

PMA-SynRM의 출력 및 손실특성 비교분석

정운호*, 정상용*
 동아대학교 전기공학과*

A Comparative Analysis of the Output and Losses of the PMA-SynRM

Yun-Ho Jeong*, Sang-Yong Jung*
 Department of Electrical Engineering, Dong-A University*

Abstract - 본 논문에서는 PMA-SynRM과 IPMSM의 출력 및 손실 특성 비교분석을 수행하였다. 비교분석을 위한 모델을 선정하여 모델별 유한요소법해석을 통해 성능 및 손실특성 해석을 수행하고, 제어정수 추출을 통해 출력특성곡선을 유도하여 전동기의 각 운전영역에서의 특징을 비교분석한다.

1. 서 론

전기자동차는 배터리의 에너지밀도의 제한으로 내연기관 자동차에 비해 일충전 주행거리가 짧아 높은 성능의 구동시스템이 요구되어진다. 희토류자성체가 포함된 영구자석전동기는 출력밀도와 효율이 높다. 특히 희토류 자성체를 사용한 매입형영구자석동기전동기(IPMSM)는 구조적인 안전성과 톨릭턴스 토크를 포함한 높은 토크밀도로 인해 전기자동차용 구동모터로 적합하다.

하지만 희토류물질의 매장량이 몇몇 국가에 집중되어있어 희토류자성체의 가격이 비싸고, 안정적인 공급에 대한 우려가 있다. 또한, 영구자석전동기의 자속은 영구자석으로부터 공급받으므로 약자속제어시 자속 크기의 제어에 어려움이 존재한다. 따라서 영구자석 사용량을 저감하면서 IPMSM과 같은 높은 성능을 낼 수 있는 전동기의 개발의 필요성이 제기되었다.

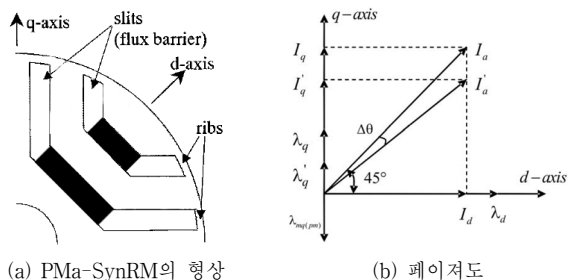
한편, 동기 톨릭턴스 전동기(SynRM)는 영구자석을 사용하지 않아 IPMSM에 비해 낮은 성능을 나타낸다. 하지만 SynRM의 자속은 d축전류에 비례하므로 d축 전류 제어에 의한 적절한 자속 제어를 통해 효율을 향상시킬 수 있어서 고속의 운전이 유리하다.[1] 또한 SynRM의 회전자에 적절한 영구자석의 추가로 q축 자속을 상쇄시켜 정동력 영역을 더 확대시킬 수 있으며, 토크밀도를 향상시킬 수 있다. 이처럼 SynRM의 회전자에 영구자석을 추가한 전동기를 PMA-SynRM(Permanent Magnet assisted Synchronous Reluctance Motor)이라한다.[2]

본 논문에서는 PMA-SynRM의 특성을 분석하기위해 IPMSM과의 출력 및 손실 특성을 비교분석한다. IPMSM 모델의 고정자 형상 및 사이즈와 전류밀도 등의 조건을 같게 하여 회전자 형상변화 및 자석 사용량에 의한 특성만을 비교한다. 우선, SynRM 모델을 설계 하여 IPMSM의 자석 사용량의 비율별 PMA-SynRM모델을 선정한다. 유한요소법(Finite Element Method)을 사용하여 전동기별 성능특성 및 손실특성 해석을 수행한다. 아울러 제어정수를 추출을 통해 출력특성곡선을 그려 운전영역별 특징에 대해 비교한다.

2. 본 론

2.1 PMA-SynRM 모델링

<그림 1>은 PMA-SynRM형상 및 회전자 기준의 d-q축으로 표현한 페이저도를 나타내고 있다. PMA-SynRM의 q축은 자속장벽의 끝부분으로 인덕턴스가 최소가 되고, d축은 q축으로부터 전기각 90°에 해당하는 자속이 자속장벽을 따라 흐르는 부분으로 인덕턴스가 최대가 된다.



<그림 1> PMA-SynRM의 형상 및 페이저도

d-q 좌표축을 이용하여 고정자의 입력전류를 d축 전류와 q축전류로 나누어 나타낼 수 있다.

$$I_d = I_a \cos \gamma, \quad I_q = I_a \sin \gamma \quad (1)$$

d-q 좌표축으로 표현한 쇠교자속과 전압은 아래 식 (2)와 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_d = L_d I_d, \quad \lambda_q = L_q I_q - \lambda_{PM} \quad (2)$$

$$V_d = -\omega_r (L_q I_q - \lambda_{PM}), \quad V_q = \omega_r (L_d I_d) \quad (3)$$

PMA-SynRM은 자석에 의한 토크와 인덕턴스 차에 의한 톨릭턴스토크로 구분할 수 있다. 자석에 의한 자속과 전류에 의한 자속을 통합하여 d축과 q축 쇠교자속으로 표현한 전자기적인 토크는 다음 식 (4)와 같다.

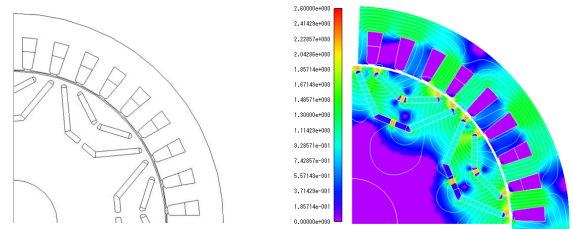
$$T = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{PM} I_d + (L_d - L_q) I_d I_q) \\ = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_d I_q - \lambda_q I_d) \quad (4)$$

위 식(4)를 통해서 PMA-SynRM의 전자기적인 토크는 동기전동기와 같음을 확인 할 수 있다.

2.2 Pma-SynRM 설계

2.2.1 IPMSM 모델의 사양

아래 <그림 2>는 성능 비교를 위해 선정된 IPMSM 모델의 형상 및 자속분포를 나타내고 있다.



(a) IPMSM 모델의 형상 (b) IPMSM 모델의 자속분포

<그림 2> IPMSM 모델의 형상 및 자속분포

IPMSM의 사양은 아래 <표 1>과 같다.

<표 1> IPMSM 사양

구 분	사 양
정격 출력 / 정격 토크	50 kW / 132 Nm
정격속도 / 최대 속도	3600rpm / 7500 rpm
극 / 슬롯	8극 / 36슬롯
전류 밀도	7.2Arms/mm ²
영구 자석	NdFeB
권선 방식	분포권

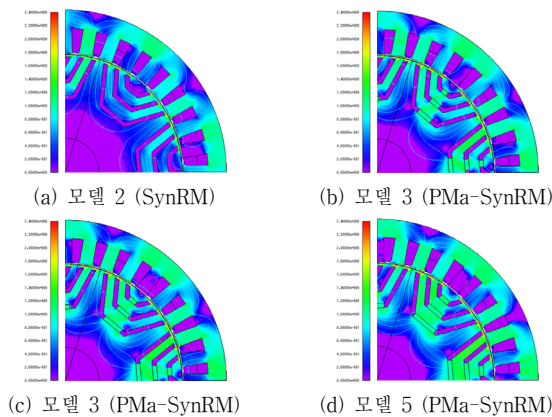
2.2.2 Pma-SynRM 모델 선정

본 논문에서는 PMA-SynRM 모델을 선정하기 전 SynRM 모델에 대한 설계가 선행되었다. SynRM은 IPMSM과 사이즈 및 고정자 형상을 동일한 조건으로 하여 회전자 형상만을 변경하였다. PMA-SynRM 모델은 SynRM 모델의 형상을 기본으로 하여 자석을 1층 layer에서 3층 layer 까지 4:7:10의 비율로 장벽 가운데 배치하였다. 자석은 IPMSM과 같은 NdFeB를 사용하였으며, 사용량은 IPMSM 대비 각각 30%, 40%, 50%로 하였다. 선정된 각 모델별 유형과 자석 사용량을 <표 2>와 같다.

<표 2> 모델별 유형 및 자석 사용량

모델	유형	극당 자석 면적 (IPMSM대비)
1	IPMSM	268.8mm ² (100%)
2	SynRM	0mm ² (0%)
3	PMA-SynRM	80.64mm ² (30%)
4	PMA-SynRM	107.52mm ² (40%)
5	PMA-SynRM	134.4mm ² (50%)

<그림 3>은 모델 2, 3, 4, 5의 형상 및 자속분포를 나타내고 있다. <그림 2>의 IPMSM과 비교하여 자속의 흐름의 차이를 확인할 수 있다.



<그림 3> 모델별 형상 및 자속분포

2.3. PMA-SynRM 특성 비교분석

2.3.1 성능특성 비교분석

각 모델별 성능 특성을 비교하기 위하여 각 모델의 base point에서의 토크특성과 최대속도 동작점 7500rpm에서 역기전력 해석을 수행하였다.

<표 3> 모델별 성능특성 해석결과

모델	평균 토크	평균토크대비	역기전력
1	139.2943578 [Nm]	3.2981 [%]	240.75Vrms @ 7500rpm
2	49.18901 [Nm]	11.69531 [%]	-
3	77.6918 [Nm]	7.06494 [%]	44.3827Vrms @ 7500rpm
4	87.77331 [Nm]	6.14785 [%]	70.426Vrms @ 7500rpm
5	97.91374 [Nm]	5.256838 [%]	97.4856Vrms @ 7500rpm

자석사용량이 많은 IPMSM부터 자석이 없는 SynRM까지 자석사용량 많은 순서로 평균토크와 역기전력은 값이 증가하였고, 리플성분이 줄어들었다.

2.3.2 손실특성 비교분석

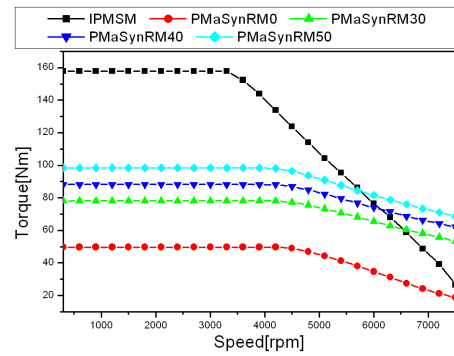
최대속도 동작점 7500rpm을 기준으로 각 모델별 손실특성 해석을 수행하였다. <표 4>의 손실특성 해석결과를 통해서 자석을 적게 사용할 수록 손실이 적음을 확인할 수 있다.

<표 4> 모델별 손실특성 해석결과

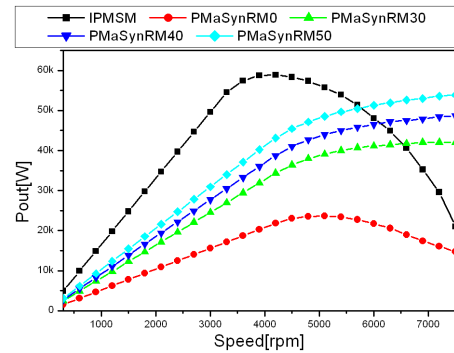
모델	동 손 [W]	철 손[W]			총 손실 [kW]
		자석와류손	회전자	고정자	
1	411.6407	573.5686	704.83	203.72	908.55
2	12410.9	0	203.16	438.75	641.91
3	12410.9	291.9499	302.96	455.73	758.69
4	12410.9	294.0136	287.26	490.04	777.31
5	12410.9	295.4141	292.24	522.87	815.11

2.3.3 동작특성 및 출력특성 곡선 비교 분석

아래 <그림 4>는 각 전동기 별 성능 및 출력 곡선을 나타내고 있다.



(a) 모델별 동작특성



(b) 모델별 출력특성 곡선

<그림 4> 모델별 동작특성 곡선(위)과 출력특성 곡선(아래)

일정 토크 영역에서는 IPMSM의 토크 및 출력이 높게 나타나지만 일정 출력영역에 들어가면서 토크가 떨어지는 속도가 더 가파르게 나타나면서 PMA-SynRM 모델이 더 높은 토크와 출력 값을 나타내었다.

3. 결 론

본 논문에서는 PMA-SynRM과 IPMSM의 성능 및 손실특성 비교분석을 수행하였다. PMA-SynRM의 자석량은 IPMSM 대비 0%, 30%, 40%, 50%로 하였다. 성능특성에서는 PMA-SynRM모델이 IPMSM모델에 비해 역기전력이 더 낮게 나타났으나 평균토크가 낮고, 리플이 높게 나타났다. 동작 및 출력특성에서는 IPMSM보다 고속영역으로 근접할 수 록 토크와 출력이 높게 나타났다. 앞서 실시한 손실특성 해석결과, PMA-SynRM의 총 손실이 더 낮게 나타났으므로 효율 또한 IPMSM에 비해 높게 나타난다. 이처럼 고속 운전영역에서 나타나는 높은 토크밀도, 출력밀도 및 효율 등의 장점들을 더 증대시키고 저속 운전영역에서 토크를 향상시킬 수 있는 연구가 폭넓게 진행 된다면 PMA-SynRM이 IPMSM을 대체하여 전기자동차 구동시스템으로써의 활용도가 높아질 것으로 기대된다.

< 감사의 글 >

본 논문은 교육과학기술부의 한국연구재단(2011-0005679)과 지식경제부의 산업원천기술개발사업(10035411)의 지원을 받아 수행된 연구임.

[참 고 문 헌]

[1] Kiriya, H., Kawano, S., Honda, Y., Higaki, T., Morimoto, S., Takeda, Y., "High Performance Synchronous Reluctance Motor with multi-flux Barrier for the Appliance Industry.", Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE, vol.1, pp. 111-117, 1998.
 [2] Boldea, I., Tutelea, L., Pitic, C.I., "PM-assisted reluctance synchronous motor/generator (PM-RSM) for mild hybrid vehicles: electromagnetic design", Industry Applications, IEEE Transactions on, Issue:2, pp. 492, March-April 2004