

고속구동 설계에서의 손실계수

김기봉, 권병일
위스콘신대 하양대

LOSS COEFFICIENTS IN HYPER SPEED DESIGN

KiBong Kim, Ph.D., Byungil Kwon, Ph.D.
University of Wisconsin-Madison, HanYang University

Abstract - 최근에 주목 받고 있는 초고속 구동 전기기기의 전자기 설계에 있어서는 일반적 설계법외에 고려하여야 할 상수들이 있다. 10만 rpm급의 고속회전이 필요한 전자기 응용기들은 물리적 접촉이 불가능하며, 초고속 switching 이 가능한 전력소자나 높은 주파수에서도 eddy current 및 hysteresis loss 를 최소화 할수 있는 강판 제질의 개발이 선행되어야 가능하다. 본 논문에서는 이러한 초고속 구동을 하는 전자기 응용 기기의 설계에 있어서 고려하여야 하는 유기 기전력, 풍손, 마찰손, eddy current and hysteresis loss 와 같은 철손 그리고 tooth-ripple losse 등에 대한 연구결과를 설명하며, 초고속 전자기 응용기기의 구동 특성과 초고속 회전에서 가장 우려되는 고주파 손실을 최소화 하고 고효율을 유지하기 위한 최적형상 설계를 제시한다.

1. 서 론

최대회전속도 10만 rpm에 이르는 초고속을 구하기 위한 전자기 응용기기는 여러 가지 형태로 가능하다. 그러나 본 논문에서 선택된 것은 Brushless 영구자석형 전자기 응용기기이며 이것은 인버터 회로에 의해 구동되어진다. 정격용량 5 KW인 이 기기는 6만 rpm 을 정격속도로 하고 최대 10만 rpm 까지의 속도에서 가변되면서 무리없이 구동되어지도록 설계되었다. 따라서 무부하속도는 10만 rpm 을 훨씬 상회한다. 그러나 물리적인 이유로 속도가 10만 rpm 에서 제한 되도록 제어 되어진다. 초고속 모터를 설계할 때 유의하여야 할 사항들은 다음과 같이 나열할수 있다.

- (1) 전기적 고려사항
 - (가) DC bus voltage 이하로 역기전력을 억제한다.
 - (나) 고주파와 고속회전으로 인한 손실의 감소
 - (다) 왜형파 보정 및 고주파 스위칭
- (2) 기계적 고려사항
 - (가) 베어링 또는 물리적 지지 방법
 - (나) 회전자 강도보강 및 균형
 - (다) 영구자석의 보호 및 냉각

본 논문에서는 초고속 모터와 관련된 여러 가지 특성 가운데 손실에 관하여 설명함을 주 목적으로 한다.

2. 본 론

2.1 손실과 효율

손실은 전기적 손실과 기계적 손실로 구분된다. 전기적

회전하는 원통체에서의 풍손 계산을 위한 실험적 수식은 다음에서와 같이 나타 내어진다.

먼저, Tera 상수 T_a 는 다음의 식(1) 과 같다.

$$T_a = u \times d / v \times \sqrt{d/r} \tag{1}$$

여기서, u 는 회전자의 주변속도 (m/sec), d 는 공극거리 (m), r 는 회전자 반경 (m), 그리고 v (m²/sec) 는 회전에 대한 점성 마찰이다.

만일 T_a 가 400 보다 크다면, 공기의 흐름은 난류 (turbulence)이라고 볼수 있다. 토오르크 상수 C_m 을 다음의 식 (2)와 같이 정의하면

$$C_m = 0.02 \times T_a^{-\frac{1}{5}} \tag{2}$$

풍손 W_w 은

$$W_w = \pi C_m p r^4 \ell \frac{\omega^3}{2} \tag{3}$$

과 같이 정의 할 수 있다.

풍손의 계산 결과는 그림 (1) 에 나타내어져 있다. 초고속 기기의 경우, 회전자의 주변속도가 엄청나게 높기 때문에 공기의 흐름이 심한 난류(turbulence) 이며, 따라서 풍손은 주요 관심사항이 된다.

그림에서 그래프(1)은 공극을 10% 증가 시킨 경우, 그래프(2)는 기준값, 그리고 그래프(3)은 회전자 직경이 10% 늘어난 경우의 시뮬레이션이다. 이러한 계산으로부터 회전자 직경이 커지거나 공극거리가 작을수록 풍손은 증가한다는 것을 알수 있다.

b. 윤활유가 함유된 베어링의 마찰손 (bearing loss in case oil lubricated ball bearings are used)

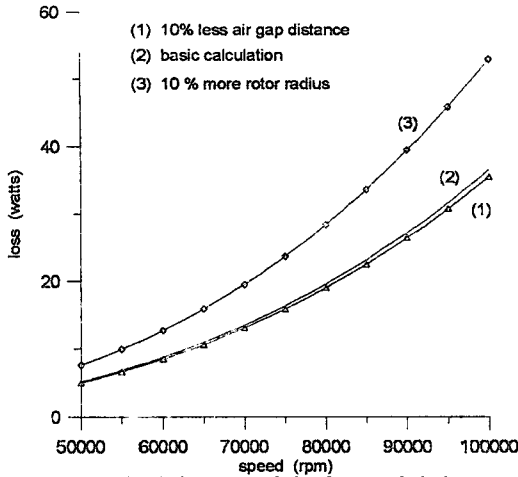


그림 1. 회전자 회전속도에 대한 함수로 나타낸 풍손
Fig. 1, Windage losses as a function of speed

$$W_r = 0.015 \frac{P_s}{D_b} v_s \quad (4)$$

여기서, P_s 는 베어링에 작용하는 회전자의 무게, D_b 는 베어링의 볼 중심에 대한 직경, 그리고 v_s (m²/sec) 는 주변 회전 속도이다.

c. 철손 (iron loss)

일반적으로 고정자 요오크에서의 무게는 다음 식(5)와 같이 표현된다.

$$m_y = \rho \times (r_o^2 - r_i^2) \times \pi \times \ell \quad (5)$$

그리고 고정자 치(teeth)에서의 무게는

$$m_t = \rho \times \omega_t \times \ell_t \times \ell \times N_s \times 10^{-3} \quad (6)$$

과 같이 나타낼 수 있다.

주파수가 f , 자속밀도가 B_m 인 경우, 단위 무게당 철손을 P_m 이라고 나타내기로 한다. 철손은 주파수와 자속 밀도의 함수로써 다음의 식 (7)과 같이 나타내어진다.

$$P_m = k_{hc} k_h f B_m^{1.6} + k_{ec} k_e f^2 B_m^2 \quad (7)$$

여기서, k_{hc} 와 k_{ec} 은 히스테리시스 손실과 eddy current 손실에 대한 고주파 보정상수로써 전기강판의 제조회사로부터 제공되는 값이다.

따라서, 철손을 나타내는 식은

$$W_i = P_m [m_t (k_{hc} k_h f \ell N_s B_m^{1.6} + k_{ec} k_e f^2 \ell N_s^2 B_m^2)] \quad (8)$$

용해야 함을 알 수 있다. 최저 주파수를 얻기 위해서는 극수가 최소화 되어야 하며 본 논문에서는 2극을 사용하였다. 자속밀도를 줄이기 위해서는 퍼어미언스 계수가 낮게 되도록 하여 역기전력이 낮게 되도록 자기회로를 설계해야 한다. 마지막으로 재질의 특성을 비교하면, 표 1에서와 같다.

표 1. 전기 규소강판의 철손 특성 비교

재질명	SUPER E-CORE	RM-23	S-60
철판 두께	0.1 mm	0.35 mm	0.5 mm
규소함유량	6.5 %	3.0 %	3.0 %
단위 철손	18.7	55	62*

여기서, 단위철손의 단위는 (W/kg) 이며, W10/1K 의 상태를 기준으로 표기하였다. *근사치

d. 동손 (copper loss)

일반적으로 동손은 저항손을 지칭하며 저항손은 도체 직경의 함수로 나타내어지는데 식(9) 와 (10)과 같다.

$$W_c = R_e \cdot i_a^2 N_{exc} \quad (9)$$

$$R_e = \rho(r, T) \frac{\ell_s}{A_s} = (2\pi f \frac{T}{r}) \rho_o \frac{\ell_s}{A_s} \quad (10)$$

이 경우 도체의 저항율은 주파수의 함수로 표기되며, 따라서 고주파 일수록 저항이 커고 저항손이 커짐을 알 수 있다. 이것은 표피효과로 설명되어진다.

동손은 온도에 대한 함수로써 온도 보정식은 다음 식 (11)과 같다.

$$R_{gT} = R_g \frac{234.5 + T_c}{234.5 + 20} \quad (11)$$

일반적으로 사용되는 B종 철연은 제한 온도가 125° C 이다. 이 경우 상기식에서의 Tc 의 값을 적용하여 계산한다.

e. Tooth-ripple losses

회전자가 고정자의 극을 따라 동기속도 n(rps)로 빠르게 회전하는 동안 극 표면에서는 주파수 nS 에 대한 시변 맥동이 발생한다. 여기서 S는 회전자 슬롯의 개수를 말한다. 만일 극표면이 도체(solid) 인 경우, 이 결과 발생하는 유기전류(eddy current)는 tooth ripple losses 로 정의되는 저항손이 심각하게 발생한다. 회전자를 지지하는 hoop 등에서 초고속인 경우 발생하는 와전류 손실은 P.J. Lawrenson 교수의 모델로 계산할 수 있다.

$$B_y(x, y) = -B_p - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{D_n}{\cosh\left(\frac{2\pi n}{\tau_n} \delta\right)} \left(\frac{2\pi n}{\tau_n}\right) \cosh\left(\frac{2\pi n}{\tau_n} (\delta - y)\right) \cos\left(\frac{2\pi n}{\tau_n} x\right) \quad (12)$$

$$B_{dyn} = B_{stat} \frac{(\mu_1 + 1)}{\mu_1 + \sqrt{1 - j\mu_1 K}} \frac{1 - \frac{(\mu_1 + 1)(\mu_1 + 1)}{(\mu_1 + 1)(\mu_1 + 1)} e^{-4\pi\delta / \tau_n}}{1 - \frac{(\mu_1 + 1)\mu_1 + \sqrt{1 - j\mu_1 K}}{(\mu_1 + 1)\mu_1 + \sqrt{1 - j\mu_1 K}} e^{-4\pi\delta / \tau_n}} \quad (13)$$

$$K = \frac{\mu_0 \chi f \tau_n^2}{2\pi} \quad (14)$$

$$f = n N_1 \quad (15)$$

$$P = \frac{1}{2} \frac{(B_{dyn} f \tau_n)^2 \chi}{2 \operatorname{Re}(\gamma)} \quad (16)$$

$$\gamma^2 = \left(\frac{2\pi}{\tau_n}\right)^2 - j \frac{1}{\alpha^2} \quad (17)$$

$$\alpha = \sqrt{\mu_o \mu_r \omega \chi} \quad (18)$$

상기의 식을 사용하여 계산된, 회전자의 hoop 표면의 자속밀도는 그림 2와 같다.

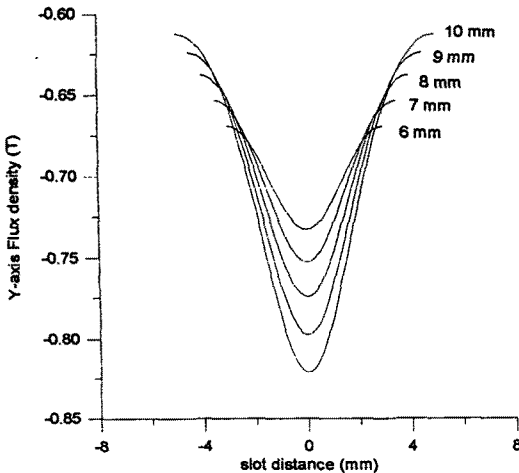


그림 2. 슬롯 간격을 함수로 한 경우의 자속밀도 분포
Fig. 2. Flux density distribution with varied slot pitch
이 그림에서, 자속밀도는 슬롯 개구간격의 함수로 나타내어져 있다. 예상한바와 같이, 자속밀도의 맥동은 개구 간격이 클수록 커짐을 알수 있다. 또 하나 중요한

르지 않음을 발견 할수 있다. 회전자 hoop 의 tooth ripple loss 는 회전자 회전 속도가 높을수록 크리크 개구 폭이 클수록 커짐을 알수 있다. 실험에 사용된 초고속 모터의 경우, 회전속도가 1000 rps이며, 18개의 슬롯이 있으므로 tooth ripple 맥동 주파수는 18,000 Hz 이다. 이를 계산하면 tooth ripple loss 는 67 watt이다.

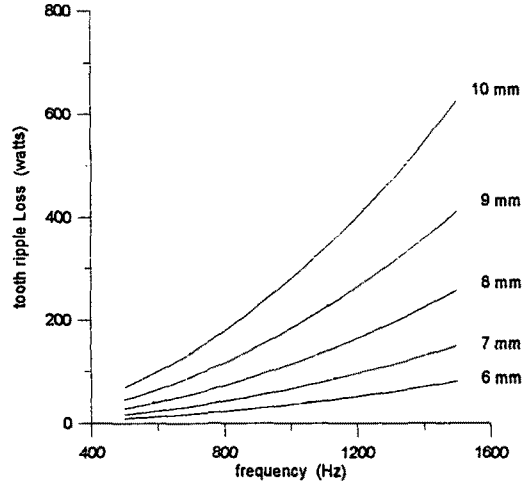


그림 3. 슬롯 개구폭과 주파수의 함수로 나타낸 Tooth ripple loss
Fig. 3. Tooth ripple losses as a function of operating frequency

3. 결 론

본 논문에서는 제한된 지면관계로 손실의 특성을 매우 자세히 설명하지는 않았지만, 고속구동용 전자기 응용기기의 상대적 특성을 설명하는데 중심을 두었다. 고속구동의 경우, 사용되는 주파수는 대단히 높다. 극수가 2극인 경우, 회전수가 10만 rpm 이면, 주파수는 1667 Hz 이다. 이것은 상용주파수에 비해 23배에 해당한다. 고전적 공식에 의하면 철손은 주파수의 제곱의 자속에 비례하므로 784배에 이르게 된다고 계산될 것이다. 그러나 실제의 경우, 철손이 그와 같이 증가 하지는 않는데, 그 이유는 재료의 특성에 기인한다. 따라서 고속 손실보정 계수 Khc, Kcc 가 도입되며 그 값은 전기 규소강판의 제조회사에서 실험적으로 제공되는 값이다.