flux density. In this paper, three formulas for calculating the iron loss coefficients are discussed. And the coefficients are applied to calculate the iron loss of the 25kW high speed motor.

1. 서 론

초고속 전동기의 총 손실 중에 철손이 차지하는 비중이 매우 크다. 그러므로 고속용 전동기의 사용 및 구동 드라이브 장치의 성능 향상을 위한 연구를 위해서는 정확한 철손 예측이 선행되어야 한다. 예를 들어 고속 모터의 설계 단계에 개선된 도전 강판의 사용이나 복잡한 구동제어 시에 계산된 철손은 정량화되어 설계에 반영되고 효율을 예측할 수 있다[1].

일반적으로 전기기기의 설계자에게 철손에 관련된 정보는 자속밀도나 주파수에 따른 단위 철손으로 재질 제작자에 의해 표나 그래프로 제공된다. 이러한 자료들은 보통 철손에 관련된 식 또는 효율 산정의 방법으로 도출될 수 있다. 특히 초고속 전동기와 같은 높은 주파수 영역을 갖는 경우에는 히스테리시스 손실이 매우 큰 영향을 미치고 철손은 주파수에 따라 변하기 때문에 고속 모터에 적합하게 유도된 식을 이용하여 주파수의 변화에 따른 철손 정보를 도출해야만 한다[2].

본 논문에서는 고속 회전기용 규소 강판의 철손 계수를 산정함으로써 전기기기 설계자가 효율을 미리 예측할 수 있게끔 정보를 제공하고자 한다. 철손 계수 산정은 우선 Steinmetz 방정식을 이용하여 주파수 및 자속밀도의 영향을 고려하여 와전류 손실 계수 및 히스테리시스 손실 계수를 산정한다. 더 나아가 고속기에 적합한 철손 식을 이용하여 주파수 및 자속밀도에 따른 계수를 산정하고 이 값을 이용하여 실제로 제작된 25kW급 60000rpm으로 회전하는 고속용 기기의 고정자 요크에 발생하는 철손을 계산하고자 한다.

2. 본 론

2.1 철손 계수 산정

2.1.1 k_e 와 k_h 만 포함된 식

일반적으로 철손은 와전류 손실과 히스테리시스 손실로 나뉘어 진다. 식(1)은 철손을 계산하기 위한 Steinmetz 방정식으로서 주파수 및 자속밀도에 의해 표현되며 이 식은 정현적인 변화를 갖는 자속밀도에 대한 계산에 적합하다[3]. 그림 1은 규소 강판 제작자에 의해 공급되는 Arnon05의 주파수 및 자속밀도에 대한 단위 중량당 철손 정보를 표시하고 있다.

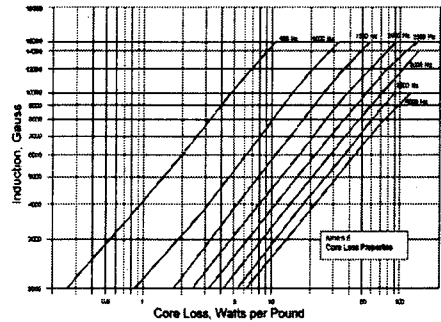


그림 1. 실리콘 규소 강판의 자속밀도와 주파수에 따른 철손 정보

$$P_c = P_h + P_e$$

$$= k_h f B^n + k_e f^2 B^2 \tag{1}$$

여기에서 f 는 자계의 주파수를 나타내며 B 는 자속밀도, k_h 와 k_e 는 각각 히스테리시스 손실 계수와 와전류 손실 계수를 나타낸다. 그림1에서 제시된 철손 정보를 통하여 계수를 산출하기 위하여 식(1)을 식(2)와 같이 주파수에 대한 철손에 대한 식으로 변형할 수 있다. 그리고 식(2)는 식(3)과 같이 주파수에 관한 선형 방정식으로 표현할 수 있다.

$$P_c/f = k_h B^n + k_e f B^2 \tag{2}$$

$$P_c/f = D + Ef \tag{3}$$

식(3)에서 미지수 D 와 E 는 각각 식(4)-(5)와 같다.

$$D = k_h B^n \tag{4}$$

$$E = k_e B^2 \tag{5}$$

식(3)의 대수 방정식에 양변에 주파수 f 로 나누어주면 식(6), (7)로 쓸 수 있다.

$$P_{c1}/f_1 = D + Ef_1 \tag{6}$$

$$P_{c2}/f_2 = D + Ef_2 \tag{7}$$

식(6), (7)을 정리하여 행렬식으로 표현하면, 식(8)과 같다.

$$\begin{pmatrix} D \\ E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & f_1 \\ 1 & f_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} P_{c1}/f_1 \\ P_{c2}/f_2 \end{pmatrix} \tag{8}$$

식(4)는 식(9), (10)과 같이 로그를 이용한 선형방정식으로 표현할 수 있다. 각각의 일정한 자속밀도에 대하여 주파수 및 철손 데이터를 대입하여 정리하기 위하여 식(9), (10)을 행렬식으로 식(11)과 같이 표현한다.

$$\log D_1 = \log k_h + n \log B_1 \quad (9)$$

$$\log D_2 = \log k_h + n \log B_2 \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} \log k_h \\ n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \log B_1 \\ 1 & \log B_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \log D_1 \\ \log D_2 \end{pmatrix} \quad (11)$$

2.1.2 초과 손실이 포함된 식

식(12)는 초과 손실에 포함된 식을 표현한다.

$$\begin{aligned} P_c &= P_h + P_e + P_a \\ &= k_h f B^n + k_e f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} \end{aligned} \quad (12)$$

여기에서 P_a 는 초과 손실을 나타내고, 손실은 자성체의 두께와 단면적, 도전율에 관계가 있다. 식(12)로부터 각각의 계수는 곡선의 근사화 방법을 통하여 얻을 수 있다.

2.1.3 고속용 전동기의 사용되는 철손 특성식

2.1.1절과 2.1.2절에서 제시된 식은 높은 주파수 영역에서 오차가 많이 발생하기 때문에 고속기에 적합하지 않다. 고속용 기기에 사용되는 철손을 구하기 위하여 식(13)이 제시된다[4]. 식(13)은 주파수에 대한 선형방정식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} P_c &= P_h + P_e + P_a \\ &= k_h f B^{(a+bB+cB^2)} + k_e f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} P_c/f &= P_h/f + P_e/f + P_a/f \\ &= k_h B^{(a+bB+cB^2)} + k_e f B^2 + k_a \sqrt{f} B^{1.5} \end{aligned} \quad (14)$$

식(12)의 n 은 $a+bB+cB^2$ 으로 대체되어 식(13)과 같이 표현된다. 식(14)에서 각각의 계수는 곡선의 근사화 방법에 의하여 구해진다.

2.2 해석 결과

표1에서는 고속용에 주로 사용되어지는 ST100, ST150, Arnon05, Arnon07의 재질에 대하여 구해진 계수들을 표시하였다. 하지만 표1에 제시된 계수들은 주파수 변화를 정확히 고려하지 못하는 단점이 있다. 식(12)에 제시된 철손 식에 대하여 곡선의 근사화 방법을 통하여 얻어진 자속밀도에 대한 P_c/f 의 값을 그림2에 제시하였다. 이 과정을 통하여 그림 3에 제시된 바와 같이 Arnon05의 각 계수의 주파수에 따른 변화값들을 확인할 수 있다. 그림 4는 Arnon05의 재질에 대하여 식(14)의 식을 곡선의 근사화 방법을 통하여 구한 k_h , k_e , k_a 의 변화를 보여준다.

표1 1KHz에서 식(1)에 의해 구한 재질에 따른 철손계수

재질	k_h	k_e	k_a
ST100	0.0458	2.148×10^{-6}	1.8578
ST150	0.009	3.58×10^{-5}	1.9802
Arnon05	0.009	6.17×10^{-6}	1.1592
Arnon07	0.0156	8.5×10^{-6}	1.7575

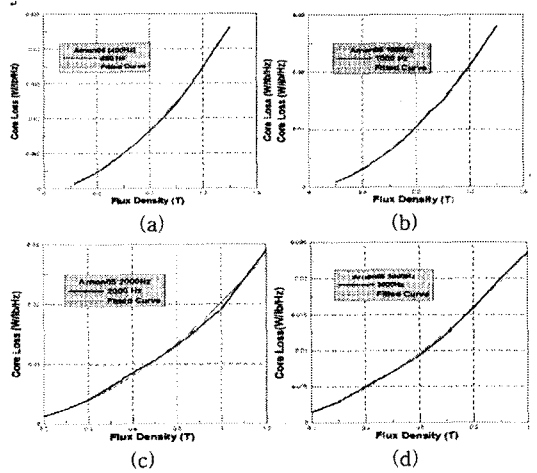
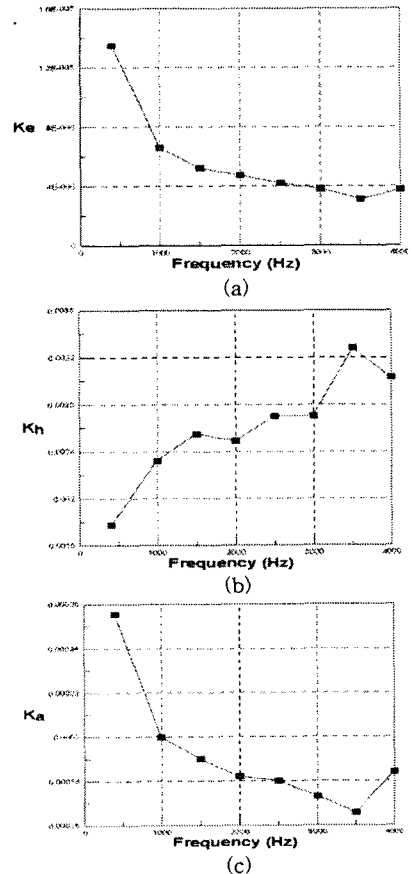


그림 2. Arnon05의 각각의 주파수에 대한 자속밀도 대 P_c/f 의 그래프



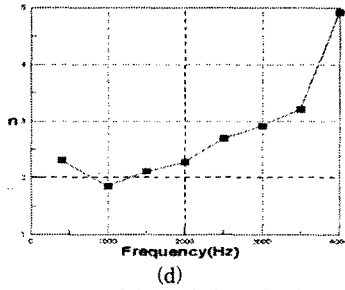


그림 3. Arnon05의 주파수 변화에 따라 나타나는 식(12)의 계수 k_h , k_e , k_a , n 의 변화

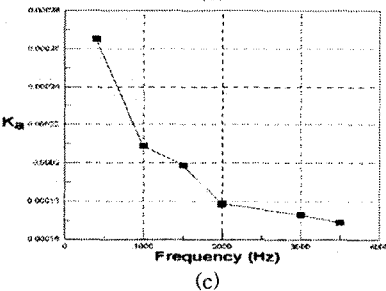
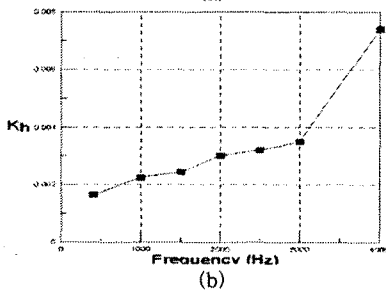
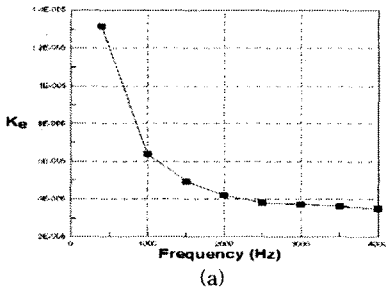


그림 4. Arnon05의 주파수 변화에 따라 나타나는 의 계수 k_h , k_e , k_a 의 변화

표2 식(14)에 제시된 계수 a, b, c의 주파수에 따른 변화

주파수 \ 계수	a	b	c
400 Hz	2.0216	-0.096	0.365
1000 Hz	1.60	0.0026	0.268
1500 Hz	1.653	0.0079	0.4377
2000 Hz	0.953	0.539	1.554
2500 Hz	1.359	0.56	1.077
3000 Hz	1.09	1.486	-0.175
3500 Hz	1.23	1.31	-0.81
4000 Hz	1.465	4.01	7.42

2.3 계수를 이용한 철손 산정

2.2절에서 구해진 각각의 방법을 통하여 얻어진 철손 계수를 이용하여 25kW급 60000 rpm으로 회전하는 초고속 전동기의 철손을 구해보면 표3과 같이 구해진다. 단, 해석 모델의 철손이 발생하는 고정자 요크의 총 질량은 4.3kg이다. 해석 모델은 유한 요소해석을 통하여 고정자 요크에 대하여 자속분포가 해석되었다. 해석 결과로부터 고정자 요크의 평균 자속밀도를 산출해 철손 특성식에 대입하여 철손을 계산한다. 표3에서 제시된 결과로부터 알 수 있듯이 식(1)에 의하여 구해진 철손 중 ST100과 ST150의 경우 식(12)와 식(13)에 의해 구해진 철손과 많은 오차가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 계수를 계산하기 위한 과정에서 1 KHz 이의에서 철손 데이터가 대입되어 계산되어야 하기 때문에 오차가 발생하기 때문이다. 그래서 식(1)을 식(2)부터 식(11)까지의 방법으로 구해진 철손 식은 계산 과정에서도 알 수 있듯이 주파수에 따른 철손 계수 변화를 정확히 고려하기 어려운 단점이 있다.

표3 25kW 60000rpm의 고속 전동기의 재질에 대한 철손 (단위: W)

철손 산정 방법	Arnon05	Arnon07	ST100	ST150
식(1)에 의한 철손	187.4	311.9	612.2	592.2
식(12)에 의한 철손	195.3	298.1	198.5	216.9
식(13)에 의한 철손	195.2	262.6	174.2	229.2

3. 결 론

본 논문에서는 고속용 전동기에 주로 사용되는 ST100, ST150, Arnon05, Arnon07등의 규소 강판 재질에 대하여 주파수의 변화를 고려하여 와전류 손실 계수, 히스테리시스 손실 계수, 초과 손실 계수를 각각 구하였다. 특히 철손을 구한 세 가지의 특성식 중에서 고속용에 적합한 철손 특성식을 찾아 각각 재질에 대하여 계수를 구하였다. 구해진 중앙당 철손 계수를 이용하여 실제 25kW급 60000rpm으로 회전하는 고속용 전동기 모델에 적용하여 고정자 요크에 발생하는 철손을 구하였다. 앞으로 본 논문에서 제시된 철손 계수 산정 방법은 고속용 회전기에 적용되는 참고 자료로서 활용될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] K.Atallah, "An improved method for predictiong iron losses in brushless permanent magnet DC drives", *IEEE T rans. Magn.*, vol. 28, no. 5, pp. 2997-2999, 1992
- [2] Jianguo Zhu, "Improved formulations for rotational core losses in rotating electrical machines", *IEEE Trans. Mag n.* vol. 34, pp. 2234-2242, July 1998
- [3] M.armor, "A simple method for the estimation of power losses in silicon iron sheets under alternating pulse voltage excitation", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 30, pp. 824-944, March 1994
- [4] N. Sadowski, "The rain-flow method for evaluation of iron losses in electrical machines", *IEEE Trans. Magn.*, vo l. 36, no. 4, pp.1923, 1988