

수치해석 방법을 적용한 BLDC 전동기의 역기전력 연구

김 현 철

국방과학연구소

(2007. 8. 1. 접수 / 2008. 7. 9. 채택)

A Study on Back EMF of BLDC Motor Using Numerical Analysis Method

Hyun-Cheol Kim

Agency for Defense Development

(Received August 1, 2007 / Accepted July 9, 2008)

Abstract : This report describes the analytical solution of back EMF for BLDC motor using numerical analysis of air gap flux density. The analysis of air gap flux density is the key to expect the performance of back EMF for the design of brushless motor. The numerical analysis and FEM analysis are performed to vary attachment of stator side or rotor side, radial flux magnetization or parallel flux magnetization, magnet arc angle in the condition of constant air gap. This results have more reliable data comparing with test result of the back EMF for 7 phase BLDC motor.

Key Words : back EMF, air gap flux density, surface magnet, radial flux, parallel flux

1. 서 론

브러시리스 전동기의 스위칭되는 상전류 파형은 불완전하게 설계된 역기전력 파형에 의해 상전류 파형은 원하는 파형에서 벗어나 왜곡된 파형이 되게 된다. 이와 같이 왜곡된 파형은 전자기 노이즈가 되어 주변기기에 영향을 미쳐 주변기기의 오동작의 원인이 되며, 전기기기 및 전력전자 분야 안전에 문제를 될 수 있다. 이를 개선하기 위한 방법으로 공극자속밀도 파형에 대해 분석하여 브러시리스 전동기에 적합한 파형을 식별하여야 하며, 이를 근거로 하여 적절한 역기전력 파형을 도출하여야 한다.

표면부착형 영구자석 전동기 설계의 중요한 설계 인자인 역기전력 분석을 위해서 공극자속밀도에 대한 영구자석 형상과 공극변화에 따른 특성이 중요한 요소를 차지한다. 수치해석 방법으로 표면부착형 영구자석 전동기의 공극자속밀도 해석을 시도한 대표적으로 발표된 논문이 N. Boules¹⁾로부터 시작되어 최근의 M. Popescu²⁾에 이르기 까지 현재까지도 다양한 연구가 지금까지도 활발히 전개되고 있다.

본 논문은 표면부착형 영구자석 전동기의 역기전력에 대한 수치적 해를 구하기 위해 역기전력 해석을 위한 핵심인 공극자속밀도에 대한 수치적 해석

을 근거로 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 이용하여 역기전력 해석적 계산 방법인 BLV 방법으로 브러시리스 전동기의 역기전력을 산출하였다³⁾.

2. 공극자속밀도의 이론적 해석

공극자속밀도에 대한 해석적 모델링, 평행방향 자화 및 경방향 자화 등에 대한 해는 기 발표된 논문을 참고하고, 해석을 위해 사용된 모델은 Fig. 1 과 같다⁴⁾.

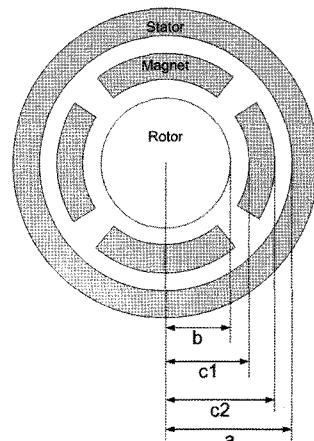


Fig. 1. Analytical model of brushless motor.

2.1. 경방향 자화에 대한 공극자속밀도

(1) 반경 $r = a$ 에서

$$\begin{aligned} [B_a]_R &= \int_{c_1}^{c_2} B'_{ra} dc = \sum_{m=0}^{\infty} F_{anR} \cos(n\theta) \\ &= \int_{c_1}^{c_2} \left[\sum_{m=0}^{\infty} 2p \frac{2}{\pi} \frac{\mu_0}{a} k_m \frac{B_r}{\mu_0} \frac{a^n}{c^n} \frac{c^{2n} + b^{2n}}{a^{2n} - b^{2n}} \times \right. \\ &\quad \left. \sin(n\xi) \cos(n\theta) \right] dc \end{aligned} \quad (1)$$

(2) 반경 $r = b$ 에서

$$\begin{aligned} [B_b]_R &= \int_{c_1}^{c_2} B'_{rb} dc = \sum_{m=0}^{\infty} F_{bnR} \cos(n\theta) \\ &= \int_{c_1}^{c_2} \left[\sum_{m=0}^{\infty} 2p \frac{2}{\pi} \frac{\mu_0}{b} k_m \frac{B_r}{\mu_0} \frac{b^n}{c^n} \frac{c^{2n} + a^{2n}}{a^{2n} - b^{2n}} \times \right. \\ &\quad \left. \sin(n\xi) \cos(n\theta) \right] dc \end{aligned} \quad (2)$$

2.2. 평행방향 자화에 대한 공극자속밀도

평행 자화의 경우 자계는 3개의 자계 성분의 합이 된다.

(1) 측면 $[K_{ml}]$ 에서 전류에 의한 B_L

(2) 곡면 $r = c_1$ $[-K_{mc}]$ 에서 전류에 의한 B_{c1}

(3) 곡면 $r = c_2$ $[K_{mc}]$ 에서 전류에 의한 B_{c2}

해석을 위해 가정된 자기회로의 선형적 동작은 전체 자계분포를 얻기 위해 중첩을 이용함으로서 얻을 수 있다.

$$[B_a]_p = [B_a]_L + [B_a]_{c1} + [B_a]_{c2} \quad (3)$$

$$[B_b]_p = [B_b]_L + [B_b]_{c1} + [B_b]_{c2} \quad (4)$$

(1) 측면에서 공극자속밀도

측면에서의 공극자속밀도는 경방향 자화전류 K'_{ml} 와 선형적인 관계로 구할 수 있다.

$$K_{ml} = K'_{ml} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (5)$$

결과적으로

$$[B_a]_L = \sum_{m=0}^{\infty} F_{anL} \cos(n\theta) \quad (6)$$

$$[B_b]_L = \sum_{m=0}^{\infty} F_{bnL} \cos(n\theta) \quad (7)$$

여기서

$$F_{anL} = F_{anR} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (8)$$

$$F_{bnL} = F_{bnR} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (9)$$

(2) 곡면 $r = c_1$ 에서 전류에 의한 자계

(가) 반경 $r = a$ 에서

$$\begin{aligned} [B_a]_{c1} &= \sum_{m=0}^{\infty} 2p \left[\frac{2}{\pi} \frac{\mu_0 i}{a} \frac{a^n}{c_1^n} \frac{c_1^{2n} + b^{2n}}{a^{2n} - b^{2n}} \sin(n\xi) \right] \times \\ &\quad \cos(n\theta) \\ &= \int_0^{\alpha/2} \left[\sum_{m=0}^{\infty} 2p \frac{2}{\pi} \frac{\mu_0}{a} \left[-k_m \frac{B_r}{\mu_0} c_1 \sin\xi \right] \times \right. \\ &\quad \left. \frac{a^n}{c_1^n} \frac{c_1^{2n} + b^{2n}}{a^{2n} - b^{2n}} \sin(n\xi) \cos(n\theta) \right] d\xi \end{aligned} \quad (10)$$

(나) 반경 $r = b$ 에서

$$\begin{aligned} [B_b]_{c1} &= \sum_{m=0}^{\infty} 2p \left[\frac{2}{\pi} \frac{\mu_0 i}{b} \frac{a^n}{c_1^n} \frac{c_1^{2n} + b^{2n}}{a^{2n} - b^{2n}} \sin(n\xi) \right] \times \\ &\quad \cos(n\theta) \\ &= \int_0^{\alpha/2} \sum_{m=0}^{\infty} 2p \frac{2}{\pi} \frac{\mu_0}{b} \left[-k_m \frac{B_r}{\mu_0} c_1 \sin\xi \right] \times \\ &\quad \frac{b^n}{c_1^n} \frac{c_1^{2n} + a^{2n}}{a^{2n} - b^{2n}} \sin(n\xi) \cos(n\theta) d\xi \end{aligned} \quad (11)$$

(3) 곡면 $r = c_2$ 에서 전류에 의한 자계

이 성분은 앞의 곡면 $r = c_1$ 에서 전류에 의한 자계에 의해 얻어지는 전류와 반대 극성으로 인해 전류는 크기는 같고 부호는 반대로 된다.

(가) 반경 $r = a$ 에서

$$\begin{aligned} [B_a]_{c2} &= \sum_{m=0}^{\infty} 2p \left[\frac{2}{\pi} \frac{\mu_0 i}{a} \frac{a^n}{c_2^n} \frac{c_2^{2n} + b^{2n}}{a^{2n} - b^{2n}} \sin(n\xi) \right] \times \\ &\quad \cos(n\theta) \\ &= \int_0^{\alpha/2} \sum_{m=0}^{\infty} 2p \frac{2}{\pi} \frac{\mu_0}{a} \left[k_m \frac{B_r}{\mu_0} c_2 \sin\xi \right] \times \\ &\quad \frac{a^n}{c_2^n} \frac{c_2^{2n} + b^{2n}}{a^{2n} - b^{2n}} \sin(n\xi) \cos(n\theta) d\xi \end{aligned} \quad (12)$$

(나) 반경 $r = b$ 에서

$$\begin{aligned} [B_b]_{c2} &= \sum_{m=0}^{\infty} 2p \left[\frac{2}{\pi} \frac{\mu_0 i}{b} \frac{a^n}{c_2^n} \frac{c_2^{2n} + b^{2n}}{a^{2n} - b^{2n}} \sin(n\xi) \right] \times \\ &\quad \cos(n\theta) \\ &= \int_0^{\alpha/2} \sum_{m=0}^{\infty} 2p \frac{2}{\pi} \frac{\mu_0}{b} \left[k_m \frac{B_r}{\mu_0} c_2 \sin\xi \right] \times \\ &\quad \frac{b^n}{c_2^n} \frac{c_2^{2n} + a^{2n}}{a^{2n} - b^{2n}} \sin(n\xi) \cos(n\theta) d\xi \end{aligned} \quad (13)$$

3. 역기전력의 이론적 해석

이상적인 표면부착형 영구자석 브러시리스 직류 전동기의 역기전력 파형의 상단부분이 평탄한 사

다리파 형태의 파형을 하는 것이 원칙이나 프링징(fringing) 효과, 공극의 길이가 일정하지 않는 점과 고정자의 슬롯팅(slotting) 현상 때문에 이상적인 사다리파 형태를 이루지 않는 것이 실제로 전동기에 서 나타나는 파형이다.

역기전력은 이론적으로 계산하는 방법은 지금까지 대표적으로 알려진 방법으로 BLV 방법과 치자 속 파형(tooth-flux waveform)을 근거로 계산하는 방법이 있다³⁾.

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

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

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

e : 기전력, ω_m : 각속도, θ_1, θ_2 : 코일 피치,
 T_c : 코일 턴수, r : 고정자 반경, ξ : 회전자 위치,
 $B(\theta)$: 공극주위 θ_1, θ_2 사이 자석 자속밀도 분포
 L : 코일 길이, $v = r\omega$,
 B_1, B_2 : θ_1, θ_2 에서의 자속밀도

4. 시뮬레이션 결과

표면부착형 영구자석 전동기의 시뮬레이션을 위한 모델에 적용된 파라미터는 Table 1과 2와 같다.

4.1. 경방향 자화 시뮬레이션 결과

4.1.1. 영구자석이 고정자에 부착된 경우(공극 일정)

영구자석의 각도 변화에 따른 경방향 자화에 의한 공극자속밀도의 시뮬레이션 수행한 결과는 Fig. 2와 같고 FEM해석 결과는 Fig. 3과 같다.

시뮬레이션 특성 결과에 의해 다음과 같이 판단 할 수 있다.

Table 1. Permanent magnet attachment on stator

a : 0.03587 [m]	b : 0.026 [m]
c1 : 0.02687	c2 : a
Br : 0.635 [Tesla]	p : 4극
recoil permeability : 1.22	

Table 2. Permanent magnet attachment on rotor

a : 0.03587 [m]	b : 0.026 [m]
c1 : b	c2 : 0.3587
Br : 0.635 [Tesla]	p : 4극
recoil permeability : 1.22	

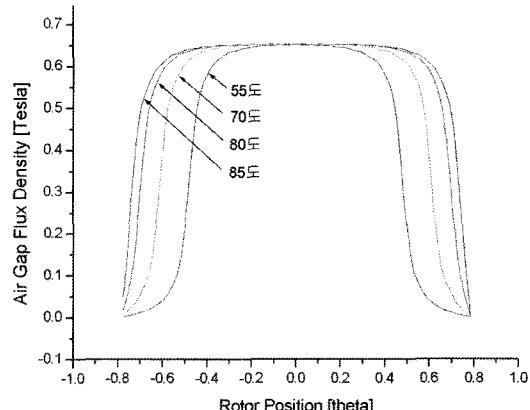


Fig. 2. The result of air gap flux density adhered to stator side(radial direction magnetization).

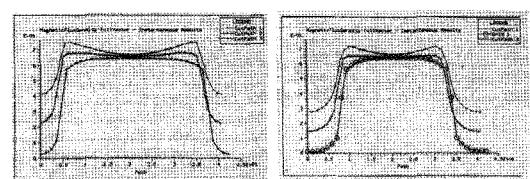


Fig. 3. The result of FEM analysis(stator adhesion/radial direction magnetization).

1) 고정자에 부착되는 영구자석의 경방향 자화는 결과적으로 사각파 공극자속밀도를 만들고 있다. 회전자에 부착된 영구자석의 경방향 자화 공극 자속밀도의 사각파 보다 모양이 부족하다.

2) 직류기에 사용되는 사각형 공극자속밀도로 이용할 수 있음을 확인할 수 있다.

3) 시뮬레이션 결과와 FEM 해석결과가 잘 일치함을 알 수 있다. FEM은 MSC/EMAS를 이용하여 시뮬레이션 조건과 같은 조건으로 수행하였다.

4.1.2. 영구자석이 회전자에 부착된 경우(공극 일정)

영구자석의 각도 변화에 따른 경방향 자화에 의한 공극자속밀도의 시뮬레이션 수행한 결과는 Fig. 4와 같고 FEM해석 결과는 Fig. 5와 같다.

시뮬레이션 특성 결과에 의해 다음과 같이 판단 할 수 있다.

1) 회전자에 부착되는 영구자석의 경방향 자화는 결과적으로 가장 사각파에 가까운 공극자속밀도를 만들고 있다.

2) BLDC 전동기에 사용되는 사각형 공극자속밀도로 이용할 수 있음을 확인할 수 있다.

3) 시뮬레이션 결과와 FEM 해석결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

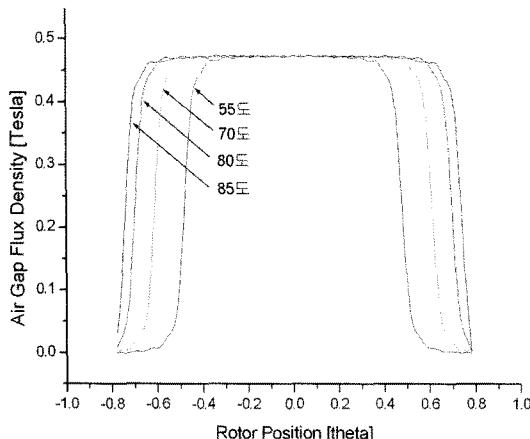


Fig. 4. The result of air gap flux density adhered to rotor side(radial direction magnetization).

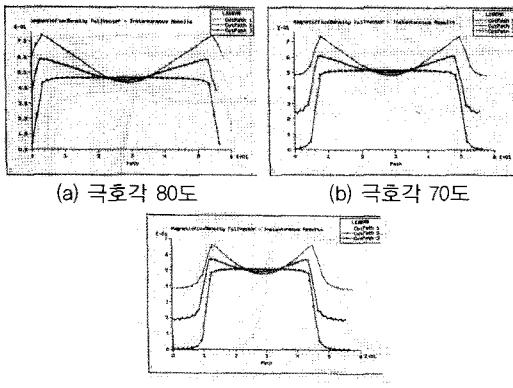


Fig. 5. The result of FEM analysis(rotor adhesion/radial direction magnetization).

4.2. 평행방향 자화 시뮬레이션 결과

4.2.1. 영구자석이 고정자에 부착된 경우(공극 일정)

영구자석의 각도 변화에 따른 평행방향 자화에 의한 공극자속밀도는 2.4절에서 언급한 바와 같이 영구자석에 대해 측면(L), 곡면(C1) 및 곡면(C2)의 자속밀도를 더한 결과가 공극자속밀도가 된다. 영구자석의 각도 변화에 따른 평행방향 자화에 의한 공극자속밀도는 Fig. 6 및 Fig. 7과 같고 FEM해석 결과는 Fig. 8과 같다.

시뮬레이션 특성 결과에 의해 다음과 같이 판단 할 수 있다.

- 1) 고정자에 부착되는 영구자석의 평행방향 자화는 경방향 자화에 비해 극호각이 90도에 가까울 수록 정현파 공극자속밀도에 가까움을 알 수 있다. 반면 50도에 가까울수록 사각파 공극자속밀도에 가까움을 알 수 있다.

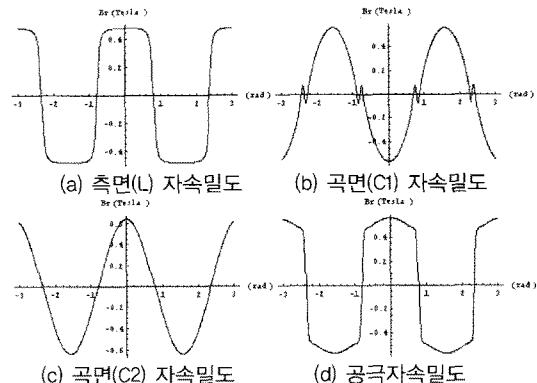


Fig. 6. The result of air gap flux density adhered to stator side(parallel direction magnetization/85° pole arc).

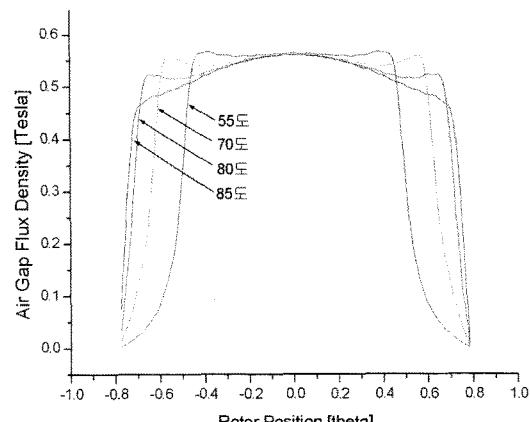


Fig. 7. The results of air gap flux density adhered to stator side(parallel direction magnetization).

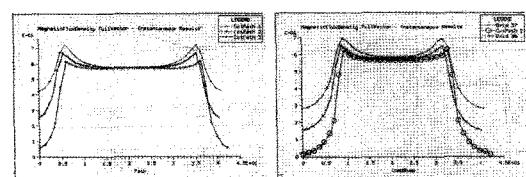


Fig. 8. The results of FEM analysis(stator adhesion/parallel direction magnetization).

2) 극호각이 작을수록 직류기에 사용되는 사각파 공극자속밀도로 이용할 수 있음을 확인할 수 있다.

3) 시뮬레이션 결과와 FEM 해석결과가 잘 일치 함을 알 수 있다.

4.2.2. 영구자석이 회전자에 부착된 경우(공극 일정)

영구자석의 각도 변화에 따른 평행방향 자화에 의한 공극자속밀도는 2.2절에서 언급한 바와 같이 영구자석에 대해 측면(L), 곡면(C1) 및 곡면(C2)의

자속밀도를 더한 결과가 공극자속밀도가 된다. 영구자석의 각도 변화에 따른 평행방향 자화에 의한 공극자속밀도의 시뮬레이션 수행한 결과는 Fig. 9 및 Fig. 10과 같고 FEM해석 결과는 Fig. 11과 같다.

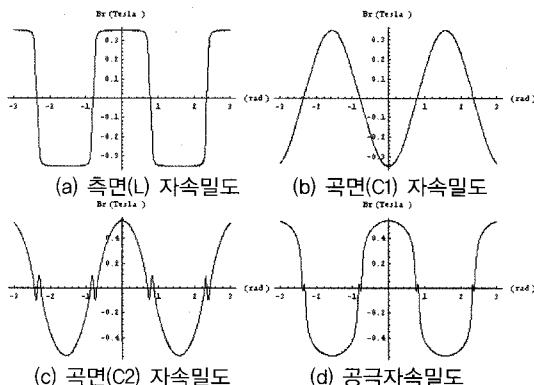


Fig. 9. The result of air gap flux density adhered to rotor side(parallel direction magnetization/85° pole arc).

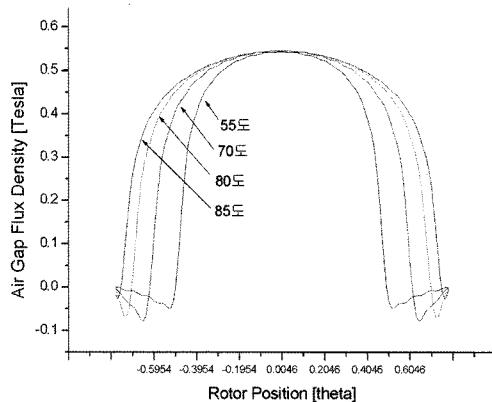


Fig. 10. The result of air gap flux density adhered to rotor side(parallel direction magnetization).

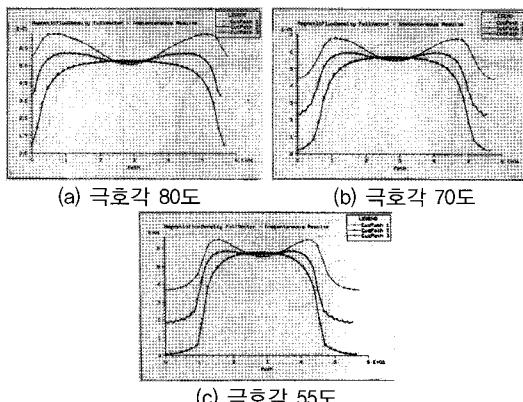


Fig. 11. The result of FEM analysis(rotor adhesion/parallel direction magnetization).

시뮬레이션 특성 결과에 의해 다음과 같이 판단할 수 있다.

- 1) 회전자에 부착되는 영구자석의 평행방향 자화는 결과적으로 가장 정현파에 가까운 공극자속밀도를 만들고 있다.
- 2) PMSM에 사용되는 정현파 공극자속밀도로 이용할 수 있음을 확인할 수 있다.
- 3) 시뮬레이션 결과와 FEM 해석결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

4.3. 역기전력 시뮬레이션 결과

공극자속밀도의 해석적인 결과를 이용하여 역기전력을 구하기 위해 대상 모델을 7상 6극 BLDC 전동기에 대해 적용하였다. 역기전력 특성 분석은 사각파 공극자속밀도를 만드는 경방향 자화에 의한 공극자속밀도를 도출하고 이를 근거로 하여 상기전력 및 선간 역기전력을 해석하였다.

7상 BLDC 전동기의 시뮬레이션을 위한 모델에 적용된 파라미터는 Table 3과 같다. 7상 BLDC 전동기의 상세한 내부 단면도는 Fig. 12와 같다.

4.3.1. 공극자속밀도 시뮬레이션 결과

영구자석의 각도 변화에 따른 경방향 자화에 의한 공극자속밀도의 시뮬레이션 수행한 결과는 Fig. 13과 같으며 공극자속밀도의 상단 최대값은 약 0.59[Tesla]이며 설계값에 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3. The Dimensions of 7 phase BLDC motor

$a : 0.051$ [m]	$b : 0.037$ [m]
$c_1 : b$	$c_2 : 0.0465$ [m]
$Br : 1.06$ [Tesla]	$p : 6$ 극
recoil permeability : 1.1	

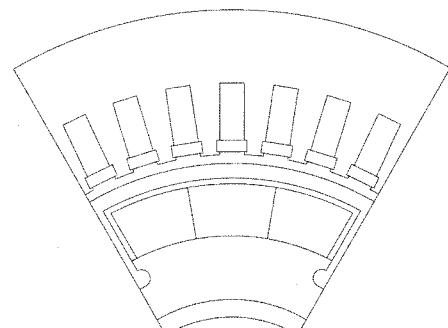


Fig. 12. Configuration of 7 phase BLDC motor drive.

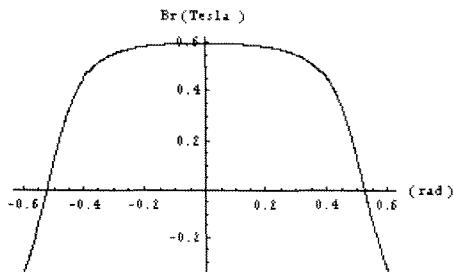


Fig. 13. The analysis result of air gap flux density for high speed 7 phase BLDC motor drive.

4.3.2. 역기전력 시뮬레이션 결과

7상 6극 BLDC 전동기의 선간 역기전력은 Fig. 14와 같으며 선간 전압 최대값은 약 286[V]이며 설계값으로 원하는 선간 역기전력 파형임을 확인할 수 있었다.

Fig. 15는 제작된 7상 BLDC 전동기의 측정된 선간 역기전력으로 Fig. 14의 시뮬레이션 결과와 거의 같은 약 286[V]이며 설계값에 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다.

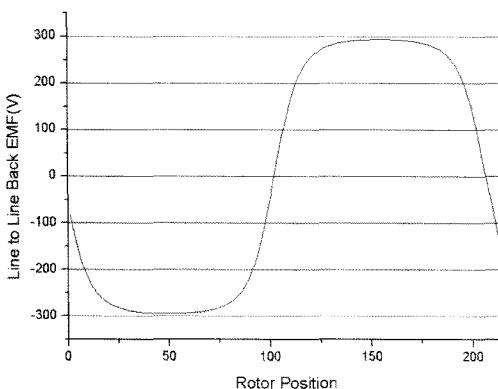


Fig. 14. The simulation result for line to line back EMF.

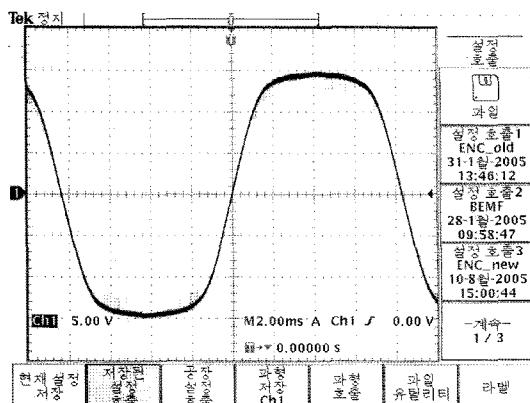


Fig. 15. The test result for line to line back EMF.

5. 결 론

브러시리스 전동기의 불완전하게 설계된 역기전력 파형에 의해 상전류 파형은 원하는 파형에서 벗어나 왜곡된 파형이 되게 된다.

이를 개선하는 한 방법으로 역기전력 파형의 근원적 요소인 공극자속밀도 파형에 대해 수치해석 모델화 하였으며 이를 근거로 하여 역기전력 파형을 도출할 수 있었다. 7상 6극 BLDC 전동기에 대해 역기전력 측정 결과와 시뮬레이션 결과가 잘 맞음을 확인할 수 있었다.

본 연구의 수치해석 방법에 의한 역기전력을 구하는 기법은 영구자석의 다양한 형상설계로부터 최적 형상설계에 까지 적용할 수 있으며, 설계변경에 용이하게 적용할 수 방법을 제시하였다.

참고문헌

- 1) N. Boules, "Prediction of No Load Flux Density Distribution in Permanent Magnet Machines", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-21, No. 4, pp. 633 ~ 643, 1985.
- 2) K. F. Rasmussen, J. H. Davis, T. J. E. Miller, M. I. McGilp and M. Olaru, "Analytical and Numerical Computation of Air-Gap Magnetic Fields in Brushless Motors with Surface Permanent Magnets", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-21, No. 4, pp. 633 ~ 643, 1985.
- 3) J.R. Handershot Jr, T.J.E. Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motors, Magna Physics Publishing, 1994.
- 4) 김현철, 김장목, 김철우, 표면부착형 영구자석 전동기의 정현파 공극자속밀도 연구, 대한전기학회 논문지, 56-9-9, pp. 1571 ~ 1576, 2007.