

단시간 고출력 BLDC 전동기 개발

공영경, 김현철*, 송종현**, 김병섭**, 김창림**, 홍성영**, 최경호**
국방과학연구소*, 호성중공업(주)**

The development of BLDC motor with short rating and high power density

Young-Kyoung Kong*, H.C. Kim*, J.W. Song**, B.S. Kim**, C.L. Kim**, S.Y. Hong**, K.H. Choi**
ADD*, HICO**

Abstract - ADD has developed a special BLDCM(brushless d.c. motor) that has small size and high power density. The model of BLDCM is like that of advanced nation. Design, production and test carried out with ADD and HICO. Now the performance of BLDCM is achieved 65% of design data. Also we are concerned with adhesion of magnet in rotor for high speed.

1. 서 론

최근에 이르러 전력소자의 발달과 고성능 영구자석의 제작이 가능하게 됨에 따라 기존의 브러시 직류전동기 대신에 브러시리스화된 직류전동기 사용이 점차적으로 증대되어 가고 있다.⁽¹⁾ 그 중에서도 영구자석의 성능은 나날이 향상되어 가고 있는 실정이며, 희토류 금속인 SmCo나 NdFeB 자석재료가 가장 많은 관심을 받고 있다.⁽²⁾ 그림1은 NdFeB 자석의 성능향상 추세를 보여주고 있다.

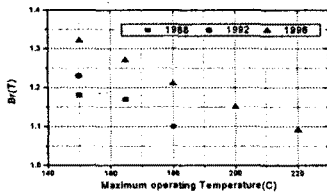


그림 1 NdFeB 자석 발전추세

영구자석의 부착형태에 따라서 크게 매입형과 표면부착형이 사용되고 있으며⁽³⁾ 본 논문에서는 고출력에 적합한 표면부착형에 대한 것으로서 표면부착형 영구자석의 잇점을 토대로 하여 고출력 영구자석에 대한 기저력 계산 및 토크 식 제시, 고출력을 낼 수 있는 새로운 영구자석 부착방안 제시 및 그 실험결과 등을 다루고 있으며, 이렇게 제작된 7상 6극 고출력 영구자석 전동기에 대한 부하시험 결과로서 그 타당성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 추진부하 특성

전동기의 최적화된 설계는 부하의 형태에 따라 달라진다. 가장 일반적인 전동기 부하종류는 크게 세가지로 나누어진다. 즉 일정출력, 일정토크 및 제곱비례 토크 특성이다. 추진부하 특성은 속도의 제곱에 비례하는 토크 특성을 가지고 있다.⁽⁶⁾ 추진부하는 동일한 동작점에서 최대토크, 속도 및 출력을 가지게 된다. 광범위한 일정출력 속도범위에 걸쳐 운전되는 전동차용 전동기에 사용되는 약계자 잇점이 적은 대신에 최대속도에서 최대토크를 내는 코너출력점에서 연속적으로 운전되도록 설계가 고려되어야 한다. 실질적

으로 약계자 설계는 높은 코너출력 운전을 방지할 수 있고, 또한 높은 임피던스를 갖도록 하는 경향을 가지게 한다.

2.2 표면부착형 영구자석 전동기의 잇점

영구자석 회전자의 가장 일반적인 배치형태는 표면부착형과 매입형의 2가지가 있다.

이들 2가지 형태중에서 고출력 추진용 전동기로서 표면부착형은 다음과 같은 이유로 유리한 점을 가지고 있다.

첫째, 큰 공극

매입형 회전자는 허용 누설자속을 유지하기 위하여 작은 공극을 필요로 하는 반면, 충격에 잘 견디고 정밀한 공극관리가 필요한 곳에서는 큰 공극을 가질 수 있는 구조인 표면부착형 회전자가 유리하다.

둘째, 낮은 감자 특성

아주 큰 반자계가 형성되면 영구자석 성질을 잃어버리는 감자현상이 일어난다. 표면부착형 영구자석의 경우에는 전기자 전류에 기인되어 발생하는 자석 본체에서 발생하는 자장이 적다. 이에 비해 매입형의 경우는 극 끝단에 자속이 집중되기 때문에 자석과 커풀링되는 자장이 증가하기 때문에 높은 토크나 비정상 작동시에 감자가 쉽게 일어난다.

셋째, 적은 누설자속

매입형 영구자석 회전자는 일반적으로 주어진 자속밀도에 대해 보다 큰 자석체적이 필요하기 때문에 극 누설자속이 크다.

넷째, 코너점(Corner Point) 운전

매입형 영구자석 회전자의 주요 잇점은 일정한 출력조건 하에서 약계자 운전이 가능한 점이 있으나, 속도의 제곱에 비례하는 추진부하에는 중요한 요소가 아니다. 또한 매입형의 경우 코너점에서 역률을 감소시킬 수 있는 단위 리액턴스가 높으나, 표면부착형의 경우 코너점에서 역률이 거의 1에 가까울 정도의 값으로 낮다.

다섯째, 큰 자석냉각효과

공극에 직접 노출되는 부분이 많기 때문에 열발산에 유리하여 냉각효과가 크다.

여섯째, 제작의 용이성 및 치부분 포화

규모가 크게 되면 표면부착형이 제작상 용이하고 회전자 자기회로 구조상 치부분의 자속분포 밀도가 매입형이 높기 때문에 고출력을 내는데는 표면부착형이 유리하다.

2.3 표면부착형 7상 6극 BLDCM 해석

가. 7상 6극 전동기 기저력 및 토크

1상의 권선을 N_s 라 두고, 이 권선이 고정자에 정현적으로 분포되어 있다고 하면, $\theta = \theta$, 위치에서 1상(a상) 전류에 의해 만들어진 기저력(MMF)는 식 (1)과 같다.

$$MMF_a(\theta_s) = \frac{N_s}{2} i_{as} \cos \theta_s \quad (1)$$

다른 2상(b상), 3상(c상)...7상(g상)에 대한 MMF 역시 식(2)...(7)과 같이 표현 되어진다.

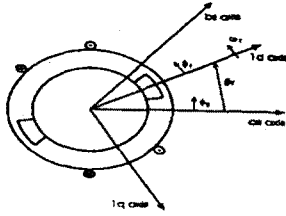


그림 2 7상 6극 BLDCM 모델

$$MMF_b(\theta_s) = \frac{N_s}{2} i_b \cos(\theta_s - \frac{2}{7}\pi) \quad (2)$$

$$MMF_c(\theta_s) = \frac{N_s}{2} i_c \cos(\theta_s - 2\frac{2}{7}\pi) \quad (3)$$

$$MMF_d(\theta_s) = \frac{N_s}{2} i_d \cos(\theta_s - 3\frac{2}{7}\pi) \quad (4)$$

$$MMF_e(\theta_s) = \frac{N_s}{2} i_e \cos(\theta_s - 4\frac{2}{7}\pi) \quad (5)$$

$$MMF_f(\theta_s) = \frac{N_s}{2} i_f \cos(\theta_s - 5\frac{2}{7}\pi) \quad (6)$$

$$MMF_g(\theta_s) = \frac{N_s}{2} i_g \cos(\theta_s - 6\frac{2}{7}\pi) \quad (7)$$

회전자에 N-S극 1쌍의 영구자석이 있다고 가정하면, 고정자 각상에서의 전압방정식은 식(8)과 같이 나타내어진다.

$$v_{is} = r_s i_{is} + \frac{d\lambda_{is}}{dt} \quad (i = a, b, \dots, g) \quad (8)$$

$$\lambda_{is} = \sum_{j=a}^g (L_{is,j} i_{js}) + \lambda_{is,lr} \quad (i = a, b, \dots, g)$$

$$L_{is,j} = L_b + \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \frac{\pi \mu_0 l r}{g} \quad (i=j)$$

$$\left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \frac{\pi \mu_0 l r}{g} \cos((i-j)\frac{2\pi}{7}) \quad (i \neq j)$$

여기서

λ_{is} : 쇠교자속

$L_{is,j}$: $i=j$ 시 자기 인덕턴스

$i \neq j$ 시 상호 인덕턴스

L_b, i_{js} : 상호 권선에 의해 만들어 지는 쇠교 자속

$\lambda_{is,lr}$: 영구자석에 의해 만들어 지는 쇠교 자속

L_b : 누설 인덕턴스

N_s : 고정자 한 상의 권선수

μ_0 : 공극 투자율

g : 공극

l : 회전자의 축방향 길이

r : 고정자 내경

또한 토크 방정식의 일반식은 식(9)와 같다.

$$T_{elr} = \left\{ -\frac{1}{2} (i_s)^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L_s - L_b] i_s + (i_s)^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} \Lambda_{lr} \right\} \quad (9)$$

$$\Lambda_{lr}^T = -\lambda_m [\cos \theta_r \cos(\theta_r - r) \cos(\theta_r - 2r) \cos(\theta_r - 3r) \cos(\theta_r - 4r) \cos(\theta_r - 5r) \cos(\theta_r - 6r)]$$

$$\lambda_m = \left(\frac{N_s}{2}\right) \pi r l B_m, \quad r = \frac{2\pi}{7}$$

표면부착형 영구자석 전동기에서는 릴럭턴스 토크 성분은 나타나지 않는다. 즉 (9)식의 첫 번째 항은 무시할 수 있다. 따라서 식(9)는 식(10)과 같이 정리된다.

$$T_{e,lr} = \lambda_m \{ i_{as} \sin \theta_r + i_{bs} \sin(\theta_r - r) + i_{cs} \sin(\theta_r - 2r) + i_{ds} \sin(\theta_r - 3r) + i_{es} \sin(\theta_r - 4r) + i_{fs} \sin(\theta_r - 5r) + i_{gs} \sin(\theta_r - 6r) \} \quad (10)$$

나. 전류제어 방법

키르히호프의 전류법칙으로부터 7상 입력전류의 합은 0이 이어야 한다. 따라서 본 시스템의 전류제어 방법으로 7상중 6상에는 구형파가 인가하고, 나머지 1상은 전류(轉流)를 위한 여유시간을 갖도록 하였다.

즉, $-\frac{\pi}{7} \leq \theta_r \leq \frac{\pi}{7}$ 구간에서의 입력전류는 다음과 같다.

$$i_{as} = 0$$

$$i_{bs} = i_{cs} = i_{ds} = -I_s$$

$$i_{es} = i_{fs} = i_{gs} = I_s$$

이것은 토크 식(10)에 대입하면 식(11)과 같이 얻어진다.

$$T_{e,lr} = \lambda_m I_s \{ -\sin(\theta_r - r) - \sin(\theta_r - 2r) - \sin(\theta_r - 3r) + \sin(\theta_r - 4r) + \sin(\theta_r - 5r) + \sin(\theta_r - 6r) \} \quad (11)$$

$$= 2\lambda_m I_s \cos \theta_r (\sin r + \sin 2r + \sin 3r)$$

$r = \frac{2}{7}\pi$ 이므로 이를 식(11)에 적용하면 식(12)와 같이 정리된다.

$$T_{elr} = 4.3812 \lambda_m I_s \cos \theta_r \quad (12)$$

본 전동기는 회전자 자석이 6극 구조를 이루고 있으며, 고정자는 직렬 3권선을 이루고 있다. 따라서 전체 발생 토크는 T_{el} 의 3배가 되어 식(13)과 같이 된다.

$$T_e = T_{elr} + T_{elr} + T_{elr} \quad (13)$$

$$= 13.1436 \lambda_m I_s \cos \theta_r \quad \left(-\frac{\pi}{7} \leq \theta_r \leq \frac{\pi}{7}\right)$$

2.4 고출력 달성을 위한 새로운 표면부착 방안

이상적인 표면부착형 영구자석 브러시리스 직류전동기의 경우 윗부분이 완전히 평탄한 구형파 형태의 파형을 하는 것이 원칙이나 프링징(fringing) 효과나 공극의 길이가 일정하지 않는 점과 고정자의 슬롯팅(slotting) 현상 때문에 이상적인 사다리꼴 파형을 이루지 않는 것이 실제 전동기에서의 파형이다.

이 중에서 공극의 길이를 일정하게 유지하는 것 이외에도 표면부착형 영구자석 전동기의 경우 고속으로 되면 될수록 원심력을 견딜 수 있는 접착력도 중요한 요소가 된다.

역기전력은 이론적으로 계산하는 방법은 지금까지 대표적으로 알려진 방법으로 BLV 방법과 치자속 파형(tooth-flux waveform)을 근거로 계산하는 방법이 있다.⁽⁴⁾

BLV 방법은 매끄럽고 비슬롯화된 고정자를 기준으로 계산한 것으로서 식(14), (15)와 같이 된다.

$$e = -\omega_m T_c r L \frac{\partial}{\partial \xi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} B(\theta) d\theta \quad (14)$$

$$\text{단 } e = -(B_1 - B_2) L V \quad (15)$$

ϵ : 기전력,

ω_m : 각속도

T_c : 코일 턴수,

r : 고정자 반경

ξ : 회전자 위치

θ_1, θ_2 : 코일 범위

$B(\theta)$: 공극주위의 θ_1, θ_2 사이의 자석 자속밀도 분포

L : 코일 길이,

$v = r\omega$

B_1, B_2 : θ_1, θ_2 에서의 자속밀도

치자속 파형을 근거로 계산한 식은 식(16)과 같다.

$$e = -\omega W_T L K_s \frac{dB_T}{d\xi} \quad (16)$$

단 W_T : 치폭(tooth width)

K_s : 격층율

B_T : 치 단면에서의 평균자속밀도

이론적인 계산식에서 보는 바와 같이 권선이나 슬롯은 고려되었으나 자석의 부착형태와 관계되는 요소는 고려되지 않았음을 볼 수 있다.

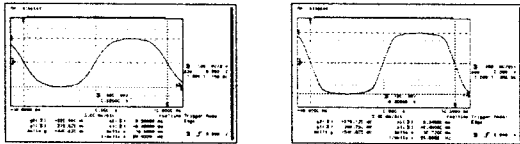
이러한 점들을 고려하여 구형파에 보다 더 가깝도록 영

구자석 표면부착 방안을 제시하고 25,000rpm 수준의 초고속 운전에도 견딜 수 있는 실험수행 결과를 제시하고자 한다.

역기전력의 파형이 구형파에 가까울수록 높은 출력을 낼 수 있다는 것은 잘 알려진 바와 같다. 따라서 이러한 파형 구현을 위해 표면부착 부위에 대해 자석이 면접착이 이루어져 접촉될 수 있도록 코아(core)면과 자석면이 그림 3과 같이 되도록 하여 면접착식 표면부착형 영구자석을 제작하여 원형에 부착된 표면부착형 영구자석 전동기와 실험비교한 결과 새롭게 제안된 면접착식의 표면부착형이 구형파에 가까운 역기전력 파형이 만들어짐을 확인할 수 있었고 접착제 부착성도 유리한 점을 가짐을 알 수 있었다. 그림 3, 4는 면접착식 및 원형접착식 표면부착 방식에 대한 그림 및 실험결과를 보여주고 있다.



그림 3 원형접착 및 면접착 형태



a) 원형접착 EMF (b) 면접착 EMF
그림 4 EMF 실험 결과

그림 5는 6슬롯 4극 표면부착형 영구자석 브러시리스 직류전동기에 대해서 BLV방법, 치자속파형 방법, 실제 실험결과 및 construction of tooth-EMF waveform 방법⁽⁵⁾에 의해서 계산된 결과에 대해 비교해 보이고 있다.

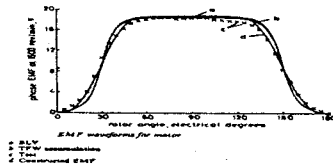


그림 5 역기전력 파형 비교(Miller논문)

그림 5에서 보는 바와 같이 실제 파형은 계산된 파형보다는 윗부분이 평탄하지 않고 있음을 보여 주고 있다. 따라서 실제 제작시에 면부착방식으로 표면부착하면 이론에 더 가까운 실제 파형이 만들어 짐을 알 수 있다.

2.5 고출력 표면부착형 영구자석 전동기 실험결과

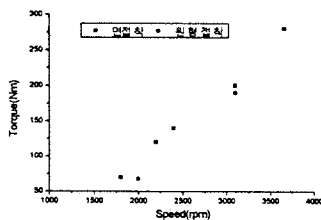


그림 6 부하시험 결과 비교

표 1 42 슬롯 7상6극 표면부착형 BLDCM 주요특성

구분	설계 내용	
	면접착	원형 부착
코아 변수	18면	원형
회전수	25,000rpm	
출력	100Kw	
공극	4.5mm	
회전자	외경	93mm
	내경	56mm
	회전자 코아	코발트 스틸
	자석	SmCo
	슬롯수	42
고정자	외경	152mm
	내경	102mm
	철심장	102mm
	턴수	2

부하시험 결과 그림 4에서⁽⁵⁾ 보는 바와 같이 면접착 영구자석 파형이 이상적인 구형파에 더욱 가까운 것을 확인할 수 있었고, 이것이 상중으로 이어져 차이를 보이고 있어 고출력을 내는데 유리함을 입증할 수 있었다. 소형 고출력의 경우 정밀한 치수 제작이 이루어 져야 되는 점이 고려되어야 한다.

3. 결 론

브러시리스 직류전동기의 적용범위가 점차적으로 확대되어 가고 있는 추세에 따라 전동기 자체의 소형 고출력화 달성을 위한 여러 가지 기술들이 개발되어져 가고 있다. 그 중에서도 표면부착형 영구자석 브러시리스 직류전동기의 경우 주추진부하에 적합한 전동기로서 많은 잇점을 가지고 있다. 이 전동기를 추진부하에 적용하기 위해서는 제한된 공간내에서 보다 고출력을 내는 것이 가장 중요한 요소가 되기 때문에 고출력 달성을 위한 새로운 표면부착 방법인 면접착식 영구자석 표면부착 방법을 제안 하였으며, 42슬롯 7상 6극 전동기에 적용하여 원형부착 방법과 비교한 결과 고출력 달성에 유리함을 입증하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Jocke F. Gieras and Mitchell Wing, Permanent Magnet Motor Technology Design and Application, Marcel Dekker, Inc.
- [2] T.J.E. Miller, Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives, Clarendon Press, Oxford, 1989
- [3] Peter Mongeu, "High Torque/High Power Density Permanent Magnet Motors", Naval Symposium on Electric Machines, proceedings, July 28-31, 1997, The Hotel Viking, Newport, RI, U.S.A.
- [4] J.R. Handershot Jr, T.J.E. Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motors, Magna Physics Publishing, 1994
- [5] T.J.E. Miller, R. Rabinovici, "Back-EMF Waveforms and core losses in brushless DC motors", IEE Proc. Electric Power Appl., vol. 141, No. 3, May 1994