

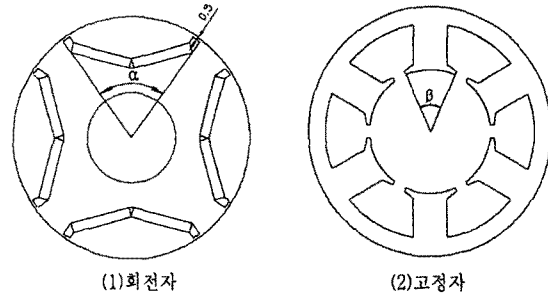
매입형 영구자석 동기전동기의 극 수 슬롯 수 조합에 따른 특성에 관한 연구

반지형, 권순오, 하승형, 홍정표
 창원대학교 전기공학과

Investigation on Characteristics of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor according to Pole-Slot Combination

Ji-Hyung Bahn, Soon-O Kwon, Seung-Hyong Ha, Jung-Pyo Hong
 Changwon National University

Abstract - Recently, Interior Permanent Magnet Synchronous Motor(IPMSM) is widely used in the industry applications such as power train for hybrid vehicles and compressor motors of air-conditioner due to its high power density and wide speed range. In designing motors, pole slot combination should be chosen properly according to the use of the motor and driving method in the initial design stage, accordingly there have been many researches about pole slot combination. As a part of the studies, this paper presents a comparison of characteristics of concentrated winding IPMSM, such as back-ernf, Total Harmonic Distortion(THD) and core losses for each pole slot combination. By comparing the characteristics of each model, this paper can be a guide or reference in determining pole slot combination in the initial design stage.



〈그림 1〉 해석 모델

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motors, 이하 IPMSM)는 마그네틱 토크만을 이용하는 표면 부착형 영구자석 동기전동기(Surface Permanent Magnet Synchronous Motors, 이하 SPMSM)와 달리 d, q축 인덕턴스 차에 의한 릴럭턴스 토크를 사용할 수 있기 때문에 높은 출력 밀도를 가지며 전류 위상제어를 통한 약계자 운전이 용이하므로 광범위한 운전영역을 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 스피들 모터 등 산업 여러 분야에의 적용에 대한 관심이 높아지고 있다[1].

전동기를 설계함에 있어 극 수 슬롯 수의 조합은 전동기의 사용 목적 및 구동방식 등에 따라 초기 설계단계에서 결정되어야 하는 중요한 요소이며 최근 이러한 부분에 대한 연구가 많이 진행되어지고 있다.[2,3]에서는 집중권 방식의 영구자석형 전동기의 권선계수를 크게 이용할 수 있는 권선배치를 소개하고 있으며 [4]에서는 스피들 모터의 성능향상을 위한 극 수 슬롯 수의 결정 방향을 제안하였다.

일반적으로 집중권 방식의 권선을 이용하는 경우 발생하는 역기전력은 분포권으로 했을 때보다 상대적으로 작은 값을 가진다. 그러나 극 수와 슬롯 수의 조합을 적절하게 선택하면 권선계수를 크게 함으로서 권선의 이용률을 높게 할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 연구의 한 부분으로 집중권 방식의 IPMSM 중 높은 권선계수를 가지는 극 수 슬롯 수 조합에 대하여 역기전력 크기와 THD, 철손 등의 특성을 비교 분석하여 IPMSM의 초기 설계 시 합리적인 극 수 슬롯 수 조합의 선택에 대한 방향을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 1은 본 논문에서 다루어지는 기본모델의 회전자와 고정자 형상을 보여주고 있다. 각각의 모델은 영구자석의 피치 α 를 자극피치의 80% 슬롯의 피치 β 를 슬롯 피치의 80%로하여 사용하였으며 영구자석과 철심 사이의 link 부분은 모든 모델에 대하여 0.5mm로 제한하였다.

표 1은 4극에서 16까지의 집중권 방식의 구조를 가지는 극 수 슬롯 수 조합에 대한 권선계수를 보여준다. 각각의 조합에 대한 권선계수는 SPMSM에 대해 공간고조파 이론을 적용하여 얻은 역기전력을 이용하여 구한 값으로 극 수 슬롯 수 조합이 1:3이고 분포권, 전침권 방식의 권선구조를 갖는 모델의 역기전력을 1로 했을 때의 발생하는 역기전력을 비로 나타낸 것이다[5].

논문에서 다루어진 모든 모델은 동일한 체적의 영구자석을 사용하였으며 4극에서 16극까지의 집중권 방식의 모델 중 권선계수가 0.75 이상인 모델을 대상으로 하여 특성을 분석하였다. 각 모델의 철심 재질은 s18을 사용하였으며 축방향 길이는 100mm이다.

〈표 1〉 극 수 슬롯 수 조합에 따른 집중권 모델의 권선계수

극 수 슬롯 수	4	6	8	10	12	14	16
6	0.866		0.866	0.500		0.500	0.866
9	0.617	0.866	0.945	0.945	0.866	0.617	0.328
12			0.866	0.933		0.933	0.866
15			0.711	0.866		0.951	0.951
18				0.735	0.866	0.901	0.945
21						0.866	0.891
24						0.760	0.866

2.2 특성분석

2.2.1 역기전력

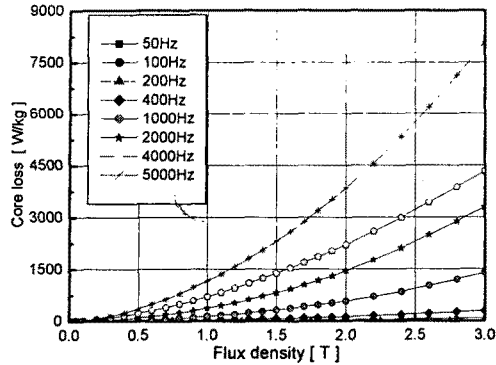
표 2는 각각의 모델의 역기전력과 역기전력의 THD를 유한요소해석(FEM)으로 구한 결과를 보여준다. 각각의 결과는 모든 모델에 대해 1턴 당 발생하는 무부하 상역기전력과 역기전력의 THD를 가장 큰 값을 갖는 모델을 1로 했을 때 환산한 값을 나타낸 것이다.

2.2.2 철손 산정

본 논문에서 해석적으로 철손을 산정하는 방법으로는 철심 재질의 철손데이터와 유한요소법(Finite Element Analysis Method)을 이용하여 고조파를 포함한 왜곡된 자속밀도 변화를 고려할 수 있는 [6,7]의 해석 방법을 사용하였다. 그림 2는 철손 산정에 사용된 철심 재질 s18의 철손데이터이며 각각의 모델에 대하여 2000rpm일 때의 무부하 철손을 산정하고 가장 큰 값을 갖는 모델의 값을 1로 환산하여 표 3에 나타내었다.

〈표 2〉 극 수 슬롯 수에 따른 역기전력 및 THD (Normalized value)

극 수 슬롯 수	항목	4	6	8	10	12	14	16
6	역기전력	1		0.935				
	THD	0.993		0.610				
9	역기전력		0.925	0.957	0.916	0.826		
	THD		0.951	0.262	0.288	0.381		
12	역기전력			0.859	0.762		0.709	0.746
	THD			0.847	0.079		0.262	0.192
15	역기전력				0.81		0.817	0.796
	THD				1		0.278	0.327
18	역기전력					0.773	0.765	0.771
	THD					0.744	0.224	0.361
21	역기전력						0.732	0.731
	THD						0.642	0.143
24	역기전력						0.642	0.707
	THD						0.183	0.621



〈그림 2〉 재질 s18의 철손 데이터

〈표 3〉 극수 슬롯 수에 따른 무부하 철손(Normalized value)

극수 \ 슬롯 수	4	6	8	10	12	14	16
6	0.355		0.350				
9		0.731	0.379	0.357	0.347		
12			0.717	0.406		0.366	0.333
15				0.398		0.761	0.347
18					0.770	0.934	0.468
21						1	0.977
24						0.519	0.508

2.3 특성 비교

극 수와 슬롯 수의 최대공약수의 크기에 따른 무부하 역기전력 THD의 크기의 변화 양상을 각각의 경우에 평균을 구하여 그림 3에 나타내었다. THD의 크기는 극 수와 슬롯 수의 최대공약수가 1일 때 가장 낮게 나타나며 최대공약수의 값이 커질수록 증가하다 6이상에서는 다시 감소하는 양상을 보였다. 이는 [4]에서 소개한 코깅토크 값의 변화 양상과 비슷한 결과를 보였다.

극 수와 슬롯 수에 따른 비교를 표 4에 정리하였다. 각각의 값들은 산정된 철손과 THD의 곱을 무부하 역기전력으로 나눈 값으로 가장 작은 값을 갖는 모델이 좋은 특성을 가진다. 특성 비교 결과 8극9슬롯, 10극9슬롯, 10극12슬롯, 16극12슬롯 모델이 여러 조합들 중 가장 좋은 특성을 보였으며 1000rpm에서 각각의 모델의 1턴에 발생하는 역기전력 파형은 그림 4와 같다. 특성을 보인 모델들의 경우 대체로 극 수 슬롯 수의 최대공약수가 작은 값을 가지고 권선계수가 높은 모델이 좋은 특성을 보임을 알 수 있다.

3. 결 론

전동기의 성능 향상을 위해 극 수 슬롯 수를 적절히 선택함으로써 권선 이용률을 높이고 역기전력의 고조파 또는 코깅토크, 철손의 저감설계에 대한 시간을 줄일 수 있다. 본 논문을 통해 극 수 슬롯 수 조합의 선택에 있어 권선계수가 높고 극 수 슬롯 수의 최대 공약수가 작은 모델을 선택하는 것이 하나의 기준이 될 수 있다는 것을 확인 하였다. 그러나 8극 9슬롯 모델이나 16극 15슬롯 모델과 같이 비대칭적인 권선배치를 가지고 있는 모델의 경우 배어링의 마멸과 소음 발생의 원인이 될 수 있는 불균형한 radial force가 발생하므로[4] 설계 시 이 부분에 대한 검토를 추가해야 할 것이다.

이상의 결과와 더불어 극수가 증가함에 따른 누설로 인한 역기전력의 감소를 최소화하기 위한 적절한 link폭과 돌극비, 토크리플 및 코깅토크에 대한 검토가 이루어 진다면 전동기의 사용목적에 따른 적절한 극 수 슬롯 수 조합의 결정에 있어서 좋은 지표가 될 수 있을 것이다.

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업 (RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다

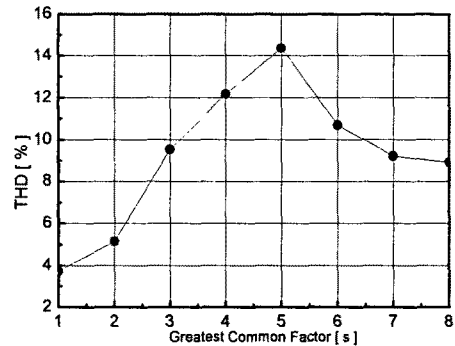
〔참 고 문 헌〕

- [1] Shigeo Morimoto, Yoji Takeda "Machine Parameters and Performance of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with Different Permanent Magnet Volume", Electrical Engineering in Japan, Vol.131, No. 4, 2000
- [2] Magnussen F, Sadarangani C, "Winding Factors and Joule Losses of Permanent Magnet Machines with Concentrated Windings", Electric Machines and Drives Conference (IEMDC'03), vol. 1, pp. 333-339, June 2003.
- [3] Cros J, Viarouge P, "Synthesis of High Performance PM Motors with Concentrated Windings", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 17 Issue: 2, pp. 248-253, June 2002

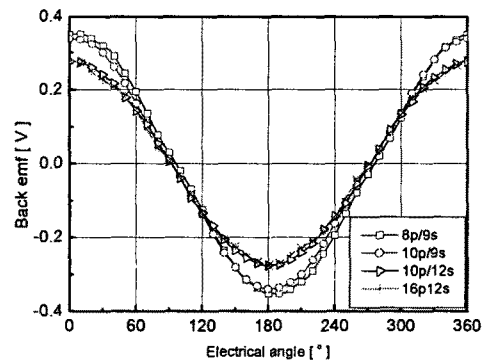
- [4] S.X.Chen, T.S.Low, H.Lin, Z. J. Liu "Design Trends of Spindle Motors for High Performance Hard Disk Drives", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.32, No.5, september 1996
- [5] 권순오, Fang Liang, Sun Tao, 강규홍, 홍정표, "공간고조파 해석을 이용한 brushless 전동기의 공극자속 분포 산정", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B권, pp. 1085-1087, 2004
- [6] Sang-Ho Lee, Ji-Young lee, Jung-Pyo Hong, Jin-Hur, Ha-gyeong Sung, "3D Core Loss Calculation in BLDC Motor made of SMC Material," International Conference on Electrical Machines and System, in CD, 2004
- [7] Hyuk Nam, Kyung-Ho Ha, Jeong-Jong Lee, Jung-Pyo Hong, and Gyu-Hong Kang, "A Study on Iron Loss Analysis Method Considering the Harmonic of the Flux Density Waveform Using Iron Loss Curves Tested on Epstein Samples," IEEE Trans. on Magnetic, pp1472-1475, May, 2003

〈표 4〉 각 모델의 특성분석 (철손×THD/역기전력)

극수 \ 슬롯 수	4	6	8	10	12	14	16
6	0.333		0.228				
9		0.751			0.16		
12			0.717			0.135	
15			0.707	0.491	0.741	0.259	0.143
18						0.273	0.219
21						0.877	0.191
24						0.148	0.446



〈그림 3〉 극 수 슬롯 수의 최대공약수에 따른 THD



〈그림 4〉 8극9슬롯, 10극 9슬롯, 10극12슬롯, 16극12슬롯 모델의

무부하 역기전력