

분포권 전동기의 출력향상을 위한 치 폭과 요크 폭의 최적 설계

김해중, 권순오, 이진규, 손도, 홍정표
한양대학교 자동차공학과

Optimal design for tooth and yoke width of distributed winding motor for maximum output

Hae-Joong Kim, Soon-O Kwon, Jin-Gyu Lee, Tao Sun, Jung-Pyo Hong
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

Abstract - Optimization of geometry is one of the most important design process of the electrical motors. Tooth and yoke width are important variables that can maximize back emf and load torque among various design parameters. In this paper, in order to design the tooth and yoke width effectively, an equivalent magnetic circuit of one pole is constructed and an optimal value of tooth and yoke width resulting minimum reluctance are determined instead of a finite element analysis(FEA) that is time consuming.

1. 서 론

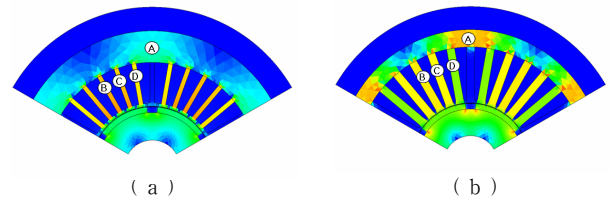
오늘날 전자기 시스템은 고효율화, 고정밀화 되어감에 따라 설계과정에서의 성능향상을 위한 최적화요구는 날로 커지고 있고, 최적화를 위한 다양한 방법들이 강구되어지고 있다.

전동기 설계에 있어서 치와 요크 폭을 결정하는 것은 매우 번거롭지만 중요한 작업 중의 하나이다. 적절치 않은 치와 요크 폭으로 설계 할 경우 치 혹은 요크에서의 자속밀도 포화로 인하여 원하는 운전영역에서 운전할 수 없을 뿐만 아니라, 최대의 역기전력을 확보 할 수 없게 되고 결국 제한된 치와 요크 폭에서 최대 토크를 확보 할 수 없게 된다. 그래서 전동기 설계 시 반드시 적절한 치와 요크 폭을 결정하여야 한다. 전동기를 해석하는데 있어서 널리 사용되는 방법 중의 하나는 유한요소해석법이다. 그러나 유한요소해석법은 많은 모델링과 복잡한 전처리 작업을 수행해야 하고, 긴 해석시간을 요한다. 그래서 본 논문에서는 유한요소해석법과 비교해볼 때 정확성은 다소 뒤지지만, 쉽고 빠르게 역기전력과 부하토크를 최대로 갖는 치와 요크 폭을 결정할 수 있는 등가자기회로법을 사용하였다. 일반적으로 역기전력과 부하토크는 영구자석의 기자력에 대해 대략 고정자의 자기저항이 가장 작은 값을 갖는 치와 요크 폭 비율에서 가장 큰 값을 갖는다. 그래서 본 논문에서는 자기저항이 가장 작은 치와 요크 폭을 찾기 위해 한 극에 대한 고정자에서의 등가자기저항을 수식화 하였다. 그리고 유한요소법으로 산정된 최적의 치와 요크 폭을 등가자기회로법으로 구한 치와 요크 폭과 비교함으로써 등가자기회로법의 신뢰성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 치와 요크 폭 설계의 당위성

전동기 설계 시 전동기 사양으로서 출력과 전류가 주어지면 냉각방식을 고려하여 전류밀도를 결정할 수 있고 전류밀도가 결정되면 사용가능한 권선의 직경을 결정할 수 있다. 요구되는 역기전력을 내기 위한 전기자권선 수 산정은 계자자속량에 따라 결정되는데, 전기자권선수가 결정되면 전동기 사양으로 주어진 고정자의 외경을 고려하여 슬롯의 단면적을 계산 할 수 있다. Torque per unit Rotor Volume(TRV)를 고려하여 회전자 직경을 산정하였을 경우 슬롯면적과 고정자의 외경이 결정되어 있으므로 치와 요크 폭은 일정 크기 이상 증가할 수 없게 제한된다. 그러므로 이 제한된 크기 내에서 치와 요크 폭에 의한 최대의 역기전력을 낼 수 있는 비율을 찾아야 한다. 그림 1은 6극 36슬롯 Surface Permanent Magnet Synchronous Motor(SPMSM)의 무부하시의 자속밀도 분포를 보여주고 있다. 그림 a모델과 같이 설계 할 경우 요크 A지점에서의 자속밀도는 0.67[T]로 상당히 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 요크의 폭에 비해 각 치의 폭이 너무 좁게 설계되었기 때문이다. 이로 인하여 그림 1의 a모델은 예상했던 것보다 역기전력이 낮게 산정 될 것이다. 그림 1의 b모델은 a모델에 비하여 치 폭과 요크 폭을 적절한 비율로 설계 한 경우이다.



<그림 1> 6극 36슬롯 SPMSM전동기의 자속밀도 분포도

<표 1> 각 위치별 자속밀도

위 치	A	B	C	D	상역기전력 [Vrms]
자속밀도[T]	a모델 0.67	1.92	1.89	1.78	139.23
	b모델 1.19	1.41	1.39	1.17	166.80

* 해석조건: 3000rpm, 20°C

그림에서와 같이 요크 A지점에서의 자속밀도는 1.19[T]이고 치 B지점에서의 자속밀도는 1.41[T]로서 치와 요크 모두 철심이 포화되지 않은 것을 알 수 있다. 그림 1의 b모델은 a모델에 비하여 역기전력이 높게 산정 되었다. 이와 같이 치 폭과 요크 폭의 비율은 치와 요크의 포화정도를 결정하게 되고, 결국에는 역기전력의 크기와 부하토크에 큰 영향을 미치게 된다. [1]

2.2 치/요크 폭에 따른 유한요소해석

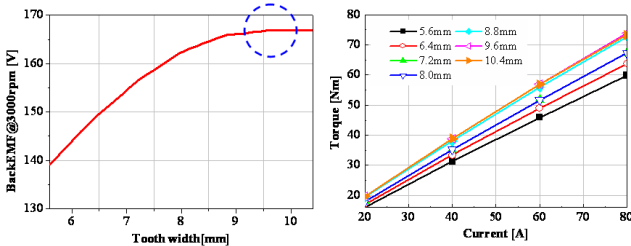
등가자기회로법을 이용한 치, 요크 폭의 최적화를 하기 전에 유한요소법을 이용하여 3극 36슬롯과 8극 48슬롯, 10극 60슬롯의 각 극 수/슬롯 수 조합 당 치, 요크 폭이 다른 일곱 개의 모델을 해석하여 역기전력을 구한 후, 그 중 역기전력이 가장 높은 모델을 찾았다.

<표 2> 각 모델의 주요 형상/치수

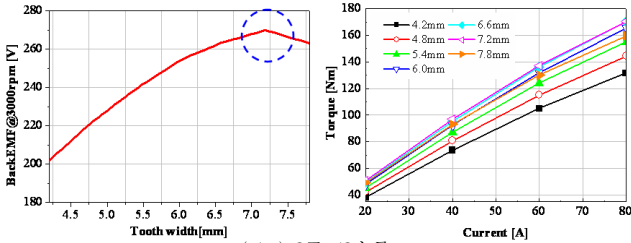
항 목	6극 36슬롯	8극 48슬롯	10극 60슬롯
고정자/회전자 외경[mm]	346.4/153.6 (샤프트 외경: 70[mm])		
적층길이[mm]	50		
공극길이[mm]	1		
자극폭[M. deg.]	50	38	30
상당직렬턴수	60 (병렬회로수 1)	120 (병렬회로수 1)	
영구자석	Br: 1.4[T], 두께 :7[mm]		
강판재질	PNSE	S18	
슬롯면적[mm ²]	679.0	614.6	544.3

각 극 수, 슬롯 수 조합에 대한 상당직렬턴수와 자극 폭, 강판재질은 표 2와 같다. 각 극 수, 슬롯 수 조합에서 치와 요크 폭이 서로 다른 7개의 모델들은 모두 고정자 및 회전자외경과 슬롯 당 턴 수, 슬롯 면적이 동일하기 때문에 치 폭이 넓은 모델은 상대적으로 요크 폭이 좁다. 각 조합모델에 대해 기준치 폭을 정하고, 기준치 폭 대비 대상 모델의 치 폭 비율로서 0.7부터 1.3까지 구분하여 해석하였다. 6극 36슬롯 기준 치 폭은 8[mm]이고, 8극 48슬롯 기준치 폭은 6[mm], 10극 60슬롯은 4.8[mm]이다. 무부하역기전력은 상온에서 3000[rpm]을 기준으로 산정하였고, 부하시의 토크는 20[Arms]부터 100[Arms]까지 20[Arms] 단위로

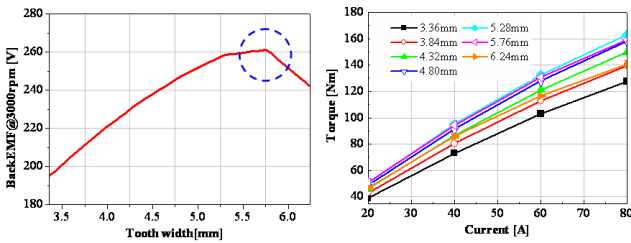
전류벡터제어 중 하나인 $I_d=0$ 제어하여 해석하였다.
그림 2는 각 극 수와 슬롯 수 조합에 대해 치와 요크 폭의 변화에 따른 역기전력과 부하토크의 변화를 보여주고 있다.



(a) 6극 36슬롯



(b) 8극 48슬롯



(c) 10극 60슬롯

<그림 2> 극 수와 슬롯 수 조합에 따른 역기전력과 부하토크

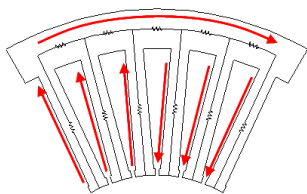
<표 3> 역기전력과 부하토크가 최대인 치 폭 (FEA 결과)

극수/슬롯수	역기전력을 최대로 하는 치 폭 [mm]	부하토크를 최대로 하는 치 폭 [mm]
6극 36슬롯	9.70	9.70
8극 48슬롯	7.20	7.20
10극 60슬롯	5.76	5.28

그림 2에서 보는 것과 같이 6극 36슬롯에서 최대역기전력 및 최대 토크를 갖는 치 폭은 9.7[mm]이고, 8극 48슬롯에서는 7.2[mm]이며, 10극 60슬롯에서는 최대역기전력을 갖는 치 폭은 5.76[mm], 최대부하토크를 갖는 치 폭은 5.28[mm]이다.

2.3 등가자기회로법을 이용한 치와 요크 폭 최적화

등가자기회로법을 이용하여 최대역기전력 및 최대토크가 되는 치 폭과 요크 폭을 찾기 위하여 고정자의 등가자기저항을 구하였다. 한 극에서의 자속은 양 옆의 다른 극으로 나누어 흐르게 되므로 계산을 간단히 하기 위하여 양 쪽 자로를 모두 고려하지 않고, 한 쪽자로를 고려하여 자기저항을 산정하였다. 그림 3은 6극 36슬롯의 N극과 S극의 각 반극 분에 의해 만들어지는 자로를 보여주고 있다.



<그림 3> 6극 36슬롯의 고정자 자로

극 당 슬롯 수가 달라지면 등가자기회로의 합성자기저항이 달라진다. 극 당 슬롯 수가 4인 경우의 합성자기저항은 다음과 같다.

$$R_{total} = 2((a^{-1} + b)^{-1} + a)^{-1} + b \quad a = \frac{1}{R_a} \quad b = R_b \quad (1)$$

극 당 슬롯 수가 6인 경우와 8인 경우는 각각 다음과 같다.
극 당 슬롯 수가 6인 경우 :

$$R_{total} = 2((((a^{-1} + b)^{-1} + a)^{-1} + b)^{-1} + a)^{-1} + b \quad (2)$$

극 당 슬롯 수가 8인 경우 :

$$R_{total} = 2(((((((a^{-1} + b)^{-1} + a)^{-1} + b)^{-1} + a)^{-1} + b)^{-1} + a)^{-1} + b)^{-1} + b \quad (3)$$

극 당 슬롯 수가 증가할수록 등가자기회로의 합성자기저항은 긴 연분수의 형태로 나타나게 된다. 치와 요크에서의 자기저항은 치와 요크의 길이 및 면적을 고려하여 산정할 수 있고, 치의 길이와 면적, 요크의 길이와 면적은 다음 수식으로 산정할 수 있다. [2]

$$S_t = 2xL_{st} \quad S_y = \frac{D_h}{2}L_{st} + \frac{D_y}{2}L_{st} \quad (4)$$

$$l_t = \frac{D_y}{4} + \frac{D_h}{4} - \frac{D_s}{2} \quad l_y = \left(\frac{D_y}{2} + \frac{D_h}{2}\right) \times \frac{\pi}{n_s} \quad (5)$$

$$R_a = \frac{l_t}{\mu S_t} \quad R_b = \frac{l_y}{\mu S_y} \quad (6)$$

여기서 x 는 치 폭의 절반 값이고, L_{st} 는 전동기의 축방향길이, n_s 는 총 슬롯 수, l_t 는 치의 길이, S_t 는 치의 면적, l_y 는 요크의 길이, S_y 는 요크의 면적이다.

모든 해석 모델에 대해 슬롯면적은 동일해야 하므로 슬롯의 바깥지름 D_y 는 슬롯 면적과 치의 면적을 이용하여 다음과 같은 수식으로 산정가능하다.

$$D_y = n_s x \frac{2}{\pi} + \sqrt{\left(\frac{2}{\pi} n_s x\right)^2 + D_s^2 - \frac{4}{\pi} n_s (x D_s - A_s)} \quad (7)$$

여기서 A_s 는 슬롯의 단면적이다.

극 당 슬롯 수에 따라 위 식(1), (2), (3)을 이용하여 고정자 등가자기회로의 합성저항을 산정하고, 이때의 치 폭을 확인한다.

<표 4> 역기전력/부하토크 최대 치 폭과 자기저항 최소 치 폭

극수/슬롯수	FEA		등가자기회로
	역기전력을 최대로 하는 치 폭 [mm]	부하토크를 최대로 하는 치 폭 [mm]	등가자기저항이 최소인 치 폭 [mm]
6극 36슬롯	9.70	9.70	10.0
8극 48슬롯	7.20	7.20	7.20
10극 60슬롯	5.76	5.28	5.6

유한요소해석법을 통하여 역기전력 및 부하토크가 최대인 치 폭, 요크 폭과 등가자기회로를 이용하여 자기저항이 최소인 치 폭이 거의 일치함을 알 수 있다.

즉 등가자기회로법을 이용하여 자기저항이 최소가 되는 치 폭을 찾으면 쉽고 빠르게 치 폭과 요크 폭을 최적화를 수행할 수 있는 것이다.

3. 결 론

치와 요크 폭의 최적화를 함에 있어서 등가자기회로법을 사용하여 자기저항이 최소인 치, 요크 폭을 구하는 방법은 유한요소법에 비하여 쉽고 빠르게 역기전력과 부하토크가 최대가 되는 치 폭, 요크 폭을 구할 수 있었다. 향후 6극 27슬롯과 같이 극 당 슬롯 수가 정수개가 아닌 경우의 자기 저항이 최소가 되는 치, 요크 폭을 구하는 방법에 대한 연구가 추가적으로 필요 할 것으로 생각 된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김영균, "등가자기회로법과 유한요소법을 이용한 액추에이터의 토크 특성 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 605-607, 2000
- [2] Edward C. Lovelace, "Optimization of a Magnetically Saturable Interior Permanent-Magnet Synchronous Machine Drive, 63-108, 2000