

등가 자기회로를 이용한 집중권 전동기의 치폭 요크폭 최적설계

김도진\*, 권순오\*, 홍정표\*, 남혁\*\*  
 한양대학교 자동차 공학과\*, LG 전자\*\*

Optimal Design of Tooth and Yoke Width Using Equivalent Magnetic Circuit in Concentrated Winding Motor

Do-Jin Kim\*, Soon-O Kwon\*, Jung-Pyo Hong\*, Hyuk Nam\*\*  
 Department of Automotive Engineering, Hanyang University\*, LG Electronics\*\*

**Abstract** - This paper presents optimal design of tooth and yoke width for increasing torque density when designing concentrated winding Interior Permanent Magnet Synchronous Motor(IPMSM) which is used currently. In case of IPM, characteristic of motor changes according to saturation, thus design considering saturation should be done. This paper proposed method to decide tooth and yoke width using magnetic equivalent circuit with calculated magnetic resistance. This method provide less effort and time than FEM using optimal design when deciding tooth and yoke width. Proposed method and FEM are compared and verified.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, 이하 IPMSM)는 영구자석에 의해서 발생하는 마그네틱 토크만을 이용하는 표면 부착형 영구자석 동기전동기(Surface Permanent Synchronous Motor, 이하 SPMSM)와 달리 d, q축 인덕턴스 차에 의한 릴럭턴스 토크를 사용할 수 있기 때문에 높은 출력 밀도를 가지며 전류 위상제어를 통한 약제자 운전이 용이하므로 광범위한 운전 영역을 확보할 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히 집중권 권선 방식의 IPMSM의 경우 엔드 코일의 길이를 짧게 할 수 있으므로 소형, 경량화가 가능하며 분포권 방식의 전동기에 비해 권선작업이 간단하기 때문에 높은 생산성을 갖는 이점이 있다. 따라서 저속영역에서 일정토크와 고속영역에서의 광범위한 정출력 구간을 요구하는 하이브리드 차량 구동용 전동기 또는 에어컨 컴프레서용 전동기 및 스핀들 모터 등 산업 여러 분야에의 적용에 대한 관심이 높아지고 있다.[1][2]

전동기를 설계함에 있어 토크 밀도를 증가시키는 것은 매우 중요하다. 전동기에서 동일 토크를 발생시킬 때, 전류의 크기가 작을수록 손실과 코일의 굵기 등 전동기 설계에 많은 장점을 가질 수 있다.

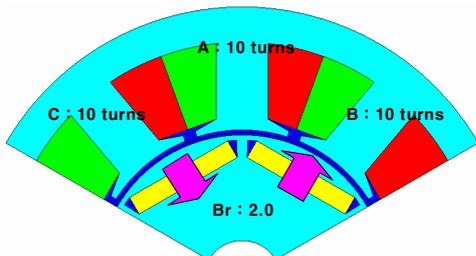
본 논문에서는 자속을 최대도 확보하기 위해서 등가자기회로법을 이용하여 치폭과 요크폭을 산정하는 방법에 대해서 논하고자 한다. 자기저항으로 구성된 등가자기회로를 이용하여 치와 요크폭을 산정하게 되면 유한요소법을 이용한 최적화 과정에 비해서 많은 시간과 노력이 절약될 수 있다.

본 논문에서 제시한 자기저항을 이용한 등가자기회로법과 유한요소법을 이용한 최적화를 통해서 산정된 치폭과 요크폭을 비교해 봄으로써 신뢰성을 검증한다.

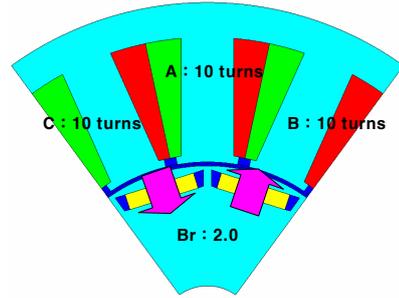
2. 본 론

2.1 전동기 모델

일반적으로 IPM 전동기는 높은 토크를 발생을 한다. 하지만 이러한 높은 토크를 발생시키기 위해서 치폭과 요크폭의 설계가 매우 중요하다. 치와 요크에서 포화가 발생하면 원하는 토크를 낼 수 없기 때문이다. 따라서 자기저항을 이용하여 고정자에서의 치폭 요크폭을 설계하려고 한다.



<그림 1> 6극 9슬롯 전동기 모델



<그림 2> 10극 15슬롯 전동기 모델

전동기 모델은 6극 9슬롯과 10극 15슬롯에 대해서 자기저항을 산정하고 유한요소 해석을 통해서 이를 검증하고자 한다. 6극 9슬롯과 10극 15슬롯 모델은 그림 1,2와 같다.

2.2 등가자기회로법

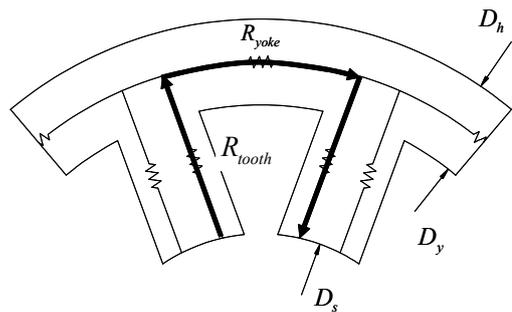
전동기의 형상을 자기저항으로 표현할 수 있으며, 고정자에 대해서 자기저항을 표현하면 그림 3과 같다. 등가자기회로법을 이용하여 토크밀도, 무부하 역기전력을 최대도 가져가기 위해서 고정자에 대한 자기저항을 산정하고 자기저항이 최소가 되는 치폭, 요크폭을 산정한다. 초기조건과 가정은 다음과 같다.

1. 치와 요크의 비투자율은 일정하다.
2. Tooth tip 은 고려하지 않는다.
3. 하나의 자속경로를 통해서 고정자의 치와 요크의 치수를 계산한다.
4. D<sub>s</sub>, D<sub>h</sub>는 초기형상에서 결정된다.

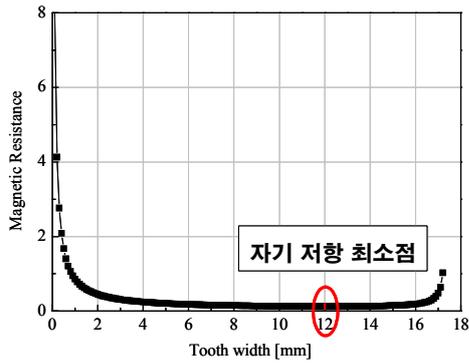
위와 같은 초기조건과 가정을 두고 치와 요크의 자기저항을 산정하여 자기저항이 최소가 되는 치폭 요크폭을 결정한다. 자기저항산정은 아래의 수식(1)과 같다.

$$R_{total} = \frac{l_{tooth}}{\mu S_{tooth}} + \frac{l_{yoke}}{\mu S_{yoke}} \quad (1)$$

여기서, R<sub>total</sub>는 자기저항의 총합이며, L<sub>st</sub>는 전동기의 축방향길이, sn은 총 슬롯 수, l<sub>tooth</sub>는 치의 길이, S<sub>tooth</sub>는 치의 면적, l<sub>yoke</sub>는 요크의 길이 S<sub>yoke</sub>는 요크의 면적이다.



<그림 3> 고정자에 대한 자기저항 (6극 9슬롯)



〈그림 4〉 치폭의 변화에 따른 자기저항

치폭의 변화에 따른 총 자기저항의 변화는 그림 4와 같다. 따라서 설계를 할 때, 자기저항이 최소가 되는 지점에서 설계를 하여야 무부하 역기전력, 토크밀도를 최대한 크게 가져 갈 수 있다. 이러한 방법으로 산정된 자기저항을 검증하기 위해서 유한요소해석을 이용하여 검증하고자 한다.

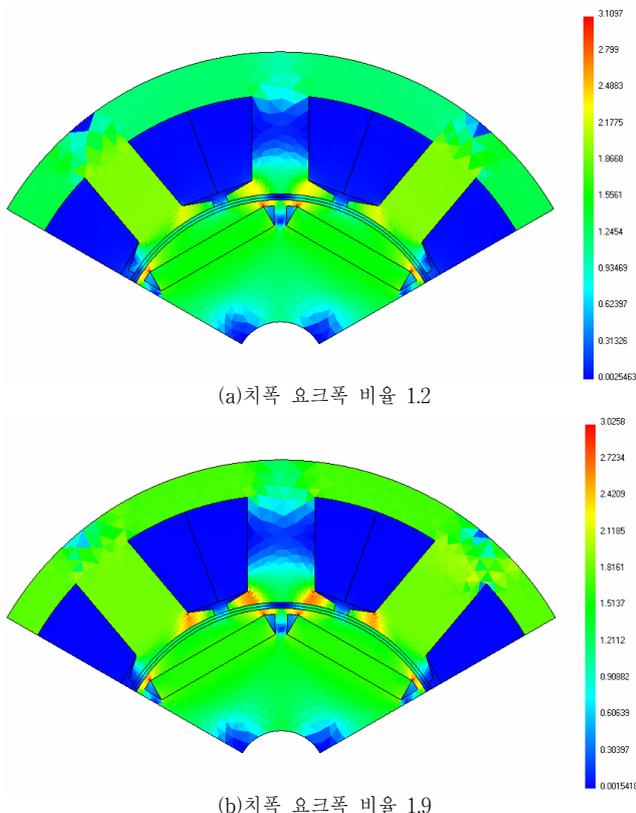
### 2.3 유한요소해석 (FEA)

#### 2.3.1 유한요소해석 조건

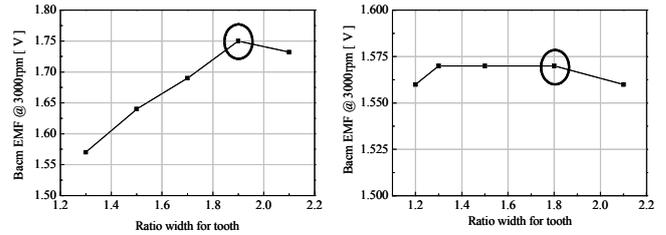
치폭 요크폭에 변화에 따른 무부하 역기전력과 토크를 유한요소해석을 이용하여 산정하였다. 일반적으로 집중권 전동기는 자속이 치에서 요크쪽으로 나누어 들어가기 치폭이 요크폭에 비해서 크게 설계한다. 유한요소해석을 할 때, 조건은 무부하 해석시 속도는 3000rpm에 대한 무부하 역기전력을 비교하였다. 부하 해석시 정현파 전류를 50A에서 200A 까지 인가하여 Id=0 운전을 하여 토크를 비교한다.

#### 2.3.2 자속밀도 비교

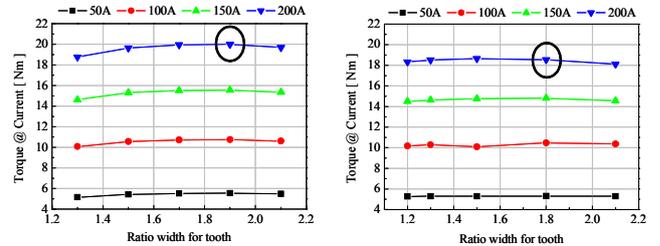
무부하 역기전력을 해석하여 비율에 따른 자속밀도를 비교하면 자속의 포화가 치폭 요크폭의 비율이 1.2에 비해서 1.9의 비율에서 많이 발생함을 알 수 있고 그림 5에 나타내었다.



(b)치폭 요크폭 비율 1.9  
〈그림 5〉 치폭 요크폭에 따른 자속밀도 비교



(a) 6극 9슬롯 (b) 10극 15슬롯  
〈그림 6〉 치폭의 변화에 따른 무부하 역기전력



(a) 6극 9슬롯 (b) 10극 15슬롯  
〈그림 7〉 치폭의 변화에 따른 토크 변화

### 2.4 결과 비교

6극 9슬롯, 10극 15슬롯의 전동기의 치폭 요크폭의 비율에 따라서 무부하 역기전력, 토크를 비교한 것은 그림 6, 7에 나타내었다. 위의 결과에 따라 설계의 최적 포인트는 무부하 역기전력이 최대가 되고 동일한 전류에서 토크가 최대가 되는 지점이 될 것이다. 등가자기회로법을 이용하여 산정한 치폭과 요크폭과 유한요소해석을 사용하여 산정한 치폭과 요크폭의 비율을 비교한 것은 표 1에 나타내었다.

〈표 1〉 치폭 요크폭 비율 산정 결과

	등가자기회로법	유한요소해석	비교
6극 9슬롯	1.8	1.9	
10극 15슬롯	1.9	1.86	

등가자기회로법을 이용한 치폭 요크폭 값과 유한요소해석을 통해서 산정된 치폭 요크폭을 비교해보면 거의 유사함을 알 수 있다. 따라서 시간과 노력이 많이 필요한 유한요소해석을 이용한 최적화에 비해서 등가자기회로법을 이용하여 치폭과 요크폭을 산정이 유용할 것이다.

### 3. 결 론

전동기 설계시 치폭 요크폭의 결정은 매우 중요하다. 이 설계에 따라서 무부하 역기전력, 토크 밀도등이 포화에 민감하기 때문이다. 따라서 치폭 요크폭 설계를 본 논문에서 제시한 등가자기회로법을 이용하면 유한요소해석을 이용한 최적화를 통해서 결정을 하는것에 비해 많은 시간과 노력을 줄일 수 있다.

### [참 고 문 헌]

[1] Shigeo Morimoto, Yoji Takeda " Machine Parameters and Performance of Interior Magnet Synchronous Motors with Different Permanent Magnet Volume", Electrical Engineering in Japan, Vol.131, No4 2000  
 [2] 반지형, 권순오, 하승형, 홍정표, "매입형 영구자석 동기전동기의 극수 슬롯 수 조합에 따른 특성에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술논문집, pp771-772, 2006  
 [3] Ji-Young, Sang-Ho Lee, Geun-Ho, Lee, Jung-Pyo Hong and Jin Hur, "Determination of Parameters Considering Magnetic Nonlinearity in and Interior Permanent Magnet Synchronous motor", IEEE Trans. Magn, vol. 42, no. 4, pp1303-1306, April, 2006