

공간고조파 · 자기포화를 고려한 IPMSM 전향보상 토크 리플 저감 기법

박 태 원 · 조 영 훈*

건국대학교 전기공학과

Torque Ripple Reduction of IPMSM Using Feedforward Compensation Considering Spatial Harmonics and Magnetic Saturation

Taewon Park · Younghoon Cho*

KonKuk University

Key words : Torque ripple (토크 리플), Spatial harmonics (공간고조파), Feedforward compensation (전향 보상), Feedforward (전향 보상), Interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM), Dead-time (데드타임)

교신저자, E-mail: yhcho98@konkuk.ac.kr

탄소배출 규제를 포함한 친환경적인 움직임이 활발해짐에 따라, 기존 내연기관 기반 구동 시스템에서 전동기를 활용한 구동 시스템으로의 전환이 전 세계적으로 가속화되고 있다. 특히 전기자동차(EV)와 하이브리드 전기자동차(HEV) 분야에서 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 이러한 추세 속에서 저소음 · 저진동 특성을 향상시키는 전동기의 개발은 필수적이다. 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Machine, PMSM)는 높은 출력 밀도, 우수한 효율, 빠른 응답 특성으로 인해 가장 주목받는 구동 기술 중 하나로, 전기자동차 및 산업 응용에서 널리 활용되고 있다. 그러나 PMSM 구동 시스템에서는 공간 고조파, 제어기의 대역폭 한계, 변조 지수의 제약, 데드타임(dead-time) 등의 요인으로 인해 6차 전력 맥동이 발생한다. 토크 리플은 전기자동차의 기계적 진동을 유발하여 차량의 소음 · 진동 · 승차감(NVH) 성능에 부정적인 영향을 미치므로, 이를 저감하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

토크 리플은 대부분 6차 고조파에서 나타나며, 12차 이상의 고조파는 변조 지수의 한계로 인해 완벽히 보상하기 어렵다. 6차 고조파 저감 알고리즘은 크게 두 가지로 구분된다. 첫 번째는 전류 지령에 고조파 성분을 추가하는 방식으로, 구현이 직관적이고 고조파 전류를 직접 보상할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 별도의 제어기 설계가 필요하고 제어기 차수가 증가하면서 시스템 복잡도와 안정성 문제가 발생한다. 두 번째는 전류 제어기의 출력단에 전향보상 항을 삽입하는 방식으로, 기존 제어기 구조를 유지하면서 빠른 응답성을 확보할 수 있다는 장점이 있다. 보상 전압은 분석적으로 도출된 조건이나 공간 고조파 모델을 기반으로 산출되어 적용된다.

본 논문에서는 전향보상 기반으로 동기좌표계 q 축에 6차 고조파 항을 보상하여 토크 리플 저감을 달성한다. 이를 위해 공간 고조파로 인한 자속의 고조파 성분을 분석하고, 이로 인해 발생하는 토크 리플을 상쇄할 수 있는 보상항의 위상과 크기를 계산하였다. 그림 1은 자속의 고조파 성분은 3상 역기전력 성분이고 이를 통해 동기좌표계 dq 축 자속에 6차 고조파가 있음을 알 수 있다. 그림 2는 제안하는 방식의 적용 전 후 토크의 6차 고조파만을 추출한 파형이다. 토크 리플의 6차 고조파가 제안하는 방식을 통해 효과적으로 맥동이 저감됨을 볼 수 있다.

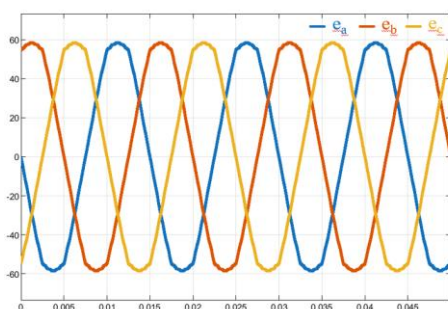


Photo. 2 Three-phase back-EMF waveform (1000 rpm)

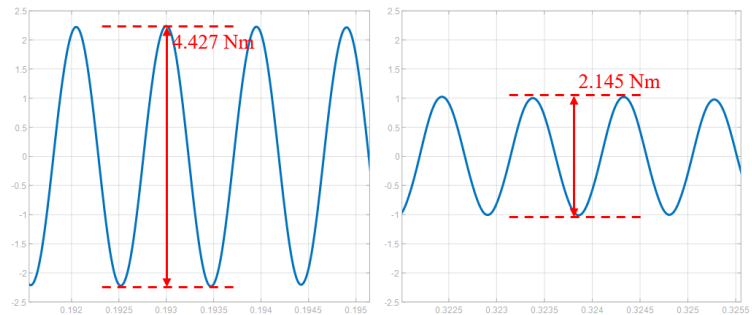


Photo. 1 Comparison of waveforms with and without the proposed method

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원
에 의한 연구임(RS-2024-00402727)