

고속철도 추진용 5상 영구자석 저감형 동기전동기의 최적설계

Optimal Design of Five-Phase Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor for High Speed Railroad Traction System

백제훈 · 김명룡 · 이경표*

Jeihoon Baek · Myung Yong Kim · Kyung-Pyo Yi

Abstract Permanent magnet assisted synchronous reluctance motors (PMA-SynRM) show higher efficiency and power density compared to conventional induction motors for high speed railroad traction systems. Furthermore, 5-phase PMA-SynRMs have lower torque ripple and higher power density than 3-phase systems. Therefore, the 5-phase PMA-SynRM is suitable for high-speed railway traction systems. In this study, 3kw 3-phase and 5-phase PMA-SynRM models were optimized using lumped parameter model and genetic algorithm, and their characteristics were compared. The optimized models are fine-tuned using finite element analysis. The final models of the 3-phase and 5-phase PMA-SynRMs are fabricated and tested to verify the analysis results.

Keywords : Synchronous motor, Five-phase, Lumped parameter model, Genetic algorithm, Optimal design

초 록 영구자석 저감형 동기전동기는 기존의 고속철도 추진용 유도기보다 높은 효율과 출력밀도를 보이고, 일반적인 영구자석 동기전동기에 비해 자석 사용량을 줄여 가격을 낮출 수 있다. 또한 5상 구동 시스템을 사용할 경우 3상 시스템에 비해 낮은 토크리플과 높은 출력밀도를 가지게 된다. 이러한 특성으로 인해 5상 영구자석 저감형 동기전동기는 고속철도 추진용 전동기로 적합한 특성을 가진다. 본 연구에서는 집중상수모델과 유전알고리즘을 이용하여 3상 및 5상 영구자석 저감형 동기전동기 3kw 축소모델을 최적설계하고 이들의 특성을 비교하였다. 또한 유한요소해석을 이용하여 최종 보정설계를 진행한 3상 및 5상 전동기를 제작하고 실험을 통해 해석값을 검증하였다.

주요어 : 동기전동기, 5상, 집중상수모델, 유전알고리즘, 최적설계

1. 서 론

국내 대부분의 고속철도 차량은 추진용 전동기로 유도전동기를 사용하고 있으며, 이들은 낮은 효율과 출력밀도를 보인다. 이에 따라 고속철도 추진용 전동기에 고효율, 고출력밀도의 영구자석 매입형 동기전동기를 적용하는 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 영구자석 매입형 동기전동기는 영구자석 표면 부착형 동기전동기에 비해 고속 회전 시 기계적 강도가 우수하고 릴럭턴스 토크 비율이 높은 장점을 가지고 있으나, 회토틀 영구자석 사용량이 많아 전동기의 가격이 상승하고, 고속 회전 시 영구자석으로 인해 발생하는 역기전력이 인버터의 입력전압보다 커지는 경우를 방지하기 위한 자속제어로 인하여 영구자석이 감지될 수 있다는 단점이 있다[1,2]. 이러한 단점을 해결하기 위하여 영구자석 사용량을 줄이고 릴럭턴스 토크 성분을 증가시킨 회전자 구조를 가지는 영구자석 저감형 동기전동기를 고속철도 추진용 전동기로 제시한다. 또한 3상 구동 시스템에 비해 낮은 토크리플과 높은 출력밀도를 가지는 5상 구동 시스템의 적용을 검토한다.

본 논문에서는 3상 및 5상 영구자석 저감형 동기전동기의 최적설계를 위해 전동기의 집중상수모델을 제시하고 이를 이용하여 초기 모델 설계 및 유전알고리즘을 이용한 최적화 설계를 진행한다. 그리고 집중상수 모델에서 추정된 포화자속 성분의 설계변수를 유한요소해석을 이용하여 추출하고, 보정 설계를 거쳐 최종 모델을 제시한다. 이러한 설계 과정을 이용한 최적화된 3상 및 5상 영구자석 저감형 동기전동기를 450kW급 고속철도 추진용 전동기에 적용하기 위하여 3kW의 축소 모델을 각각 같은 고정자 외경으로 설계하여 제작하였고, 이들의 역기전력과 쇄교자속 하모닉 성분을 실험적으로 측정하여 해석 값과 비교하였다.

*Corresponding author. E-mail: kpyi82@krii.re.kr.

© 2017 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<https://doi.org/10.7782/JKSR.2017.20.5.588>

2. 본 론

2.1 영구자석 저감형 동기전동기의 토크 계산

5상 영구자석 저감형 동기전동기는 영구자석 매입형 동기전동기와 동기 릴럭턴스 전동기의 중간 형태이며 전동기의 전압 방정식은 다음의 벡터 매트릭스 형태로 표현할 수 있다[3].

$$V_s = R_s I_s + \frac{dA_s}{dt} \tag{1}$$

각 벡터 매트릭스는 고정자 전압 $V_s = [v_{as} v_{bs} v_{cs} v_{ds} v_{es}]^T$, 고정자 전류 $I_s = [i_{as} i_{bs} i_{cs} i_{ds} i_{es}]^T$, 공극의 쇠교자속 $A_s = [\lambda_{as} \lambda_{bs} \lambda_{cs} \lambda_{ds} \lambda_{es}]^T$ 이다.

5상의 a,b,c,d,e 좌표는 2차원 d-q 공간 벡터로 변환할 수 있으며 전동기의 전압방정식과 쇠교자속은 다음과 같다.

$$V_d = -\omega_r(L_q I_q - \lambda_{PM}) \quad V_q = \omega_r(L_d I_d) \tag{2}$$

$$\lambda_d = L_d I_d \quad \lambda_q = L_q I_q - \lambda_{PM} \tag{3}$$

위 식에서 L_d 는 d축 인덕턴스, L_q 는 q축 인덕턴스 그리고 λ_{PM} 은 영구자석의 쇠교자속이다.

따라서, 3상 및 5상 영구자석 저감형 동기전동기의 출력 토크는 다음과 같이 정리되며 p는 회전자의 극 쌍수이다.

$$T_e = \frac{3p}{22} \text{Im}[\lambda_{qd} I_{qd}] = \frac{3p}{22} [\lambda_d I_q - \lambda_q I_d] = \frac{3p}{22} [\lambda_{PM} I_d - (L_d - L_q) I_d I_q] \tag{4}$$

$$T_e = \frac{5p}{22} \text{Im}[\lambda_{qd} I_{qd}] = \frac{5p}{22} [\lambda_d I_q - \lambda_q I_d] = \frac{5p}{22} [\lambda_{PM} I_d - (L_d - L_q) I_d I_q] \tag{5}$$

2.2 영구자석 저감형 동기전동기의 자기회로 모델

전동기의 d, q축 전압방정식 및 출력 토크를 계산하기 위하여 등가회로 방정식을 이용한 자기회로 모델을 개발하였으며 고정자와 회전자의 철심 비선형 전자기계 특성을 고려하였다. Fig. 1에서 보이는 바와 같이 영구자석 저감형 동기전동기의 d, q축 인덕턴스 계산을 위한 자계 등가회로는 포화 특성을 포함하고 있다.

릴럭턴스 토크를 발생하는 회전자의 구조는 두 개의 자속 장벽으로 구성되어 있으며 이는 q축의 포화를 방지하여 d축에 비하여 낮은 인덕턴스 값을 갖는다. 이에 따라 높은 인덕턴스 값을 갖는 d축과 낮은 인덕턴스의 q축의 비율에 따른 돌극비가 발생하여 높은 릴럭턴스 토크가 발생된다. 영구자석의 쇠교자속은 q축의 선형 등가회로에서 고정자 자속 성분과 회전자의 영구자석의 자속 성분 그리고 포화자속 성분으로 계산되어진다. q축 등가회로 모델에서 Φ_{gi} (i=1,2)는 공극에서 고정자 치의 자속 성분이며 Φ_m 는 영구자석 자속 성분 그리고 Φ_b 는 자기회로에서 반대의 방향을 갖는 포화 자속 성분의 추정 값이다. d축의 비선형 방정식은 d축 인덕턴스의 비선형 포화 현상과 철심의 B-H 비선형 데이터에 의해 계산되었다.

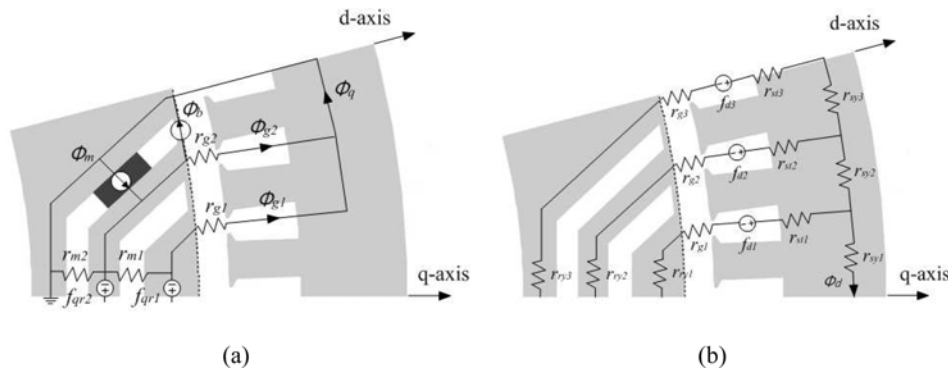


Fig. 1. Equivalent circuit of (a) q-axis (b) d-axis.

2.3 유전알고리즘과 유한요소해석을 이용한 최적설계

3상 및 5상 영구자석 저감형 동기전동기의 최적설계는 같은 외경을 제한조건으로 하였으며 같은 정격속도와 출력 토크의 동작점에서 설계하였다. 따라서 설계변수는 집중권 및 분포권의 권선방법과 고정자와 회전자 슬롯 수와 형상, 그리고 회전자의 자속장벽 형상, 영구자석의 크기 등이다. 각 전동기의 설계변수의 수는 20개이며 이러한 설계 변수의 조합으로 발생하는 모델은 수천가지이다. 따라서 각 모델의 출력 특성 중 목적 함수에 부합하는 최적의 모델을 찾기 위해 유전알고리즘을 이용하였으며, 최적화를 위한 목적함수는 효율, 전동기 재료비 그리고 출력토크 리플이다.

$$\text{목적함수} = \sqrt{k_1 \times \text{전동기손실}^2 + k_2 \times \text{전동기 재료비}^2 + k_3 \times \text{토크리플}^2} \quad (6)$$

식(6)에서 각 k_1, k_2, k_3 는 각 목적함수의 중요도를 결정하는 계수이며, 본 논문에서는 3상 전동기의 경우 0.6, 0.4, 0의 계수를 사용하여 가장 손실이 낮고 재료비가 최소화 된 모델을 찾는 것을 목적함수로 하였으며, 5상 전동기는 0.3, 0.3, 0.4의 계수를 적용하여 토크리플이 낮은 모델을 찾도록 하였다[4]. 유전알고리즘은 등가회로에 의한 자기회로 모델에서 위의 목적함수에 부합하는 모델을 초기모델로부터 50개씩 반복적으로 생산하여 비교함으로써 더 나은 모델을 찾는 방법을 사용하며, 20개의 기계적, 전기적 설계변수의 최대-최소 범위에서 자기회로를 계산한다[5]. Table 1은 전동기의 설계변수 중 주요 항목을 나타낸다.

Table 1. Design variables of PMA-SynRM.

Design variables	3-phase		5-phase	
	min	max	min	max
rotor/stator length (mm)	50	80	50	80
turns per slot	5	40	5	40
yoke width (mm)	5	20	5	30
ratio of inner/outer diameter of rotor	0.5	0.8	0.3	0.7
rotor cavity ratio	0.3	0.5	0.3	0.8
slots/pole/phase	0.5	1.5	0.5	1.5

목적함수를 만족하는 최종의 우수한 모델은 수천 가지의 후보 모델에서 변이와 적자생존의 과정에 의해 20개가 선정되며, 그 중 제작이 용이한 모델을 선택하게 된다. 3상 및 5상 모델의 극 수는 4극에서 12극까지, 슬롯 수는 6에서 48까지 범위에서 선택되었으며 모델별 슬롯/극/상 수에 의해 최대 효율과 최소 토크리플에 부합하는 조합으로 결정되었다. Fig. 2에서 보이는 5상 영구자석 저감형 동기전동기는 토크리플이 낮은 분포권 15슬롯 4극의 구조를 갖는 모델이며, 3상 영구자석 저감형 동기전동기는 효율이 높고 재료비가 낮은 형태의 집중권 12슬롯 8극의 구조를 갖는 모델이 최종적으로 선택되었다. 이 두개의 최종 모델은 유한요소해석을 통해 자기회로 모델에서 가정된 포화 자속 성분의 추정 값을 계산하여 재설계되었으며 같은 고정자 외경 190mm의 조건에서 정격전류 15.17Arms, 정격전압 67V 그리고 정격속도 1800rpm에서 3kW의 출력을 갖는 전동기가 설계되었다.

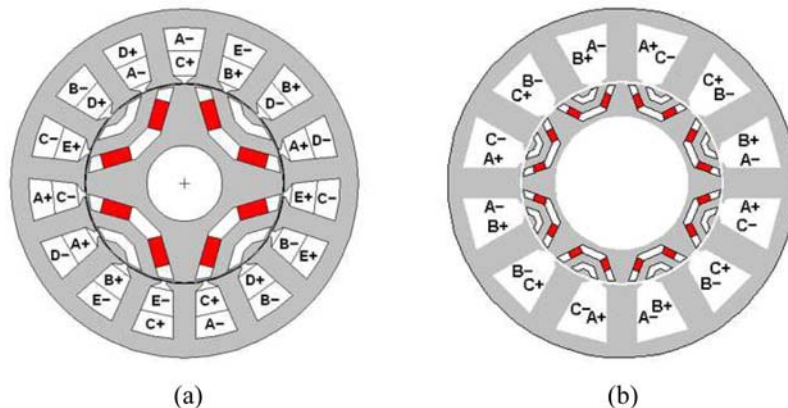


Fig. 2. Final design of (a) 5-phase 15 slot 4 pole model, (b) 3-phase 12 slot 8 pole model.

2.4 유한요소해석 결과

2.4.1 3상 및 5상 영구자석 저감형 동기전동기의 역기전력과 쇄교자속 비교

영구자석 저감형 동기전동기의 등가 자기회로 모델과 유전알고리즘에 의한 최적설계 결과를 유한요소해석하여 각 전동기의 특성을 비교하였다. Fig. 3은 3상과 5상 영구자석 저감형 동기전동기의 역기전력 해석결과이다. 3상 전동기의 역기전력 최대값은 1800rpm에서 48.2V로서, 5상 전동기의 40V에 비해 20% 가량 높으며 hanning window 기법을 이용하여 노이즈를 제거하고 푸리에 변환을 이용하여 주파수 분석을 한 결과, 3상 전동기의 역기전력은 기본파 성분이 10V 이하로 낮으며 2차와 3차 성분이 10V 이상으로 높다. 또한 9차 이상의 고조파 성분이 나타나는 것으로 분석되었다. 그에 비하여 5상 전동기는 기본파 성분이 20V로 높고 4차까지의 성분은 10V 이하, 고조파 성분은 8차까지 낮은 값으로 분포한다. 또한, 역기전력에 의한 THD는 3상 전동기는 77.48%이고 5상 전동기는 63.8%로 계산된다. 따라서 고속 회전 시 5상 전동기의 최대값은 3상 전동기에 비해 20% 정도 낮은 값을 가지며 고조파 성분의 하모닉 손실이 낮고 그에 따른 소음과 진동이 낮은 것으로 분석되었다.

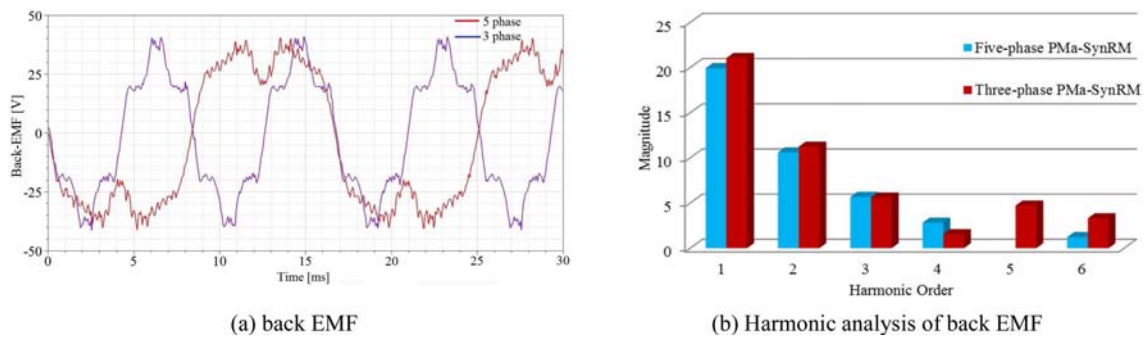


Fig. 3. Comparison of back EMF analysis results of 3-phase and 5-phase PMA-SynRMs.

Fig. 4는 3상과 5상 영구자석 저감형 동기전동기의 공극에서의 쇄교자속 해석 및 고조파 분석결과이다. 3상 전동기의 쇄교자속 최대값은 0.12Wb로 5상 전동기의 0.05Wb에 비해 2배 이상이나, 고조파 분석결과 3상 전동기의 쇄교자속 기본파 값은 0.03Wb로 5상 전동기에 비해 낮으며 5상 전동기는 3차 고조파 성분이 나타나지 않는다. 따라서 쇄교자속의 형태와 고조파 성분의 분석에 따라 5상 전동기가 3상 전동기에 비해 고조파가 적게 발생하므로 그에 의한 토크 리플이 상대적으로 적게 발생하는 것을 예측할 수 있다.

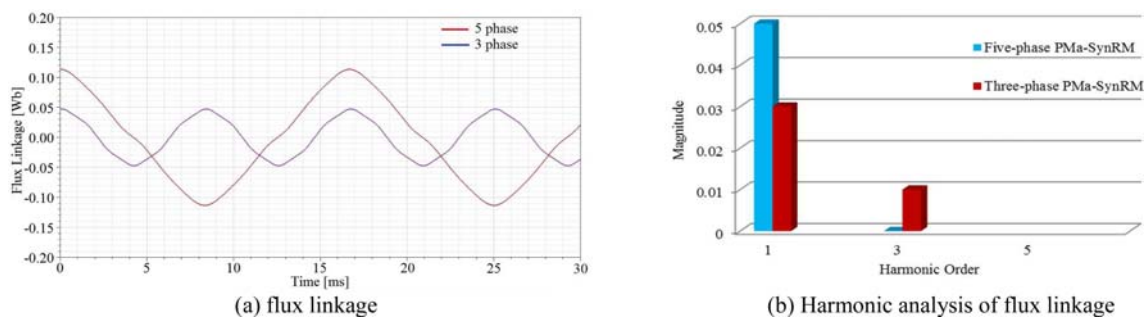


Fig. 4. Comparison of flux linkage analysis results of 3-phase and 5-phase PMA-SynRMs.

2.4.2 3상 및 5상 영구자석 저감형 동기전동기의 출력토크 리플 및 코깅토크 비교

유한요소해석에 의한 3상 및 5상 영구자석 저감형 동기전동기의 출력토크와 코깅토크를 비교한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 각 전동기의 평균 출력토크는 정격속도 1800rpm, 정격전류 15A에서 15.48Nm를 나타낸다. 그러나 토크리플의 비교 해석 결과 3상 전동기는 81.3%이고 5상 전동기는 10%이므로 5상 전동기의 토크리플이 매우 작은 것으로 해석되었다. 그 이유는 1회전 시 3상 전동기는 6개의 펄스출력인데 비해 5상 전동기는 10개의 펄스출력을 가지므로 상대적으로 낮은 토크리플의 특성이 나타나며 역기전력의 고조파 성분이 작기 때문에 같은 평균 출력토크를 내기 위해 3상 전동기보다 낮은 토크 최대값이 필요하다. 그러나 고정자의 슬롯에서 발생하는 코깅토크의 비교 결과 5상 전동기는 2.32Nm, 3상 전동기는 1.04Nm로 5상의 경우 2배의

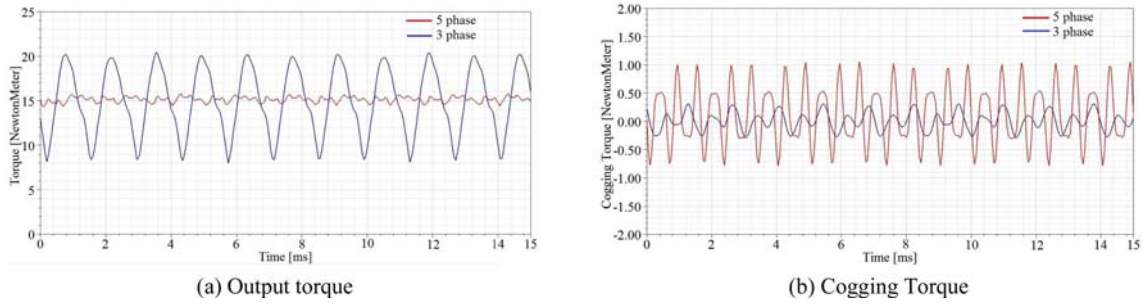


Fig. 5. Comparison of torque and cogging torque of 3-phase and 5-phase PMA-SynRMs.

코깅토크 값을 가지며, 그 이유는 5상 전동기는 15슬롯 4극의 구조로서 3상 전동기의 12슬롯 8극에 비해 적은 회전자 극수를 가지기 때문이다. 그러나 코깅토크의 최대값이 출력토크의 리플에 큰 영향을 끼치지 않으므로 고속철도의 추진용 전동기로 적용하는 데에는 문제가 없는 것으로 분석되었다.

2.5 영구자석 저감형 전동기 제작 및 실험결과

각 3상 및 5상 영구자석 저감형 전동기는 고정자의 외경과 축방향 길이가 같으며 정격출력이 3kW로 동일하므로 같은 출력

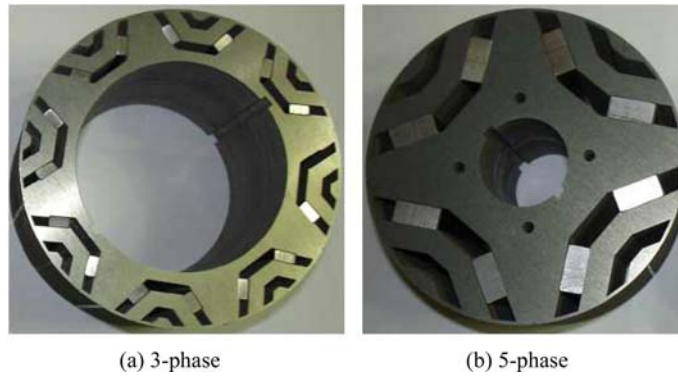


Fig. 6. Manufactured rotor for 3-phase and 5-phase PMA-SynRMs.

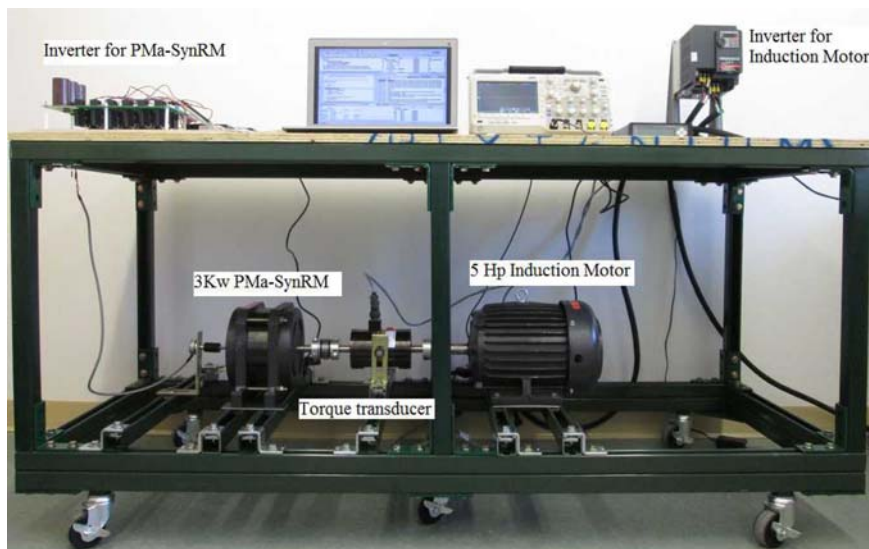


Fig. 7. Experimental setup.

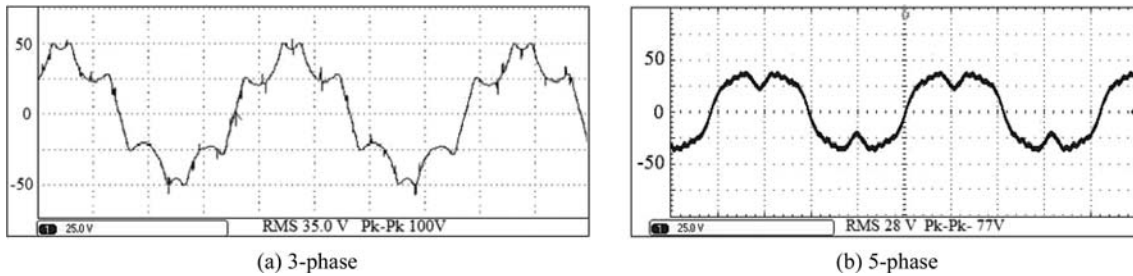


Fig. 8. Experiment result for back EMF of 3-phase and 5-phase PMA-SynRM.

밀도를 갖는다. 최적 설계된 3상 전동기는 집중권 12슬롯 8극으로 제작되었으며 5상 전동기는 분포권 15슬롯 4극으로 제작되었다. Fig. 6은 제작된 3상 및 5상 전동기의 회전자 구조이다. 또한, 정격속도에서의 전동기 특성을 확인하기 위해 Fig. 7과 같이 실험환경을 구축하였으며 무부하 시 1800rpm 정격속도에서의 역기전력을 측정하고 부하 시의 정격전류에서의 정격 토크출력을 측정하였다. 출력 토크리플은 실험적으로 측정이 어려우므로 본 논문에서는 설계 및 해석에 의한 평균 토크출력 값과 실험치를 비교하였다. 3상과 5상 전동기의 정격전류는 15.17A로 고정하고 토크 각을 조정하여 d축 전류와 q축 전류를 변화시키면서 같은 토크출력을 발생하는 지점을 찾는 방법으로 실험하였다.

Fig. 8에서 보이는 바와 같이 실험에 의한 3상 전동기의 역기전력 최대값은 50V로, 해석값 48.2V와 거의 일치하며 5상 전동기는 실험값이 38.5V이고 해석값이 40V이므로 오차가 5% 이내이다. 또한 정격전류 인가 시 3상 및 5상 전동기의 출력 토크 실험값은 15Nm로서 설계 및 해석값인 15.48Nm에 근접한다. 따라서 최적설계 과정에 의해 설계하여 해석한 결과와 실험 결과는 매우 작은 오차를 가지며 450kW의 고속철도용 영구자석 저감형 동기전동기 설계와 제작을 위한 과정으로 충분한 결과를 도출하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 3상과 5상 영구자석 저감형 전동기를 최적화 설계하여 각 3kW의 모델을 제작하여 비교함으로써, 고속철도 추진용 전동기로 적합한 전동기를 제시하고자 하였다. 최적화 설계 과정은 영구자석 저감형 동기전동기의 등가 자기회로 모델을 개발하여 초기 설계 모델을 도출하고, 유전알고리즘을 적용한 최적화 기법을 사용하여 최대효율과 낮은 토크리플을 목적함수로 하여 각 3상과 5상 전동기에 적용하였다. 그 결과 같은 부피를 가지는 각 전동기는 같은 효율을 가지며 정격 출력에서 94%의 최대효율을 나타내었다. 그리고 출력 토크 리플은 3상 전동기가 81.3%, 5상 전동기가 10%이므로 THD와 소음, 진동 특성은 5상 전동기가 유리하다. 영구자석 저감형 동기전동기는 영구자석 매입형 및 표면부착형에 비해 적은 양의 희토류 영구자석을 사용하므로 가격이 저감되며, 역기전력이 낮으므로 고속 회전이 요구되는 고속철도 추진용 전동기에 매우 적합하다. 또한 5상 전동기는 같은 회전속도에서 3상에 비해 낮은 역기전력을 갖는 형태로 설계가 가능하므로 고속을 요구하는 고속철도의 추진시스템 제어에 유리하다. 따라서 본 논문에서 제시한 5상 영구자석 저감형 동기전동기는 고속철도의 기존의 유도전동기 또는 영구자석 매입형 전동기를 대체하여 고속철도의 성능을 향상시킬 수 있다.

후 기

본 논문은 2017년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원과 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 연구되었음.

References

- [1] T. M. Jahns, V. Caliskan (1999) Uncontrolled Generator operation of interior PM synchronous machines following high-speed inverter shutdown, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 35(6), pp. 395-404.
- [2] S. Morimoto, M. Sanada, Y. Takeda (2001) Performance of PM-Assisted synchronous reluctance motor for high-efficiency and wide constant-power operation, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(5), pp. 509-514.

- [3] L. Parsa, H. A. Toliyat, A. Goodarzi (2007) Five-phase interior permanent magnet motors with low torque pulsation, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(1), pp. 40-46.
- [4] J. Baek, S. Bonthu, S. Choi (2016) Design of five-phase permanent magnet assisted synchronous reluctance motor for low output torque ripple applications, *IET Electric Power Applications*, 10(5), pp. 339-346.
- [5] S. Shamlou, M. Mirsalim (2013) Design, optimization, analysis and experimental verification of a new line-start permanent magnet synchronous shaded-pole motor, *IET Electric Power Applications*, 7(1), pp. 16-26

(Received 10 August 2017; Accepted 23 August 2017)

Jeihoon Baek: jhbaek@koreatech.ac.kr

School of Electrical, Electronics and Communication Engineering, Korea University of Technology & Education, 1600 Chungjeol-ro, Byeongcheon-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam-do 31253, Korea

Myung Yong Kim: mykim@krri.re.kr

Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16105, Korea

Kyung-Pyo Yi: kpyi82@krri.re.kr

Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16105, Korea