

영구자석 동기전동기의 전원 주파수 6배 진동 가진원 분석

김재현*, 김두영*, 박권일**, 박민로*, 홍정표*
한양대학교 미래자동차공학과*, 현대파워텍**

Vibration Source Analysis of 6 times Line Frequency of the Permanent Magnet Synchronous Motor

Jae-Hyun Kim*, Doo-Young Kim*, Kwon-Il Park**, Min-Ro Park*, Jung-Pyo Hong*
Department of Automotive Engineering, Hanyang University*, Hyundai Powertech**

Abstract - 본 논문은 영구자석 동기전동기의 전원 주파수 6배 성분 진동의 전자기적 가진원을 분석하였다. 전동기에서 발생하는 진동은 주로 반경 방향 전자기력에 의해서 발생한다. 하지만, 전동기는 주로 벨트나 기어 시스템에 연결되어 구동하며, 이때 토크의 떨림인 토크 리플이 전체 시스템의 진동에 큰 기여를 하게 된다. 따라서 본 논문에서는, 토크 리플의 주요한 시간 차수인 전원 주파수 6배 성분에서의 전자기적 가진원을 분석하였다. 전자기적 가진원은 크게 반경 방향 전자기력과 토크 리플로 나누어진다. 이때 반경 방향 전자기력을 만들어내는 원인은 계자에 의한 자속밀도와 전기자에 의한 자속밀도로 나누어지고, 토크 리플을 만들어내는 원인은 전류 변화에 의한 유기 전압, 인덕턴스 변화에 의한 유기 전압, 계자 자속 변화에 의한 유기 전압으로 나누어진다. 본 논문에서는, 유한요소해석 (FEM)을 이용하여 전원 주파수 6배 성분의 진동을 앞서 말한 전자기적 가진원 별 원인으로 분리하여 분석하였다.

1. 서 론

전동기는 실생활에서 사용되는 전기제품뿐 아니라 전 산업에 걸쳐서 널리 사용되고 있다. 전동기에서 발생하는 전자기력은 토크를 만들어 출력에 기여하는 동시에 전동기의 소음 및 진동도 야기한다. 전동기에서 발생하는 진동 및 소음은 전기제품의 사용자로 하여금 심리적 불안감과 짜증을 유발한다. 따라서, 전동기의 성능을 결정짓는 효율이나 출력에 관한 연구뿐만 아니라, 전동기의 진동 및 소음을 분석하여 저감시키기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 전동기에서 발생하는 진동의 전자기적 가진원은 크게 반경 방향 전자기력과 토크 리플로 나누어지는데, 일반적으로 전동기의 반경 방향 전자기력이 토크에 비해 훨씬 크기 때문에 전동기의 진동은 주로 반경 방향 전자기력에 의해서 발생한다. 하지만, 전동기가 벨트 또는 기어와 같은 시스템에 연결되어 구동될 경우 토크 리플이 시스템 전체에 큰 진동을 유발하게 된다. 이에 따라, 여러 타입의 전동기의 토크 리플을 분석하여 개선하는 연구들이 진행되었고 [1]-[4], 극 수 슬롯 수에 따른 반경 방향 전자기력을 분석한 연구 [5], [6]가 진행되었다. 하지만 이러한 연구들은 진동의 원인인 반경 방향 전자기력과 토크 리플을 동시에 고려하지 않고, 개별적인 전자기적 가진원을 분석하였다. 따라서 본 논문에서는 토크 리플의 주요한 시간 차수인 전원 주파수 6배 성분의 반경 방향 전자기력 및 토크 리플을 유한요소해석 (FEM)을 이용하여 분석하였다.

2. 본 론

2.1 대상 모델

본 논문에서는 8극 12슬롯의 자속 집중형 영구자석 동기전동기 (Concentrated Flux Synchronous Motor, CFSM)의 전원 주파수 6배 진동의 전자기적 가진원에 대해서 분석하였다. 대상 모델의 정보는 <표 1>에 정리하였다.

<표 1> 대상 모델 정보

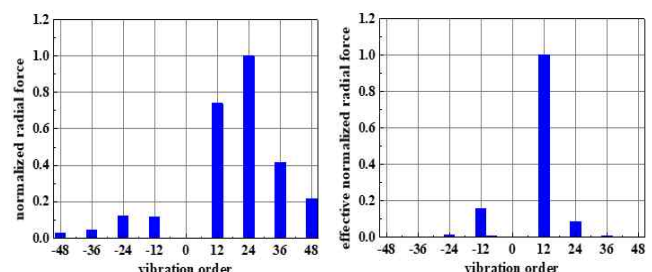
항목	값
전동기 타입	자속 집중형 영구자석 동기전동기 (CFSM)
극수 / 슬롯 수	8 / 12
상당직렬턴수	600
상전류 [A_{rms}]	2.12
영구자석 잔류자속밀도 @20°C [T]	0.41
구동 속도 [rpm]	2000

2.2 반경 방향 전자기력 분석

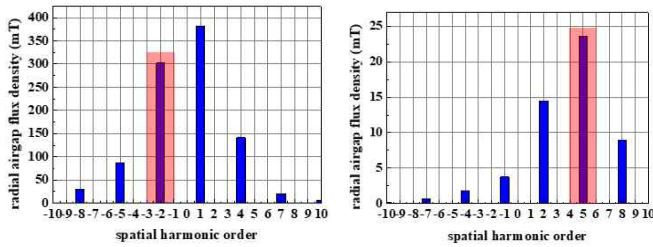
반경 방향 전자기력을 산정하기 위해 전자기 FEM을 진행하였다. FEM을 통해 얻어진 반경 방향 및 접선 방향 공극 자속밀도로 Maxwell stress tensor를 이용하여 반경 방향 전자기력을 구하였다. 얻어진 반경 방향 전자기력을 스펙트럼 분석하여 전원 주파수 6배 성분의 반경 방향 전자기력을 공간고조파 차수인 vibration, r 에 따라서 <그림 1> (a)에 나타내었다. 그런데 고정자 외경에 발생하는 변위는 아래의 수식 (1)과 같이 vibration order의 네 제곱의 역수에 비례한다.

$$\Delta d \propto \frac{1}{r^4} \quad (1)$$

여기서, Δd 는 고정자의 변위, r 은 vibration order이다. 따라서 실질적으로 진동에 기여하는 유효 반경 방향 전자기력을 구하면 <그림 1> (b)와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 vibration order $r=12$ 가 반경 방향 전자기력에 의한 진동의 주요 원인이 된다. Vibration order는 전기자 기자력, 계자 기자력, 전기자와 계자 기자력의 합성, 그리고 슬롯 효과에 의해서 발생한다. 이러한 원인들 중에 전원 주파수 6배 성분의 반경 방향 전자기력의 vibration order $r=12$ 를 만들어내는 기자력을 분석하였다. 분석 결과, <그림 2>와 같이 vibration order $r=12$ 의 주요 원인은 전원 주파수 1배 성분의 전기자 기자력의 공간고조파 -2차 성분과, 전원 주파수 5배 성분의 계자 기자력의 공간고조파 5차 성분의 합성에 의해 발생한다 [7].



(a) 반경 방향 전자기력
(b) 유효 반경 방향 전자기력



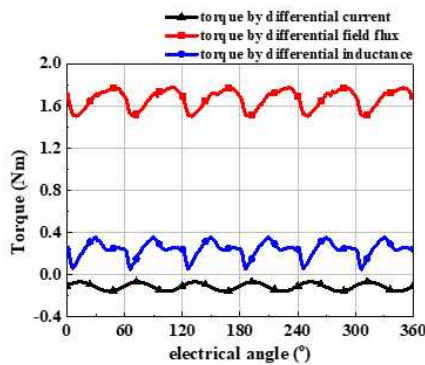
(a) 전원 주파수 1배 성분의 전기자 기자력
(b) 전원 주파수 5배 성분의 계자 기자력

2.3 토크 리플 분석

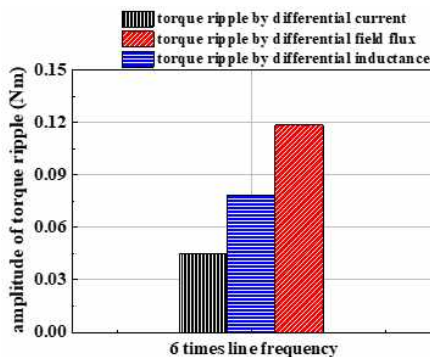
토크 리플의 전원 주파수 6배 성분을 분석하기 위해서 전자기 FEM을 진행하였다. 이때 전류는 정현파로 인가하였다. 토크는 전류와 유기 전압의 곱으로 표현되는데, 정현파 전류가 인가될 경우 유기 전압의 고조파 성분이 토크 리플의 원인이 된다. 따라서 토크 리플의 주요 원인을 분석하기 위해 유기 전압을 전류 변화에 의한 유기 전압, 인덕턴스 변화에 의한 유기 전압, 계자 자속 변화에 의한 유기 전압으로 아래의 수식과 같이 분리하여 산정하였다.

$$e = L \frac{di}{dt} + \omega i \frac{\partial L}{\partial \theta} + \omega \frac{\partial \lambda_m}{\partial \theta} \quad (2)$$

여기서, e 는 유기 전압, L 은 인덕턴스, i 는 전류, t 는 시간, θ 는 기계각, ω 는 각주파수, 그리고 λ_m 은 영구자석에 의한 쇄교자속이다. 위의 수식과 같이 분리하여 얻은 유기 전압을 이용하여 각각의 성분에 의해서 발생하는 토크를 산정하였다. 전류 변화에 의한 토크, 인덕턴스 변화에 의한 토크, 그리고 계자 자속 변화에 의한 토크를 산정하여 <그림 3>에 나타내었다. 각 원인에 의해서 발생한 토크를 고조파 분석하여 <그림 4>에 나타내었고, 그림에서 알 수 있듯이 토크 리플의 전원 주파수 6배 성분의 주요 원인은 계자 자속의 변화에 의한 것임을 확인하였다.



<그림 3> 유기 전압 성분에 따른 토크 파형



<그림 4> 유기 전압 성분에 따른 전원 주파수 6배 토크 리플

3. 결 론

본 논문에서는, 자속 집중형 영구자석 동기전동기의 전원 주파수 6배 성분 진동의 전자기적 가진원을 분석하였다. 전자기적 가진원은 크게 반경 방향 전자기력과 토크 리플로 나누어진다. 이때 반경 방향 전자기력은 발생 원인에 따라 전기자 기자력, 계자 기자력, 전기자 기자력과 계자 기자력의 합성, 그리고 슬롯 효과로 나누어지며, 토크 리플은 발생 원인에 따라 전류 변화에 의한 유기 전압, 인덕턴스 변화에 의한 유기 전압, 그리고 계자 자속 변화에 의한 유기 전압으로 나누어진다. 전원 주파수 6배 성분의 반경 방향 전자기력은, 전자기력의 공간고조파 차수인 vibration order와 고정자의 변위와의 관계를 고려하여 진동을 만들어내는 주요한 원인에 대해서 분석하였다. 토크 리플은 앞서 말한 유기 전압의 성분에 따라 분리하여 산정하였고, 이를 바탕으로 각 유기 전압의 성분에 의해서 발생하는 토크 리플을 구하였다. 분석 결과, 전원 주파수 6배 성분의 반경 방향 전자기력은 vibration order $r=12$ 에 의해서 주요하게 발생하며 이는 전원 주파수 1배 성분의 전기자 기자력의 공간고조파 -2차 성분과, 전원 주파수 5배 성분의 계자 기자력의 공간고조파 5차 성분에 의해서 발생함을 확인하였다. 또한, 토크 리플의 전원 주파수 6배 성분은 계자 자속의 유기 전압 변화에 의해 주요하게 발생함을 확인하였다. 결과적으로 전원 주파수 5배 성분의 계자 기자력과, 계자 자속 변화에 의한 유기 전압이 진동의 주요한 원인임을 알 수 있다. 따라서 영구자석에 의한 고조파 성분 저감 설계를 진행하면 전원 주파수 6배 성분의 진동을 개선할 수 있을 것이다.

향후 영구자석형 동기전동기의 전원 주파수 6배 성분의 진동을 분석할 때, 본 논문과 같이 전자기적 가진원인 반경 방향 전자기력과 토크 리플을 분석하여 진동에 크게 기여하는 성분을 찾아낸다면, 진동 개선 설계에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김재현, 김두영, 박권일, 윤명환, 홍정표, "EPS용 SPMSM의 토크 리플 분석 및 저감 설계", 2017 한국자동차공학회 춘계 학술대회, 1107-1111, 2017
- [2] 김기오, 유준열, 윤명환, 홍정표, "회전자 형상 변화를 통한 자속집중형 동기전동기의 토크 리플 저감 설계", 2017 한국자동차공학회 추계학술대회, 1302-1305, 2017
- [3] 이재웅, 차경수, 윤명환, 홍정표, "EV 구동용 120kW 권선계 차형 동기 전동기 토크 리플 저감 설계", 2017 한국자동차공학회 추계학술대회, 1319-1324, 2017
- [4] Young-Hoon Jung, Myung-Seop Lim, Myung-Hwan Yoon, Jae-Sik Jeong, Jung-Pyo Hong, "Torque Ripple Reduction of IPMSM Applying Asymmetric Rotor Shape Under Certain Load Condition", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 33, 333-340, 2018
- [5] 박권일, 차경수, 윤명환, 홍정표, "전기자동차 견인용 전동기의 극 수 슬롯 수 조합에 따른 전기적 특성 및 진동 특성 분석", 2017 한국자동차공학회 춘계학술대회, 1159-1163, 2017
- [6] 신창욱, 손형수, 윤명환, 홍정표, "전자기력의 기본파 성분 진동저감을 위한 IPMSM의 극 수 슬롯 수 조합에 대한 연구", 2015년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 726-727, 2017
- [7] Doo-Young Kim, Min-Ro Park, Jae-Han Sim, Jung-Pyo Hong, "Advanced Method of Selecting Number of Poles and Slots for Low-Frequency Vibration Reduction of Traction Motor for Elevator", IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 22, 1554-1562, 2017