

극수를 고려한 최대 출력을 만족하는 회전자 크기에 관한 연구

김도진, 권순오, 이정종, 정재우, 홍정표
한양대학교 자동차 공학과

A Study on size of rotor considering pole number to satisfy maximum torque in permanent magnet motor

Do-Jin Kim, Soon-O Kwon, Jeong-Jong Lee, Jae-Woo Jung, Jung-Pyo Hong
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

Abstract - 본 논문은 전동기의 최대출력을 낼 수 있는 사이즈를 결정에 관해 연구한 논문이다. 전동기의 초기 설계 시 주어진 외경의 치수에서 회전자의 사이즈를 결정하는 것은 중요하다. 본 논문에서는 자기장하와 전기장하를 이용하여 회전자 크기에 따라 전동기 최대 출력을 낼 수 있는 회전자 사이즈를 수식적으로 산정하는 방법에 대하여 다룬다.

1. 서 론

영구자석형 전동기는 산업전반에 걸쳐 매우 다양하게 활용되고 있으며 그 종류 또한 다양하다. 다양한 종류 및 용도의 영구자석형 전동기의 설계에는 시스템의 구조 상 사이즈의 제약이 따른다. 그러므로 제한된 사이즈 내에서 최대의 출력을 낼 수 있는 전동기의 설계는 무엇보다 중요하다. 한편, 영구자석형 전동기의 설계는 전기장하와 자기장하를 어떻게 분배하는가에 따라서 전동기의 손실, 효율, 출력 등 전반적인 특성이 달라진다. 경우에 따라서 전기장하를 크게 하여 동기계를 만들 수도 있으며 자기장하를 크게 하여 철기계를 만들 수도 있다. 본 논문은 제한된 사이즈 내에서 최대 출력을 낼 수 있는 회전자 크기의 결정에 관하여 설명하고 있으며 전기장하와 자기장하의 값을 수식적으로 계산하여 최대 출력을 낼 수 있는 회전자 크기에 대해서 살펴본다. 또한, 극수의 변화에 따라서 요크 폭은 변화하게 되는 특성을 반영하여 극수 변화에 따른 최대출력을 내기 위한 회전자의 크기의 변화에 대하여도 다룬다.

2. 본 론

2.1 최대 출력 확보를 위한 회전자 sizing

회전자의 크기에 따라 최대 출력 확보를 하기 위해서 초기에 회전자의 크기에 따른 요크 폭은 고려를 하지 않는다는 가정을 두게 된다. Tangential force는 전동기의 토크에 기여하는 성분으로 Maxwell Stress Tensor를 이용하여 공극으로부터 산정하게 되며 수식 (1)과 같다.

$$F_{\alpha} = \frac{lD}{2} \int_0^{2\pi} B_n H_t d\alpha \quad (1)$$

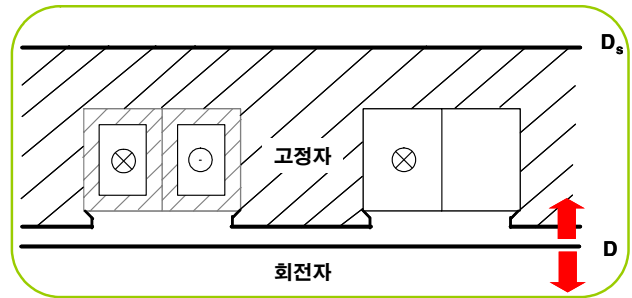
여기서, $B_n = B(\alpha)$ 이며, $H_t = \frac{I}{l} = A(\alpha)$ 이며, 토크는 수식 (2)와 같이 표현된다.

$$T = \frac{D}{2} F_{\alpha} = \frac{lD^2}{4} \int_0^{2\pi} B(\alpha) A(\alpha) d\alpha \quad (2)$$

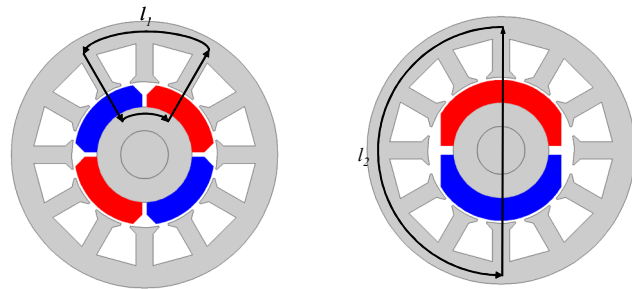
여기서 전기장하 A 는 고정자 영역과 전류에 비례한 값이다. 이때, 전류밀도를 일정하다고 가정하므로 인가되는 전류는 전류 밀도 J 로 표기하며, 전기장하 A 는 수식 (3)과 같다.

$$A \sim \frac{I_{tot}}{\pi D} \sim \frac{J}{\pi D} \left[\pi \left(\frac{D_s}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right] \quad (3)$$

여기서 D 는 회전자 외경, D_s 는 고정자 최외경이 된다. 위 수식 (3)은 고정자의 요크부분이 고려되지 않고 전기장하를 산정하는 수식이 되겠다. 하지만 전동기에서는 실제로 권선 작업이 이루어지는 부분은 슬롯 부분이므로 요크를 제외한 수식으로 재 수식화가 필요하며 추후 고려하겠다. 그림 (1)에서 전기장하 영역을 빗금으로 표시하였다.



〈그림 1〉 전기장하



〈그림 2〉 극수 변화에 따른 자속 경로

수식 (2), 수식 (3)을 정리하면 토크는 회전자 크기 D , D_s 에 따라서 나타낼 수 있으며, 수식 (4)에서 보는바와 같이 토크는 D^3 에 비례한다는 것을 알 수 있다.

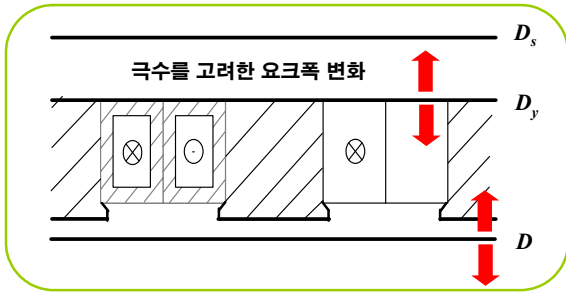
$$T \sim D^3 \left[\frac{D_s^2}{D^2} - 1 \right] = D \cdot D_s^2 - D^3 \quad (4)$$

2.2 극수 변화에 따른 요크 폭 변화

전동기는 극수의 변화에 따라서 많은 특성의 변화가 있다. 일반적으로 전동기에서 극수가 증가하면 철손이 증가하며, 극호각이 작아지기 때문에 자속의 경로 또한 감소할 수 있다. 그림 2에서 보는바와 같이 4극기의 경우 자속경로 l_1 이 2극기의 l_2 보다 짧은 것을 확인할 수 있다. 이는 극수가 증가할 경우 극 당 자속량이 감소하게 되는데 이때 요크의 두께를 줄이더라도 요크의 자속밀도를 일정수준으로 유지시킬 수 있다. 이러한 점을 고려하여 최대 출력 확보를 위한 회전자 크기를 결정할 경우 극수 변화에 따른 요크 두께를 고려하여야 한다.

2.3 극수를 고려한 회전자 sizing

앞서 언급한 수식을 통하여 극수의 변화는 고려하지 않은 상태에서의 전기장하와 자기장하를 비교하여 최대 출력을 낼 수 있는 회전자 sizing에 대한 설명을 하였다. 본 장에서부터는 극수 변화에 따라 자속 경로를 고려한 회전자 sizing에 대해서 검토한 내용에 대해서 다루고자 한다. 위에서 언급한 바와 같이 요크의 자속밀도는 일정하다고 가정하였을 경우, 요크 폭은 극수에 따라서 변화하게 된다. 그림 3과 같이 극수를 고려할 경우 요크 폭은 변화하게 되고 회전자 직경 역시 변화하게 된다. 아래 수식 (5)는 극수에 따른 요크 폭을 고려한 수식이다.



〈그림 3〉 극수 변화에 따른 회전자 반경

그림 3과 같이 극수를 고려할 경우 요크 폭은 변화하게 된다. 그리고 회전자 직경 역시 변화하게 된다. 아래 수식 (5)는 극수에 따른 요크 폭을 고려한 수식을 나타낸다.

$$\pi \left[\left(\frac{D_s}{2} - \frac{D_s - D_y}{2n} \right)^2 - \left(\frac{D_y}{2} \right)^2 \right] \quad (5)$$

위의 수식에서 n은 극수 비로써, 극수 변화를 비로 나타낸 계수이다. 그리고 D_y 는 슬롯 최외각 영역의 직경을 나타낸다. 따라서 극수가 증가하게 되면 요크 폭은 감소하게 되고 극수가 감소할 경우에는 요크 폭이 증가하게 된다. 따라서 요크 폭을 고려한 극수 변화에 따른 전기장하의 경우 앞서 보인 수식 (3)은 수식 (6)과 같다.

$$A \sim \frac{I_{tot}}{\pi D} \sim \frac{J}{\pi D} \left[\pi \left(\frac{D_y}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right] + \pi \left[\left(\frac{D_s}{2} - \frac{D_s - D_y}{2n} \right)^2 - \left(\frac{D_y}{2} \right)^2 \right] \quad (6)$$

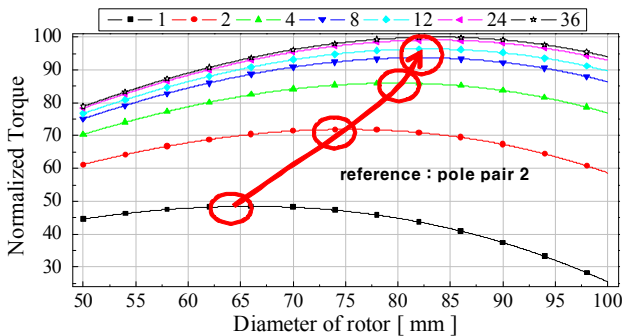
극수를 고려한 토크 수식은 (7)과 같다.

$$T \sim (D \cdot D_y^2 - D^3) + D \left\{ \left(D_s - \frac{D_s - D_y}{n} \right) - D_y \right\} \quad (7)$$

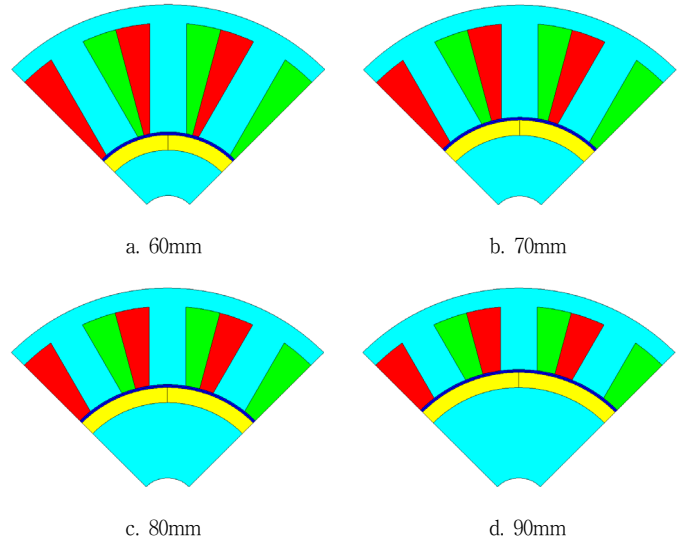
표 1과 같은 형상치수의 전동기가 있을 경우 여러 극수에서 최대 출력을 낼 수 있는 전동기의 회전자 형상의 크기를 산정해 본다. 초기 전동기의 극수가 4극일 경우에서 극수의 변화에 따른 전동기 형상을 비교해 보았다. 극수가 작아질 경우 회전자의 크기는 감소하지만 요크 폭은 커지게 되며, 회전자의 크기는 기존 전동기에 비해서 감소하여야 최대 출력을 낼 수 있다. 그리고 극수가 증가할 경우에는 요크 폭은 감소하게 되며, 회전자의 크기는 증가되어야 최대 출력을 낼 수 있음을 알 수 있다. 그림 4는 극수의 변화에 따라서 회전자의 크기의 변화를 나타낸다.

〈표 1〉 초기 전동기 형상 치수

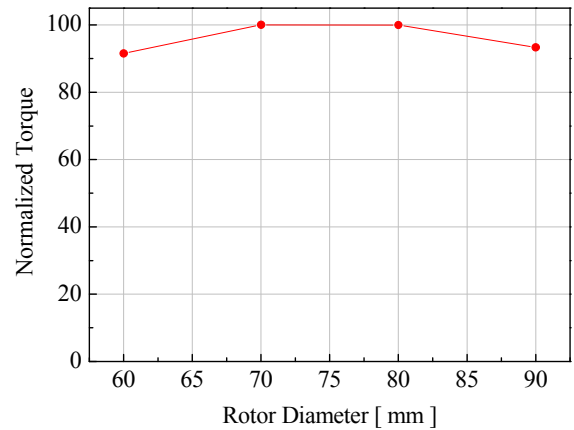
극수	4
고정자 최외경 [mm]	146
고정자 요크내경 [mm]	130



〈그림 4〉 극수 변화에 따른 최대 출력을 회전자 크기 변화



〈그림 5〉 회전자 직경 변화에 따른 모델링



〈그림 6〉 회전자 직경 변화에 따른 출력 비교

2.4 유한요소해석을 통한 검증

8극 모델에 대해서 회전자의 직경에 따른 유한요소해석을 수행하고 수식에 대한 검증을 하였다. 앞서 그림 4의 8극의 모델의 경우 회전자의 크기에 따라서 동일한 전류를 인가하고 고정자 형상 변화 시 면적에 따른 턴 수를 변화시켜 출력을 산정해 하였다. 해석 대상 모델은 8극 모델이므로 그림 5와 같이 전체모델에서 1/4 만 모델링 하였으며, 유한요소 해석 시 동일한 전류를 인가하여 출력을 산정하였다. 그 결과, 출력은 회전자 직경이 70, 80mm를 가질 때 최대값을 가진다. 위 결과로부터 최대 출력을 발생시키는 회전자 직경이 수식으로 산정된 값과 유한요소 해석을 통해 산정된 값이 유사하다는 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 최대 출력을 낼 수 있는 회전자 직경의 크기에 관한 논문이다. 수식으로 산정된 최대출력을 발생시키는 회전자 직경과 유한요소 해석을 통해서 산정된 회전자 직경은 거의 유사함을 확인하였다. 전동기의 초기설계 시 유한요소해석법을 통해서 회전자 직경을 찾을 경우 많은 시간이 걸릴 수 있다. 그러므로 본 논문에서 제시한 수식적인 방법을 통해서 초기 전동기 설계를 할 경우 설계의 신속성 측면에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Thomas Finken, Kay Hameyer, "Design of Electric Motors for Hybrid- and Electric- Vehicle Applications", ICEMS, 2010
- [2] V.B. Honsinger, Life Fellow IEEE, "SIZING EQUATIONS FOR ELECTRICAL MACHINERY", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-2, No. 1, March 1987