

영구자석 형상에 따른 전기 스쿠터용 IPMSM 특성 고찰

김미정, 김원호, 장익상, 이기덕, 이재준, 한정호, 정태철, 채웅찬, 이주
한양대학교

Study of IPMSM characteristic for electric scooter according to the shape of permanent magnet

Mi-Jung Kim, Won-Ho Kim, Ik-Sang Jang, Ki-Doek Lee, Jae-Jun Lee, Jeong-Ho Han, Tae-Chul Jeong, Woong-Chan Chae, Ju Lee
Hanyang University

Abstract - 최근 레저와 이동수단으로 전기를 이용한 스쿠터와 자전거가 많이 연구 개발되고 있다. 이러한 어플리케이션에 사용되는 모터의 경우는 설계 및 제어 비용이 저렴하면서도 소음이 작고, 출력밀도와 효율이 요구가 된다. 대부분의 경우 BLDC가 전동기 및 제어기 제작 단가가 저렴하여 자전거 및 스쿠터의 전기 추진용으로 많이 사용되었지만 소음 및 효율등의 성능면에서는 요구사항을 만족하지 못하고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 현재 출력밀도와 효율이 높은 IPMSM이 많이 연구 개발되고 있다. 본 논문에서는 전기 스쿠터용 IPMSM의 영구자석 형상에 따른 특성을 연구하였다.

1. 서 론

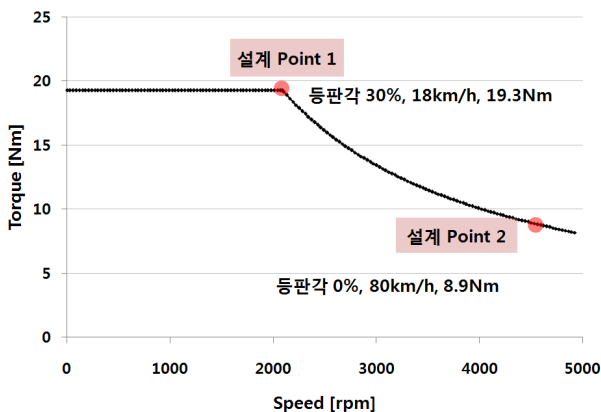
최근 레저와 이동수단으로 전기를 이용한 스쿠터와 자전거가 많이 연구 개발되고 있다. 이러한 어플리케이션에 사용되는 모터의 경우는 설계 및 제어 비용이 저렴하면서도 소음이 작고, 출력밀도와 효율이 요구가 된다. 대부분의 경우 BLDC가 전동기 및 제어기 제작 단가가 저렴하여 자전거 및 스쿠터의 전기 추진용으로 많이 사용되었지만 소음 및 효율등의 성능면에서는 요구사항을 만족하지 못하고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 현재 출력밀도와 효율이 높은 IPMSM이 많이 연구 개발되고 있다. 본 논문에서는 전기 스쿠터용 IPMSM의 영구자석 형상에 따른 특성을 연구하였다.

2. 본 론

2.1 목표 사양 및 제한 조건

최고 등판각 30%에서 18km/h로 운전하며 최대 80km/h의 속도로 운전 할 수 있는 전동기를 설계하기 위해서 부하토크를 고려하여 표 1과 같이 설계 사양을 결정하였다. 그림 1은 기어비를 고려하여 실제 motor에서의 속도-토크 곡선을 나타내고 있다.

배터리 전압의 경우 제어기 소자에 의한 전압 강하분을 고려하여 10% 마진을 두며 DC-link 단에 직결되며 SVPWM 방식을 고려하면 실제 모터 상 전압의 제한치는 36.37V가 된다. 전기자전거나 스쿠터의 경우 전기 자동차에 비해 전동기가 차지하는 무게의 비율이 크다. 따라서 전동기의 크기를 최소화하여 전체 무게를 줄이기 위해 고정자 외경과 적층길이 250mm와 30mm로 제한을 두었다.



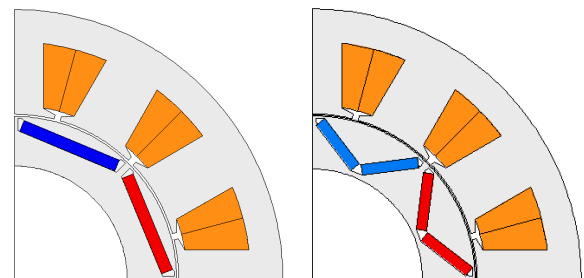
<그림 1> IPMSM 속도-토크 곡선

<표 1> 목표 사양 및 제한 조건

사양	값	단위
출력 / 기저속도	4.2 / 2088	kW / rpm
토크 @ 기저속도	19.3	Nm
토크 @ 최대속도	8.9	Nm
배터리 전압	70	Vdc
IGBT 소자 허용 전류	240	A
PWM 방식	SVPWM	
동작 온도	150	℃
고정자 외경 / 적층길이 제한	250 / 30	mm / mm
최대 전류 밀도	5.5	A/mm ²
점적률	45	%
전기 강판	S18	

2.2 해석 모델

영구자석 형상에 따른 IPMSM의 특성을 알아보기 위해 그림 2과 같이 바 타입과 V타입으로 설계를 진행하였다. 영구자석 형상에 따른 특성을 알아보기 위해 각 타입의 영구자석 사용량은 동일하게 하여 설계하였으며 고정자의 형상 및 권선 사양도 동일하게 하여 결과를 확인하였다.



(a) 바 타입 (b) V 타입

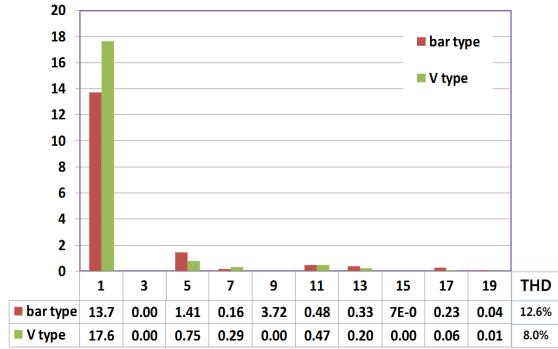
<그림 2> 해석 모델

<표 2> IPMSM 설계 치수

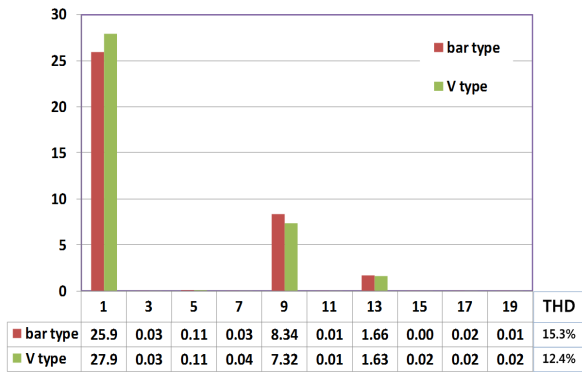
항목		바 타입	V 타입	단위
고정자	외경	250		mm
	내경	153		mm
	적층길이	30		mm
	슬롯수	312		
	턴수	17		
	점적률	45		%
회전자	공극	1		mm
	영구자석 길이	48	26.5 * 2	mm
	영구자석 두께	5.5	5	Poles

2.3 특성 분석

그림 3은 영구자석 형상에 따른 무부하 역기전력 고조파 성분을 나타내고 있다. V타입의 경우 바 타입과 양의 영구자석을 사용하더라도 무부하 역기전력 기본파 성분의 값이 더 커지는 것을 확인 할 수 있다. 또한 THD의 경우 180 차수 까지 고려하였을 때 바 타입의 경우 12.6%, V 타입의 경우 8.0%로 V 타입이 고조파 성분이 적은 것으로 나왔다. 특히 V 타입의 경우 바 타입보다 기본파 대비 5고조파 성분의 감소 비율이 큰 것을 확인 할 수 있다. 그림 4는 최고속도에서의 유기기전력 고조파 성분을 나타내고 있다. 마찬가지로 바 타입의 영구자석인 경우가 THD가 높게 나타남을 확인 할 수 있다.



〈그림 3〉 무부하 역기전력 고조파 분석



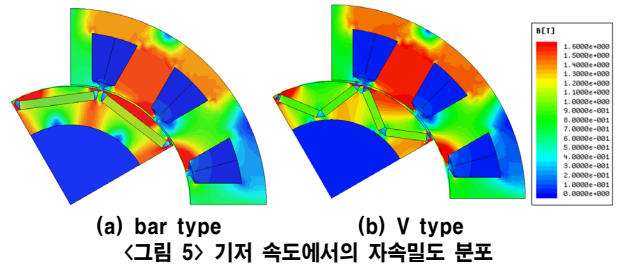
〈그림 4〉 최고속도에서의 유기기전력 고조파 분석

〈표 3〉 영구자석 형상에 따른 토크 및 토크리플

	코깅 토크 [Nm]	기저속도		최고속도	
		평균 토크 [Nm]	토크 리플 [%]	평균 토크 [Nm]	토크 리플 [%]
bar type	1.61	18.8	14.9	10.6	48.2
V type	2.25	20.0	11.5	10.8	28.2

〈표 4〉 영구자석 형상에 따른 손실 및 효율

	기저속도			최고속도		
	철손 [W]	와류손 [W]	효율 [%]	철손 [W]	와류손 [W]	효율 [%]
bar type	83	38	94.91	197	221	90.44
V type	124	58	93.85	208	305	88.43



〈그림 5〉 기저 속도에서의 자속밀도 분포

표 3은 영구자석 형상에 따른 토크 및 토크 리플을 나타낸다. V 타입이 같은 영구자석을 사용하더라도 실제 유효 길이가 더 길며 또한 자속을 중앙으로 모아주어 공극 자속밀도의 최대값이 바 타입보다 높게 나타나게 된다. 그러한 이유로 코깅 토크의 경우 V 타입이 더 크게 나타나게 되나 기저속도나 최고속도에서는 고조파 성분이 많이 함유된 바 타입에서 더 높게 나타나고 있다. 기저속도에서의 평균토크의 경우 V 타입은 요구 토크를 만족하는 반면 바 타입의 경우 요구 토크보다 낮은 값을 갖는다. 이는 같은 이유는 앞에서 언급한 것과 같이 영구자석량을 사용하더라도 실제 자속을 만들어내는 영구자석의 길이가 바 타입이 더 작아 토크를 발생시키는 자속이 작게 되며, 이로 인해 마그네틱 토크가 감소하여 평균토크가 낮게 나오게 된다. 바 타입의 경우 요구 토크를 만족시키기 위해 영구자석의 두께를 증가시키거나 극효율을 증가시킬 수 있으나 이러한 경우 V 타입보다 많은 영구자석을 사용하게 된다.

표 4는 영구자석 형상에 따른 손실 및 효율을 나타내고 있다. 상대적으로 영구자석에 의한 자속량이 작은 바 타입의 경우 포화 레벨이 낮아 철손이 V 타입보다 낮게 나타나게 되며 영구자석에서의 와류류 손실의 경우 길이가 긴 V 타입에서 높게 나타난다. 이러한 이유 때문에 바 타입의 IPMSM이 V 타입 IPMSM 보다 높은 효율 특성을 보인다.

그림 5는 운전온도 20℃, 기저속도에서의 각 형상별 자속밀도를 나타내고 있다.

3. 결론

본 논문에서 전기 스쿠터 추진용 IPMSM의 영구자석 형상에 따른 특성을 알아보았다. 영구자석의 형상은 V 타입과 바 타입으로 하여 비교하였으며 각 타입별 영구자석 사용량은 동일하게 하였다. 고정자의 형상과 권선 사양 및 입력 전류를 동일하게 하여 두 모델의 특성을 보면 V 타입의 무부하 역기전력 및 최고속도에서의 유기기전력의 고조파 특성이 바 타입보다 좋게 나왔으며 이는 기저속도 및 최고속도에서의 토크 리플에도 영향을 주어 V 타입의 IPMSM이 바 타입 IPMSM 보다 토크 리플이 낮게 나오는 것을 확인 하였다. 반면 영구자석의 사용량은 동일하더라도 실제 공극자속밀도에 크게 영향을 미치는 영구자석의 길이가 V 타입이 바 타입보다 더 길기 때문에 역기전력 및 토크 레벨에서 더 높게 나오는 것을 확인하였다. 낮은 자속 레벨에 의해 철손, 와류류 손실이 적은 바 타입의 IPMSM이 V 타입보다 효율이 높게 나타났다. 두 모터의 효율이 1~2% 차이가 나나 동일 출력을 내기 위한 영구자석 사용량과 고조파 영향에 의한 토크 리플 등을 비교해 볼 때 V 타입의 IPMSM이 더 적합하다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 10033217)

[참고 문헌]

- [1] 한양대학교 에너지변환연구실, “매입자석 동기모터의 설계 및 제어”, 2007
- [2] Sung-II Kim, etc., “Optimization for reduction of torque ripple in interior permanent magnet motor by using the taguchi method”, IEEE Trans. on magnetics, vol. 41, no.5, pp. 1796~1799, 2005
- [3] Yukio Honda, Tomokazu Nakamura, Toshiro Higaki, Yoji Takeda, “Motor design consideration and test results of an interior permanent magnet synchronous motor for electric vehicles”, IEEE Industry Applications Society, Annual Meeting, pp. 75~82, 1997