

대용량 BLDC전동기의 가진력 해석 (I)

김 한들¹, 김 철¹, 신 판석¹, 김 동석², 박 관수²
 홍익대학교 전기공학과¹, 부산대학교 전기공학과²

A Magnetic Exciting Force Analysis of the large scale BLDC Motor.

Han-deul Kim¹, Chul Kim¹, Pan-seok Shin¹, Dong-sok Kim², Gwan-soo Park²

Dept. of Electrical Engineering, Hongik University¹, Dept. of Electrical Engineering, Pusan National

Abstract - 대용량 추진용 32극, 96슬롯의 5MW급의 BLDC(Brushless DC) 전동기를 설계하고, 그 특성을 유한요소해석법(FEM)을 이용하여 해석하였다. 해석 결과를 이용하여 진동 및 소음의 원인이 되는 가진력(Magnetic Exciting Force)을 계산할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 계산된 가진력을 분석하여 진동 및 소음의 원인을 줄일 수 있는 방안을 모색하고, 이를 설계에 반영함에 그 목적이 있다. 이러한 과정을 통하여 BLDC전동기 설계에 이 기술을 적용하여 전동기의 소음 및 진동의 저감과 성능을 향상시킬 수 있는 방법을 제시한다.

1. 서 론

고속전철이나 대형선박의 추진용 전동기의 진동 및 소음원으로는 기계적인 원인, 전자기적인 원인, 공기역학적인 원인이 있다. 그러나 선박용 추진전동기는 대부분 저속으로 구동되므로 추진용 BLDC 전동기 같은 경우 상대적으로 전자기적인 원인에 의한 진동 및 소음에 주원인이다. 전동기의 코깅 토크(Cogging torque)가 소음 및 진동의 주원인이므로 이러한 코깅 토크를 FEM을 이용하여 해석하고 이를 분석하여 전동기의 코깅 토크를 저감시킬 수 있도록 전동기의 설계변경에 관한 방법을 연구한다.

대용량 BLDC전동기는 고정자 슬롯에 발생하는 자기력 또한 매우 크므로 이에 따른 슬롯에 발생하는 가진력(Magnetic Exciting Force) 역시 매우 크다. 이러한 가진력을 고려하여야 전동기의 고정자측에 발생하는 진동 및 소음을 효과적으로 저감할 수 있다. 그러나 아직 이를 계산할 수 있는 상용화된 프로그램이 없기에 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 이에 상용화 할 수 있는 프로그램의 개발이 필요하다. 따라서 본 논문은 프로그램의 개발에 필요한 알고리즘의 연구가 목적이며, 차후 가진력과 진동 및 소음의 원인관계를 좀더 세밀히 규명하고, 나아가 진동 및 소음 저감에 향상된 방법을 제시할 수 있어야 한다.

2. 전자계 해석

2.1 5MW PM 사양 및 전자계 해석 모델

대용량 추진용 PM BLDC MOTOR의 기본 사양은 다음 그림 1 및 표 1과 같이 3상 32극 150[rpm], 정격전압 600[V], 전류 9600[A]이하이다.

표 1. PM BLDC MOTOR의 기본 사양

용량[MW]	극수 [극]	상수 [상]	슬롯수 [개]	Rated Voltage Range [V]	전류 [A]	Rated Speed [rpm]
5	32	3	96	550 ~ 830	< 9600	150

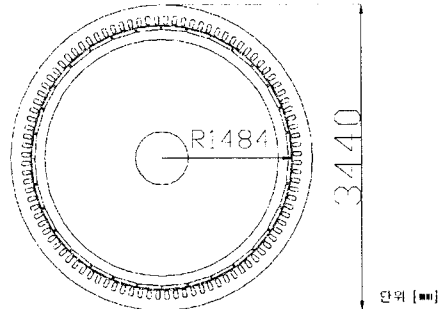


그림 1. 5 MW PM BLDC MOTOR 단면

자기 해석모델의 도면은 그림 2에서 보듯이 해석의 용이성을 위하여 전체 도면에서 1/16만을 해석 하였다. 재질조건은 그림 2에서 보이는 각각의 재질에 따라 다음 표 2의 조건을 부여하였다. 재질조건 중 영구 자석의 방향은 N극과 S극이 번갈아 가면서 위치하고 착자방향은 방사상이다. Shaft는 재질은 구조용 강판, 고정자 및 회전자 코어는 전기용 강판, 그리고 영구자석은 SmCO이다.

표. 2 자기 해석 모델의 재질조건

재질	SmCO	Shaft	core	Coil
특성	Br=0.9T	초기 비투자율 = 3500	J _s =1.8T, 초기 비투자율 =7500	copper

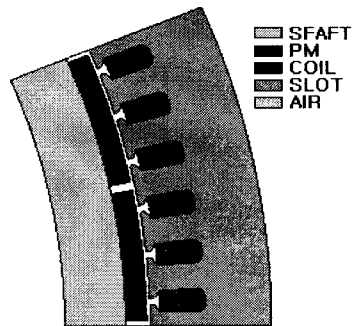


그림 2. BLDC 전동기 자기해석 모델

그림 3은 해석모델의 외부회로도이며, Y결선으로 동일상내의 코일들은 병렬결선이다. BLDC의 동작방법은 회전자내의 영구자석의 기계각에 따라 동작하며, 각각의 코일은 단면적 42[mm], 5턴으로 내부저항값은 5.4[mΩ]이다.

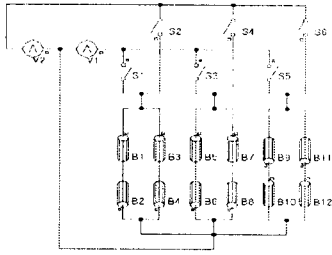


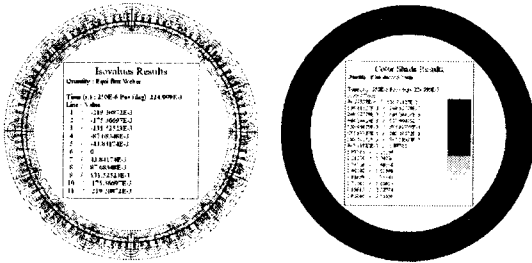
그림 3. 전동기 해석의 외부회로도

2.2 자계해석 결과

2.2.1 코깅 토크 및 역기전력 해석

코깅토크가 전동기의 진동 및 소음의 원인이므로 이에 대한 해석을 일차적으로 하였다. 코깅 토크는 외부회로를 연결하지 않고, 정속회전(여기서는 150rpm)할 때의 한 극에 걸리는 토크를 해석함으로써 확인할 수 있다.

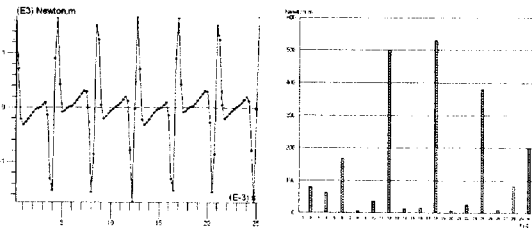
그림 4는 해석결과의 예로서 기계각 = 0° 에서 외부회로가 있을 때의 자속선도와 자속밀도도이다.



(a) 자속선도 (b) 자속밀도도

그림 4. 자속선도와 자속밀도도

그림 5는 한 극의 영구자석에 의한 코깅토크를 해석한 결과이다. 그림 5의 (a)는 계산된 코깅토크 값이고, (b)는 코깅토크의 한 주기에 대한 스펙트럼 분석을 한 것이다. 그중 코깅토크의 최대값은 1687.3[Newton. m]이다. 기본 주파수는 40[Hz]이며 차수에 따라 40×n[Hz]형으로 주파수는 증가하게 된다. 18고조파의 성분비는 25.0%로 가장 크며, 16차 23.7%, 24차 18.0%, 30차 9.5%, 6차 8.0%, 2차 3.8%, 4차 3.0% 순이다.



(a) 코깅 토크 (b) 코깅 토크 스펙트럼

그림 5. 코깅토크와 코깅토크의 스펙트럼

다음 그림 6은 역기전력(BEMF) 그래프이다. 역기전력은 그림 7의 회로와 같이 전압원의 자리에 매우 큰 저항(1[TΩ])을 달고 그 저항에 걸리는 전압을 측정한다. 역기전력을 측정하는 이유는 그림 3의 전압원의 전압이 역기전력의 최대치 보다 작을 경우 전동기는 정속으로 회전하지 못하기 때문이다. 그림 6에서 역기전력의 최대치는 560 [V]로 그림 3에서 전압원의 값은 600 [V]로 입력하였다.

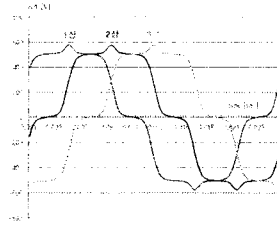


그림 6. 역기전력 그래프

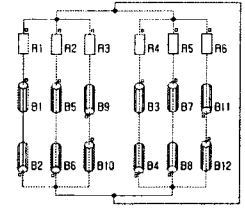
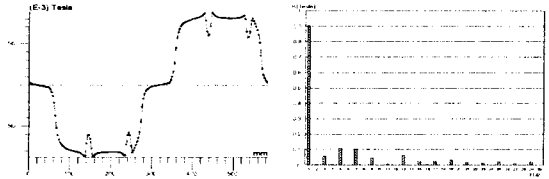


그림 7. 역기전력 회로도

2.2.2 공극의 자속밀도 및 전류 파형

그림 8은 외부회로(그림 3)를 연결한 후 공극의 자속밀도를 분석한 것으로써 (a)는 공극의 자속밀도이고, (b)는 (a)에서 한 주기에 대한 스펙트럼이다.

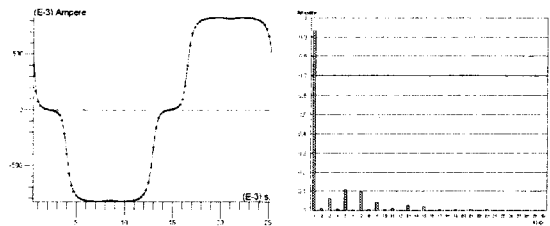
자속밀도의 최대값은 0.889 [Tesla]이다. 그리고 스펙트럼에서 기본 주파수는 40[Hz]이고 차수에 따라 40×n형으로 증가하게 된다. 여기서 1차의 성분비는 61.8%로 가장 크고, 5차는 7.5%, 7차 7.0%, 17차 4.2%, 3차 3.8%, 9차 3.1%, 19차는 2.2%순 이다.



(a) 공극의 자속밀도도 (b) 스펙트럼

그림 8. 공극의 자속밀도와 공극 자속밀도의 스펙트럼

그림 9에서 (a)는 코일에 걸리는 전류파형이고, (b) 전류파형을 FFT로 분석한 것이다. 그림 9의 (b)에서 기본 주파수는 40[Hz]이고, 차수에 따라 40×n[Hz]형으로 증가한다. 전류파형은 기본파가 67.3%, 5차가 7.9%, 7차가 7.0%, 3차가 4.4%, 9차가 3.0%, 13차가 1.9%, 15차가 1.5% 순이다.



(a) 전류 파형 (b) 전류파형 스펙트럼

그림 9. 전압·전류 파형

3. 가진력

가진력(Magnetic Exciting Force)은 그림 10에서 보여지는 것과 같이 외부전원을 인가할 때 고정자 슬롯에서 발생하는 자기력과 영구자석의 자기력이 주 원인이 되어 그림 11 에서처럼 고정자의 형상에 뒤틀림을 유발하게 된다. 이는 회전자의 회전과 함께 진동 및 소음의 한 원인이 된다. 대용량 전동기일수록 그 힘은 더욱 커지게 되며 전동기 설계에서 이를 고려하지 않을 경우 공극에서 고정자와 회전자의 마찰까지 유발할 수 있고, 나아가 시스템에 영향을 미치게 된다. 이러한 사고를 미연에 방지하고 전동기의 진동 및 소음을 줄이기 위해서는 이 힘을 계산할 필요가 있다.

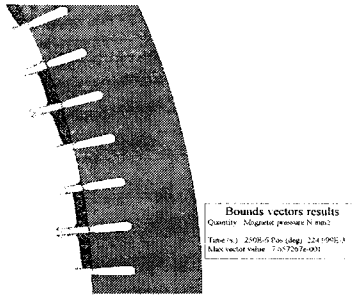


그림 10. 고정자의 전자력 분포

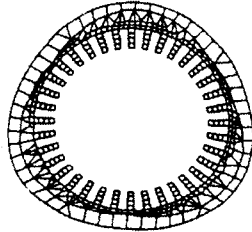


그림 11. 가진력에 의한 고정자 형상의 뒤틀림의 예

가진력의 계산은 등가자화 전류와 2개의 삼각형 요소를 이용하여 자속밀도 관계식에 의하여 계산되며, FEM에서는 다음과 같이 계산한다.

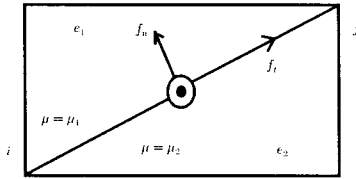


그림 12. 두 재질간의 등가자화전류

그림 12의 e_1, e_2 를 구성하는 선상의 자화 전류 I_m 는 다음 (식 1)와 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{I}_m = \frac{1}{\mu_0} \int_S \nabla \times \vec{M} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\mu_0} (M_{1i} - M_{2j}) l_{ij} \quad (\text{식 1})$$

여기서, M_{1i}, M_{2j} 는 각각의 경계면에서의 요소 e_1 과 요소 e_2 의 자화의 세기의 접선성분, l_{ij} 는 경계면에서의 길이, μ_0 는 진공에서의 투자율이다. 매질에 상관없이 (식 1)은 항상 성립하고, 두 영역의 경계에서 자계의 세기 \vec{H} 의 접선성분은 연속이기 때문에 (식 1)을 (식 2)에 대입하면 경계면에서의 전류는 (식 3)과 같다.

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} \quad (\text{식 2})$$

$$I_m = \frac{1}{\mu_0} (B_{1i} - B_{2j}) l_{ij} \quad (\text{식 3})$$

여기서, B_{1i}, B_{2j} 는 각각의 요소에서의 자속밀도의 접선 성분이다. 요소의 변 i, j 에 작용하는 힘 \vec{f}_{ij} 는 플레밍의 왼손 법칙으로부터 (식 4)와 같이 된다.

$$\vec{f}_{ij} = \vec{I}_m \times \vec{B}_{ij} \quad (\text{식 4})$$

힘의 법선성분 f_n 과 접선성분 f_t 를 각각 자속밀도의 법선성분과 접선성분 B_n, B_t 로 나타낸다면 (식 5), (식 6)과 같이 쓸 수 있다.

$$f_n = I_m B_t l_{ij} \quad (\text{식 5})$$

$$f_t = -I_m B_n l_{ij} \quad (\text{식 6})$$

여기서, 두 요소에서의 자속밀도 법선방향 성분은 같으며 자속밀도의 접선성분은 두 요소내의 자속밀도의 평균값을 취하여 계산한다. 각 요소의 힘이 구해지면 회전자와 고정자의 각 부위별(공극 주변) 가진력(전자력)을 계산할 수 있으며, 이 정보는 다음 단계인 전동기의 변형장의 해석에 활용될 수 있다.

그림 13은 위의 앞서 언급한 내용들을 적용한 가진력 계산 프로그램의 순서도이다.

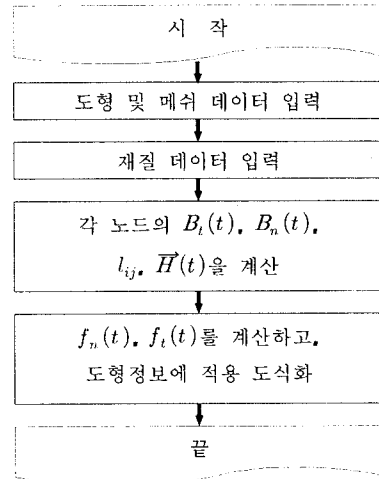


그림 13. 가진력 계산의 순서도

4. 결 론

본 논문에서는 대용량 추진용 BLDC 전동기의 전자계를 해석하고 가진력 해석 프로그램 개발에 필요한 알고리즘을 연구하였다. 대형 BLDC 전동기의 해석 결과 높은 코깅도크가 발생됨에 따라 높은 진동 및 소음이 발생할 것으로 사료된다. 그리고 공극의 자속밀도에서 40×n형의 공간 고주파가 발생되며, 이는 전압원, 가진력과의 기계적 공진이 발생할 수 있으므로 이에 대한 대책이 필요하다. 이에 진동 및 소음을 줄이기 위해서는 극/슬롯비, 또는 형상의 변화 등을 통한 저감 대책이 필요하다. 가진력은 그림 13의 순서도에 따라 FEM을 적용하여 프로그램 개발을 할 예정이며, 결과는 추후 발표할 계획이다.

본 연구는 2005년도 국방과학연구소의 지원에 의하여 수중운동체특화연구센터의 주관으로 수행된 과제임

[참 고 문 헌]

- [1] 송혁진 외, "BLDC Motor의 전자기적 가진원 분석 및 진동 저감 설계", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, 2005
- [2] Sheppard J. Salon, "FINITE ELEMENT ANALYSIS OF ELECTRICAL MACHINES", KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1995
- [3] M.E.H. Benbouzid 외, "Finite Element Modeling of a Synchronous Machine : Electromagnetic Forces and Mode Shapes". IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 1993