

고정자의 상분할에 따른 표면부착형 영구자석 동기전동기 특성 해석

이승한, 조영택, 조한욱  
충남대학교

Characteristic Analysis of Surface mounted Permanent Magnet Synchronous Motor according to Phase-Separation of Stator

Seung-Han Lee, Young-Taek Cho, Han-Wook Cho  
Chungnam National University

**Abstract** - This paper deals with characteristic analysis of surface mounted permanent magnet synchronous motor according to a phase-separation of stator. The characteristic analysis of designed model is performed by finite element analysis(FEA), and the result are shown that there is no difference between the two models in comparison with a general SPMSM. Finally, this study verifies the feasibility of SPMSM with separated stator core. The experimental data is shown the validity of this paper.

1. 서 론

최근 환경오염과 에너지 부족에 대한 관심이 증가함에 따라 전기자동차, 태양광, 풍력, 철도 등 다양한 분야에서 전동기가 활용되고 있으며, 그 중 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor)는 고효율, 고전력 밀도, 높은 출력 토크, 유지 보수의 편리성으로 인해 많은 관심과 연구가 진행되고 그 사용이 점차적으로 확대되는 추세이다. 이러한 다양한 분야에서 사용되고 있는 영구자석 동기전동기에 고장이 발생할 경우 사용 효율이 저하되거나 공정이 중단되는 상황에 직면하며 심지어 사고에 의한 큰 손실이 발생될 수 있다.

영구자석 동기전동기에서 발생하는 고장의 유형을 조사해보면 크게 고정자 및 회전자 관련 고장, 인버터 및 전력 회로 부분 고장, 축 센서 및 전류 센서 같은 센서류 부분 고장, 그리고 기타 기계적 고장 등으로 분류할 수 있으며 각각 유형 별로 어느 정도 연구가 진행되고는 있지만 아직 고장의 정도에 대한 판단 기준 등이 명확히 확립되어 있지 않아 대응이 부족한 실정이다[1]. 이 중 고정자 권선의 단락(turn short)과 같은 고장의 경우 열에 의해 권선의 절연 파괴가 더 많은 권선으로 쉽게 전파되어 더 큰 손실을 초래하는 순환전류를 일으킨다. 이는 권선에 일부 단락이 발생했을 경우 전동기의 동작이 가능하나 초기 고장 단계에서 진단되지 않으면 빠르게 절연 파괴가 심화되는 특징을 갖기 때문에 전동기 효율에 큰 문제점을 일으킬 수 있다.

본 논문에서는 고정자 고장 시 구조적인 이점을 갖는 상분할이 가능한 모델을 제시한다. 또한 같은 조건의 전동기 모델과의 특성 비교를 통해 두 모델간의 차이가 없음을 보이고, 실제 실험을 통해 타당성을 검증한다.

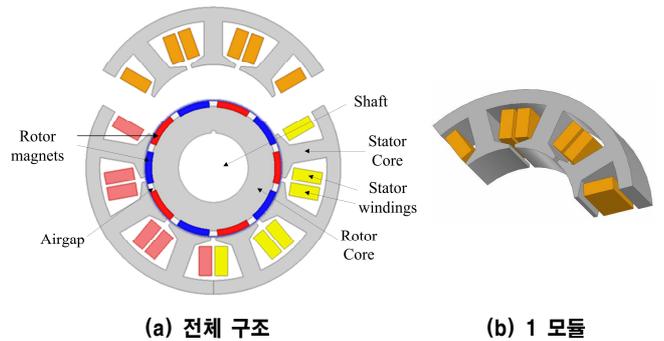
2. 표면부착형 영구자석 동기전동기의 고정자 상분할

2.1 해석 모델

본 논문에서 사용한 전동기 모델은 고정자의 한 상을 분리할 수 있도록 설계된 10극 9슬롯 구조를 갖는 표면부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM : Surface mounted Permanent Magnet Synchronous Motor)이다. 표 1은 설계된 모델의 기본적인 사양을 나타낸다.

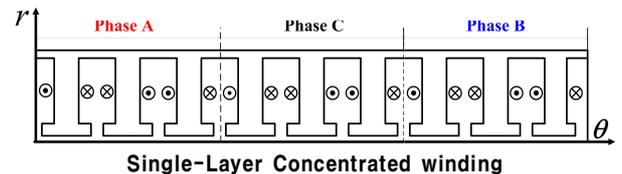
<표 1> SPMSM 사양

Item	Value
Voltage	36V
Current	13A
Power	350W
Speed	1325rpm
Torque	2.5Nm
Number of Slots/poles	9/10
Series turns per phase	120
Stator Winding	Concentrated winding



(a) 전체 구조 (b) 1 모델

<그림 1> SPMSM 형상



Single-Layer Concentrated winding

<그림 2> 10극 9슬롯 치 집중권 권선법

그림 1(a)는 해석 모델의 전체 구조를 나타내며, 그림 1(b)는 고정자의 상분할 시 한 모델에 대한 3차원 형상을 나타낸다. 분할된 한 상에 대한 파라미터 값들을 구하기 위해 해석 모델을 살펴보면 한 상에 대한 저항, 인덕턴스 값은 식(1), (2)을 통해 구할 수 있다[2].

$$R_{ph,A} = N_{ph} A \rho_c \frac{l_w}{A_c N_{sn}} \tag{1}$$

$$L_a = \frac{N_a \phi_a}{i_a} \tag{2}$$

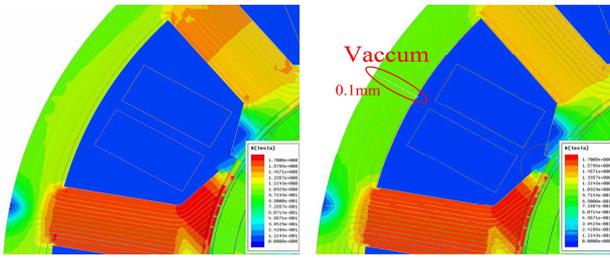
여기서  $N_{ph}$ 는 상당 턴 수,  $\rho_c$ 는 권선의 저항률,  $l_w$ 는 턴 당 권선 길이,  $A_c$ 는 가닥의 단면적,  $N_{sn}$ 은 턴 당 가닥수를 나타낸다. 표 2는 전동기 상분할 시 한 모델에 대해 도출해 낸 파라미터 계산 값을 나타내며, 표 3은 직접 측정된 한 모델의 파라미터 값들을 나타낸다.  $L_{ab}$ ,  $L_{ac}$ 는 상호 인덕턴스를 나타낸다.

<표 2> Phase A 계산 값

Parameter	Calculated Value
$R_a$	0.150 $\Omega$
$L_a$	1.4 mH
$L_{ab}$	95 $\mu H$
$L_{ac}$	95 $\mu H$

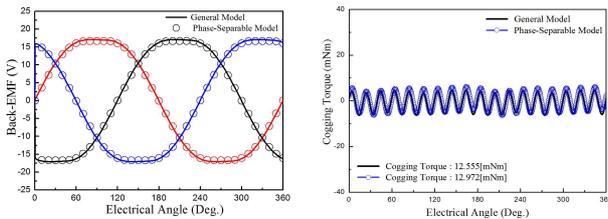
<표 3> Phase A 측정 값

Parameter	Measured Value
$R_a$	0.153 $\Omega$
$L_a$	1.328 mH



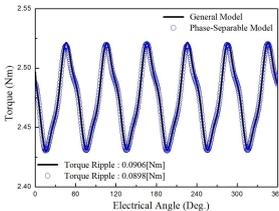
(a) 일반 모델 (b) 상분할이 가능한 모델

<그림 3> 자계 특성 비교



<그림 4> 역기전력

<그림 5> 코깅 토크



<그림 6> 정격 토크

<표 4> 해석 모델 권선계수

Winding factor	Value
$k_w$	0.945
$S_{pp}$	3/10
$LCM$	90

## 2.2 권선법 및 권선계수

그림 2는 해석 모델의 단층권 권선방식을 보여준다. 해석 모델은 분수 극/슬롯 수 조합을 가지며, 고정자 상분할이 가능하도록 치 집중권 권선법으로 설계되었다. 권선계수  $k_w$ 는 공급 간 쇄교 자속의 모양 및 크기에 영향을 주며, 역기전력의 고조파 성분에도 영향을 주므로 정현적인 역기전력 값을 얻기 위해 반드시 고려해야 하는 부분이다. 일반적으로 권선계수  $k_w$ 는 식(3)와 같이 분포계수  $k_d$ 와 단절계수  $k_p$ , 스류계수  $k_s$ 의 곱으로 구할 수 있다. 집중권 권선법의 경우 제작과정의 어려움과 고비용 등의 문제로 보통 스류를 하지 않으므로  $k_s$ 는 고려하지 않는다 [3][4].

$$k_w = k_d \cdot k_p \cdot k_s \quad (3)$$

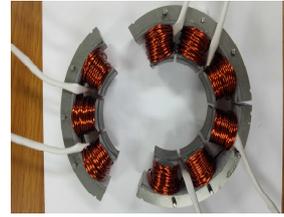
표 4는 해석 모델의 권선계수를 나타낸다. 여기서  $S_{pp}$ 는 매극 매상당 슬롯 수이며,  $LCM$ 은 극, 슬롯 수의 최소 공배수를 나타낸다.

## 3. 특성 해석 및 실험

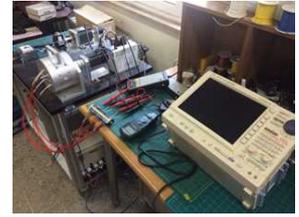
유한요소해석 S/W인 Ansys Maxwell 2D v16를 통해 해석모델의 특성을 해석하였다. 동일한 조건의 기준을 갖는 전동기와 비교를 위해 동일한 사양을 갖는 일반적인 10극 9슬롯 영구자석 동기전동기를 선정하고, 두 모델간의 자계 특성, 역기전력, 코깅토크, 출력 토크를 비교하였다.

### 3.1 자계 특성 비교

그림 3(a)는 일반적인 10극 9슬롯 전동기 모델의 자계 특성을 나타내며, 그림 3(b)는 상분할이 가능한 모델의 자계 특성을 나타낸다. 상분할이 가능한 전동기 모델의 경우 상 간 간격을 0.1mm로 고려하여 설계/해석하였으며, 그림과 같이 거의 동일한 자계 분포를 나타내었다.

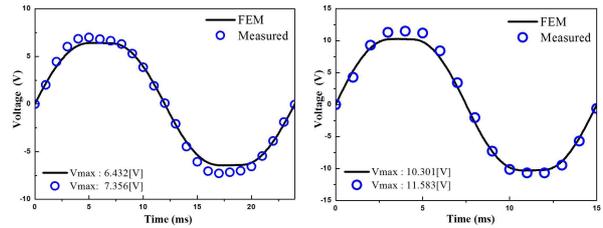


(a) 제작된 전동기 모델



(b) 시험 평가

<그림 7> 제작 및 시험 평가



(a) 500rpm

(b) 800rpm

<그림 8> 역기전력 시험 데이터 비교

## 3.2 역기전력, 코깅 토크, 정격 부하시 출력 토크 비교

그림 4는 두 비교 모델의 역기전력 파형을 보여준다. 파형의 왜곡이 없는 정현적인 역기전력 파형을 볼 수 있으며, 두 모델의  $V_{max}$  값이 16.98[V]로 거의 일치함을 알 수 있다. 그림 5는 영구자석 기기에서 무부하시 회전자 자석과 고정자 슬롯 간에 자기 저항 차에 의해 발생하는 코깅 토크 곡선을 보여준다. 그림 6은 정격 부하시 고조파 성분에 의해 발생하는 토크 출력 곡선을 보여주며, 토크 특성 곡선 또한 두 모델간의 차이가 거의 없음을 확인하였다.

## 3.3 제작 및 시험 평가

설계된 모델을 이용하여 상 분할이 가능한 전동기를 제작하였다. 그림 7(a)는 제작된 전동기의 실제 사진이며, 그림 7(b)는 전력 계측기를 이용한 시험 평가 사진이다. 그림 8(a)는 500rpm에서의 역기전력 파형을 나타내며, 그림 8(b)는 800rpm에서의 역기전력 파형을 나타낸다. 시험을 통해 FEM 해석값과 실제 측정값의 파형이 대체로 유사하고, 크기가 거의 같음(오차율:5.4%)을 알 수 있고, 해석 모델의 타당성을 검증하였다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 고정자의 상 분리가 가능한 10극 9슬롯 영구자석 전동기를 제시하였다. 유한요소해석 S/W인 Ansys Maxwell 2D v16를 통해 특성을 비교/해석했고, 실제 제작된 전동기의 실험적 데이터를 통해 타당성을 검증했다. 제안된 전동기 모델은 고정자 고장 시 유지보수에 있어 큰 구조적 이점을 가지며, 향후 전동기의 고장난 상판별 및 검출에 유리하게 적용될 수 있으리라 기대된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Kyeong-Hwa Kim, Dong-Uk Choi, Bon-Gwan Gu, In-Soung Jung, "A Study on Stator Winding Turn-Fault Model for Fault Diagnosis in Inverter-Driven Permanent Magnet Motor Drives", *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Engineers* Vol.23, No5, pp. 18~28, May 2009
- [2] Ji-Hwan Choi, "Analysis on the Concentrated Stator Winding type High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor considering Electromagnetic Loss with Current Harmonics", Ph D. Dissertation Chungnam National University, August 2014
- [3] Jang-Young Choi, Yu-Seop Park, and Seok-Myeong Jang, "Experimental Verification and Electromagnetic Analysis for Performance of Interior PM Motor According to Slot/Pole Number Combination", *IEEE Transactions on magnetics*, Vol.48, No.2, 2012
- [4] Lester Chong, "Design of an Interior Permanent Magnet Machine with Concentrated Windings for Filed Weakening Applications", Ph D. Dissertation New South Wales University, 2011