

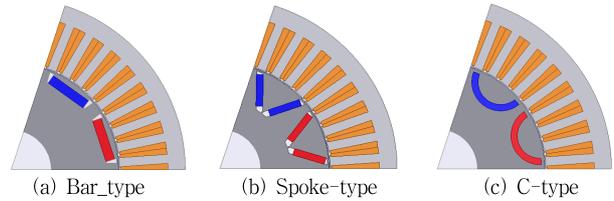
10극 45슬롯 고효율 밀도형 IPMSM의 영구자석 형상 변화에 따른 특성 비교 연구

정동훈*, 김승주**, 이기덕*, 이 주*
 한양대학교*, 한국기계전기전자시험연구원**

A comparative study on the characteristic of 10 poles 45 slots IPMSM having High Power Density by Permanent Magnet Shape

Dong-Hoon Jung*, Seung-Joo Kim*, Ki-Doek Lee*, Ju Lee*
 Hanyang University*, Korea Testing Certification**

Abstract - 최근 에너지 절약 정책으로 인하여 기계, 가전, 자동차 및 로봇 응용 산업분야 등에서 고효율, 고효율 및 고성능의 전동기를 요구한다. 매입형 영구자석 동기 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)는 타 전동기와 비교하여 출력밀도가 높고 기계적으로 강인한 회전자 구조를 가지는 등 많은 장점을 가지고 있어 모든 산업에서 널리 사용되고 있으며, 그에 따른 연구도 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 영구자석 동기 전동기 중 10극 45슬롯 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)의 영구자석 형상변화에 따른 특성을 비교 연구하고 전동기의 고효율밀도를 위한 영구자석의 형상을 제시한다.



<그림 1> IPMSM 설계 모델

1. 서 론

최근 화석에너지 고갈과 함께 화석에너지 사용 시 방출되는 탄소에 의한 지구온난화와 같은 환경오염문제가 대두되고 있다. 이 문제를 해결하고자 내연기관에 의존하던 동력원을 전동기로 대체하고자 다양한 산업분야 및 연구기관에서 전동기 연구가 활발히 이루어지고 있다.

특히 영구자석형 전동기는 산업에서 요구하는 고효율, 고효율 고성능을 만족하기 때문에 영구자석 전동기에 관한 연구는 오래전부터 진행되어 왔다. 그 중 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)는 영구자석에 의해 발생하는 마그네틱 토크와 d, q축 인덕턴스 차에 의해 발생하는 릴럭턴스 토크를 함께 사용하므로 높은 출력 밀도를 가지며 이로 인해 전동기 사이즈 축소 및 경량화가 가능하다. 표면부착형 동기 전동기(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor)의 경우, 원심력에 의한 자석 비산을 방지하기 위해 외경에 비자성체의 보호관이 설치되지만, IPMSM은 영구자석을 철심에 매입하여 설계하므로 기계적으로 강인한 회전자 구조로 되어있어 보호관이 불필요하다. 그에 따라 등가 공극이 작게 되고, 같은 양의 자속을 사용한 경우의 SPMSM과 비교하면 퍼미언스가 높게 되므로, 자석 동작점의 자속밀도를 향상 시킬 수 있다. 또한, 전류 위상제어를 통한 약제자 운전이 가능하므로 광범위한 운전영역을 가지는 장점이 있다. IPMSM은 전동기 특성이 회전자에 매입된 영구자석의 형상에 의존하게 된다. 본 논문에서는 영구자석이 Bar-type, V-type, C-type의 형상으로 매입된 3개의 IPMSM에 대하여 유한요소 해석을 수행하고 역기전력 및 토크, 토크리플 등의 출력특성을 비교 분석하였다.

2. 본 론

2.1 IPMSM 전동기 설계 사양

Bar-type, V-type, C-type의 세 모델은 190kW급 10극 45슬롯 IPMSM으로 <표 1>은 정격속도 4000rpm에서의 요구토크를 나타낸다.

<표 1> 전동기 설계 목표 사양

설계 사양		
출력	190	[kW]
요구토크@정격속도	465@4000	[Nm@rpm]

190kW급 전동기를 포함한 구동 시스템에서 DC-Link단의 배터리 전압을 680V라고 설정하고 방전되어 최소가 되는 전압 600V를 기준으로 설계하여 SVPWM 제어 방식을 고려하면 상 전압의 제한치는 346V가 된다.

2.2 설계 모델

전동기의 회전자에 매입된 영구자석의 형상에 따른 3개의 설계 모델을 <그림 1>에 나타내었다. (a)는 영구자석이 Bar-type, (b)는 V-type, (c)는 C-type으로 설계된 모델이다.

<표 2> IPMSM 모델 사양

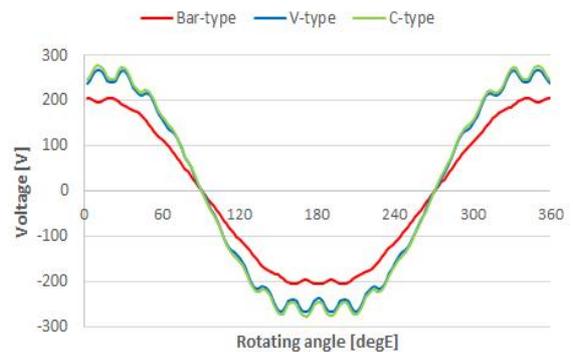
	설계 모델	단 위
극수	10	
슬롯수	45	
고정자외경	260	mm
회전자외경	160	mm
공극길이	1	mm
적층길이	160	mm
전류밀도	20	A/mm ²
영구자석(극당너비)	240	mm ²

<표 2>는 설계 모델의 상세사양을 보여주고 있다. 세 모델은 <표 2>에 나타난 모델 사양을 동일하게 적용하여 전동기 사이즈와 영구자석 사용량 및 재질, 극효율은 동일하게 하고 마그넷 형상만 <그림 1>과 같이 Bar-type, V-type, C-type으로 다르게 적용하였다.

2.3 IPMSM의 특성 해석 및 분석

2.3.1 역기전력 특성 비교

정격속도 4000rpm에서 역기전력 파형을 <그림 2>에 나타내었다.

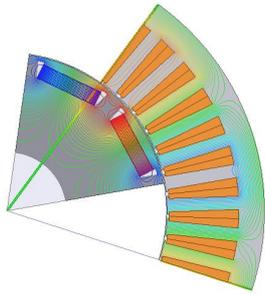


<그림 2> IPMSM 역기전력

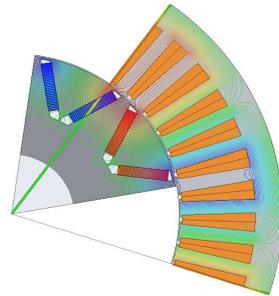
Bar-type, V-type, C-type으로 매입한 세 모델의 역기전력을 비교해보면, Bar-type은 151.59Vrms, V-type은 199.9Vrms, C-type은 205.99Vrms로 C-type으로 매입한 IPMSM의 역기전력이 가장 크다.

2.3.2 Flux line 비교

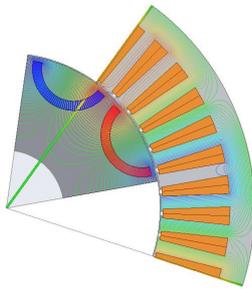
<그림 3>은 세 모델의 Flux line을 나타낸다. (a)는 영구자석이 Bar-type, (b)는V-type, (c)는 C-type으로 매입한 모델의 무부하시 Flux line이다.



(a) Bar-type



(a) V-type



(a) V-type

<그림 3> IPMSM의 Flux line

세 모델의 무부하시 Flux line을 비교해보면, V-type, C-type으로 매입하는 경우 Bar-type에 비해 자속을 더욱 집중시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 Flux line을 통하여 영구자석을 C-type으로 매입하는 것이 자속의 누설을 고려하였을 때, V-type에 비해 더욱 유리하다는 것을 알 수 있다.

2.3.3 토크특성 비교

IPMSM의 전체 토크는 식(1)과 같이 영구자석에 의한 마그네틱 토크와 d-q축 인덕턴스 차에 의한 릴럭턴스 토크의 합이다.

$$T = P_n \Psi_a i_q + P_n (L_d - L_q) i_d i_q \quad (1)$$

위 식에서 P_n 은 극쌍수, Ψ_a 는 영구자석에 의해 전기자 권선에 쇄교하는 자속, i_d 는 d축전류, i_q 는 q축전류, L_d 는 d축 인덕턴스, L_q 는 q축 인덕턴스이다.

<표 3>은 550A 동일한 전류크기에서 세 모델의 최대토크가 발생하는 전류의 위상각을 나타낸다. 정격속도 4000rpm에 대해서 세 모델에 <표 3>에 나타낸 전류 및 전류위상각을 적용하여 FEM해석을 수행하였다.

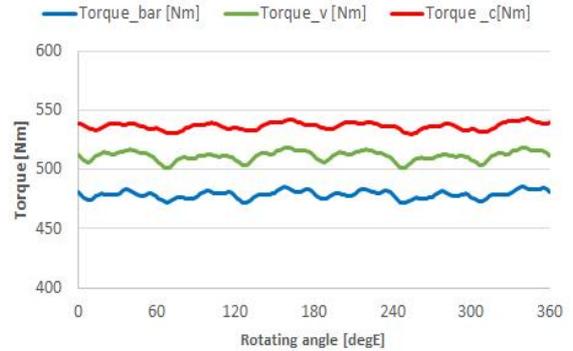
<그림 3>은 Bar-type, V-type, C-type으로 매입한 IPMSM의 토크 파형이다.

<표 4>는 세 모델에 대한 토크 및 토크리플이며, <표 5>에서는 손실과 효율 및 출력 밀도를 나타내었다. <표 4>의 토크, 토크리플 과 <표 5> 손실과 효율 및 출력 밀도를 통하여 Bar-type, V-type, C-type으로

매입한 세 모델에 대하여 출력을 비교하였다.

<표 3> 전류 및 전류 위상각

	Bar-type	V-type	C-type	단위
전류	550			A
전류 위상각	38	41	37	deg



<그림 3> IPMSM 토크

<표 4> 토크, 토크 리플 비교

	Bar-type	V-type	C-type	단위
토크	475.2	507.81	532.89	Nm
토크리플	14.06	17.23	12.64	Nm
비교	100	106.9	112.1	%

Bar-type, V-type, C-type으로 매입한 세 모델의 토크를 비교해보면, Bar-type은 478.2Nm, V-type은 507.84Nm, C-type은 532.89Nm로 C-type으로 매입한 IPMSM의 토크가 가장 크다.

<표 5> 손실 및 효율 비교

	Bar-type	V-type	C-type	단위
동손	7713.78			W
철손	1358	1456	1429	W
영구자석 와전류손	122.31	46.44	144.13	W
출력밀도	3.75	4.0	4.2	W/mm ³
효율	95.58	95.84	96	%

3. 결 론

본 논문에서는 영구자석의 형상에 따른 190kW급 10극 45슬롯 IPMSM의 특성을 알아보았다. 영구자석의 형상은 Bar-type, V-type, C-type으로 비교하였다. 극효율과 영구자석 사용량을 동일하게 적용하여 세 모델을 비교하였을 때, Bar-type으로 매입된 IPMSM 기준, V-type은 106.9%, C-type은 112.1%로 토크를 발생하며, V-type과 C-type으로 영구자석이 매입된 IPMSM이 Bar-type으로 매입된 IPMSM보다 더 높은 출력밀도를 가진다는 것을 확인하였다.

효율 또한 Bar-type의 형상을 가진 IPMSM보다 상대적으로 V-type, C-type으로 영구자석을 매입하는 것이 더 향상된다는 것을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김원호, "EV 견인용 IPM 동기전동기의 NE-Map 기반 설계", 2011
- [2] 이재준, "영구자석 형상에 따른 120kW급 IPMSM 특성 연구", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 추계학술대회 논문집, 21-23, 2010. 10
- [3] 한양대학교 에너지변환연구실, "매입자석 동기모터의 설계 및 제어"
- [4] Lusu Guo, "Effects of magnet shape on torque characteristics of Interior Permanent Magnet machines", Electric Ship Technologies Symposium, ESTS 2009, 97-97, 2009