

# 이동형 전원장치용 3[kW] PMA-RSG의 최적 설계에 대한 연구

(A Study on 3[kW] PMA-RSG Optimal Design for Mobile Power Supply)

백제훈\* · Hamid A. Toliyat · 김남훈\*\*

(Jei-Hoon Baik · Hamid A. Toliyat · Nam-Hun Kim)

## 요 약

본 논문에서는 영구자석형 릴럭턴스 동기 발전기(PMA-RSG : Permanent magnet assisted-synchronous reluctance motor)에 대한 등가 자기 회로를 사용한 해석모델에 대해서 제시하고, 영구자석형 릴럭턴스 동기 발전기의 외형과 고정자 권선 그리고 특성을 결정하기 위해서 영구자석형 릴럭턴스 동기 발전기의 집중변수 모델(LPM : Lumped parameter model)을 제안한다. 집중변수 모델을 통하여 제안된 기기의 회전자 브리지에서 발생하는 자기 포화 현상에 대해서 예측하고, 기기의 성능에 대해서 효과적으로 검토한다. 집중변수 모델은 유한 요소법(FEM : Finite element method)에 비하여 정확하지는 않지만 영구자석형 릴럭턴스 동기 발전기의 자기적인 특성을 분석하는데 있어서 많은 시간이 걸리지 않으며, 초기 회전기기의 시제품 제작과 최적 설계에 있어서도 많은 장점을 가지고 있다. 집중변수 모델과 유한요소법을 통하여 영구자석형 릴럭턴스 동기발전기를 초기 설계하고, 실제작을 고려하여 기기를 최적화하여 유한 요소법을 이용하여 설계 검증을 한다. 집중변수 모델의 선형 비선형 모델을 위해서 Matlab을 이용하였다. 제안된 영구자석형 릴럭턴스 동기발전기의 정당성을 검증하기 위해서 실제 역기전력 파형을 측정하였다.

## Abstract

In this paper, an analytical model using equivalent magnetic circuits for the PMA-SynRG is presented. The lumped parameter model (LPM) is developed from machine geometry, stator winding and machine operating specifications. By the LPM, magnetic saturation of rotor bridges is incorporated into model and it provides effective means of predicting machine performance for a given machine geometry. The LPM is not as accurate as finite element analysis but the equivalent magnetic circuits provide fast means of analyzing electromagnetic characteristics of PMA-SynRG. It is the main advantage to find the initial design and optimum design. The initial design of PMA-RSG is performed by LPM model and FEM analysis, and the final PMA-RSG design is optimized and identified by FEM analysis considering actual machine design. The linear LPM and the nonlinear LPM are programmed using MATLAB and all of machine parameters are calculated very quickly. To verify justification of the proposed design of PMA-RSG, back-EMF is measured.

Key Words : PMA-RSG, LPM, Motor Design, Reluctance Generator, Optimum Design

\* 주저자 : Texas A&M Univ. 박사과정

\*\* 교신저자 : 청주대학교 전자정보공학부 전임강사

Tel : 043-229-8487, Fax : 043-900-8581, E-mail : cop1288@hotmail.com

접수일자 : 2009년 5월 12일, 1차심사 : 2009년 5월 15일, 심사완료 : 2009년 5월 26일

### 1. 서 론

최근 이동형 발전 장치의 개발 요구에 따라서 발전기에 대한 관심이 크게 증폭되고 있으며, 특히 자석을 적게 사용하면서 상대적으로 구조가 간단한 영구자석형 릴럭턴스 동기 발전기(Permanent Magnet Assisted-Synchronous Reluctance Generator : PMA-RSG)에 대해서 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 군용이나 상업용에 있어서 넓은 일정 파워-스피드 영역(CPSR : Constant power-speed range)과 높은 신뢰성을 가지는 보조 발전기 시스템에 대한 요구가 높아지고 있다[1].

표면 부착형 영구자석 동기기(SPMMSM : Surface-mounted permanent magnet synchronous machine)는 높은 전력 밀도와 토크를 가지고 있지만, 고속 영역에서 회전자 구조적인 문제와 약계자 제어가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 매입형 영구자석 동기기(IPMSM : Interior permanent synchronous machine)는 높은 파워 밀도와, 자기 토크와 릴럭턴스 토크에 의한 높은 토크 밀도 그리고 넓은 일정 파워-스피드 영역을 가지고 있지만, 약계자 영역에서 감자전류에 의해서 언콜트를 제너레이터 모드에서 인버터의 고장을 야기할 수 있는 문제점을 가지고 있다[2-3].

이러한 매입형 영구자석 동기기의 문제점을 보완하는 측면에서 영구자석형 릴럭턴스 동기기가 대안으로 주목받고 있다. 영구자석형 릴럭턴스 동기기(PMA-RSM : PMA - RS machine)는 릴럭턴스 토크와 자기 토크에 의한 높은 토크와 파워 밀도를 가지고, 상대적으로 회전자의 구조가 간단하고, 저가이며, 높은 효율과 높은 신뢰성을 가진다는 장점을 가지고 있다[4].

본 논문에서는 두개의 자속 장벽(Flux barrier)을 가지고 있으며, 두 번째 자속 장벽에 영구자석을 가지는 영구자석형 릴럭턴스 동기 발전기를 제안한다. 자석의 감자를 막기 위해서 네오디움 자석(NdFeB permanent magnet)을 사용하였으며, 집중 변수 모델(LPM : Lumped parameter model)을 이용하여 회전자의 자속장벽에 들어가는 네오디움 자석의 사용량을 최소화하였고[5], 권선 분포와 폴당 고정자 슬

롯의 적절한 수를 찾았다[6].

그림 1은 권선 분포도와 회전자 구조의 단면을 보여주고 있으며, 2층 집중권(Double-layer concentrated winding)을 가지면서 폴당 슬롯당 고정자 슬롯의 수(SPP : The number of stator slots per pole per phase)가 1/2인 구조를 보여주고 있다[7].

집중권 방식은 고정자 권선의 엔드 와인딩의 면적을 줄일 수 있고, 이로 인한 동손과 기기의 축 길이(Axial length)를 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있지만 권선 구조가 출력이 작은 기기에 제한이 되어 있으며 성능이 일반적인 분포권에 비해서 떨어진다는 단점을 가지고 있다[8]. 따라서 본 논문에서는 넓은 영역에서의 CPSR과 고효율 그리고 높은 역율을 가지는 3[kW] PMA-RSG(PMA-RS generator)을 설계하기 위해서 집중권 방식의 고정자와 2층 자속 장벽 구조의 회전자를 가지는 PMA-RSG에 대하여 집중변수 모델을 이용하여 디자인하고, 코깅 토크(Cogging torque)와 토크 맥동을 최소화하고 집중변수 모델을 통한 설계의 검증용 위해서 유한요소법을 이용한다. 그리고 실제 전동기 제작을 고려하여 10[%]의 마진을 주어 초기 설계된 모델을 바탕으로 하여 정격파워를 3.3[kW]로 증가시켜 모델을 최적 설계하여 최종 설계된 모델을 제작한다.

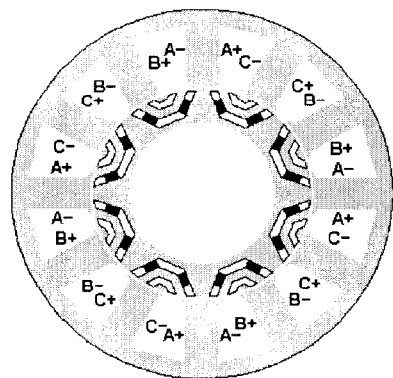


그림 1. PMA-RSG의 단면도  
Fig. 1. Cross section of PMA-RSG

### 2. PMA-RSG 모델링

제안된 PMA-RSG의 경우 그림 2와 같이 회전자

의 두 번째 장벽의 공극에 영구자석이 삽입되어 있다. d-q 기준좌표계에서, 고정자 전류는 d축과 q축과 전류각으로 나타낼 수 있으며[9-10], dq축 전압과 쇄교 자속은 아래의 수식으로 나타낼 수 있다

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

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

$$V_d = -\omega_r \lambda_q, \quad V_q = \omega_r \lambda_d \quad (3)$$

토크는 아래의 수식으로 유도 된다

$$T = \frac{3}{2} P (\lambda_d I_q - \lambda_q I_d) \quad (4)$$

$$= \frac{3}{2} P \lambda_{PM} I_d + (L_d - L_q) I_d I_q$$

여기서,  $\lambda_{PM}$ 은 영구 자석의 쇄교 자속, P는 폴페어,  $L_d$ 는 d축 인덕턴스 그리고  $L_q$ 는 q축 인덕턴스를 나타낸다.

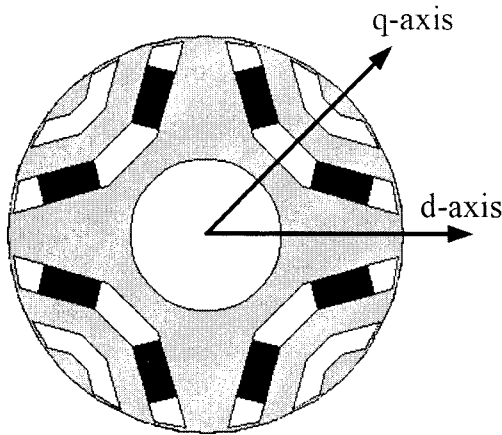


그림 2. PMA-RSG의 d축과 q축  
Fig. 2. d-q axis in PMA-RSG

토크 방정식으로부터, 각각 동작 지점에서 단위 전류 당 최대 토크를 발생 시키는 전류 각을 계산할 수 있다. 릴럭턴스 동기기기의 전동기 동작 모드에서는 단위 전류당 최대 토크를 발생시키는 전류 각으로 제어함으로써 동시에 효율 역시 최대로 할 수 있지만[12], 최대 토크제어가 최대 파워운전을 의미

하지는 않는다. 이와 비슷한 방법으로 발전모드에서 유효전력을 최대로 하기 위해서는 상전류, 전류 각( $\gamma$ )과 토크 각( $\delta$ )의 함수로 전류를 제어해야 한다.

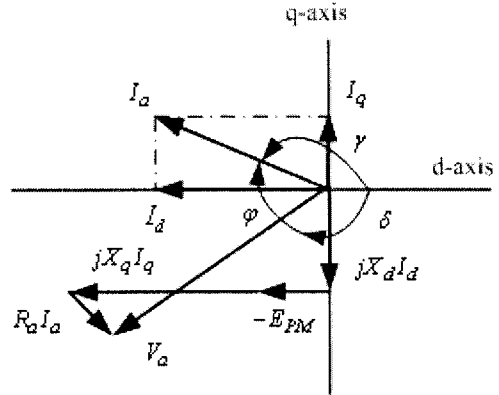


그림 3. 발전기 모드에서의 벡터 다이어그램  
Fig. 3. Vector diagram for generation mode

그림 3과 같이 발전모드의 벡터 다이어그램에서, 최대 유효전력을 얻기 위해서는 그림과 같이 전류벡터의 Id 전류를 -값으로 Iq 전류를 +값으로 제어함으로써 가능하다.

### 3. LPM을 이용한 설계

집중 변수 모델은 PMA-RSG의 전자기적 특성을 분석하는데 있어서 유한 요소법에 비해서 정확하지 않지만 시간이 많이 걸리지 않는 장점이 있다. 집중 변수 모델을 이용하여 기기의 발전기 동작영역에 대해서 전동기 형상을 기초로 분석을 하고, 동작영역 안에서 요구사항을 만족할 수 있는지 결정하게 된다.

정확한 d축 쇄교자속과 정격부하에서의 인덕턴스를 계산하기 위해서 비선형적인 전동기 포화 모델을 사용하고, 회전자와 고정자의 투자율과 코어의 포화값을 계산하기 위해서 코어의 B-H곡선을 이용하여 비선형 모델을 모델링한다.

집중변수 모델은 기기의 형상과 회전자 권선, 그리고 기기의 동작조건으로부터 유도될 수 있다. PMA-RSG의 회전자의 구조는 회전자 내부의 공극으로 인하여 전자기적으로 돌극형의 구조를 가지고 있으며 dq 기준 좌표계를 이용하여 모델링이 가능하

다. q축 모델의 경우는 회전자 내부의 자속장벽 공극으로 인하여 포화가 되지 않기 때문에 선형 모델로 등가화 하며, d축 모델의 경우는 포화로 인하여 비선형 모델을 사용하여 모델링 한다.

### 3.1 d축 인덕턴스

d축 인덕턴스는 자화 인덕턴스와 누설 인덕턴스로 나타낼 수 있으며, 비선형 d축 등가 자속회로로부터 고정자 MMF 와 자속은 아래와 같이 계산된다.

$$f_{ds} = \frac{3}{2} \frac{\pi}{4} \frac{(N_a k_{a1} I_d)}{p^2} \quad (5)$$

$$\Phi_d = \frac{f_{ds}}{r_g} \quad (6)$$

$k^{th}$  세그먼트의 공극과 코어 릴럭턴스는 아래와 같이 계산된다.

$$r_{gk} = \frac{g}{u_0(\alpha_k - \alpha_{k-1})rl} \quad (7)$$

$$r_k = \frac{l_k}{uB_k A_k} \quad (8)$$

$k^{th}$  세그먼트의 고정자 MMF소스는 아래와 같이 계산된다.

$$f_{dsk} = \frac{1}{\alpha_k - \alpha_{k-1}} \int_{\alpha_{k-1}}^{\alpha_k} (f_{ds} \sin \alpha) d\alpha \quad (9)$$

그림 4는 등가 d축 인덕턴스 회로를 나타내고 있으며,  $\alpha$ 는 자속 경로(magnet flux path)와 회전자 표면(rotor surface) 사이의 각이다.

병렬 비선형 등가 회로는 반복적으로 계산해서 얻고, 포화 d축 쇄교 자속과 인덕턴스는 아래와 같이 정의 된다[11].

$$\lambda_{ds} = N_a k_{a1} \Phi_d \quad (10)$$

$$L_{dm} = \lambda_{ds} / I_d \quad (11)$$

### 3.2 q축 인덕턴스

q축 등가회로에서는 2층의 자속장벽이 있어서 q축의 포화가 되지 않게 하여준다. 그러므로 q축의 파라미터를 계산하기 위해서 선형 집중변수 모델을 사용한다. 회전자 브리지는 포화된 릴럭턴스 상수로 모델된다. q축 인덕턴스 계산은 IPM 기기의 d축 인덕턴스 계산하는 방식과 같다. 2번째 층에 있는 영구자석 소스  $\Phi_m$ 은 일정한 자속 소스이고 잔류자속 밀도(Br : remanent flux density)에 비례한다. 포화된 브리지는 일정한 자속소스  $\Phi_b$ 로 등가화하고 이 값은 포화 자속밀도  $B_s$ 에 비례하게 된다. 포화자속 소스의 방향은  $\Phi_m$ 이 방향과 반대이다.

공극 자속 밀도는 아래와 같이 쓸 수 있으며, 식에서 나타난 바와 같이 단면적의 함수이다.

$$B_g = \frac{1}{A_s} (1/r)^{-1} \left[ \frac{B_r A_m}{2} - B_s A_b \right] \quad (12)$$

여기서,  $A_s$ 는 고정자 치의 피치 면적(stator tooth pitch area)이고,  $A_m$ 은 영구자석의 면적,  $A_b$ 는 회전자 브리지의 면적을 나타낸다.

권선 팩터(winding factor)를 이용해서, 영구자석의 쇄교 자속은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\lambda_{PM} = \frac{\sqrt{2}rlB_g N_a k_a}{p} \quad (13)$$

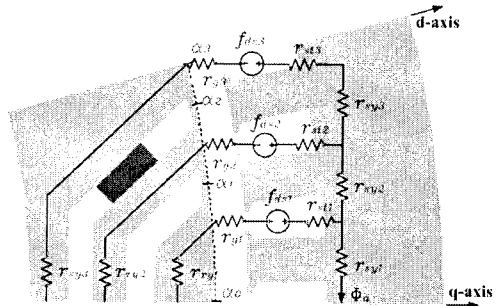


그림 4. d축 인덕턴스 회로  
Fig. 4. Equivalent d-axis inductance circuit

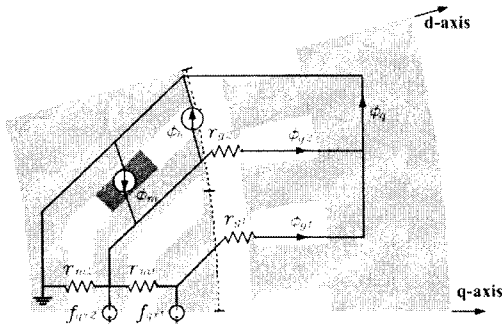


그림 5. q축 인덕턴스 회로  
Fig. 5. Equivalent q-axis inductance circuit

### 3.3 LPM과 FEA를 이용한 최적화 과정

전동기의 최적화 디자인을 위하여 집중변수 모델을 이용하여 디자인하고 2-dimensional 유한 요소법 (FEM : Finite element method) 프로그램을 이용하여 검증하는 방법을 이용하였으며, 그림 6은 유한요소 프로그램과 집중변수 모델을 이용한 최적화 과정의 플로차트를 보여주고 있다.

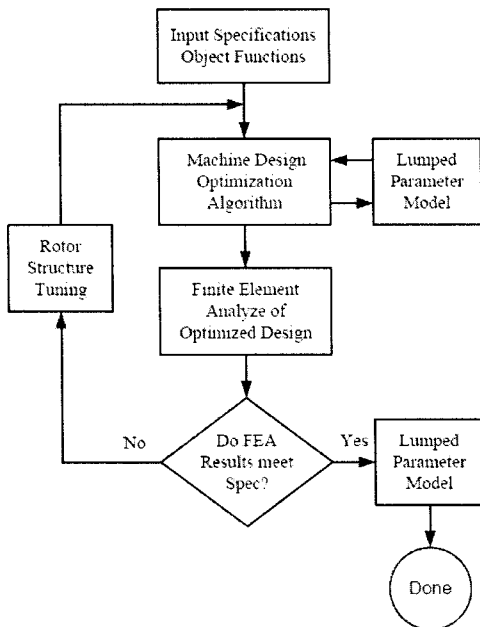


그림 6. LPM과 FEA프로그램을 이용한 최적화 과정  
Fig. 6. Optimization process using iterations between LPM and FEA programs

유한 요소법은 집중변수 모델을 이용하여 설계된 전동기의 영구자석 쇠교자속과 d축 인덕턴스, q축 인덕턴스, 평균 출력 토크 그리고 토크리플을 확인하는데 있어서 매우 유용한 방법이다. 유한요소 프로그램의 입력으로는 영구자석의 비투자율, 영구자석의 자속밀도 그리고 코어의 B-H 곡선등의 재질에 대한 속성이 사용된다. A, B, C상에 전류를 여자하지 않은 상태에서 영구자석의 쇠교자속이 계산된다. 비슷한 방법으로 코깅 토크를 고정자 권선 A, B, C상의 여자 없이 얻을 수 있다.

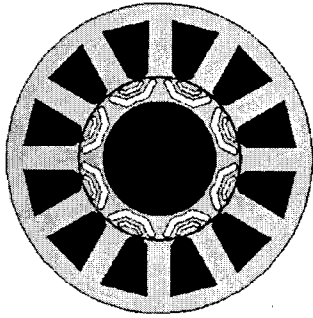
집중변수 모델을 통해서 추정된 포화 자속 밀도와 회전자 구조는 유한 요소법을 통해서 만족할 때까지 수정되어 진다.

## 4. 시뮬레이션 결과

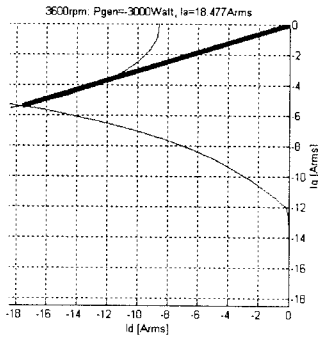
### 4.1 설계 비교

집중권을 형태의 권선을 가지는 PMA-RSG를 설계하기 집중변수 모델을 사용하였고, 초기 발전기 모델로 집중변수 모델과 유한요소법을 이용하여 설계하였으며, 그 결과는 그림 7에서 보여주고 있다. 그림 7 (b)는 전류 벡터를 보여주고 있다. 그림 8은 초기 설계를 바탕으로 실제 제작 마진을 두기 위하여 최종 설계된 발전기 모델을 보여주고 있으며, 그림 8 (b)는 전류벡터를 보여주고 있다. dq 평면상에서 동작지점은 전압 제한조건과 일정파워 조건을 만족시키는 발전영역에서 이루어지고, dq축 전류벡터의 각은 그림 8 (b)의 전류벡터로부터 dq평면상에서 전류조건을 만족시켜주는 각도가 된다. 1차적으로 집중변수 모델과 유한요소법으로 설계된 모델과 실제 제작을 고려해서 최종 설계된 모델과의 비교를 표 1에 나타내었다.

최종 모델은 집중변수 모델과 유한요소법과의 튜닝을 통하여 최적화하였다. 고정자 권선과 풀당 슬롯의 수는 초기 모델과 같은 규격을 사용하였으며, 정격전류는 초기 모델에 비하여 19[%]정도 줄어들었고 또한 기기의 축 길이(axial length)와 자석의 총 (Total magnet mass) 역시 각각 17[%], 11[%]씩 줄어들었지만, 기기의 효율과 역율은 개선되었다.

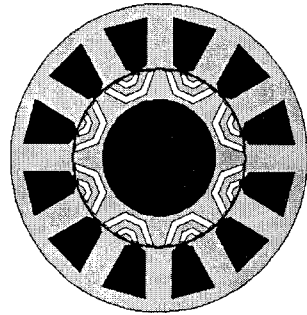


(a) 초기 설계된 PMA-RSG의 단면

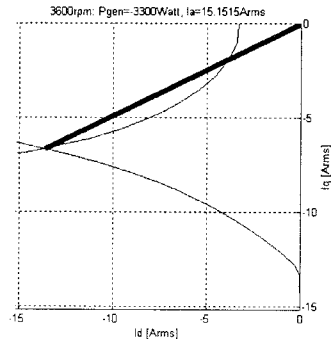


(b) 전류 벡터

그림 7. 초기 최적 설계된 PMA-RSG  
Fig. 7. Initial optimum designed PMA-RSG



(a) 최종 설계된 PMA-RSG의 단면도



(b) 전류 벡터

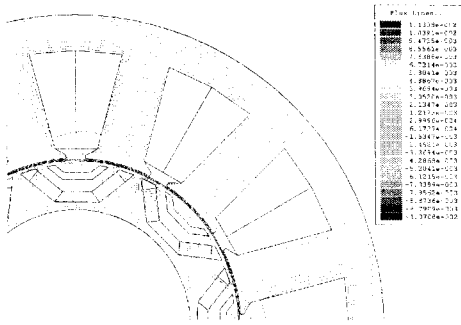
그림 8. 최종 최적 설계된 PMA-RSG  
Fig. 8. Final optimum designed PMA-RSG

표 1. 초기 설계와 최종 설계 비교  
Table 1. Comparison of initial design and final design

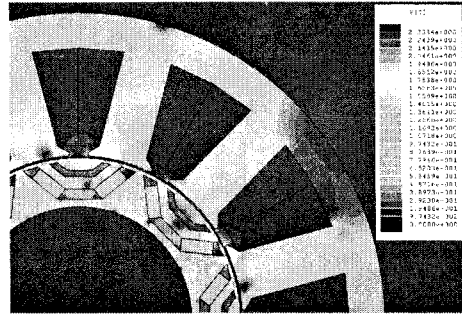
|                          | 1st generation | 2nd generation |
|--------------------------|----------------|----------------|
| Stator winding           | Concentrated   | Concentrated   |
| Number of Slots/poles    | 12/8           | 12/8           |
| Series turns per phase   | 88             | 96             |
| Rated current [Arms]     | 18.5           | 15.15          |
| Stator OD [mm]           | 190            | 190            |
| Axial length [mm]        | 75             | 62             |
| PM flux linkage [mWbrms] | 55             | 56.62          |
| Total Magnet mass [Kg]   | 0.595          | 0.535          |
| Armature loss [W]        | 74.3           | 60.27          |
| Efficiency [%]           | 96.8           | 97.3           |
| Power factor             | 0.98           | 1              |

#### 4.2 유한 요소법 결과

최적화된 모델의 분석과 비교를 위해서 유한요소법이 사용되었다. 집중변수 모델을 사용하는 경우는 코깅 토크와 출력 토크 리플의 분석이 불가능하기 때문에 유한요소법을 통해서 자속 라인과 자속 밀도를 알 수 있으며, 자속라인은 설계된 기기의 출력 특성을 파악하는데 사용되고, 자속밀도는 설계된 기기의 포화를 파악할 수 있다. 그림 9 (a)는 초기 설계된 발전기 모델의 자속 라인을 보여주고 있으며, 그림 9 (b)는 초기 설계된 발전기 모델의 자속 밀도를 나타내고 있다. 그림 10 (a)는 최종적으로 최적 설계된 발전기 모델의 자속 라인을 보여주고 있으며 그림 10 (b)는 최종적으로 최적 설계된 발전기 모델의 자속 밀도를 나타내고 있다. 그림 11 (a)는 FEM을 이용한 역기전력 파형, 그림 11 (b)는 실측한 역기전력 파형을 보여주고 있다. 그림 12와 13은 FEM을 이용



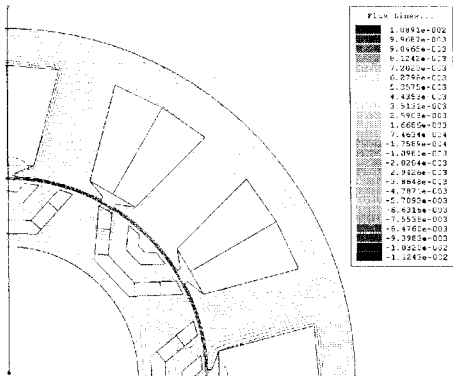
(a) 자속 라인



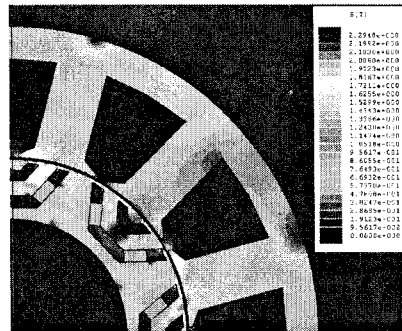
(b) 자속 밀도

그림 9. 1차 모델의 특성 분석

Fig. 9. Characteristics analysis for 1st model



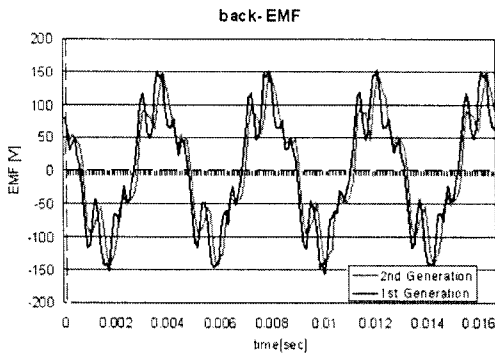
(a) 자속 라인



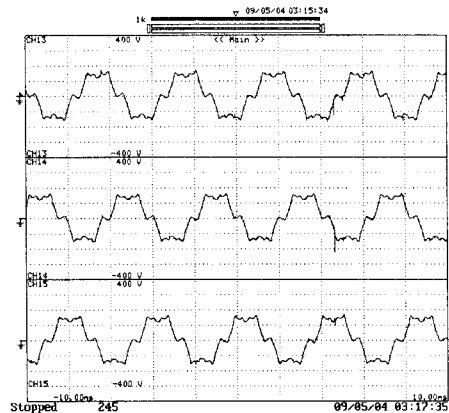
(b) 자속 밀도

그림 10. 2차 모델의 특성 분석

Fig. 10. Characteristics analysis for 2nd model



(a) FEM을 이용한 결과



(b) 실제 측정된 결과

그림 11. 역기전력 파형

Fig. 11. Back-EMF results

한 코깅토크와 출력 토크 파형을 각각 보여주고 있다.

최종 디자인된 모델이 초기 모델에 비해 브리지 부분에서의 자속밀도가 작고, 포화영역이 적은 것을 알 수 있으며, 회전자에 첫 번째 장벽 넓이를 증가시킴으로써 누설 자속 라인이 감소되는 것을 볼 수 있다. 그러므로 최종 설계된 기기의 성능이 누설이나 포화 현상의 영향으로 인해 향상 될 수 있음을 직관할 수 있다.

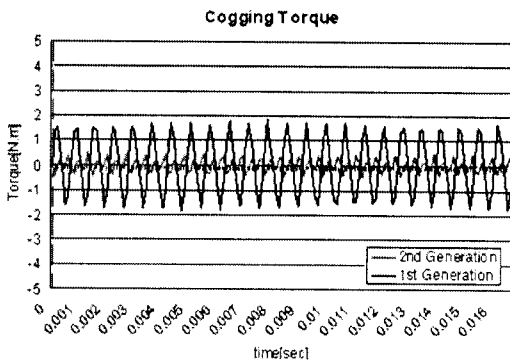


그림 12. FEM을 이용한 코깅토크 파형  
Fig. 12. Cogging torque simulation results from FEA

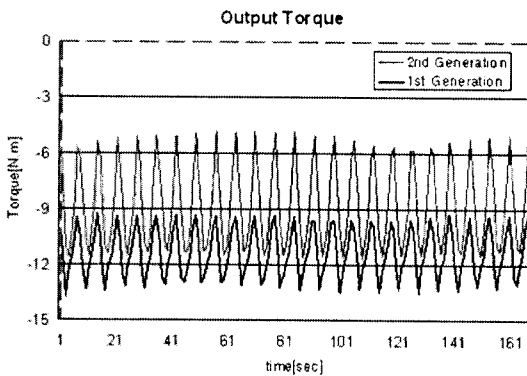


그림 13. FEM을 이용한 출력토크 파형  
Fig. 13. Output torque simulation results from FEA

## 5. 결 과

본 논문에서는 3[kW] PMA-RSG를 설계하기 위해서 집중변수 모델과 유한요소법을 이용하여 설계하였다. 제안된 집중변수 모델과 유한요소법을 이용

하여 초기 PMA-RSG를 설계할 수 있었으며, 최종적으로 기기의 실제 제작을 고려하여 초기 모델을 기반으로 3.3[kW]의 PMA-RSG를 집중변수모델과 유한 요소법의 반복적인 최적화 작업을 통하여 최적화를 하였으며, 유한요소법을 이용하여 제안된 기기의 설계를 검증하였다. 제안된 집중변수 모델을 이용하여 최종 설계된 PMA-RSG는 초기 설계된 모델에 비해 높은 효율과 적은 자석과 구리를 사용함으로써 생기는 가격적인 이득도 얻을 수 있었다. 출력 성능의 관점에서는 넓은 범위에서의 CPSR을 이루기 위해서 최대 파워를 얻을 수 있도록 설계 되었으며, 출력 토크 리플과 코깅 토크 역시 초기 모델에 비해서 개선되었다.

## References

- [1] S. Morimoto, M. Sanada, Y. Takeda, "Performance of PM assisted synchronous reluctance motor for high efficiency and wide constant power operation," IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 37, no.5, pp. 1234-1240, Sep-Oct 2001.
- [2] T.M. Jahns "Uncontrolled generation of interior PM synchronous machines following high-speed inverter shutdown," IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, vol. 1, pp.395-404, 1998.
- [3] W. L. Soong, "Field-weakening performance of interior permanent magnet motors," IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 38, no. 5, pp. 1251-1258, Sep-Oct 2002.
- [4] H. Murakami, Y. Honda, H. Kiriyaama, "The performance comparison of SPMSM, IPMSM and SynRM in use as air-conditioning compressor," Industry Applications Conference of IEEE Industrial Application Society Annual Meeting, vol. 2, pp. 840-845, Oct. 1999.
- [5] P. Niazi, H.A. Toliyat, D-H. Cheong, and J-C. Kim, "A low-cost and efficient permanent magnet assisted synchronous reluctance motor drive," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, no. 2, pp. 542-550, March/April 2007.
- [6] Y. Honda, T. Nakamura, T. Higaki, Y. Takeda, "Motor Design Considerations and Test Results of an Interior Permanent Magnet Synchronous motor for Electric Vehicles," IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, vol. 1, pp. 75-82, October 1997.
- [7] A.M. El-Refai, T.M. Jahns, "Optimal Flux Weakening in Surface PM Machines Using Concentrated Windings," IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, vol. 2, pp. 1038-1047, Oct 2004.
- [8] J. Cross, P. Viarouge, "Synthesis of High Performance PM Motors with Concentrated Windings," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 17, no. 2, June 2002.



- [9] I. Boldea, L. Tutelea, C.I. Pitic, "PM-Assisted reluctance synchronous motor/generator (PM-RSM) for mild hybrid vehicle: electromagnetic Design," IEEE Transaction on Industry Application, vol. 40, no. 2, pp. 492-498, March/April 2004.
- [10] P. Niazi, "Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Design and Performance Improvement," PhD Thesis, Dept. of Elec. & Comp Eng., Texas A&M, 2005.
- [11] E.C. Lovelace, "Optimization of a Magnetically Saturable Interior PM Synchronous Machine Drive," PhD Thesis, Dept. of Elec. Eng. & Comp. Sci., MIT, 2000.
- [12] Won-Sik Baik, Min-Hui Kim, Nam-Hun Kim, Kyeong-Ho Choi, Don-Ha Hwang, and Dong-Hee Kim, "An Optimal Efficiency Control Of Reluctance Synchronous Motor Using Neural Network with Direct Torque Control", IECON USA, 2003.

◇ 저자소개 ◇

**백제훈 (白制勳)**

1972년 10월 25일생. 1996년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 Dept of EE Univ. of Wisconsin-Madison 졸업(석사). 2006~현재 Texas A&M Univ. 박사과정.

**Hamid A. Toliyat**

1982년 Dept. Electrical engineering, Sharif University of Technology 졸업. 1986년 Dept. of Electrical engineering, West Virginia University 졸업(석사). 1991년 Dept. of Electrical engineering, University of Wisconsin - Madison 졸업(박사). 1991~1994년 이란 Ferdowsi University 교수. 1994년~현재 1994 Dept. of Electrical and Computer Engineering, Texas A&M University 교수. General Chair of the 2005 IEEE International Electric Machines and Drives Conference in San Antonio, TX. Editor of the IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION. Associate Editor of the IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS.

**김남훈 (金男勳)**

1973년 6월 12일생. 1998년 삼척대학교 제어계측공학과 학사. 2000년 영남대학교 전기공학과 졸업(석사). 2003년 영남대학교 전자공학과 졸업(박사). 2004년 부터 2007년 Texas A&M Univ. Post Doc. 2007년~현재 청주대학교 전임강사.