

가변자속형 FSPM 전동기의 등가 전·자기회로를 이용한 특성해석

장진석, 이재광, 김병택
국립 군산대

Characteristic Analysis of a Hybrid Excited Flux Switching PM Motor by Using the Equivalent Magnetic · Electric Circuit Method

Jin-seok Jang, Byung-taek Kim
Kunsan national University

Abstract - 본 논문은 가변자속 기능을 가지는 Flux Switching Permanent Magnet (FSPM) 전동기의 전·자기적 등가회로를 이용한 특성해석방법을 다룬다. 우선 가변자속 기능을 갖는 FSPM 전동기의 구조와 동작원리를 설명하였다. 다음으로 오버행을 고려한 2-D 유한요소 해석 모델을 이용하여 역기전력, 인덕턴스를 구하였다. 마지막으로 등가회로 해석을 통해 가변자속 운전 시 FSPM 전동기의 특성해석을 실시하였다.

1. 서 론

최근 여러 산업분야에서 고속 저토크, 고속운전 등의 가변속 운전의 요구조건을 만족시키는 전동기의 사용이 증가하고 있다. 하지만 기존의 영구자석형 전동기는 전기자 반작용으로부터 영구자석을 보호하도록 설계하기 때문에 자속을 제어하기 어렵다. 따라서 이러한 전동기는 세탁기, 자동차 등의 넓은 운전 범위를 요구로 하는 분야에서 운전 조건을 만족하기 매우 어렵다. 따라서 가변자속 운전을 위한 연구들이 활발히 진행되었다[1]~[3]. 이중 [1]는 전기자 권선에 음의 d축전류를 흘려줌으로써 영구자석의 폭 차이에 따른 감자를 이용하여 자속가변을 제안하였다. 하지만 정확한 감자를 예측이 어렵고 신뢰성이 미흡한 단점이 있다. 또한 영구자석으로부터 발생하는 자속을 제어하기 위해 회전자에 계자권선을 설치할 수 있으나 slip ring, brush 등의 부가적인 장치들이 필요하다. 따라서 본 연구는 slip ring 등의 기계적 장치 없이 자속을 제어할 수 있도록, 영구자석이 전기자에 설치된 FSPM 전동기에 계자권선을 설치한 구조를 제안한다. 우선 계자권선을 고정자에 설치하여 가변자속이 가능한 FSPM 전동기 구조와 동작원리를 제시한다. 전동기의 파라메타 산정을 위하여 등가자기회로 해석이 필요하지만 회전자와 고정자의 2중 돌극 구조와 철심의 비선형성으로 인하여 정확한 예측이 어렵기 때문에 2차원 유한요소 해석을 통한 전동기의 파라메타 추출을 실시하였다. 전동기의 2차원 해석에 앞서 전동기의 오버행을 고려한 2차원 등가 모델을 제안하였으며, 등가회로를 이용하여 제안된 전동기의 특성을 분석하였다.

2. 가변 자속형 전동기 구조 및 동작원리

그림1.(a)은 3상 10극 12슬롯의 제안된 가변자속형 전동기의 구조를 나타내고 있다. 그림1.(b)에 계자권선과 전기자권선의 결선방식을 정확히 살펴보기 위하여 3차원 모델링을 이용하여 전동기의 구조를 나타내었다. 영구자석은 U-타입의 코어 사이에 삽입되어 있으며, 계자권선은 영구자석을 감싸듯 감겨져 있고, 전기자권선은 그 위를 교차하여 감겨있다.

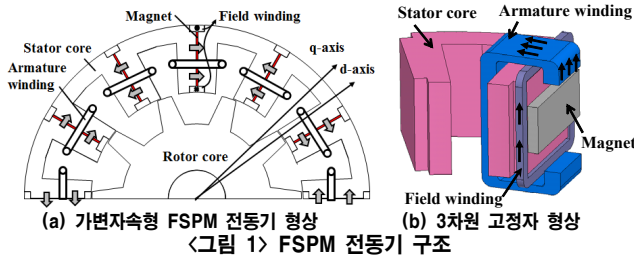
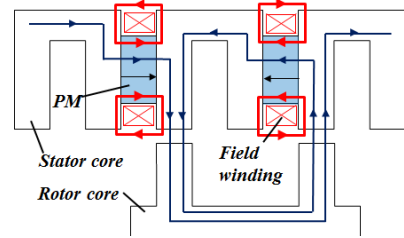


그림 2은 가변자속형 FSPM 전동기의 가변 자속원리를 나타낸다. 그림으로부터 영구자석의 자화방향과 같은 방향으로 계자자속을 발생시키면 자속이 증가함을 알 수 있다. 반대로 계자전류를 역방향으로 인가하면 자속량은 감소할 것이다. 따라서 계자권선에 발생하는 손실을 줄이고 자속 가변의 폭을 증가시킬 수 있다.

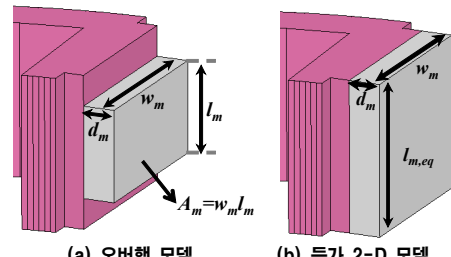


〈그림 2〉 가변자속원리

3. 회로해석을 통한 FSPM 가변자속 특성확인

3.1 오버행을 고려한 2차원 모델링

그림 3.(a)에 제안된 전동기의 고정자 코어와 영구자석을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 제안된 전동기의 고정자 코어와 영구자석 사이에 오버행이 존재하므로, 이를 고려하기 위해서는 3차원 해석이 요구된다. 하지만 3차원 해석은 많은 시간과 노력을 요구하므로 본 논문에서는 오버행을 고려한 2차원 유한요소 해석 모델을 제안한다.



만약 영구자석 특성을 변경하여 그림3.(b)의 2-D 해석모델의 공극 자속량을 그림3.(a) 모델의 공극 자속량과 동일하게 발생 시킨다면 오버행을 고려한 간이적인 2-D FE해석이 가능할 것이다. 이를 수행하기 위하여 오버행이 있는 영구자석 부분과 오버행이 없는 영구자석부분의 자속 분포를 고려한 등가자기회로를 그림 6.(a), (b)에 각각 나타내었다.

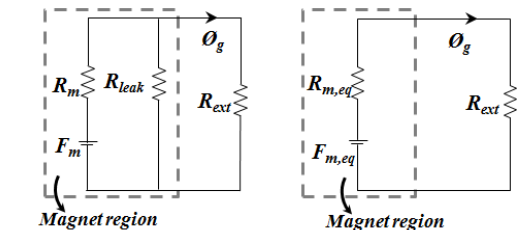


그림4에서 F_m 은 영구자석의 기자력, $F_{m,eq}$ 은 영구자석의 등가 기자력, R_m 은 영구자석의 자기저항, R_{leak} 은 고정자 코어와 코어 사이의 누설 자기저항, R_{eq} 은 영구자석 등가 자기저항, R_{ext} 는 총 외부 자기저항이다.

그림4(a),(b)의 총 외부 자기저항 R_{ext} 는 두 모델의 영구자석을 제외한 모든 부분이 동일하므로 같은 값을 가진다고 가정한다. 4.(a)의 영구자석 기자력, 영구자석 자기저항, 누설 자기저항은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$F_m = \frac{\delta_m}{\mu_r \mu_o} B_r \quad (1)$$

$$R_m = \frac{\delta_m}{\mu_r \mu_o \alpha A_{m,eq}} \quad (2)$$

$$R_{leak} = \frac{\delta_m}{\mu_o (1-\alpha) A_m} \quad (3)$$

여기서, α 는 l_m 과 $l_{m,eq}$ 의 비율($l_m/l_{m,eq}$)이고, A_m 은 $l_{m,eq}\omega_m$ 로 구한다.

그림 4.(a)의 회로의 영구자석 영역은 테브난 등가회로를 이용하여 테브난 기자력 $F_{m,TH}$, 테브난 등가 저항 R_{TH} 로 표현할 수 있다. 그러므로 두 모델의 총 외부저항은 동일하므로 공극자속이 동일하려면 $F_{m,TH}$ 와 $F_{m,eq}$, R_{TH} 와 R_{eq} 가 같아야 한다. 즉, 다음의 조건을 만족해야만 한다.

$$R_{eq} = R_{TH} = \frac{R_m R_{leak}}{R_m + R_{leak}} = \frac{1}{1 + (\mu_r - 1)\alpha} \frac{\delta_m}{\mu_o A_m} \quad (4)$$

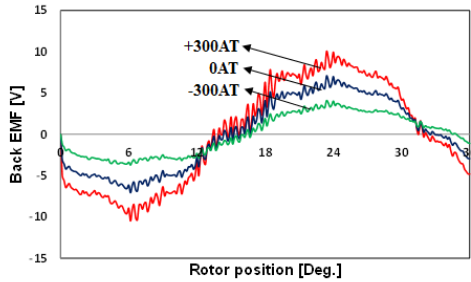
$$F_{m,eq} = F_{m,TH} = \frac{R_{leak}}{R_m + R_{leak}} F_m = \frac{\alpha}{1 + (\mu_r - 1)\alpha} \frac{\delta_m}{\mu_o} B_r \quad (5)$$

따라서, 오버행을 고려한 2-D FE해석 모델의 비투자율과 자속밀도는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\mu_r' = 1 + (\mu_r - 1)\alpha \quad (6)$$

$$B_r' = \alpha B_r \quad (7)$$

제시한 2차원 모델을 이용하여 계자전류의 변화에 따른 가변자속 시역기전력을 시간차분 유한요소 해석을 통해 그림 5와 같이 얻었다.



〈그림 5〉 FSPM 전동기 구조

또한 d, q축 인덕턴스는 다음의 식을 이용하여 구했으며, d, q축 인덕턴스의 값은 각각 98.2[mH], 78.2[mH]이다.

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{n\Phi}{i} = \frac{N^2}{R} \quad (8)$$

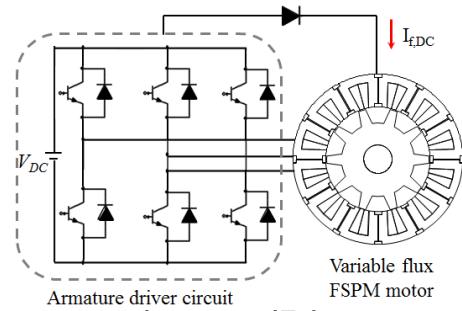
3.2 등가회로 해석을 통한 특성해석

그림 6에 FSPM 전동기의 구동회로를 나타내었으며, 회로의 전압방정식은 식(9)와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{Bmatrix} = r \begin{Bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{Bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} L_a(\theta) & M_{ab}(\theta) & M_{ac}(\theta) \\ M_{ab}(\theta) & L_b(\theta) & M_c(\theta) \\ M_{ac}(\theta) & M_c(\theta) & L_c(\theta) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} e_a(\theta) \\ e_b(\theta) \\ e_c(\theta) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

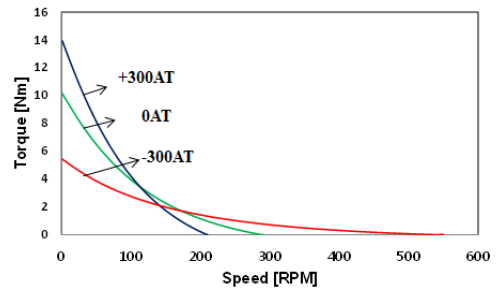
(9)로부터 얻은 전류를 이용하여 토크를 다음과 같이 구하였다.

$$\tau_m = \frac{e_a(\theta)i_a + e_b(\theta)i_b + e_c(\theta)i_c}{\omega_m} \quad (10)$$

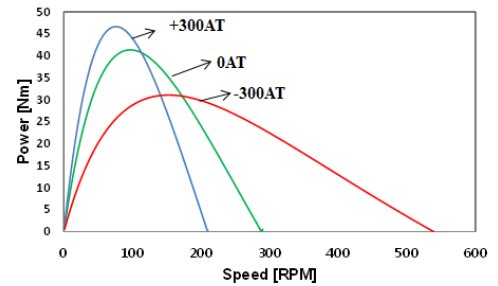


〈그림 6〉 FSPM 전동기 구조

유한요소 해석으로부터 얻은 파라메타와 (9)과 (10)을 이용하여 가변자속운전 시 운전특성을 예측하였다. 그림 7는 속도 대비 토크 커브, 그림 8는 속도 대비 출력 커브를 나타내었다.



〈그림 7〉 속도 대비 토크



〈그림 8〉 속도 대비 출력

그림으로부터 제안된 전동기의 토크는 저속 운전 대비 48.4%향상됨을 알 수 있고, 최대속도는 92.8% 향상됨을 알 수 있었다. 따라서 제안된 전동기의 저속 고토크, 고속운전이 가능함을 확인 할 수 있었다. 차후 실험을 통해 등가회로의 결과를 비교 분석하겠다.

4. 결 론

본 논문은 등가 전자기 회로를 이용한 가변자속형 FSPM 전동기의 특성해석법을 다루었다. 전동기의 기본 파라메타를 구하기 위하여 유한요소 해석을 실시하였고, 전압 방정식을 이용하여 전동기의 특성을 예측하였다. 마지막으로 유한요소 해석을 통하여 등가회로 해석방법의 유효성을 검증하였다.

【참 고 문 헌】

- [1] V. Ostovic, "Memory motors" IEEE industry applications magazine, vol.9, no.1, pp.52-61, 2003.
- [2] Y. Chengfeng, L. Heyun G. Jian and Z.Q. Zhu, "Design and analysis of a novel hybrid excitation synchronous machine with asymmetrically stagger permanent magnet," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 11, pp. 4353-4356, 2008.
- [3] X. Luo, and T. A. Lipo, "A synchronous/permanent magnet hybrid AC machine," International Conference on Electric Machines and Drives, 1999, pp.19-21, May 1999.