

개방 고장 조건에서 다상 BLDC 모터의 토크 리플 고조파 분석

이규범, 김태운, 서용석
 전북대학교

Analysis on Torque Ripple Harmonics of Multi-phase BLDC Motor under Open Circuit Fault Conditions

Kyubeom Lee, Taeyun Kim, Yongsug Suh
 Jeonbuk National University

ABSTRACT

대용량 전기 추진 시스템의 발전으로 자동차뿐만 아니라 선박, 비행기 등 대부분의 운송수단들이 전기 추진 시스템을 도입하고 있다. 특정 분야의 경우 전기 추진 시스템에서 발생하는 고장으로 인해 신뢰성이 저하되면 안전에 문제가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 다양한 고장 허용 제어 방법이 연구되었다. 많은 방법들이 고장으로 인해 발생하는 토크 리플을 감소시키는데 집중하였으나 제어로 인해 발생하게 되는 고조파의 영향은 고려되지 않았다. 토크에 포함된 고조파 성분들은 BLDC 모터와 같은 환경에서 토크 리플 크기에 큰 영향을 미치는 중요한 요소이다. 때문에 이러한 고조파 성분의 영향을 분석하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 다상 BLDC 모터에서 토크 고조파 저감 제어 방법이 저차 고조파 성분들에 미치는 영향을 분석한다. 이를 통해 토크 리플 저감에 가장 효과적인 고조파 성분을 찾고 제어로 인한 추가적인 악영향이 발생하는지 확인한다. 고조파 분석에 사용한 장비는 PLECS와 HIL(Hardware-In-the-Loop) 시뮬레이션을 사용하여 검증하였다.

1. 서론

환경 규제와 더불어 대용량 전기 모터 및 배터리 기술이 발전하면서 자동차, 선박, 비행기 등 다양한 분야에 전기 추진 시스템을 사용한 운송수단이 개발되고 있다.

운전 중 반도체 스위치, 모터의 고장자 또는 회전자 고장이 발생하면 시스템의 안정성이 떨어지고, 이는 신뢰도 하락으로 이어진다. 이에 고장 상황에서도 안정성을 유지하는 고장 허용 제어에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.^[1~7] 많은 연구들이 토크 리플 저감을 위해 전류를 제어하는 방법을 사용하는데, 전류 제어가 토크의 고조파에 어떤 영향을 미치는지에 대한 분석은 부족하다. 사다리꼴 파형의 역기전력을 가진 5상 PMSM에서 건전 상전류를 제어해 토크 리플을 줄인 방법이 보고되었다.^[1] 하지만 이 방법은 역기전력과 상전류에 1차, 3차 고조파 성분만 존재하기 때문에 고려하는 고조파의 범위가 좁다. 단상 개방 사고 발생 시 두 개의 건전 상 전류를 제어하여 토크 리플을 감소시키는 방법인 DPC(Double-Phase Control)-FTC가 제안되었다.^[2] 이 방법은 제어 상 개수가 적기 때문에 제어가 단순하다는 장점이 있지만, 전류 제어가 2차 이외의 고조파에 미치는 영향 분석이 없다. 단상 개방 사고에서 사용 가능한 모

든 건전 상을 제어하는 MPC(Multi-Phase Control)-FTC 방법이 제안되었다.^[3] 이 논문에서는 전류 제어가 토크의 2차 외 고조파 영역에 미치는 영향에 대한 분석이 없다. PMSM에서 전류의 고조파 주입을 통해 토크 고조파 성분을 보상하는 제어 방법이 보고되었다.^[4~7] 하지만 이 방법은 고조파 성분이 적은 PMSM 환경에서 검증되었고 주입 전류가 고조파에 미치는 영향에 대한 분석이 없다. 이처럼 토크 리플 저감 제어의 전류 제어가 토크 고조파에 미치는 영향에 대한 분석은 그 범위가 매우 좁다. 이는 상전류와 역기전력에 많은 고조파가 포함된 환경에서 원하지 않은 영향을 미칠 수 있다. 따라서 토크 리플 저감 제어가 고조파 영역에 미치는 영향 분석이 필요하다.

본 논문에서는 토크 리플 저감 목적의 전류 제어가 다른 고조파 영역에 미치는 영향을 분석한다. 토크의 2차, 4차 고조파를 수식 모델로 구현하고 토크 리플 저감 제어 적용 시 변경되는 토크 고조파 성분 벡터 다이어그램을 분석하는 방법을 사용한다. 고조파 분석 및 검증에는 PLECS 시뮬레이션과 HIL 604 장비를 사용한다.

2. 다상 BLDC 모터 드라이브 모델

그림 1은 본 논문에서 사용하는 12상 BLDC 모터의 등가회로이다. 12상 BLDC 모터의 구동 시스템은 12상이 독립적으로 이루어져 있으며 각 위상을 구동하는 12개의 2레벨 H-브리지 인버터로 구성되어 있다. 이때 전체 12상 전류는 3상 그룹 4개가 15도의 위상차를 가지며 분포된다.

BLDC 모터의 경우 전압과 전류의 파형은 정현파가 아닌 사다리꼴 파형이기 때문에 수식 (1), (2)와 같이 많은 고조파 성분이 포함되어 있다. 따라서 전압과 전류의 곱으로 표현되는 토크 또한 많은 고조파 성분을 포함하게 된다. 때문에, 전류의 크기와 위상각을 변경하면 토크 수식에 영향을 주게 되고 이러한 현상은 고조파의 변화로 나타난다.

$$e_p = \sum_{n=1,3,5\dots}^N \left(\frac{12}{n^2\pi^2} \left(\sin\left(\frac{2n\pi}{12}\right) + \sin\left(\frac{10n\pi}{12}\right) \right) \right) \times E_n \sin(n\omega t - \frac{(p-1)n\pi}{12}) \quad (1)$$

$$i_p = \sum_{n=1,3,5\dots}^N \left(\frac{24}{n^2\pi^2} \left(\sin\left(\frac{10n\pi}{12}\right) - \sin\left(\frac{11n\pi}{12}\right) - \sin\left(\frac{n\pi}{12}\right) + \sin\left(\frac{2n\pi}{12}\right) \right) \right) \times I_n \sin(n\omega t - \frac{(p-1)n\pi}{12}) \quad (2)$$

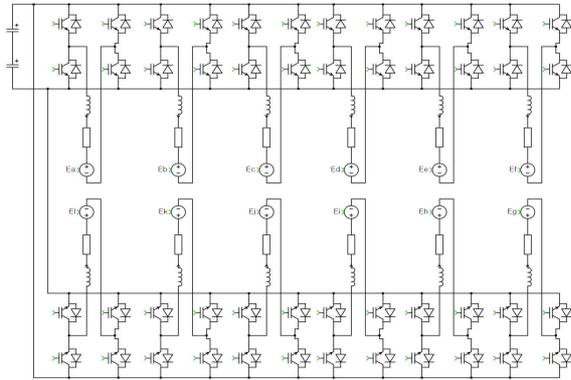


그림 1 12상 BLDC 모터 구동 시스템의 전체 회로도
Fig. 1 Overall equivalent circuit and H-bridge inverter for 12-phase BLDC motor drive system

3. 제어에 의한 고조파 영향 분석

12상 BLDC 모터가 생성하는 토크의 2차 및 4차 고조파 성분의 일반식은 수식 (3), (4)와 같다.

$$T_{2wt} = \left(-\frac{E_1 I_1}{2} \cos(2wt + \theta_E + \theta_I)\right) + \frac{E_1 I_3}{2} \cos(2wt - \theta_E + 3\theta_I) + \dots + \frac{E_{11} I_9}{2} \cos(2wt + 11\theta_E - 9\theta_I) \quad (3)$$

$$T_{4wt} = \left(-\frac{E_1 I_3}{2} \cos(4wt + \theta_E + 3\theta_I)\right) - \frac{E_3 I_1}{2} \cos(4wt + 3\theta_E + \theta_I) + \dots + \frac{E_{11} I_7}{2} \cos(4wt + 11\theta_E - 7\theta_I) \quad (4)$$

토크의 2차 고조파 벡터 다이어그램은 12개 상이 30도 간격으로 분포된 형태를 보인다. 토크의 4차 고조파 벡터 다이어그램은 각 상이 60도 간격으로 분포되어 6상으로 구성된 두 개의 벡터 다이어그램이 중첩된 형태를 보인다. 단상 사고 상황에서 출력 토크의 2차, 4차 고조파를 저감시키는 제어 방법으로는 MPC 방법론을 적용한다.^[3]

토크의 2차 고조파 저감 제어로 변화한 토크의 4차 고조파 벡터 다이어그램은 그림 2와 같다. 토크 2차 고조파 벡터 다이어그램에서 대칭이던 상은 4차 고조파 벡터 다이어그램에서도 대칭 형태로 나타난다. 원래 중첩된 b, h 상은 2차 고조파 저감 제어에 의해 서로 반대 방향으로 가중치 벡터가 인가되지만, b 상에 인가된 가중치 벡터의 수평 성분이 더 크기 때문에 수평 성분 합 벡터는 a 상 방향으로 치우친다. 따라서 제어되는 벡터의 수직 성분은 서로 상쇄되지만, 완전히 소거되지 않은 a 상 방향 수평 성분은 토크 리플로 나타난다.

토크의 4차 고조파 저감 제어로 변화한 토크의 2차 고조파 벡터 다이어그램은 그림 3과 같다. 토크 4차 고조파 벡터 다이어그램에서 상하 대칭인 b, f 상과 c, e 상은 2차 고조파 벡터 다이어그램에서는 좌우 대칭 형태가 된다. 이로 인해 제어에 사용된 벡터들을 이루는 수평 성분 벡터는 서로 상쇄되지만, 소거되지 않은 수직 성분 벡터들은 토크 리플 크기 증가로 나타난다.

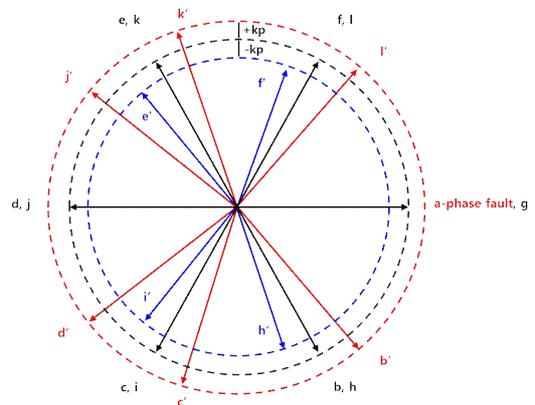


그림 2 2차 고조파 저감 제어 적용 시 벡터의 변화를 나타내는 토크 4차 고조파 벡터 다이어그램
Fig. 2 Vector diagram of 4th harmonic under 2nd harmonics reduction method

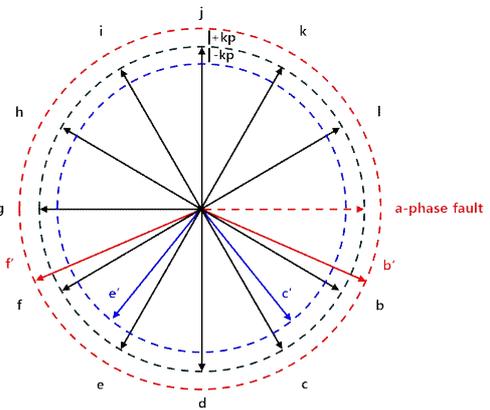


그림 3 4차 고조파 저감 제어 적용 시 벡터의 변화를 나타내는 토크 2차 고조파 벡터 다이어그램
Fig. 3 Vector diagram of 2nd harmonic under 4th harmonic reduction method

4. 시뮬레이션 검증

토크 리플 저감 방법은 PLECS 및 HIL을 사용하여 검증한다. 모터 추진 시스템은 전류제어기, 속도제어기, H-브리지, 12상 BLDC 모터, 인버터 등으로 구성된다. 시뮬레이션은 정상 상황, 단상 고장 상황, 제어 동작 상황으로 나누어 진행되며 시뮬레이션에서 사용하는 모터의 시스템 사양은 표 1과 같다.

표 1 BLDC 모터의 동작 조건
Table 1 Operation condition of BLDC motor

Phase number	12	Rated voltage	1,500Vdc
Rated Torque	118 kN	Stator resistance	0.075 mΩ
Rated speed	85 rpm	Stator inductance	0.312 mH
J motor	10,300 kg*m ²		

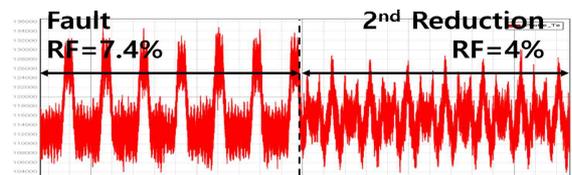


그림 4 2차 고조파 저감 제어 방법 적용 전후의 출력 토크 파형
Fig. 4 2nd harmonic reduction method applied output torque waveform

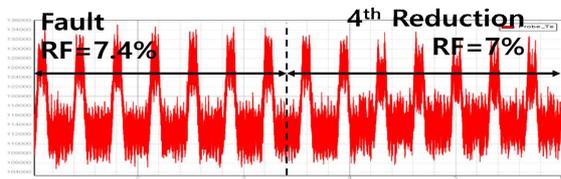


그림 5 4차 고조파 저감 제어 적용 전후의 출력 토크 파형
Fig. 5 4th harmonic reduction control applied output torque waveform

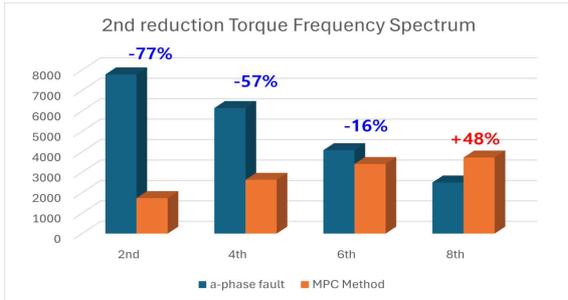


그림 6 2차 고조파 저감 제어 시 출력 토크의 주파수 스펙트럼 그래프
Fig. 6 2nd harmonic reduction controlled output torque frequency spectrum

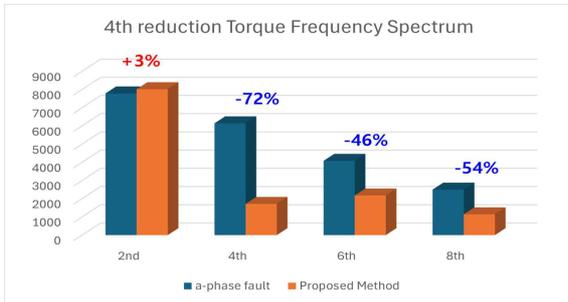


그림 7 4차 고조파 저감 제어 시 출력 토크의 주파수 스펙트럼 그래프
Fig. 7 4th harmonic reduction controlled output torque frequency spectrum

시뮬레이션 결과 토크 2차 고조파 저감 제어 시 그림 4와 같이 토크의 RF(Ripple Factor)가 7.4%에서 4%로 3.4% 감소했다. 출력 토크 주파수 스펙트럼 분석 결과 그림 6과 같이 토크의 8차 고조파가 증가하지만, 토크 리플에 영향이 큰 2차와 4차 고조파가 감소했기 때문에 RF가 크게 감소했다. 이는 앞서 수식 모델로 분석한 토크 2차 고조파 저감 제어가 4차 고조파에 미치는 영향과 동일한 결과다.

시뮬레이션 결과 토크 4차 고조파 저감 제어 시 그림 5와 같이 토크의 RF가 7.4%에서 7%로 0.4% 감소했다. 출력 토크 주파수 스펙트럼 분석 결과 그림 7과 같이 토크의 4, 6, 8차 고조파가 감소하지만, 토크 리플에 영향이 큰 2차 고조파가 증가했기 때문에 RF가 적게 감소했다. 이는 앞서 수식 모델로 분석한 토크 4차 고조파 저감 제어가 2차 고조파에 미치는 영향과 동일한 결과다.

5. 결론

대용량 배터리와 모터 기술이 발전하면서 자동차, 선박 비행기 등의 분야에 전기 추진 시스템이 도입되고 있다. 고장 상황에서 안정도를 유지하는 고장 허용 제어가 요구된다. 고장 허용 제어 방법으로 전류를 제어해 토크 리플을 줄이는 방법이 연구되고 있으나, 전류 제어가 토크의 고조파에 미치는 영향에 대한 분석이 부족하다. 이는 고조파가 많은 환경에서 원치 않은 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 논문에서는 다상 BLDC 모터에서 토크 리플 저감 제어가 토크의 고조파 영역에 미치는 영

향을 분석했다. 토크 2차 고조파 저감 제어는 RF를 3.4% 감소시키고 토크 4차 고조파 저감 제어는 0.4% 감소시켰다. 토크 2차 고조파 저감 제어는 토크 8차 고조파가 증가하는 단점이 있지만, 토크 리플에 큰 영향을 미치는 2차와 4차 고조파가 감소하여 전체 출력 토크의 리플에 큰 영향을 준다. 토크 4차 고조파 저감 제어는 4차, 6차, 8차 고조파가 크게 감소하는 장점이 있지만, 고차 고조파의 크기가 2차 고조파의 크기 대비 작아 전체 출력 토크 리플에는 영향을 미치지 못했다. 따라서 토크 리플 저감을 위해 토크 고조파 저감 제어를 적용할 경우, 토크 리플 영향력이 큰 저차 고조파를 대상으로 하는 것이 가장 효과적인 방법이다. 차후 본 논문의 분석을 기반으로 토크 리플 영향력이 큰 2차와 4차 고조파를 저감시키는 제어 방법을 연구할 예정이다.

이 논문은 2024년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술포럼연구소의 지원을 받아 수행된 연구임
(No. 21-403-D00-007(KRIT-CT-22-054), 고성능 추진 전동기 개발, 2022~2024)

참고 문헌

- [1] S. Dwari and L. Parsa, "Fault-tolerant control of a five-phase permanent magnet motors with trapezoidal back EMF", *IEEE Trans Ind. Electron*, vol.58, no.2, pp. 476-485, Feb. 2011.
- [2] H. Park, T. Kim, and Y. Suh, "Fault-tolerant Control Methods for Reduced Torque Ripple of Multi-phase BLDC Motor Drive System under Open-circuit Faults" *2021 Transaction IEEE-IAS*
- [3] T. Kim, H. Park and Y. Suh, "Torque Ripple Reduction Method With Enhanced Efficiency of Multi-phase BLDC Motor Drive Systems Under Open Fault Conditions" *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 27, No. 1, February 2022
- [4] H. Qiu-Liang, C. Yong and X. Li, "Fault-Tolerant Control Strategy for Five-Phase PMSM With Third-Harmonic Current Injection," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 58501-58509, 2018
- [5] X. Pei, P. Cui, C. Wang and Z. Zheng, "Torque Performance Optimization of Permanent Magnet Motor with Open Circuit Fault Based on BQGA and Current Harmonic Injection," *2022 9th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA)*, Zhuhai, China, 2022
- [6] Z. Zhang, Y. Wu, H. Su and Q. Sun, "Research on Open-circuit Fault Tolerant Control of Six-phase Permanent Magnet Synchronous Machine Based on Fifth Harmonic Current Injection," in *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 306-314, September 2022
- [7] G. Liu, Z. Lin, W. Zhao, Q. Chen and G. Xu, "Third Harmonic Current Injection in Fault-Tolerant Five-Phase Permanent-Magnet Motor Drive," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 8, pp. 6970-6979, Aug. 2018