

BLDC 전동기에서 희토류 자석의 최소사용을 위한 설계기법

박지승, 이세희, 이준호, 박일한
 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학부

The Design Method for Using the Least Nd-Fe-B in BLDC Motor

Ji_Seung Park, Se-Hee Lee, Joon-Ho Lee, Il-Han Park
 Sungkyunkwan University

Abstract - BLDC 전동기의 제작시 영구자석의 가격은 전체 가격을 결정하는데 높은 비중을 갖는다. 이런 영구자석의 크기를 최적화 시킬 수 있다면 비용절감이 예상된다. 본 논문은 BLDC 전동기에서 고가(高價)의 영구자석의 재료비용을 절감시키기 위한 설계방법을 제시한다. 기본적인 설계방법은 영구자석 내부에서 적절한 동작점을 갖는 한계 내에서 영구자석의 크기를 줄이는 것이다. 그리고 전동기의 전체크기를 비례적으로 증가시킴으로써 요구되는 기본과 자속을 보상한다. BLDC 전동기의 자기적 특성은 유한요소법을 사용하여 해석하였다. 회전자 위치에 따라 계산되는 유한요소 해석결과와 magnetic vector potential을 이용하여 권선의 자속을 계산하였고, 기본파의 성분은 푸리에 변환으로 얻었다. 설계사례로서 영구자석 대 기타부분의 비용을 각각 80/20, 70/30, 60/40, 50/50으로 가정할 때 기존 전동기 비용에 대해서 크기가 새로이 조정된 전동기 비용을 비교 검토하였다.

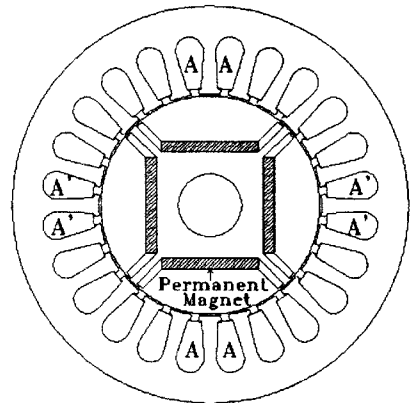


그림 1. IPM BLDC 전동기 (해석모델)

1. 서론

현재까지 영구자석 재질에 관한 연구가 많이 진행되어 Nd-Fe-B 와 같은 고에너지 영구자석의 개발로 인해 공극의 자속밀도를 증가시킬 수 있게 되었다. 따라서 전동기의 출력특성도 많이 향상되어 정보통신기기를 비롯한 가전기기, 산업용기기 및 자동차전장용 등 여러 부분에 걸쳐 BLDC 전동기의 수요가 급증하고 있다. 하지만 Nd-Fe-B 와 같은 값비싼 영구자석의 사용은 BLDC 전동기의 성능 향상이라는 장점 외에 전체 제작단가를 높이는 부담을 지우고 있다.

본 논문에서는 BLDC 전동기의 제작시 드는 재료비용을 줄이는 방안을 모색하기 위해 영구자석 내부에서 적절한 동작점을 갖는 한계 내에서 영구자석의 크기를 줄여보는 방법을 사용하였다. 그리고 전동기의 전체크기를 비례적으로 증가시킴으로써 요구되는 기본과 자속을 보상했다. BLDC 전동기의 비선형 자기적 특성을 해석하는데는 2차원 유한요소법이 사용되었고, 권선의 쇠교자속의 기본파 성분을 얻기 위해선 푸리에 변환이 쓰였다. 마지막으로 기존 해석모델과 새롭게 크기가 변화된 해석모델의 재료비용의 변화를 비교하여 보았다.

2. 연구모델 및 유한요소정식화

2.1 연구모델

본 연구에서 사용된 모델은 영구자석이 회전자 내부에 매입된 형태인 IPM(Interior Permanent Magnet) BLDC 전동기이다. 극수 4, 슬롯수 24 이고, 영구자석으로는 잔류자속밀도가 1.1T 인 희토류계 Nd-Fe-B 영구자석이 사용되었으며, 극당 자극각도는 90이다. 그림 1은 해석모델을 나타내고 있으며 제원은 표 1과 같다.

표 1. 해석모델의 제원

구분	제원	
영구자석 Nd-Fe-B	자화방향 두께	2.7 (mm)
	폭	24.2 (mm)
	잔류자속밀도 (Br)	1.1 (T)
	보자력 (Hc)	875 (KA/m)
회전자	극수	4
	외경	27.5 (mm)
	내경	8 (mm)
고정자	슬롯수	24
	상수	3
	슬롯당권선수	18
	stack length	55 (mm)
	외경	50 (mm)
공극	길이	0.5 (mm)

2.2 지배방정식

영구자석이 있는 모델의 경우에 자속밀도는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\vec{B} = \mu_0 \{ (1 + \chi_m) \vec{H} + \vec{M} \} \quad (1)$$

여기서 \vec{M} 은 자화벡터, \vec{H} 의 부적으로 인가된 자기장이 다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_o \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\mu_0 \vec{M} = \vec{B}_r \quad (4)$$

$$\text{자기저항을 } \nu = \frac{1}{\mu_0(1+\chi_m)} \quad (5)$$

$$\vec{H} = \nu(\vec{B} - \mu_0\vec{M}) \quad (6)$$

식(2)와 자기벡터 포텐셜 \vec{A} , 등가자화전류 \vec{J}_m 로써 식(1)을 다음 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (7)$$

$$\vec{J}_m = \nabla \times (\nu\mu_0\vec{M}) \quad (8)$$

$$\nabla \times \nu(\nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_o + \vec{J}_m \quad (9)$$

2.3 유한요소정식화

식(9)의 지배방정식을 Galerkin method를 이용하여 식(10)과 같은 요소 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\{I_{ie}\} = \nu [K^e] \{A^e\} - \{f^e\} - \{g^e\} \quad (10)$$

$$[K^e] = \frac{\nu^e}{4\Delta} \begin{pmatrix} b_i^2 + c_i^2 & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_k + c_i c_k \\ b_i b_j + c_i c_j & b_j^2 + c_j^2 & b_j b_k + c_j c_k \\ b_i b_k + c_i c_k & b_j b_k + c_j c_k & b_k^2 + c_k^2 \end{pmatrix}$$

$$\{f^e\} = \frac{J_o \Delta}{3} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \{g^e\} = \frac{\nu\mu_0}{2} \left(M_x \begin{pmatrix} c_i \\ c_j \\ c_k \end{pmatrix} - M_y \begin{pmatrix} b_i \\ b_j \\ b_k \end{pmatrix} \right)$$

2.4 쇠교자속과 푸리에 급수

권선의 쇠교자속은 다음과 같이 얻어진다.

$$A = \frac{N}{S} l_s \int A dS \quad (11)$$

여기서, N 은 권선당 코일턴수, A 는 평균 벡터포텐셜 값, S 는 권선부 면적, l_s 는 코어의 stack length이다. 그리고 주기함수 $f(t)$ 의 푸리에 급수 표현은 다음과 같다.

$$f(t) = \frac{1}{2} A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega_0 t + B_n \sin n\omega_0 t) \quad (12)$$

3. 모델해석과 모델의 전체크기 변형

3.1. 모델의 해석과 푸리에 변환

2차원 유한요소법을 이용하여 모델의 비선형 자장특성을 해석하여 얻은 magnetic vector potential을 가지고 권선의 쇠교자속을 계산하였고, 여기서 기본파의 성분은 푸리에 변환으로 얻었다. 이때 그림 2와 같은 해석모델에서 영구자석부분의 자화방향두께 d 의 크기를 2.7 (mm) 0.5 (mm)까지 0.2 (mm)씩 단계적으로 줄여가면서 각각 해석결과를 얻었다.

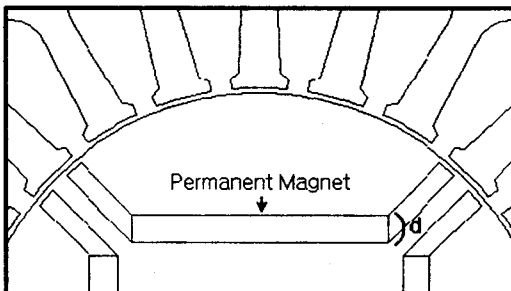


그림 2. 해석모델에서 영구자석 부분

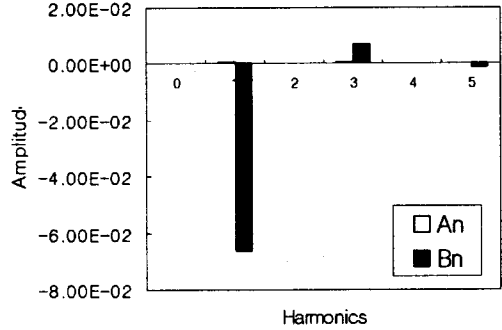


그림 3. 푸리에 변환으로 얻은 자속의 고조파성분

3.2. 모델의 전체크기 변형

이 논문의 목적인 영구자석의 재료비용을 절감시키기 위해서 영구자석의 크기 (d)를 줄인 후에는 원래의 전동기 모델에서 요구되었던 기본파 자속을 보상하기 위한 방안이 필요하다. 여기서는 전동기의 전체크기를 비례적으로 증가시키는 방안을 채택하였다. 기본 모델에서 새로운 모델로의 크기 증가비율은 식 (13)과 같다. 여기서 $X_{original}^{(1)} = \sqrt{A_{ol}^2 + B_{ol}^2}$ 은 영구자석의 자화방향두께 $d = 2.7$ (mm)인 기본모델의 제 1고조파 성분의 크기이고 $X_{change}^{(1)}$ 는 d 가 줄어든 모델의 제 1고조파 성분의 크기이다. 그리고 α 는 크기 증가비율이다.

$$\frac{X_{original}^{(1)}}{X_{change}^{(1)}} = \alpha \quad (13)$$

이 α 에 따라 그림 1과 같은 모델의 가로, 세로 길이를 비례적으로 증가시켰고, 깊이는 고정하였다.

표 2. 각 해석 모델의 $X^{(1)}$ 과 α

d (mm)	제1고조파성분크기 $X^{(1)}$	α
2.7	6.64E-02	1
2.5	6.50E-02	1.0213
2.3	6.34E-02	1.0471
2.1	6.16E-02	1.0767
1.9	5.97E-02	1.1117
1.7	5.75E-02	1.1544
1.5	5.50E-02	1.2071
1.3	5.20E-02	1.2755
1.1	4.85E-02	1.3679
0.9	4.42E-02	1.4999
0.7	3.89E-02	1.7061
0.5	3.19E-02	2.0777

4. 재료비용 산출

표 2의 α 에 따라 크기가 증가된 새로운 모델들의 자기적 특성을 다시 유한요소법으로 해석하여 검토한 후에 (그림 4), 기존 모델 ($d = 2.7$ mm)의 재료비용에 대한 새로운 모델들의 비용 변화를 산출하여 비교하였다. 여기서 영구자석 대 기타부분의 비용은 각각 80:20, 70:30, 60:40, 50:50으로 가정하였으며, 표 3은 그 중 70:30인 사례에 대한 결과치이다. 그림 5, 6, 7, 8에

서 비용 이득율이 (+)이면 전동기의 재료비용이 기존비용보다 감소된 것이고, (-)이면 기존 비용보다 더 증가하여 오히려 재료비가 상승했음을 나타낸다.

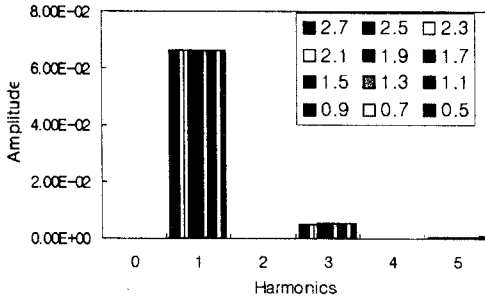


그림 4. 각각 크기가 증가된 모델의 고조파성분 비교

표 3. 영구자석 대 기타부분 비용이 70: 30 인 사례

해석모델	영구자석	기타부분	전체비용	비용이득율
2.7	70	30	100	0
2.5	67.61	31.29	98.897	1.1031
2.3	65.38	32.89	98.272	1.7284
2.1	63.12	34.78	97.895	2.105
1.9	60.89	37.08	97.955	2.0453
1.7	58.74	39.98	98.714	1.286
1.5	56.67	43.71	100.38	-0.377
1.3	54.83	48.81	103.64	-3.64
1.1	53.36	56.14	109.5	-9.497
0.9	52.49	67.50	119.98	-19.98
0.7	52.83	87.32	140.15	-40.15
0.5	55.96	129.51	185.46	-85.46

(단위 : %)

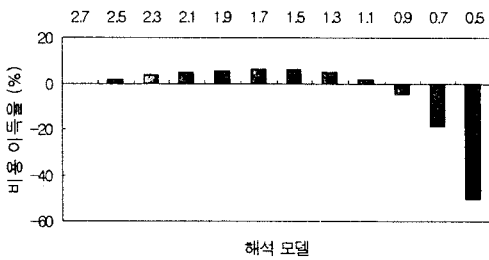


그림 5. 영구자석 대 기타비용 비 80:20

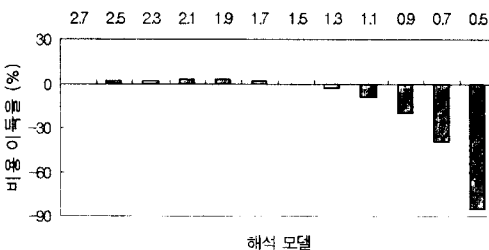


그림 6. 영구자석 대 기타비용 비 70:30

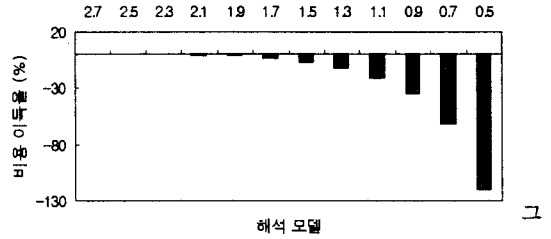


그림 7. 영구자석 대 기타비용 비 60:40

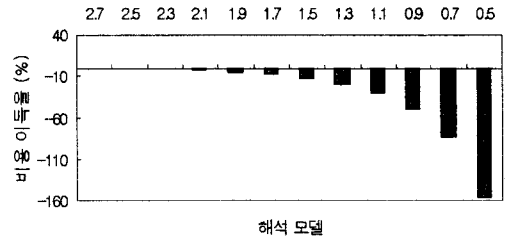


그림 8. 영구자석 대 기타비용 비 50:50

6. 결 론

본 논문에서는 BLDC 전동기에서 고가(高價)의 영구자석의 재료비용을 절감시키기 위한 설계방법으로써 영구자석의 크기만을 줄인 후 다시 전동기의 전체크기를 기본과 자속을 보상할 수 있는 만큼 증가시키는 방법을 사용하여 변화전후의 비용변화를 각각 비교하였다.

본 연구결과 일정 한계 이하로의 영구자석의 크기감소는 오히려 비용을 증가시킨다는 것을 알 수 있었고, 영구자석이 차지하는 비용이 높을수록 더 좋은 비용이득의 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 전체적으로 볼 때 비용이득을 얻어낸 정도가 현저히 높지 않아 많은 재료비용 절감효과는 기대할 수 없다.

하지만 본 논문에서는 단순히 회전자 부분에 있는 영구자석의 크기만을 고려했을 뿐, 고정자 부분에서 비용을 감소시킬 수 있을 것이라고 예상되는 두 가지 사항은 고려하지 않았다. 바로,

- 슬롯(slot)부분의 코일(coil)두께
:전동기의 전체 크기를 증가시켰으므로 코일의 단면적도 커지기 때문에 동손이 줄어들어 만일 이것을 고려한다면 재료비용을 더 줄일 수 있음.
- 고정자 요크(yoke)의 두께
:실제 요크를 통과하는 자속의 밀도가 매우 낮아질 것이므로 포화상태가 안되는 범위 내로 요크 크기를 줄여가면 매우 큰 비용절감이 또한 예상됨.

만일 위의 두 가지 사항이 고려된다면 더 향상된 비용 절감효과가 기대되며, 이는 현재 검증 중에 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] S.J Salon, "Finite Element Analysis of Electrical Machines", Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [2] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, 1992.
- [3] Hendershot, Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Magna Physics Publishing, 1994
- [4] 황병원, 이주신, "디지털 신호처리" Ohm사, 1994.