

부하상태를 고려한 매입형 영구자석 전동기의 역기전력 파형 연구

이범주, 서장호, 곽상엽, 정현교
 서울대학교 전기역학 연구실

Investigation on EMF Waveform in the Interior Permanent Magnet Synchronous Machine Considering Load Condition

Bum-Joo Lee, Jang-Ho Seo, Sang-Yeop Kwak and Hyon-Kyo Jung
 Seoul National University Electromechanics Laboratory

Abstract - 본 논문은 부하상태에 따른 매입형 영구자석 전동기에서의 역기전력 파형을 제시하였다. 유한요소해석에 기초한 고정투자율법을 사용하여 무부하 상태뿐만 아니라 부하상태에 따른 역기전력 파형을 해석하였고, 매입형 영구자석 전동기의 설계변수가 역기전력 파형의 고조파 성분에 미치는 영향을 조사하였다.

1. 서 론

최근 들어 환경문제에 대한 관심이 극적으로 증가함에 따라 친환경 전기자동차의 개발에 매우 많은 노력을 기울이고 있다.

전력소자개발 및 영구자석의 성능 향상으로 높은 기동토크와 넓은 정출력 영역을 요구하는 전기자동차에 매입형 영구자석 전동기(IPMSM)를 사용하는 시도가 증대되고 있다. IPMSM은 영구자석이 전기자 철심에 매입되어 있어 자기토크뿐만 아니라 d-q축 인덕턴스의 차이로 인한 윌러턴스 토크도 가진다.

PWM inverter로 구동되는 IPMSM에서 진동과 소음을 줄이기 위해서는 역기전력 파형의 고조파를 감소시켜야 한다.

최근 무부하 상태에서의 정현적인 역기전력 파형을 얻고자하는 시도가 있었다[1], [2]. 하지만, IPMSM은 극심하게 포화된 상태에서 동작을 하기 때문에 이에 따른 교차결합현상이 현저하게 나타난다. 따라서 부하상태에 따른 역기전력 파형이 비선형적으로 변하게 된다.

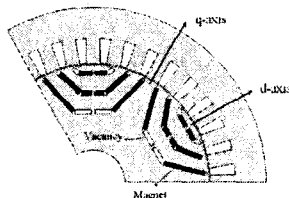
본 논문은 수치해석적으로 검증된 역기전력 파형과 부하상태에 따른 역기전력의 다양한 파형을 제시하였다. 또한, 전동기 설계의 지침으로서 설계변수와 역기전력 파형의 관계를 규명하였다.

부하상태에서의 역기전력 파형을 규명하기 위해 고정투자율법을 사용하였다.

2. 부하상태를 고려한 역기전력 계산

2.1 해석 모델

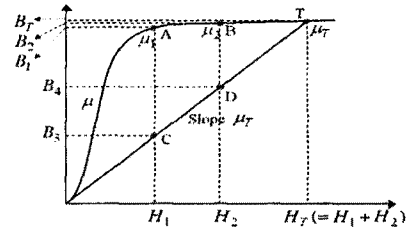
그림 1은 6극 다층 매입형 영구자석 전동기 모델이다. 그리고 설계 치수는 표1에 나타나 있다. 회전자에서 자석의 다층구조는 d-축 자속경로를 제한한다. 따라서 q-축 인덕턴스가 d-축 인덕턴스보다 더 크고, 두 축의 인덕턴스의 차이로 인해 전동기 동작의 속도영역이 넓어지고, 출력이 높아진다. 높은 q-축 인덕턴스를 얻기 위해 자석을 방사형 방향으로 분리하여 q-축 자로가 원활하도록 하였다. 또한, 정현적인 역기전력 파형과 가격 경쟁력을 고려해 볼 때 영구자석은 각 층에 부분적으로 매입하였다.



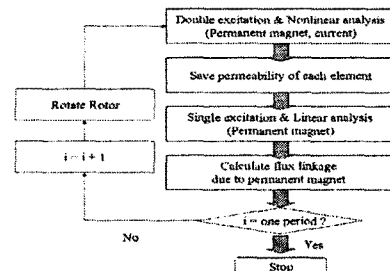
〈그림 1〉 해석 모델

〈표 1〉 해석 모델 치수

Parameters and Constraints	Value
Pole number	6
Outer diameter of the rotor	110 [mm]
Air gap	0.5 [mm]
Outer diameter of the stator	164 [mm]
Inner diameter of the stator	111 [mm]
Stacking depth	67 [mm]
Number of slot	36
Permanent magnet (Sintered NdFeB)	Br = 5500[Gauss]
Current density(at 500 Apeak)	25.8 [Arms/mm ²]
Per phase winding resistance	0.0079 [ohm]



〈그림 2〉 고정투자율법을 위한 B-H 곡선



〈그림 3〉 부하 상태 시 역기전력 파형 계산 순서도

2.2 해석 방법

2.2.1 유한요소 해석

이중 여자된 IPMSM의 극심한 포화현상으로 인해 전동기 파라미터는 전류의 크기 및 위상각에 따라 비선형의 특성을 가진다. 따라서 자성체의 비선형성을 고려하기 위해 유한요소법과 Newton - Raphson법을 사용하였다. 유한요소법을 위한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J} + \nu_o \nabla \times \mathbf{M} \tag{1}$$

여기서 \mathbf{A} 는 자기 벡터 포텐셜이고, \mathbf{J} 는 코일의 전류밀도, ν 는 자기저항률, \mathbf{M} 은 영구자석의 자화를 나타낸다. 쇠교자속은 각각의 권선에 대한 평균 벡터 포텐셜로 계산할 수 있다.

$$\lambda = \left[\frac{\iint_{S_1} A_1 dS}{S_1} - \frac{\iint_{S_2} A_2 dS}{S_2} \right] l \tag{2}$$

여기서 l 은 스택의 길이이고, S_1 과 S_2 는 각각 양방향, 음의 방향 전류가 흐르는 권선의 총면적을 나타낸다.

2.2.2 고정 투자율법(FPM)

부하상태에 따른 역기전력 파형을 얻기 위해서는 전체 쇠교자속을 영구자석에 의한 부분과 고정자 전류에 의한 부분으로 구분해야 한다[3]. 고정 투자율법에 따르면 비선형 해석으로 구한 요소별 투자율은 고정한다. 투자율이 고정된 상태에서 영구자석만을 단일 여자시켜서 선형 해석을 한다. 따라서 이 방법을 통하여 동작상태를 고려한 역기전력 파형을 얻을 수 있다. 그림 2는 고정 투자율법을 설명하기 위한 강자성체의 B-H곡선을 보여주고

있다. 이중 여자된 경우 기기는 μ_r 의 투자율로 T위치에서 동작하게 된다. 요소별 투자율이 고정된 상태에서 영구자석으로 단일 여자시켜(C 지점) 선형해석하고, 고정자 전류에 의해 단일 여자시켜(D지점) 선형해석하면 비선형 문제가 선형문제로 변환된다. 따라서 관계식은 $B_T = B_1 + B_2 = m_r(H_1 + H_2)$ 가 된다. 결과적으로 동작상태를 고려한 기기의 파라미터를 쉽게 유도할 수 있다. 그림 3은 고정투자율법을 사용하여 부하상태의 역기전력 파형을 얻기 위한 순서도이다.

2.2 해석 결과

그림 4는 영구자석으로 단일 여자된 매입형 영구자석 전동기의 자체 해석결과를 보여주고 있다. 그리고 공극에서의 자속밀도는 그림 5에서 보여진다. 이중 여자된 상태에서의 투자율이 자기포화로 인해 무부하 상태의 투자율과 다르기 때문에 동작점에서의 자속밀도는 무부하 상태에서의 자속밀도와 일치하지 않는다. 그림 6(a)는 무부하 상태의 역기전력 파형을 보여준다. 고정투자율법에 의해 얻어진 부하상태에서의 역기전력 파형은 그림 6(b)에 나타내었다. 그림 6에서 보여진 것과 같이 부하 상태에서의 역기전력 파형의 왜곡은 무부하 상태에서보다 현저하게 나타나고 있다. 왜곡의 정도를 양적으로 비교하기 위해 파형 왜곡률(THD)을 계산하였고, 그 식은 다음과 같이 정의된다.

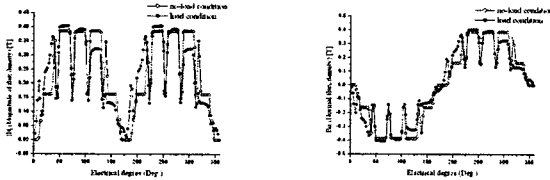
$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n V_k^2}}{V_1} \times 100 (\%) \quad (3)$$

V_1 은 역기전력 파형에서 기본과 전압의 피크값이고, V_k 은 k번째 고조파의 피크값이다. 그림 6의 경우 파형 왜곡률이 무부하 상태에서는 10.31%, 부하 상태에서는 27.27%가 된다. 이중 여자 시 강자성체에서의 비선형 포화효과는 불가피하기 때문에 부하 상태에서 역기전력의 파형 왜곡률은 무부하 상태에서 그것보다 더 크다.

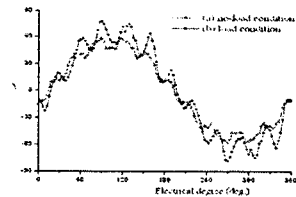
그림 7은 전류 조합에 따른 해석 모델의 역기전력 파형 왜곡률을 나타낸다. 이 그림을 통해 파형 왜곡률이 전류의 크기에 의해서 거의 결정되고, 교차결합 현상을 발생시키는 q축 전류가 d축 전류에 비해 파형 왜곡률을 주도하는 것을 알 수 있다.



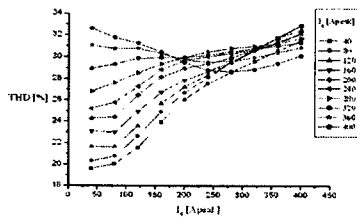
〈그림 4〉 부하 상태 시(id=120 [Apeak], iq=240 [Apeak]) 해석모델의 자체해석결과(유한요소법 적용). (a) 영구자석 단일여자(FPM 미적용). (b) 영구자석 단일여자(FPM 적용)



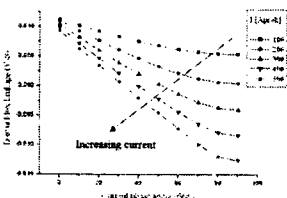
〈그림 5〉 공극 자속밀도. (a): 자속밀도 크기. (b): 자속밀도 법선성분



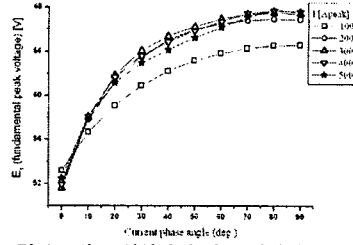
〈그림 6〉 역기전력 파형. (a) 무부하 상태(THD=10.31%). (b) id=120 [Apeak], iq=240 [Apeak] (THD = 27.27 %)



〈그림 7〉 전류조합에 따른 역기전력 파형의 파형 왜곡률



〈그림 8〉 전류 위상각에 따른 분석모델의 d축 쇄교자속



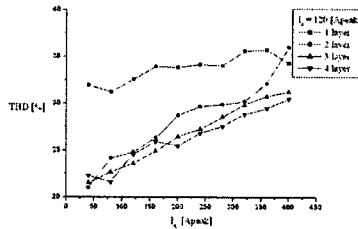
〈그림 9〉 전류 위상각에 따른 역기전력 파형의 기본과 최대치

약제자 제어영역에서 영구자석에 의한 d축 쇄교자속은 고정자 전류가 만드는 자속과 서로 반대방향이다. 그러므로, 동작점에서의 자기 포화 정도는 d축 자속경로에서의 전류에 의한 단일 여자 시의 그것보다 작다. 그림 8에서 보여진 것처럼, d축 쇄교자속은 전류 위상각이 증가함에 따라 감소하게 된다. 그림 9에서는 전류 위상각에 따른 역기전력의 기본과 크기를 보여준다. d축 전류의 크기가 증가함에 따라 d축 경로에서의 투자율 및 역기전력 파형의 최대치가 증가한다.

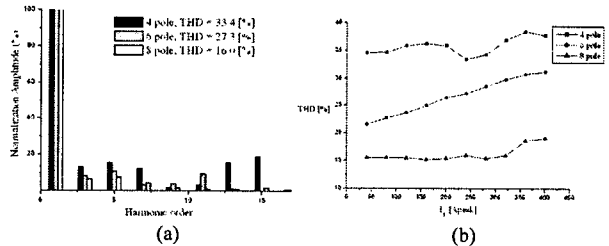
3. 기기 파라미터와 부하 상태에서 역기전력 파형의 관계

역기전력의 파형 왜곡률과 자석 층수 관계를 규명하기 위해 해석 모델의 자석의 층수를 1에서 3까지 변화시켰다. 그림 10은 역기전력 파형 왜곡률과 자석 층수 사이의 관계를 보여준다. 포화 성향을 볼 때, 역기전력의 왜곡률 감소비율이 2층 이상부터는 급격히 떨어하는 경향을 보여주고 있다.

극수와 역기전력 파형의 왜곡률 사이의 관계를 얻기 위해 3개의 시험 모델(4,6,8극)에 대해 파형 왜곡률을 계산하였다. 비교를 위해서 매극 매상 슬롯 수와 자석 층수는 일정하게 유지시켰다. 극수를 많이 사용할 수 록 역기전력 파형의 왜곡률이 작게 되는 것을 그림 11에서 보여준다.



〈그림 10〉 자석 층수에 따른 역기전력 파형 비교



〈그림 11〉 극수에 따른 파형 비교. (a) 부하상태(id= 120 [Apeak], iq= 240 [Apeak]). (b) 전류 조합(id= 120 [Apeak]으로 고정)

4. 결 론

본 논문은 매입형 영구자석 전동기의 파라미터와 부하 상태에 따른 실제 동작점에서의 역기전력 파형을 수치해석적으로 분석한 결과를 제시하였다. 부하상태에서는 전류의 크기 및 q-축 전류가 역기전력의 파형 왜곡률을 거의 결정함을 알 수 있었다. 모터의 극수와 자석의 층수는 역기전력 파형의 왜곡률과 밀접한 관련이 있음을 밝혔다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] S. Hwang, Lieu, D.K., "Design techniques for reduction of reluctance torque in brushless permanent magnet motors," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 30, pp. 4287-4289, Nov. 1994.
- [2] M. F. Hsieh, and Y. S. Hsu, "An investigation on influence of magnet arc shaping upon back electromotive force waveforms for design of permanent-magnet brushless motors," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, pp. 3949-3951, Oct. 2005.
- [3] S. Y. Kwak, J. K. Kim, and H. K. Jung, "Characteristic Analysis of Multilayer-Buried Magnet Synchronous Motor Using Fixed Permeability Method," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, pp.549-555, Sept. 2005.