

6상 비대칭형 영구자석 동기전동기와 3상 영구자석 동기전동기의 토크제어 출력 특성 비교 분석

신상혁, 서승현, 안창희, 양현주, 조영훈
건국대학교

The Comparative Analysis of Torque Characteristics of 6-phase Permanent Magnet Synchronous Motor and 3-phase Permanent Magnet Synchronous Motor

Sanghyuk Shin, Seunghyun Seo, Chang Hoi An, Hyunju Yang, Younghoon Cho
Konkuk University

ABSTRACT

본 논문에서는 6상 비대칭형 영구자석 동기전동기와 3상 영구자석 동기전동기의 일정 속도부하 조건 하에서 동토크에서의 6상 전동기와 3상 전동기의 출력 토크 맥동 성분 및 고조파가 토크에 미치는 영향과 6상 영구자석 동기전동기의 특성에 따른 주파수 영역에서의 출력을 시뮬레이션을 통해 비교 분석한다.

1. 서론

6상 영구자석 동기전동기는 기존의 3상 영구자석 동기전동기에 비해 동일 전력을 출력하기 위한 상전류의 크기가 3상에 비해 작고, 토크 맥동의 저감과 고장 대응 운전이 가능하여 안정성이 증가한다는 장점이 있다. 특히 두 상의 권선이 30° 의 위상차를 갖는 비대칭형의 경우 6차 고조파 저감 효과 또한 가지고 있다.

6상 동기전동기의 더 나은 제어 특성을 위해 VSD(Vector Space Decomposition)방식, 듀얼 d-q 제어방식^[1]등이 쓰이고 있다. 이 중 듀얼 d-q방식은 두 3상 권선의 상호 간섭 성분의 반영 정도에 따른 제어 특성의 차이가 존재하지만 기존의 3상 전동기 제어 방식을 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 듀얼 d-q제어를 사용한 중성점이 분리된 비대칭형 6상 영구자석 동기전동기와 일반적인 d-q제어를 사용한 3상 영구자석 동기전동기를 일정 속도부하 조건 하에서 두 전동기의 출력 토크 맥동 성분 및 고조파가 토크에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 비교 분석한다.

2. 본론

2.1 절 비대칭형 6상 영구자석 동기전동기

비대칭형 6상 영구자석 동기전동기는 그림 1과 같이 듀얼 3상 인버터와 6상 영구자석 동기전동기로 구성되며, 3상 영구자석 동기전동기는 하나의 3상 인버터로 구동되는 구조를 가지고 있다.

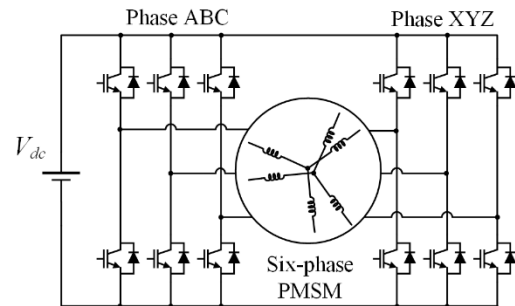


그림1 비대칭형 6상 영구자석 동기전동기
Fig.1 Asymmetrical six-phase PMSM

2.1.1 절 듀얼 d-q 변환을 통한 전동기 제어

비대칭형 6상 영구자석 동기전동기의 토크 제어를 위한 듀얼 d-q 제어의 블록도를 그림 2를 통해 나타내었다.

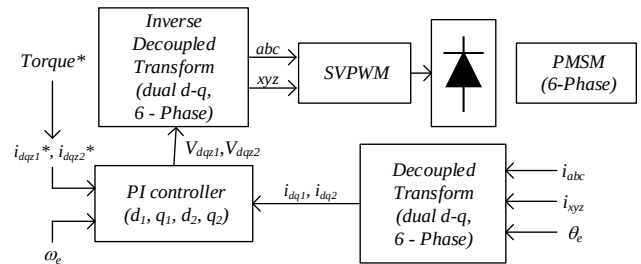


그림 2 듀얼 d-q 제어 블록도
Fig.2 Dual d-q control block diagram

3상 영구자석 동기전동기 역시 6상 영구자석 동기전동기 제어 방식과 같이 d-q축 변환과 전류제어의 PI제어를 통해 토크제어를 실행하였다. 각 시뮬레이션은 동일 PI이득 하에서 진행하였다.

2.1.2 절 6상 전동기와 3상 전동기의 수학적 모델링

영구자석 동기전동기의 전류제어에 사용되는 전동기의 방정식인 고정자의 전압 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{abcs,xyzs} = R_s i_{abcs,xyzs} + \frac{d}{dt} (\lambda_{abcs,xyzs}) \quad (1)$$

$V_{abcs,xyzs}$, $i_{abcs,xyzs}$, $\lambda_{abcs,xyzs}$ 는 각각 고정자 전압, 전류, 쇄자속을 뜻하며 R_s 는 고정자 저항을 뜻한다. 위의 (1) 식을 듀얼 d-q 변환을 통해 d1-q1축과 d2-q2축의 전압방정식으로 변환하면 다음과 같은 식 (2), (3)을 얻는다.

$$V_{d1} = R_s i_{d1} + L_{d1} \frac{di_{d1}}{dt} - \omega L_{q1} i_{q1} \quad (2)$$

$$V_{q1} = R_s i_{q1} + L_{q1} \frac{di_{q1}}{dt} + \omega L_{d1} i_{d1} + \sqrt{3} \psi_{PM}$$

$$V_{d2} = R_s i_{d2} + L_{d2} \frac{di_{d2}}{dt} - \omega L_{q2} i_{q2} \quad (3)$$

$$V_{q2} = R_s i_{q2} + L_{q2} \frac{di_{q2}}{dt} + \omega L_{d2} i_{d2}$$

식(2)와 (3)의 ω 는 회전자 전기 각속도를 나타낸다. 이때 전향 보상을 통해 상호 간섭 성분을 제거하고 PI제어의 성능을 향상시킬 수 있다. 3상 영구자석 동기전동기의 d-q 변환된 전압방정식은 식(2)와 같이 나타난다.

3. 시뮬레이션 결과

비교 분석을 위한 시뮬레이션은 매트랩 시뮬링크로 진행하였고 시뮬레이션 제정수는 표 1에 정리하였다.

표 1 시뮬레이션 제정수

Table 1 Parameters of simulation

L_d	0.24368 [mH]	P_{max}	35000 [W]
L_q	0.29758 [mH]	T_{max}	205 [N · m]
R_s	0.010087 [Ω]	J_m	0.1234 [kg · m ²]
p	8 [pole pairs]	ψ_{PM}	0.04366 [Wb]
T_{sw}	1 [μ s]	f_{sw}	10000 [Hz]

3.1 절 토크 맥동 크기 비교

6상 영구자석 전동기의 토크 맥동의 크기가 3상 영구자석 전동기의 토크 맥동 6.544 [N · m]에 비해 약 74.2%만큼 감소하였음을 확인할 수 있었다.

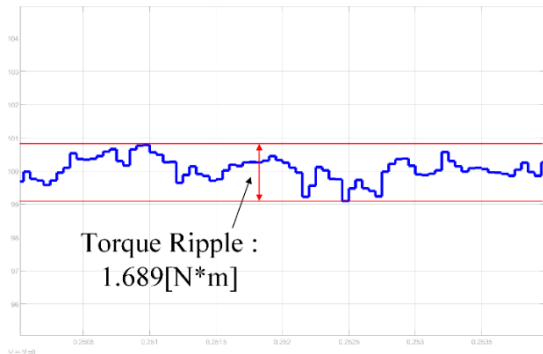


그림 3 비대칭형 6상 영구자석 동기전동기 토크 맥동
Fig 3. Torque ripple of asymmetrical six-phase PMSM

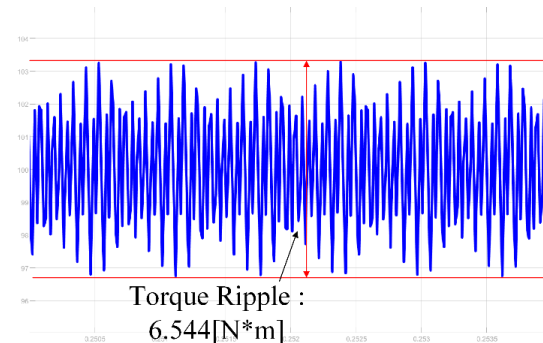


그림 4 3상 영구자석 동기전동기 토크 맥동
Fig.4 Torque ripple of three-phase PMSM

3.2 출력 토크의 고조파 성분 분석

비대칭형 6상 영구자석 동기전동기의 영향으로 6차 고조파의 영향이 3상에 비해 감소된 것과, 6상 동기전동기의 5차와 7차 고조파 또한 전류제어의 효과로 감소된 것을 확인할 수 있었다.

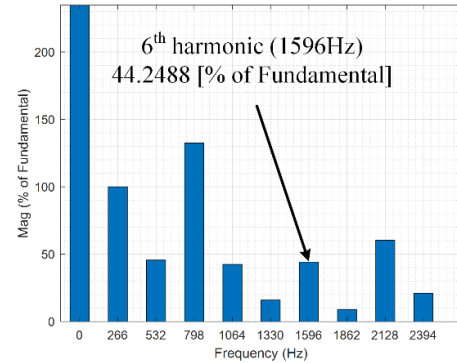


그림 5 비대칭형 6상 영구자석 동기전동기 FFT 분석
Fig.5 FFT Analysis of asymmetrical six-phase PMSM

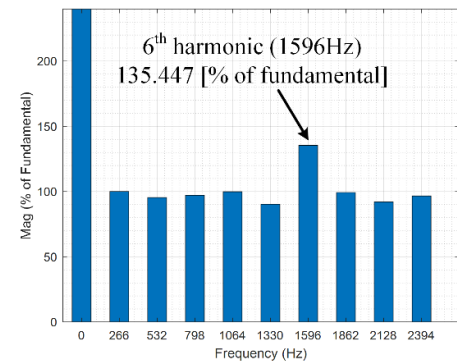


그림 6 3상 영구자석 동기전동기 FFT 분석
Fig.6 FFT Analysis of three-phase PMSM

4. 결론

본 논문은 비대칭형 6상 영구자석 동기전동기와 3상 영구자석 동기전동기를 듀얼 d-q제어를 통해 비교하여 6상 전동기의 특징인 토크 맥동 저감과 비대칭형 6상 전동기의 특징인 6차 고조파의 감소와 제어를 통한 5차와 7차 고조파의 저감을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 대학혁신지원사업에서 지원을 받아 수행된 연구임

참고 문헌

- [1] J. Karttunen, S. Kallio, P. Peltoniemi, P. Silventoinen and O. Pyrhönen, "Decoupled Vector Control Scheme for Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Machines," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 5, pp. 2185–2196, May 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2270219.