

극 수 와 슬롯 수 조합에 따른 집중권 방식 매입형 영구자석 동기전동기의 Normal Forces 및 설계 파라미터의 비교에 관한 연구

하승형, 권순오, 반지형, 정재우, 홍정표
창원대학교 전기공학과

A Study on Comparison of Normal Force and Design Parameters in IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) with Concentrated Winding according to Pole-Slot Combinations

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

Abstract - Interior Permanent Magnet Synchronous Motor(IPMSM) have many advantages such as high power density, wide speed range and so on. With the IPMSM, miniaturization and energy efficient design can be achieved in comparison with Surface Permanent Magnet Synchronous Motor(SPMSM). In order to secure miniaturization and manufacturing efficiency of the motor, it has concentrated winding, because concentrated winding can reduce the motor volume and make manufacturing to be simple compared with the distributed winding. However, according to the pole-slot combinations motor parameters can be changed and unexpected normal force can be generated. Especially, unbalanced normal force in airgap can cause serious vibration and acoustic problem. Accordingly, in this paper, normal force and parameters variation of concentrated winding IPMSM are investigated according to the pole-slot combinations.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기 전동기(Interior Permanent Synchronous Motor : IPMSM)는 고효율, 고효율의 운전 상태에서 높은 내구성, 제어성, 친환경 특성을 가지므로 다양한 분야에서 사용되고 있다[1]. 특히, IPMSM은 영구 자석에 의한 마그네틱 토크와 d-q축 인덕턴스 차에 의한 릴럭턴스 토크를 확보 할 수 있기 때문에 energy density가 높으며, 전류 위상 제어를 통한 약 계자 운전을 할 수 있기 때문에 저속회전영역에서부터 고속회전영역 까지 고효율 고효율이 요구되는 하이브리드 전기자동차의 전동기와 에어콘 컴프레서용 전동기에 적합하다.

전동기의 권선방식은 일반적으로 집중권 방식과 분포권 방식으로 분류할 수 있다. 집중권 방식은 분포권 방식에 비해서 end coil의 길이가 짧아서 전동기의 체적을 줄일 수 있으며, 권선구조가 간단하여 전동기의 제작 효율을 향상 시킬 수 있는 장점이 있다[2]. 하지만, 집중권 방식은 분포권 방식에 비해서 일반적으로 권선계수가 크지 않기 때문에 동일한 상당 직렬 턴수에 대해서 무 부하 역기전력이 분포권에 비해 낮은 값을 가진다. 그러나 극 수 와 슬롯 수 조합에 따라서 권선계수를 높게 할 수 있기 때문에 집중 권 방식 전동기 초기 설계 시 극 수 와 슬롯 수 선택은 중요한 요소가 된다.

극 수 와 슬롯 수 조합에 따라서 집중권 방식의 영구자석형 전동기는 비대칭적인 권선배치를 가지는 경우가 존재한다. 비대칭적인 권선배치는 3상 권선이 고정자 슬롯에 골고루 분포하지 않고 고정자 슬롯에 집중적으로 상의 권선들이 분포하게 되므로 3상 전류에 의한 공극자속밀도가 비대칭적인 분포를 가지게 되고 비대칭적인 normal force를 발생 시키게 된다. 이러한 비대칭적인 normal force는 시간에 따라 회전하기 때문에 전동기의 소음, 진동 및 베어링의 수명에 큰 영향을 주게 된다[3]. 따라서, 본 논문에서는 집중권 방식의 매입형 영구자석 동기 전동기의 극 수 와 슬롯 수에 따른 전동기의 설계 파라미터 변화와 normal force에 대해서 비교 분석 한 다.

2. 권선계수 및 설계 파라미터 비교

2.1 권선계수 선정

집중권 방식 전동기는 분포권 방식 전동기에 비해 전동기의 체적을 줄일 수 있으며 전동기의 제작 효율을 향상 시킬 수 있는 장점이 있는 반면 권 선계수를 크게 확보하지 못하는 단점이 있다. 집중권 방식의 권선구조를 가지는 IPMSM은 일반적으로 극 수 와 슬롯 수 조합이 2 : 3인 구조로 권선 계수는 0.866으로 크게 확보하지 못하지만 권선계수를 0.951처럼 높게 확보 할 수 있는 극 수 와 슬롯 수 조합도 존재하기 때문에 집중권 방식 전동기의 초기 설계시 극 수 와 슬롯 수 선택은 중요하다. 권선계수를 선정하기 위해서 공간고조파 이론을 이용하여 표면부착형 영구자석 동기 전동기로 역기전력을 계산 하였다[4]. 권선계수는 극 수 와 슬롯 수 조합이 1 : 3 구 조인 분포권 전동기의 전철권 권선방식의 역기전력을 1로 했을 때 극 수 와 슬롯 수 조합에 따른 집중권 방식 전동기의 역기전력을 환산 한 값이다. 권선계수는 4극에서 16극까지 6슬롯에서 24슬롯까지 계산한 값이다.

〈표 1〉 권선계수

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

위의 표를 보면, 극 수 와 슬롯 수 조합이 2 : 3 구조인 경우 권선계수는 0.866이지만 14극 15슬롯, 16극 15슬롯의 경우에는 권선계수가 0.951까지 높 게 나타난다.

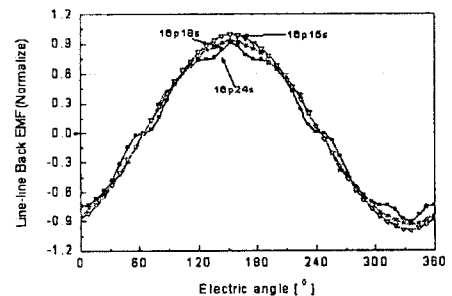
2.2 설계 파라미터 비교

극 수 와 슬롯 수 조합에 따른 파라미터를 비교하기 위해서 16극 모델의 권선계수가 0.866, 0.945, 0.951을 가지는 15슬롯, 18슬롯, 24슬롯 모델의 무 부하 역기전력, Total Harmonic Distortion(THD), 코깅토크, 토크리플, 돌극 비를 Finite Element Method(FEM)을 이용하여 선정 한다. 각 모델의 회전 자형상과 영구자석의 체적은 동일하며 고정자 형상은 치 폭/요크 폭 비율 은 점적율을 동일하게 하기 위해서 1.86, 1.67, 1.73으로 한다.

2.2.1 무 부하 선간 역기전력, THD, 코깅토크 비교

16극 15슬롯, 18슬롯 24슬롯 모델의 무 부하 선간 역기전력과 THD를 비 교한 결과는 그림 1과 표 2와 같다. 16극 24슬롯 모델을 기준으로 했을 때 권선계수가 0.951인 15슬롯 모델이 무 부하 선간 역기전력이 가장 크게 나 타났으며, THD는 가장 낮게 나타났다.

각 모델의 코깅토크를 산정한 결과는 표 2와 같으며 THD의 결과와 마찬가지로 권선계수가 0.951인 15슬롯 모델이 가장 낮게 나타났다. 표 2에 나 타난 결과 중에서 무 부하 선간 역기전력과 코깅토크 값은 15슬롯 모델의 값을 1로 했을 때 환산한 값이다.



〈그림 1〉 무 부하 선간 역기전력 비교

〈표 2〉 무 부하 선간 역기전력, THD, 코깅토크

모 델	16극 15슬롯	16극 18슬롯	16극 24슬롯
선간 역기전력 기본파 (Normalized)	1	0.944	0.865
권선계수	0.951	0.945	0.866
THD(%)	0.71	3.28	9.2
코깅토크 peak-peak (Normalized)	1	2.27	55.27

2.2.2 토크, 토크리플, 돌극비 비교

IPMSM은 식 (1)과 같이 영구자석에 의한 마그네틱 토크와 d-q축 인덕턴스 차에 의한 릴럭턴스 토크를 모두 얻을 수 있다.

$$T = P_n [\psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (1)$$

$$= P_n [\psi_a I_a \cos \beta + \frac{1}{2} (L_d - L_q) I_a^2 \sin 2\beta]$$

위 식에서 P_n 은 극 쌍수, ψ_a 는 영구자석에 의해 전기자 권선에 쇄교하는 자속, i_d 는 d축 전류, i_q 는 q축 전류, L_d 는 d축 인덕턴스, L_q 는 q축 인덕턴스, I_a 는 전기자 전류, β 는 전류위상이다.

16극 15슬롯, 18슬롯, 24슬롯 모델의 토크, 토크리플을 산정하기 위해서 동일 전류 인가 시 최대토크를 발생하는 전류위상에서 토크해석을 하였다. 또한, 각 모델의 릴럭턴스 토크와 마그네틱 토크를 확인하기 위해서 전류위상 0에서 토크 해석을 해서 마그네틱 토크를 산정한 결과는 표 3과 같다. 표 3에 나타낸 마그네틱 토크, 릴럭턴스 토크, 평균토크 값은 15슬롯 모델의 값을 1로 했을 때 환산한 값이다. 토크 해석 결과 각각의 모델의 평균토크는 모두 비슷하지만, 24슬롯 모델의 토크 리플이 가장 크게 나타난다. 릴럭턴스 토크는 24슬롯 모델이 가장 크게 나타나지만, 이에 비해 마그네틱 토크는 많이 확보 하지 못해서 결과적으로 최대토크 전류 위상에서 평균토크는 3가지 모델 모두 비슷하다.

IPMSM은 영구자석에 의한 마그네틱 토크 뿐만 아니라 d-q축 인덕턴스 차에 의한 릴럭턴스 토크를 확보 할 수 있기 때문에 높은 Energy density를 가진다. 또한, 돌극비를 크게 확보할 수 있다면 릴럭턴스 토크를 크게 얻을 수 있다. 그림 2는 전류위상각을 10°에서 80°까지 변화 시키면서 16극 15슬롯, 18슬롯, 24슬롯 모델의 돌극비를 비교한 결과이다. 전류위상각 구간에서 24슬롯 모델의 돌극비가 가장 크게 나타난다.

3. Normal Force

Magnetic forces에 의한 magnetic noise는 고정자에 진동을 유발시킨다. Normal force는 토크를 발생시키기 위한 tangential force가 작용하는 동안 고정자와 회전자 사이에 갠이 당기는 힘으로 magnetic noise의 대부분의 원인이 된다. 일반적으로 회전자에서 normal force는 서로 상쇄지만 그림 3의 16극 15슬롯 모델과 같이 권선배치가 비대칭적인 구조인 경우에는 normal force가 서로 상쇄되지 않으며 전동기 운전 시 normal force가 시간에 따라서 회전하게 된다[3].

Normal force는 FEM을 이용하여 부하 시 공극자속밀도를 구한 후 식 (2)와 같이 Maxwell Stress method 방법을 이용하여 산정 한다.

$$\sigma(\theta, t) = \frac{1}{2\mu_0} B_n(\theta, t)^2 \quad (2)$$

위 식에서 σ 는 normal force density, θ 는 angular coordinate, t 는 시간, μ_0 는 공기의 투자율, B_n 은 공극 자속밀도 중에서 normal 성분이다. 철심의 투자율이 공극의 투자율보다 많이 크기 때문에 공극에서 자속은 고정자와 회전자 사이에서 대부분 수직하게 흐른다고 가정하여 공극자속 밀도 중에서 tangential 성분은 무시한다.

그림 3의 16극 15슬롯과 24슬롯 모델의 normal force 분포를 보면 16극 24슬롯 모델은 권선배치가 대칭적이므로 normal force의 분포가 대칭적이지만, 16극 15슬롯 모델의 normal force 분포는 비대칭적으로 분포하고 있다. 또한, 전기각으로 한 주기 토크 해석을 해서 normal force를 벡터적으로 합성 했을 때 normal force의 합력은 그림 4와 같다. 회전자 축이 받는 normal force 합력의 방향은 회전하며 전기각 192°마다 반복하므로 회전자 1회전당 15(cycle/rev)로 회전하는 결과가 나타난다. 이와 같이 권선배치가 비대칭적인 구조를 가지는 경우 normal force로 인해 고정자의 진동과 소음을 유발하게 되며 베어링의 수명에 영향을 줄 것으로 판단된다.

4. 결 론

집중권 방식의 전동기는 극 수와 슬롯 수 조합에 따라 권선계수가 큰 조합을 찾을 수 있다. 권선계수가 큰 극 수와 슬롯 수 조합 중 16극 15슬롯은 권선계수가 낮은 18슬롯, 24슬롯에 비해 무 부하 역기전력을 크게 확보 할 수 있고, THD, 코강도크는 가장 낮은 결과가 나타난다.

토크 해석 결과 16극 15슬롯 모델이 권선계수가 가장 커서 마그네틱 토크가 가장 크게 나타난 반면, 돌극비가 가장 낮아서 릴럭턴스 토크는 가장 낮게 나타난다. 그러므로 최대토크 전류 위상각에서 평균토크는 3가지 모델 모두 비슷하다.

권선계수가 큰 16극 15슬롯 모델은 16극 18슬롯, 24슬롯 모델에 비해 무 부하 역기전력, THD, 코강도크가 모두 가장 좋은 결과가 나타나지만, 권선배치가 비대칭적이므로 Magnetic noise에 큰 영향을 미치는 normal force가 비대칭적으로 발생하여 전동기의 소음 및 진동을 유발하며, 베어링의 수명에 영향을 줄 것으로 판단된다. 그러므로 16극 15슬롯 보다는 16극 18슬롯 모델이 권선계수도 0.945로 비교적 크기 때문에 무 부하 역기전력을 크게 확보 할 수 있으며, THD 및 코강도크도 24슬롯 모델에 비해 낮게 할 수

있다. 또한, 권선배치가 대칭적인 구조를 가지므로 전동기의 소음 및 진동을 유발하는 normal force 역시 서로 상쇄시킬 수 있어서 16극 모델에 대해서 비교한 3가지 모델 중에서 가장 좋은 극 수와 슬롯 수 조합이라고 판단된다.

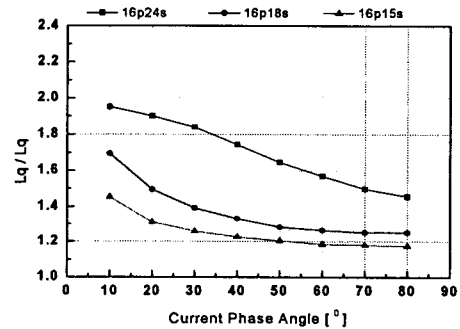
본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다

[참 고 문 헌]

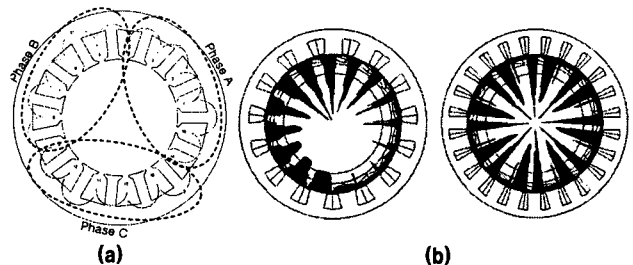
- [1] Shigeo Morimoto, Yoji Takeda "Machine Parameters and Performance of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with Different Permanent Magnet Volume", Electrical Engineering in Japan, Vol.131, No. 4, 2000
- [2] Freddy Magnussen, Chandur Sadarangani, "Winding Factors and Joule Losses of Permanent Magnet Machines with Concentrated Windings", Electric Machines and Drives Conference(IEMDC'03), vol.1, pp.333-339, June 2002
- [3] Maliti K.C., Sadarangani C., "Modelling Magnetic Noise in Induction Machines", International Conference on Electrical Machines, pp. 406-410, September 1997, Cambridge, U.K.
- [4] 권순오, Fang Liang, Sun Tao, 강규홍, 홍정표, "공간고조파 해석을 이용한 brushless 전동기의 공극자속 분포 산정", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B권, pp. 1085-1087, 2004

<표 3> 토크해석 결과

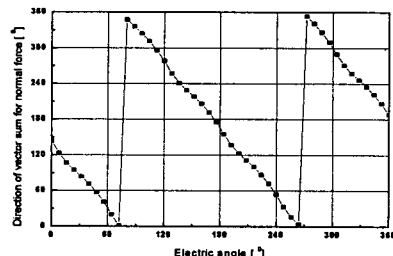
	16극 15슬롯	16극 18슬롯	16극 24슬롯
마그네틱 토크 (Normalized)	1	0.924	0.860
릴럭턴스 토크 (Normalized)	1	2.81	6.52
최대토크 전류위상 (°)	16	16	24
평균토크 (Normalized)	1	0.958	0.963
토크리플(%)	6.3	5.02	8.3



<그림 2> 돌극비 비교



<그림 3> (a) 16극 15슬롯 권선배치 (b) 16극 15슬롯, 24슬롯 normal force 분포



<그림 4> 회전자 축이 받는 normal force 합력의 방향