

반경방향 착자 영구자석을 갖는 초고속 BLDC 전동기의 특성해석

장석명*, 정재훈*, 최지환*, 조한욱*, 이성호**, 이용복***
 충남대학교*, 한국생산기술연구원**, 한국과학기술연구원***

Characteristic Analysis of Radial Magnetization Permanent magnet with High Speed BLDC Motor

Seok-Myeong Jang*, Jae-Hoon Jeong*, Ji-Hwan Choi, Han-Wook Cho, Sung-Ho Lee, Yong-Bok Lee
 Chungnam National University*, Korea Institute of Industrial Technology**, Korea Institute of Science and Technology***

Abstract - This paper deals with a magnetic field analysis on brushless DC(BLDC) motor with radial magnetization permanent magnet. In order to analyze the magnetic field, multi-layer analysis based on space harmonics method is employed. Finally, the analytical results are validated by non-linear Finite Element Analysis(FEA).

1. 서 론

최근, 초고속 전동기 시스템은 산업 현장이나, 특수 목적용으로써 각광받는 분야중 하나이다. 특히, 공장 기계의 스피들 구동용, 또는 터보압축 펌프나 마이크로 터빈과 같은 고용량 소형 시스템에 필수적인 요소 기술이다. 이러한 초고속 회전기류 들은 기어가 필요 없이 직접 구동 드라이버나 가스터빈 등에 접속되어 직접 초고속 회전력을 얻는다. 따라서 초고속 회전을 적용하는 시스템에서는 경박단소화 및 비용의 절감과 고 효율화를 꾀할 수 있는 장점을 갖는다.[1]

초고속 전동기의 운전에서는 인버터의 효율을 고려해 볼 때 PMSM보다 BLDC로 구동하는 것이 좀 더 이상적이지만, BLDC전동기의 초고속 구동의 경우 토크에 큰 토크리플이 생기게 되어 운전에 어려움이 있다. 이를 해결하기위하여 공극의 자속밀도 파형을 trapezoidal 하게 조정해, 전동기 무부하 역기전력의 파형과 전동기 구동 전압의 파형을 비슷하게 만들어 토크리플을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 초고속 BLDC 전동기의 공극 자속 밀도를 trapezoidal 하게 하기 위해 반경방향으로 착자 되어 있는 영구자석을 사용하여 전동기를 설계하였다. 그리고 그 특성을 공간 고조파법을 기반으로 한 다중층 해석기법을 적용하여 전동기에 대한 자체 특성을 해석한 다음 무부하 역기전력 상수를 도출하고, 그 결과를 유한요소법과의 비교를 통해 타당성을 확인하였다.

2. Radial Magnetization 영구자석을 갖는 BLDC 전동기의 해석

2.1 해석 모델의 구조 및 사양

그림 1의 (a)는 2극 반경방향(Radial)으로 착자된 영구자석 회전자 및 슬롯리스 고정자를 갖는 전동기의 개념도를 나타내고, 표 1은 구체적인 전동기의 사양이다. 영구자석에 의한 전자기 특성 해석을 위해 영구자석, 공극, 고정자 철심의 3개의 영역과 차후에 샤프트가 존재하는 모델의 해석에도 적용이 가능할 수 있도록 회전자 자석 안에 가상의 영역을 설정해 총 4개의 영역으로 구분하였다. 해석의 편의를 위해 자석의 비투자율은 1이라 가정하고, 회전자의 비 투자율은 μ_{st} 라는 상수로 가정하였다.

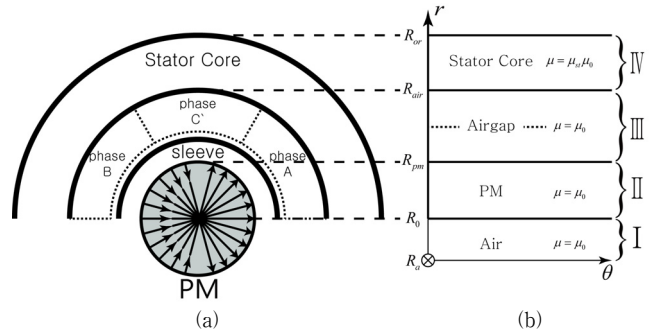
2.2 영구자석에 의한 자체특성해석

영구자석을 갖는 전기기기의 전자기적 특성 해석 및 설계를 위하여 해석영역의 지배방정식으로부터 자기 벡터포텐셜을 해석 해로 하는 공간고조파법(다중층 해석법 및 전달관계 해석기법)을 적용하였다. 해석적 방법은 지배방정식을 풀기위하여 많은 가정을 수반하거나, 정밀 해를 구하기 위하여 많은 수고로움이 요구되지만, 초기 설계시 설계 변수에 따른 기기의 특성을 분석·과약 하는데 매우 빠르고 정확하게 적용될 수 있다는 장점을 갖는다.[2]

2.2.1 영구자석 모델링

공간 고조파법을 기반으로 한 다중층 해석법을 이용하여 영구자석에 의한 자체특성 해석 시 영구자석의 정확한 자화모델링이 먼저 수행되어야 한다. 해석 모델인 반경방향으로 착자된 영구자석의 모델링은 식 (1)에 의해 나타낼 수 있다.

$$\vec{M}_{rn} = Re \left[\sum_{-\infty}^{\infty} M_{rn} e^{jn p \theta} \vec{i}_r \right] \quad (1)$$



<그림 1> 반경방향 착자 PM을 갖는 초고속 BLDC 전동기의 (a) 해석모델, (b) 해석모델의 경계조건 개념도

<표 1> 전동기 사양

항목	사양	항목	사양
정격출력	400[W]	정격속도	240[krpm]
Stack 길이	27.4[mm]	상수	3[phase]
Stator Core 외반경(R_{or})	20[mm]	극수	2[pole]
Stator Core 내반경(R_{ir})	14[mm]	매극·매상 턴수	34[turn]
자석의 외반경(R_{pm})	7[mm]	영구자석의 잔류자속밀도	1.06[T]

2.2.2 영역별 지배방정식

영구자석에 대한 자체특성을 해석하기 위해 그림 1의 (b)에서의 각 영역별 지배방정식을 도출해 내야 한다. 극좌표 모델 해석에 대하여 자기벡터포텐셜 A 는 다음과 같다.

$$A_n = Re A_{zn}(r,t) e^{j(np\theta + mz)} \vec{i}_z \quad (2)$$

영구자석 영역에서는 전류원이 존재하지 않으므로, Maxwell 방정에 의하여 자체 H는 ' $\nabla \times H = 0$ '가 성립하고 자기벡터 포텐셜 A 는 ' $B = \nabla \times A$ ', 자속밀도 B와 자화 M은 ' $\nabla \times B = \mu_0(\nabla \times M)$ '로 정의된다. 이를 Coulomb's gauge와 Vector Identity를 적용하면 해석모델의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2 A_n = -\mu_0 (\nabla \times M) \quad (3)$$

식 (3)을 전개하면 식 (4)의 지배방정식을 구할 수 있다.

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial r^2} A_{zn} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} A_{zn} - \left(\frac{n}{r} \right)^2 A_{zn} \right\} e^{jn p \theta} = \mu_0 \frac{jnp}{r} M_{rn} e^{jn p \theta} \quad (4)$$

위 식을 전개해서 편미분으로 표현되는 지배방정식의 Homogeneous Solution과 Particular solution은 식 (5)와 (6)이 된다.

$$A_{znh} = A_1 r^n + B_1 r^{-n} \quad (5)$$

$$A_{znp} = \mu_0 \frac{jnp}{1-(np)^2} r M_{rn} \quad (6)$$

해석 모델의 경우 극 쌍수가 1이 되고 고조파가 $-\infty$ 에서 ∞ 를 가짐으로 식(6)의 Particular solution에서 $(np)^2=1$ 일 때 해가 성립되지 않게 된다. 그래서 $np=1$ 일 때를 고려해서 다시 해를 구해줘야 하는데, (6)식에서 $(np)^2$ 으로 표현되어 있기 때문에 $np=1$ 일 때와 $np=-1$ 일 때를 모두 고려해 줘야 한다. 그렇게 해서 나온 Particular solution은 다음과 같다.

$$A_{znp} = \begin{cases} A_{znp} = \mu_0 \frac{jn}{1-n^2} r M_{rn} & n \neq 1 \\ A_{znp} = \mu_0 \frac{j}{2} r \ln r M_{rn} & n = 1 \\ A_{znp} = -\mu_0 \frac{j}{2} r \ln r M_{rn} & n = -1 \end{cases} \quad (7)$$

2.2.3 영역별 자속밀도 특성

식(5)와 식(7)로 General Solution을 구해 각 영역별 자속밀도 특성식을 세우면 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} B_{rnpm} &= \frac{jn}{r} [A_1 r^n + B_1 r^{-n} + A_{znp}] e^{jn\theta} \\ B_{rnair} &= \frac{jn}{r} [A_2 r^n + B_2 r^{-n}] e^{jn\theta} \\ B_{\theta pm} &= -\frac{\partial}{\partial r} [A_1 r^n + B_1 r^{-n} + A_{znp}] e^{jn\theta} \\ B_{\theta air} &= -\frac{\partial}{\partial r} [A_2 r^n + B_2 r^{-n}] e^{jn\theta} \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)의 특성식에 그림 1의 (b)에서의 각 영역별 경계조건을 대입해 행렬식으로 계수를 구한다. 식(9)는 $n \neq 1$ 에서의 행렬식이다.

$$X \cdot Y = U$$

$$X = \begin{bmatrix} R_a^n & R_a^{-n} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_o^n & R_o^{-n} & -R_o^n & -R_o^{-n} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_o^{n-1} - R_o^{-n-1} - R_o^{n-1} & R_o^{-n-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{pm}^n & R_{pm}^{-n} & -R_{pm}^n & -R_{pm}^{-n} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{pm}^{n-1} & -R_{pm}^{-n-1} - R_{pm}^{n-1} & R_{pm}^{n-1} & R_{pm}^{-n-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{air}^n & R_{air}^{-n} & -R_{air}^n & -R_{air}^{-n} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{st} R_{air}^{n-1} - \mu_{st} R_{air}^{-n-1} & -R_{air}^{n-1} & -R_{air}^{-n-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{or}^n & R_{or}^{-n} & 0 \end{bmatrix} \quad (9-a)$$

$$Y = [A^I \ B^I \ A^{II} \ B^{II} \ A^{III} \ B^{III} \ A^{IV} \ B^{IV}] \quad (9-b)$$

$$U = \begin{bmatrix} 0 & \mu_0 j n M_{rn} R_o & \mu_0 j M_{rn} & -\mu_0 j n M_{rn} R_{pm} & -\mu_0 j M_{rn} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9-c)$$

식(9)와 같이 $n=1$ 과 $n=-1$ 에서의 행렬식을 모두 도출해서 각 영역별 자속밀도 분포를 구할 수 있다. 그림 2는 III영역 공극 중심에서의 자속밀도 분포를 나타내며, 그림 3은 고정자 표면에서의 자속밀도 분포를 나타낸다. 다중층 해석기법을 이용해 해석한 결과, FEA 해석 결과와 결과가 잘 일치함을 보여주고 있다.

2.2.4 무부하 역기전력 특성

역기전력은 쇄교자속의 변화율로 정의되는데, 영구자석에 의한 고정자 표면에서의 자속밀도 B_{rn}^{air} 과 고정자 표면의 면적 S 에 의해 쇄교자속은 $d\phi = B_{rn}^{air} \cdot S \cdot d\theta$ 로 정의 되고, 1 코일피치에 대해 쇄교하는 자속 λ 는 식 (10)과 같다.[3]

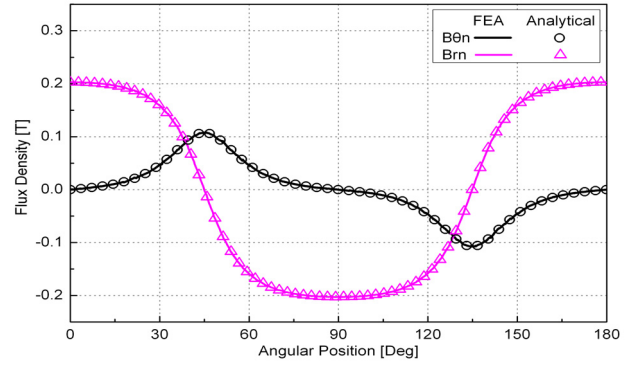
$$\lambda = N_t \int_0^\eta B_{rn}^{air} R_{air} l_{stack} d\theta \quad (10)$$

여기서 N_t 는 매극 · 매상당 턴수이고, η 는 코일 피치를 나타낸다. 이로부터 역기전력은 식 (11)과 같고, 역기전력 상수 K_e 는 식 (12)과 같다.

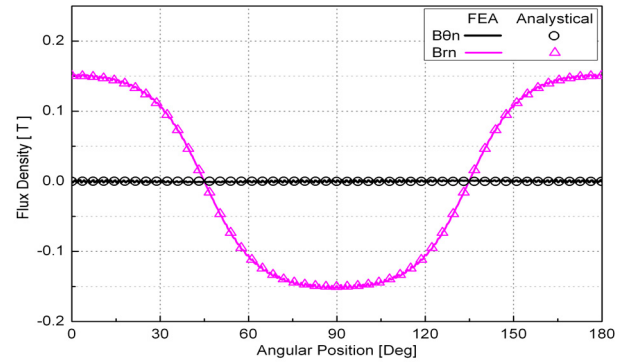
$$V_{emf} = -N_t \frac{d}{dt} \phi = -j \omega N_t \phi \quad (11)$$

$$K_e = \max \left(\frac{V_{emf}}{\omega} \right) \quad (12)$$

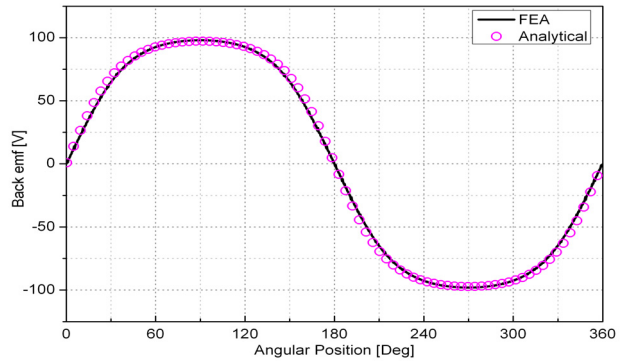
그림 4는 식(11)로 구한 역기전력 파형이다. 이 또한 다중층 해석기법을 이용한 해석결과와 FEA 해석 결과가 잘 일치함을 보여주고 있다.



<그림 2> 영구자석에 의한 공극 중심에서의 자속밀도 분포



<그림 3> 영구자석에 의한 고정자 표면에서의 자속밀도 분포



<그림 4> 해석모델의 무부하 역기전력

3. 결 론

본 논문에서는 Maxwell 방정식을 기반으로 하는 해석적인 방법인 공간고조파법을 적용하여 반경방향 착자 영구자석 전동기의 자속밀도 분포와 무부하 역기전력을 해석하였다. 해석 모델의 회전자는 원통형의 영구자석 형태를 가지며, 고정자는 슬롯리스에 분포권을 행하여 설계 및 해석을 하였다. 2차원 극좌표계와 공간고조파법을 이용하여 자기벡터 퍼텐셜을 구하고, 이를 바탕으로 자계 특성식을 구하였다. 구한 식을 통해 해석 모델의 영구자석에 의한 전류밀도를 구하고 그에 의한 쇄교 자속으로부터 역기전력 상수를 도출하였다. 해석결과는 유한요소 해석 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다. 차후에는 실제 모델의 계측 결과와의 비교를 통해 해석적 방법의 타당성을 검증 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 장석명, 조한욱 “초고속 소형 BLDC 전동기의 설계”, 2004년 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 83p, 2004
- [2] 장석명, 조한욱, 최장영, 유대준, 이성호, “전자기 전달관계 해석기법을 이용한 슬롯리스형 BLDC 전동기의 정특성 해석”, 대한전기학회 하계학술대회 B, 2005, pp.1297-1299.
- [3] 장석명, 박형일, 최지환, 최장영, 이성호 “해석적 방법에 의한 영구자석 동기전동기의 토크 리플 최소화를 위한 영구자석 형상 최적 설계”, 2010년 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 355p, 2010