영구자석형 전동기의 구동방법에 따른 전기적 특성 및 전자기적 가진원 분석

Electrical Characteristics and Electromagnetic Excitation Force Comparison of PM Motor according to the Driving method

이 수 진*. 김 도 진*. 이 병 화*. 홍 정 표†

Su-Jin Lee, Do-Jin Kim, Byeong-Hwa Lee and Jung-Pyo Hong

(Received October 17, 2012 ; Revised December 13, 2012 ; Accepted December 13, 2012)

Key Words : BLAC Motor(BLAC 전동기), BLDC Motor(BLDC 전동기), Noise and Vibration(소음 및 진동), PMSM(영구자석형 전동기)

ABSTRACT

This paper presents a result of the mechanical noise and vibration analysis as well as the electrical characteristics analysis of the permanent magnet(PM) motor according to the driving method that is Brushless DC(BLDC) drive and Brushless AC(BLAC) drive. To do that, the characteristics of the PM motor, which have the same output power but different driving method, are investigated. At that time, the characteristics such as torque, torque ripple and flux density, and so on, are obtained by finite element analysis(FEA). Besides, noise and vibration are obtained by spectrum analysis. The magnetic noise is defined as noise generated from vibrations due to electromagnetic excitation force. In this paper, the electromagnetic excitation force is analyzed and design process of noise reduction is proposed. Finally, The validity of the analysis results is verified by test.

1. 서 론

영구자석형 전동기는 유도전동기나 릴럭턴스 전동기에 비해 고효율 및 높은 출력 밀도를 가지므로 전동기의 소형 경량화가 가능하다. 따라서 소형 가전 기기에서부터 대형 발전기에 이르기 까지 다양한 분야에 적용되고 있으며 적용 범위를 넓혀 자동차용 부품에서도 기계적 유압 장치들이 전기적인 전동기로 바뀌고 있는 실태이다. 이러한 전동기 시장은 지속적으로 증가하였고 기술적인 성능도 비약적으로 향상되었다. 그러나 최근 국제적으로 소음에 대한

규제가 엄격해 지면서, 진동소음 측면에서의 문제점은 계속 제기되고 있으며 이를 해결하기 위하여 여러 가지 방안이 제시되고 있다⁽¹⁾.

영구자석형 전동기는 제어 방법에 따라 두 가지 종류로 구분할 수 있다. 하나는 Brushless DC(BLDC) 전동기로 hall sensor를 이용하여 회전자의 위치를 분석하고 6-step 구동방법에 의해 구형과 전류를 인가해주는 방식이고, 다른 종류인 Brushless AC(BLAC) 전동기는 PWM제어를 이용하여 정현과 전류를 인가하는 제어방법이다. 이러한 제어방법의 차이에 따른 전동기 성능을 비교하기 위하여 동일한 전동기로 구동 방법(BLDC와 BLAC)을 달리함으로써 토크리플

† Corresponding Author ; Member, Hanyang University
E-mail : hongjp@hanyang.ac.kr
Tel : +82-2-2220-4466, Fax : +82-2-2220-4465

* Hanyang University

A part of this paper was presented at the KSNVE 2012 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Moon Kyu Kwak

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

및 효율과 같은 전동기 특성이 변함을 비교하는 것은 매우 중요한 연구 중에 하나라 생각된다. Shi et al.⁽²⁾의 논문에서는 두 가지 모드의 토크-속도 특성을 나타내었다. Zhu et al.⁽³⁾의 논문에서는 구형과 역기전력 파형을 가지는 전동기를 대상으로 BLDC 및 BLAC 구동 시 약자속 제어에 대한 연구를 진행하였다. 추가적으로, Masataka et al.⁽⁴⁾의 논문에서는 BLDC 전동기의 효율을 BLAC 전동기만큼 증가시키는 최적설계 방법을 설명하고 있다. 하지만, 기계적인 진동소음에 관해서는 나타나고 있지 않은 논문들이다. 따라서 이 논문에서는 전동기의 구동방법에 따른 전기적인 특성 비교뿐만 아니라 기계적인 진동소음 분석을 위한 전자기 가진원 분석방법 소개와 구동방법에 따른 진동소음 분석 결과를 나타내고자 한다.

전동기의 소음원은 크게 구조적인 원인과 전자기적 원인으로 나눌 수 있다. 구조적인 원인은 모드 실험과 해석을 통하여 분석 할 수 있으나 기계적 강성 증가를 통한 고유진동수 변화나 소음원 차폐 등의 기계적인 보강 이라는 결과를 얻을 수 있다. 전동기의 진동소음 원인을 구명하기 위해서는 전자기적인 원인을 분석하는 것이 옳은 방법이라 사료된다. 전자기적인 원인은 전자기력으로 작용하는 글로벌 포스인 코깅토크와 토크리플이 있으며, 로컬 포스인 접선방향과 법선 방향 로컬 포스가 있다. 그러나 전동기의 소음원을 자세히 분석하기 위해서는 글로벌 포스의 요소인 로컬 포스를 연구할 필요가 있다⁽⁵⁾.

이 논문에서는 Maxwell stress tensor를 이용한 유한요소 해석법(finite element analysis: FEA)을 통하여 공간과 시간에 대한 스펙트럼 분석(spectrum analysis)을 수행하고 이를 바탕으로 전동기의 진동소음을 분석하고자 한다. 먼저, 유한요소 해석법과 동특성 해석(dynamic simulation), 그리고 소음 진동의 스펙트럼 분석을 통하여 전자기적 가진력 및 토크리플, 그리고 전동기 효율과 제작비용에 관하여 구동 방법에 따른 성능 비교 분석을 수행한다. 다음으로 대상전동기의 실험을 통하여 해석치와 실험치를 비교 분석함으로써 해석적인 결과의 신뢰성을 검증한다.

2. 유한요소 해석을 통한 전자기적 해석

2.1 대상 전동기

Electric power steering(EPS)용 전동기인 대상전

동기의 형상 및 실험을 위해 제작된 시작품 전동기를 Fig. 1에 나타내었다. 대상 모델은 10극 12슬롯 전동기로 전기적인 성능이 뛰어난 분수 슬롯 수로 제작되었으며 skew없이도 코깅토크 및 토크리플이 작아 제작적인 측면에서의 이점이 있다. 800W급 전동기이며 정격 속도 및 토크는 2500 rpm과 3.0 Nm이다. 자세한 사양은 Table 1에 나타내었다. Fig. 2는 회전자 위치 검출을 위한 hall sensor를 나타내었고 인버터의 구조는 Fig. 3에 나타내었다.

2.2 전기적인 특성 해석

일반적으로 전동기의 자기회로 분석을 위하여 time-stepping 유한요소 해석을 이용한다. 이러한 유한요소 해석을 통하여 얻은 파라미터 값을 바탕으로 수식적으로 먼저 구동방법에 따른 전동기 특성을 비교한다. 전동기의 전체적인 속도-토크 특성은기본적인 전압방정식으로부터 산정하게 된다.

$$V_a = \frac{e_{LL_mean}}{2} + i_L R_a + j\omega L_a i_L \quad (1)$$

$$V_{a_rms}^2 = (i_a R_a + E_a)^2 + (\omega L_a i_a)^2 \quad (2)$$

Fig. 1 Cross sections of PMSM models and test motor

Table 1 Specifications of the analysis model

List	Unit	Values
DC link voltage	V	12
Rated speed	rpm	2500
Number of Pole	-	10
Number of slots	-	12
Stack length	mm	44
Number of turn per phase / Parallel circuit	Turn	12 / 2
Residual induction(Br)	T	1.2

Fig. 2 Circuit diagram of wye-connected motor

Fig. 3 Current wave by dynamic analysis

$$i_L^2(R_a^2 + \omega^2 L_a^2) + i_L(2R_a e) + (e^2 - V_a^2) = 0 \quad (3)$$

식(3)의 근의 공식의 해에서 전류와 속도의 관계를

Fig. 4 Back EMF wave and current wave

얻으면 인덕턴스를 고려한 토크와 속도의 관계식을 얻을 수 있다. 하지만 이 논문에서는 앞에서 언급한 수식적인 방법 보다 실험 치와 해석 치의 오차를 줄일 수 있는 동특성 해석 기법을 도입하여 수행하였다.

동특성 해석의 경우 수식적인 검토와 달리 역기 전력 값을 상수로 이용하지 않고 전기적인 위상에 따른 각각의 파라미터 값을 이용하고, 인버터 구동을 포함하는 방법으로 실험 치와의 오차를 줄일 수 있다. 그리고 각 구동방법에 따른 인버터 제어를 포함하여 전동기의 특성을 예측함으로써 해석의 신뢰성을 더 높일 수 있다. 정격 속도에서의 특성 비교를 위하여 동특성 해석을 통한 입력 전류 파형을 이용하여 유한요소 해석을 수행한다.

동특성 해석을 통하여 얻은 전류 파형은 Fig. 3에

나타내었다. BLDC구동과 BLAC 구동의 가장 큰 차이점은 입력 전류의 파형이다. Fig. 4는 각 구동 방법에 따른 입력 전류와 역기전력의 관계를 나타낸다.

2.3 진동소음 분석을 위한 전자기 가진원 분석

전동기의 전자기 소음은 발생 주파수와 전압 및 전류의 영향을 기준으로 구분 될 수 있다. 먼저 발생하는 고주파 자기소음은 공극 자속의 고조파 성분에 의해 발생하며, 그 발생 주파수는 회전자 슬롯 개수와 회전 속도에 관련된다. 전압의 크기에 영향을 받는 소음은 주로 무부하 운전 중에 발생하는 자기 소음으로 공극의 퍼미언스 고조파가 주요 원인이 된다. 그리고 전류의 크기에 영향을 받는 소음은 부하 운전 중 전류의 크기에 비례하여 발생하는 자기 소음으로 전류의 고조파 성분이 영향을 미치는 부분이다. 이러한 전자기적인 가진력을 분석하기 위하여 공극에서의 공극자속 밀도를 분석하고자 한다. 공극에서 생성되는 자기력 파동은 식 (4)와 같이, 공극 자속밀도의 제곱으로 나타낼 수 있으며, 각각의 자속밀도 고조파들 간의 무수한 조합으로 이루어져 있다⁽⁶⁾. 식 (4)는 크게 세 가지 항목으로 구분된다.

$$\begin{aligned}
 p(x,t) &= \frac{b^2(x,t)}{2\mu_0} = \frac{1}{2\mu_0} \left[b_{1p}^2 \right. \\
 &+ 2 \left(\sum_v b_{1p} b_v + \sum_m b_{1p} b_m \right) + \sum_v b_v^2 \\
 &+ \sum_m b_m^2 + 2 \left(\sum_{v_1 < v_2} b_{v_1} b_{v_2} + \sum_{m_1 < m_2} b_{m_1} b_{m_2} \right) \\
 &\left. + 2 \sum_v \sum_m b_v b_m \right] \quad (4)
 \end{aligned}$$

여기서, b_{1p} : 공극자속밀도의 기본파 성분

b_v, b_m : 고정자 및 회전자 고조파 성분

먼저, 공극자속밀도의 기본파 성분의 조합으로 나타나는 자기력 파동과 고정자 고조파들 사이 혹은 회전자 고조파들 사이의 자기력 파동, 그리고 고정자 고조파와 회전자 고조파 성분들 사이의 조합으로 발생하는 자기력 파동으로 구분 할 수 있다. 전자기적인 소음을 유발 할 가능성이 상당히 높은 세 번째 항목에 대해 중점적으로 분석하였고, 식 (4)에서 마

Fig. 5 T-N-I curve by dynamic analysis

Fig. 6 Torque of BLDC and BLAC using FEA at equal load

Fig. 7 Process of spectrum analysis

지막 항으로 자기력 파동을 표현하면 식 (5)와 같다. 이 식과 같이, 공극에서의 자기력 파동은 사인과 형태의 시간적, 공간적 분포를 가지며, 그 크기는 고정자 고조파의 크기 및 회전자 고조파의 크기의 곱에 비례한다.

$$p(x,t) = P_r \cos(rx - \omega_r t - \phi_r) \quad (5)$$

여기서, $P_r = \frac{B_v B_m}{2\mu_0}$, $\omega_r = \omega_v \pm \omega_m$, $\phi_r = \phi_v \pm \phi_m$
 B_v, B_m : 고정자 및 회전자 공극자속밀도
 고조파 크기
 ω_r, ω_m : 고정자 및 회전자 공극자속밀도
 고조파 각속도
 f_r, f_m : 고정자 및 회전자 공극자속밀도 고
 조파 위상

공극에서의 슬롯의 영향을 확인하기 위하여 식 (6)에 나타낸 것과 같이 퍼미언스(relative permeance)를 산정한다⁽⁷⁾.

$$\Delta_g(\alpha) = \Delta_{g0} \cdot \lambda_{g1}(\alpha) \quad (6)$$

여기서, Δ_{g0} 는 공극 퍼미언스의 상수항이고 $\lambda_{g1}(\alpha)$ 는 각도에 따른 공극의 specific 퍼미언스를 나타낸다. 유한요소 해석을 이용하여 대상전동기의 공극자속밀도 분포를 시간과 공간에 대해 분석한 후 Fig. 7에 나타낸 순서도를 따라 전자기력 가진원에 대한 스펙트럼 분석을 진행한다. 이때, 공극 자속밀도로부터 법선 방향의 힘을 산정하여 Fourier 시리즈를 이용하여 분석한다. 구동방법에 따른 전자기력 가진원의 스펙트럼 분석 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 동일 전동기를 대상으로 해석하였으므로 극 수 슬롯 수에 따른 공간고조파의 주파수는 동일하게 산정되나 BLDC 구동이 BLAC 구동에 비해 더 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 스펙트럼 분석 결과에서도 나타났지만 법선방향 힘의 고조파 성분이 큰 경우 상대적인 진동소음이 크게 된다. 스펙트럼 분석 결과는 Table 2에 나타내었으며 저차 모드인 1, 2 모드에서의 전자기 가진원의 크기 비교 시 BLDC 구동의 가진원이 크고, 고조파도 많이 포함됨을 확인하였다. 따라서, BLAC 구동의 진동소음 특성이 더 좋을 것으로 판단된다. 이 논문에서 제시한 진동소음 분석 방법은 전동기 설계 단계에서 진동소음을 분석 함으로써 전동기 설계 기술을 증대 시킬 수 있고, 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

3. 실험 결과 비교 및 분석

3.1 전기적인 특성 비교

Fig. 5와 Fig. 6은 구동방법에 따른 전동기 성능비

(a) BLDC drive

(b) BLAC drive

Fig. 8 The result of spectrum analysis

Table 2 Analysis result of spectrum

Harmonic		Values	
Space	Time	BLDC drive	BLAC drive
2	-1	25.22	22.61
2	-2	30.75	25.99
4	1	63.11	60.57
4	2	94.09	86.74

Table 3 Test result

List	Unit	Values	
		BLDC drive	BLAC drive
Rated torque	T	2.5	2.5
Rated speed	rpm	2110	2650
Input current	Arms	87.99	71.21
Torque / current		0.0284	0.0351

교를 해석적인 방법으로 비교한 것으로 해석적인 검토 결과 BLAC 구동이 BLDC 구동에 비해 성능면

Fig. 9 Voltage wave according to the driving method

에서 뛰어난 것을 확인 할 수 있다.

BLDC 구동으로 전동기의 성능 평가 시 주의해야 하는 사항은 입력전압의 크기로, 실제 입력되는 상 전압의 파형을 정확히 고려해야 한다. 계측기에서 측정되는 전압 파형은 두상 도통에 따른 환류 (freewheeling) 전압까지 포함하고 있으므로 실제 입력되는 구형파 전압과는 파형이 달라지게 되고 실제 입력되는 전압의 값보다 크게 측정된다. Modulation index를 0.95로 봤을 때 BLDC 구동 및 BLAC 구동 시 입력 전압 파형은 Fig. 9와 같다. Table 2에 나타낸 결과와 같이 정격 속도에서의 전기적인 특성을 비교해본 결과 단위 전류당 토크비가 BLAC 구동 시 BLDC 구동일 때보다 24.02 % 더 크다는 것을 확인하였다. Fig. 10(a)는 전기적인 특성 비교를 위한 실험 시스템을 나타내었고, (b)는 진동소음 측정 시스템을 나타내었다. 해석적인 결과와 실험적인 결과를 토대로 정리하면 전기적인 특성은 BLAC 구동이 BLDC 구동에 비해 전체적으로 좋아짐을 확인하였다. 그러나 PWM 제어를 하는 BLAC의 경우 인버터의 가격이 BLDC 대비 크게 증가하는 단점이 있다.

3.2 기계적인 진동소음 분석

Fig. 11은 동일한 속도에서(@2500 rpm) 구동방법에 따른 진동을 측정한 결과를 나타내었다. 10극 12 슬롯의 전동기 특성 상 회전 주파수의 10x, 12x의 성분인 1.66 kHz와 1.85 kHz에서의 sound level과 진동 peak가 가장 높음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 12에 나타낸 운전속도 변화에 따른 소음 측정 결과를

(a) Electrical performance

(b) Mechanical performance

Fig. 10 Experiment system for testing

(a) BLDC drive

(b) BLAC drive

Fig. 11 Experiment results of vibration @ 2500 rpm

바탕으로 속도의 증가에도 불구하고 같은 주파수에서 큰 소음이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이것은

(a) BLDC drive

(b) BLAC drive

Fig. 12 Experiment results of noise in frequency spectrum

공진 대역이 약 1.5~1.9 kHz에 존재함을 나타낸다. 이때 BLDC 전동기의 overall sound level meter값은 38.8 dB(A)이고, BLAC 구동은 48.6 dB(A)값을 가진다. 결과를 보면 BLAC 구동의 경우 BLDC 구동일 때보다 sound pressure level이 낮음을 알 수 있다. Fig. 12는 전동기의 주

파수 변화에 따른 소음의 스펙트럼을 나타낸 것이다. 두 제어 방법 모두 제어 특성 보다는 모터 고유의 특성 성분이 잘 도출됨을 확인할 수 있다. 고정된 속도(@2500 rpm)에서의 FFT 특성에서 나타났듯이 1.5~1.9 kHz 성분에서 공진이 발생함을 확인하였다. 결과적으로 기계적인 진동소음의 성능 비교 결과도 마찬가지로 BLAC 구동의 경우 더 작은 진

동소음을 가짐을 확인하였다. 따라서, 이 논문에서 제시한 해석적인 방법을 통하여 진동소음 분석이 가능함을 확인하였다.

4. 결 론

이 논문은 영구자석형 전동기의 구동방법에 따른 전자기적 특성 및 진동소음 비교를 목적으로 두 구동방법에 따른 전기적 특성을 비교하였고 진동소음 분석을 위한 전자기력 분석 방법을 제시하였다. 해석방법의 신뢰성을 평가하기 위하여 실험을 진행하였고 실험결과도 해석 결과와 비슷함을 확인하였다. 구동방법에 따른 전기적 특성 및 전자기 분석 결과

성능 측면에서는 BLAC 구동방법이 BLDC 구동방법 보다 좋아지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 BLAC 구동 시 인버터의 제작 비용이 크게 증가하므로 적용 시스템에 따른 구동 방법 선택이 필요하다. 그리고 이 논문에서 제시한 진동소음 분석을 위한 전가지적 가진원 분석 방법은 추후 설계되는 영구자석형 전동기의 진동소음 분석 결과 예상에 길잡이 역할을 할 수 있을 것이라 판단된다.

참 고 문 헌

(1) Sun, T., Kim, J. M, Lee, G. H., Hong, J. P. and Choi, M. R., 2011, Effect of Pole and Slot Combination on Noise and Vibration in Permanent Magnet Synchronous Motor, IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 47, No. 5, pp. 1038~1041.

(2) Shi, Y. F., Zhu, Z. Q. and Howe, D., 2006, Torque-speed Characteristics of Interior-magnet Machine in Brushless AC and DC Mode with Particular Reference to Their Flux-weakening Performance, Proceeding of the Power Electronic and Motion Control Conference, pp. 1~5.

(3) Zhu, Z. Q., Shen, J. X. and Howe, D., 2006, Flux-weakening Characteristics of Trapezoidal Back-emf Machines in Brushless DC and AC Modes, Proceeding of the Power Electronic and Motion Control Conference, pp. 13~16.

(4) Miyamasu, M. and Aktsu, K., 2011, Efficiency Comparison Between Brushless DC Motor and Brushless AC Motor Considering Driving Method and Machine Design, Proceeding of Industry Electronics Society Conference, pp. 1830~1835.

(5) Lee, C. M., Shin, Y. H. and Moon, J. W., 2012, Sound Source Investigation of Outer Rotor BLDC Motor, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 208~213.

(6) Timar, P. L., 1989, Noise and Vibration of Electric Machines, Amsterdam: Elsevier Sciece.

(7) Goeras, J. F., Wang, C. and Lai, J. C., 2006, Noise of Polyphase Electric Motors, CRC Press Taylor & Francis Publishing Co..

Su-Jin Lee received M.S. degree in automotive engineering from the Hanyang University, Korea, 2009. Currently she is pursuing the Ph.D. degree in automotive engineering from Hanyang University, Korea. Her research interests are electromagnetic field analysis and electrical motor design for electrical power steering and traction.

Byeong-Hwa Lee received M.S. degree in Automotive engineering from the Hanyang University, Korea, in 2009. Currently he is pursuing the Ph.D. degree in automotive engineering from Hanyang University, Korea. Her main fields of interests are electromagnetic field analysis and electrical motor design related to the IPMSM for Vehicle traction.

Do-Jin Kim received M.S. degree in Automotive engineering from the Hanyang University, Korea, in 2009. Currently he is pursuing the Ph.D. degree in automotive engineering from Hanyang University, Korea. His main fields of interests are electromagnetic field analysis and acoustic noise, vibration reduction.

Jung-Pyo Hong received Ph.D. degree in electrical engineering from the Hanyang University, Korea, in 1995. From 1996 to 2006, he was professor with Changwon National University, Changwon, Korea. Since 2006 he has been working as a professor in the Hanyang University, Korea. His research interests are the design of electric machines, optimization and numerical analysis of electromagnetic.