

표면부착형 영구자석 동기전동기의 진동 특성 해석

최장영*, 박형일*, 신현재*, 유대준**, 장석명*
 충남대학교*, 충남도립청양대학**

Vibration Characteristics Analysis of Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor

Jang-Young Choi*, Hyung-Il Park*, Hyeon-Jae Shin*, Dae-Joon You**, Seok-Myeong Jang*
 Chungnam National University*, Chungnam Provincial Cheongyang College**

Abstract - This paper deals with the vibration characteristics analysis of surface-mounted permanent magnet synchronous motor. To analyze the vibration characteristics, In order to find the frequency of exciting vibration forces, torque ripple and radial force were analyzed by fast fourier transform (FFT), and stator were analyzed by modal analysis.

1. 서 론

전동기는 가전기기, 컴퓨터 주변기기, OA, FA를 위한 자동화기기 및 공작기기 뿐만 아니라 전기자동차 등 여러 제품에 이르기 까지 많은 용도로 사용되고 있다. 이러한 기기들의 기능이 복잡해지고 다양해질수록 구동원으로 이용되고 있는 전동기의 성능이 제품의 품질을 크게 좌우하게 된다. 제품의 품질을 결정하는 요인 중에서 진동 및 노이즈문제(진기계적, 기계적)가 품질과 성능을 저하시키는 결정적인 역할을 하고 있다. 또한, 기계식 압축기의 소음은 가솔린/디젤엔진 소음에 비해 비교적 문제가 되지 않았으나, 최근 내연기관을 동력으로 이용했던 기기들이 전동기를 주 동력으로 사용하게 되면서 주변기기들, 예를 들어 전기자동차의 경우 전동압축기의 소음이 새로운 이슈로 떠오르고 있다. 특히 영구자석 전동기의 경우 우수한 자기적 특성을 가지는 자성 재료와 전동기 설계 기술의 발전과 더불어 고성능, 소형, 경량화 되는 추세이며, 이에 따라 단위체적당 전자기 에너지가 커져서 진동 및 소음의 특성이 악화되고 있다[1-2].

본 논문에서 해석에 사용된 모델은 분수 슬롯 조합으로 비대칭 권선 구조를 갖는 fractional-slot 영구자석 전동기로 일반적인 영구자석 전동기에 비해 더 높은 토크 밀도와 낮은 토크 리플을 가진다. 하지만 이러한 권선의 자계는 공간 고조파 함유량이 저조파를 포함하여 더욱 증가한다. 이는 비대칭 구조 권선 타입의 가장 큰 단점이며, 이러한 불필요한 고조파들은 진동, 소음을 유발한다[3].

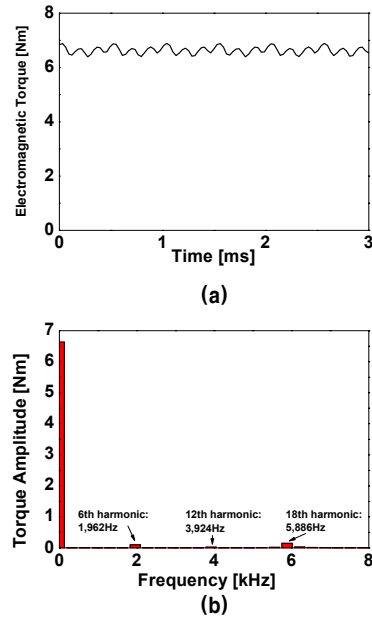
그러므로, 만족하는 구동 성능뿐만 아니라, 저소음, 저진동 특성을 가지는 전동기를 설계하기 위해서는 전자기 고조파를 줄이거나 가진원의 전달경로를 차단하고 가진원의 주파수와 일치하지 않도록 자기회로 설계에 반영하는 것이다. 따라서 본 논문은 fractional-slot 구조를 갖는 표면부착형 영구자석 동기전동기의 진동 특성을 해석하였다. FEM으로 도출한 전동기 토크 파형과 수직력의 FFT 분석을 통해 전동기의 진동, 소음을 유발할 수 있는 주파수를 제시하였다. 또한, 모달 해석을 통해 제시된 주파수와 전동기의 진동 고유주파수의 불일치 여부를 확인하였다.

2. 본 론

[4]에서 논의된 모델들의 성능으로부터 극호비 0.8의 영구자석을 갖는 6극/27슬롯 모델이 제시된 요구 성능과 제한사항을 모두 만족하는 가장 우수한 모델이라고 결론 내렸다. 그러나 6극/27슬롯 모델의 경우, 분수 슬롯 조합으로 비대칭 권선 구조를 갖고 있어, 전동기 진동/소음 측면에서 불리할 것으로 예측되며, 특히, 극호비가 0.8인 경우 코깅토크는 매우 작지만, 토크 리플이 정격의 약 7%로 고정자 진동의 가진원 역할을 할 것으로 사료된다. 따라서 전동기 고정자의 모달해석을 통해, 영구자석에 의해 고정자에 작용하는 수직력과 토크리플이 전동기 고정자의 진동 고유주파수와 일치하는지를 알아볼 필요가 있다.

2.1 토크리플

그림 1은 전동기가 6,540rpm의 속도로 회전할 때, 토크가 최대가 되도록 하는 전류 크기 및 위상각 조건에서의 토크 파형 및 FFT 분석결과를 나타낸다. 그림 1(b)에서 0고조파 성분은 직류 성분으로 평균 토크 값을 나타내며, 토크리플의 고조파 성분은 6고조파만 존재함을 알 수 있다. 한편, 정격속도 6,540rpm으로 운전될 때, 기본과 주파수는 327Hz이



<그림 1> 회전속도 6540rpm에서 최대토크를 발생하는 전류 크기 및 위상각 조건에서의 토크 특성: (a) 파형 및 (b) FFT 분석결과

<표 1> 고정자 가진원으로 작용될 수 있는 운전속도에 따른 토크리플의 주파수

운전속도	토크 리플 고조파차수		
	6	12	18
3,000rpm	900Hz	1,800Hz	2,700Hz
6,540rpm	1,962Hz	3,924Hz	5,886Hz
8,000rpm	2,400Hz	4,800Hz	7,200Hz

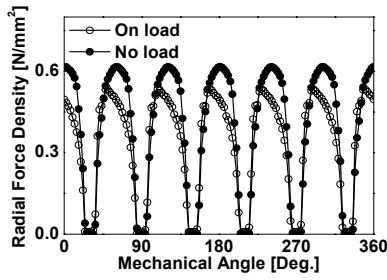
므로, 토크리플 고조파 차수 즉, 6, 12, 18고조파에 대응되는 주파수는 각각 1,962Hz, 3,924Hz 및 5,886Hz 임을 알 수 있다. 또한, 주 운전영역 속도 3000rpm에서 기본주파수는 150Hz이므로, 토크리플 성분의 주파수는 900Hz, 1,800Hz, 2,700Hz가 된다. 각 운전속도에 대응되는 토크리플 주파수에서의 토크 크기가 고정자 진동의 가진원 역할을 할 것으로 사료된다. 따라서 고정자 구조의 고유진동수가 이러한 토크리플의 주파수 성분과 부합하지 않도록 고정자 형상 설계를 진행해야 할 것이다.

2.2 수직력

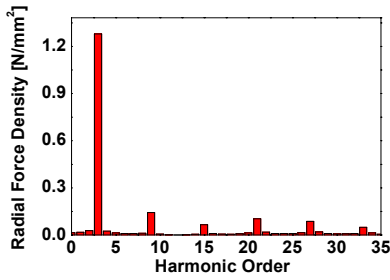
그림 2는 최대토크를 발생하는 전류 크기 및 위상각 조건에서의 수직력 특성을 나타낸다. 그림 2(a)에 수직력밀도 파형은 유한요소해석법을 사용하여 다음 수식으로부터 얻어질 수 있다[5].

$$F_r = \frac{B_g^2}{2\mu_0} \tag{1}$$

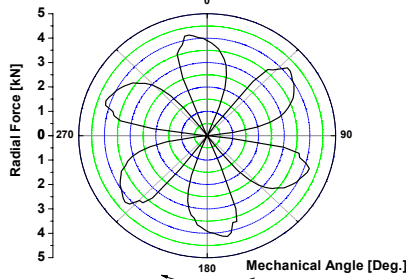
여기서 B_g 는 부하 시 자속밀도 즉, 영구자석에 의한 자속밀도와 전기자 전류에 의한 자속밀도의 합으로 주어지거나, 무부하시 자속밀도 즉, 영



(a)



(b)



(c)

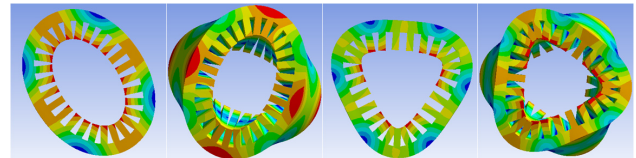
〈그림 2〉 최대토크를 발생하는 위상각 조건에서의 수직력 특성: (a) 수직력 밀도 분포, (b) FFT 분석결과 및 (c) 수직력 분포 특성

구자석에 의한 자속밀도만으로 주어질 수 있다. 그림 2(a)로부터, 전기자 반작용 자체로 인해 부하 시 자속밀도가 무부하 시 자속밀도에 비해 감소함을 유추할 수 있다. 매극 배상당 슬롯수가 1.5인 6극 27슬롯 구조의 전동기에서 수직력 고조파 차수가 임을 그림 2(b)로부터 알 수 있다. 따라서 각 운전속도에 대응되는 수직력에 의한 고정자 가진원 주파수를 예측할 수 있다. 한편 그림 2(c)로부터, 6극 27슬롯 전동기 모델의 수직력 분포가 전기적 한주기 즉, 기계적으로 60도 간격으로 대칭적이므로, 진동소음 측면에서 유리할 것으로 사료된다. 표 1과 2는 운전속도영역에 따라 토크 리플과 수직력이 고정자 가진원으로 작용할 수 있는 주파수를 나타낸 것이다.

2.3 모달해석

그림 3은 가진력이 없이 해석한 6극 27슬롯 전동기 모델의 자유진동, 즉 고정자의 고유 진동수와 각 고유진동수에 대한 네 가지의 모드형상을 나타낸 그림이다. 그림 3(a)는 타원운동을 하는 모드이다. 이 모드는 고정자의 서로 반대편에 위치한 극 때문에 radial 성분의 가진력이 발생하게 된다. 또한, 그림 3(c)의 모드는 비대칭 운동이므로 고조파 가진력의 분포에 의하여 상쇄되기 때문에 진동에 크게 영향을 미치지 않는다. 하지만, 그림 3(b)와 (d)는 고정자의 앞면과 측면에 대한 뒷면의 모양이 서로 반대로 움직이고 있으므로 굽힘(bending mode)현상이 있음을 알 수 있다. 이 모드는 축방향 길이에 대한 자속을 불균일하게 만들게 되므로 회전자와 비틀림이나 가진력의 불평형으로 기계적 움직임이나 베어링의 하중을 증가시키고 전동기의 특성을 악화시킨다.

표 1과 2로부터, 가진원으로 작용하는 토크리플 및 수직력에 대한 주파수가 고정자의 각 모드별 고유진동수에 부합하지 않음을 확인할 수 있고, 이로 인해 진동 소음이 현저히 작을 것으로 예측된다. 한편, 설계된 전동기가 단품으로 사용되지 않고, 압축기 내부에 결합되어 운전되므로 압축기 하우징과 결합된 모달해석이 수행되어야만 정확한 고유진동수 예측이 가능하다. 그러나 본 논문에서 압축기 설계도면이 나오지 않



〈그림 3〉 6극 27슬롯 전동기의 고정자 모달해석: (a) 1st mode (1,898Hz), (b) 2nd mode (3,645Hz), (c) 3rd mode (4,759Hz) and (d) 4th mode (7,825Hz)

〈표 2〉 고정자 가진원으로 작용될 수 있는 운전속도에 따른 수직력의 주파수

운전속도	수직력 고조파차수					
	3	9	15	21	27	33
3,000rpm	450Hz	1,350Hz	2,250Hz	3,150Hz	4,050Hz	4,950Hz
6,540rpm	981Hz	2,943Hz	4,905Hz	6,867Hz	8,829Hz	10,791Hz
8,000rpm	1,200Hz	3,600Hz	6,000Hz	8,400Hz	10,800Hz	13,200Hz

〈표 3〉 고정자 강판의 재질 특성

항 목	값	항 목	값
Young's modulus	200 (GPa)	Density	7600 (kg/m ³)
Poisson ratio	0.3	Yield Point	485×10 ⁶ (N/m ²)

은 상태로 인해 고정자 형상만을 고려한 고유진동수 해석을 수행하여 제시된 결과의 의미가 없을지라도, 토크리플과 수직력의 고조파 차수에 따른 진동 가진 주파수 분석을 통해 향후 압축기가 결합된 고정자 모달 해석결과에서 회피해야 할 진동 고유주파수를 제시했다는 측면에서 의미가 있다고 사료된다. 표 3은 모달해석에 사용된 고정자 강판의 재질 특성이다.

3. 결 론

본 논문에서는 표면부착형 영구자석 동기전동기의 진동 특성에 대해 고찰하였다. 진동 소음을 유발할 수 있는 비대칭 권선 구조를 갖는 6극 27슬롯 전동기 모델의 토크리플과 수직력의 고조파 분석을 통해 가진원이 될 수 있는 주파수를 제시하였다. 또한, 고정자의 모달 해석을 통해 제시된 주파수와 전동기의 진동 고유주파수의 불일치 여부를 확인하였다. 따라서 전동기의 설계시 제시된 주파수를 피해 설계하면 진동 소음이 억제될 수 있을 것으로 예상된다. 향후 제작된 모델의 실험을 통해 본 논문의 타당성을 검증할 예정이다.

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (20101020300540) 주관으로 수행된 과제임

【참 고 문 헌】

- [1] 하경호, 홍정표, "전동기의 전자기 가진력에 의한 고정자 변위 및 고유진동수 해석", 대한전기학회 전기의세계, 제48권 9호, pp.18-24, 1999.
- [2] 김지민, 손도, 채승희, 홍정표, "8극 9슬롯과 8극 12슬롯 IPM 전동기의 진동·소음 분석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.918-919, 2010.
- [3] 장우성, 지승훈, 장기봉, 김규탁, "표면 부착형 Fractional-slot 영구자석 전동기의 진동 특성", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.255-257, 2010.
- [4] 장석명, 박형일, 최장영, 유대준, "극/슬롯수 조합에 따른 전기자동차 에어컨시스템의 압축기용 영구자석 동기전동기의 특성 해석", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.136-139, 2011.
- [5] Z. Q. Zhu, Z. P. Xia, L. J. Wu and G. W. Jewell, "Influence of slot and pole number combination on radial force and vibration modes in fractional slot PM brushless machines having single- and double-layer winding," *IEEE ECCE* 2009, pp. 3443-3450, 2009.