삼상 인버터의 한 상 개방 고장 시 PMSM의 평균토크 제어성능 개선

배규철 . 이진환 . 유지윤
고려대학교 전기전자전파공학부

Average Torque Control Performance Improvement Of Three Phase Inverter One Phase Fault PMSM

Kyu Chul Bae, Ji Yoon Yoo
Department of Electrical Engineering, Korea University

ABSTRACT

영구자석 동기전동기를 채택하는 구동시스템에서는 신뢰성과 안정성을 확보하기 위한 방법으로 고장 시 대체적 운전방식을 갖출 필요가 있다. 본 논문에서는 삼상 인버터의 한상 고장 시 고장 검출기법과 추가적인 제어기를 선정하여 평균토크의 제어 성능을 개선하기 위한 시스템을 구현한 결과를 보고한다.

1. 서 론

다양한 산업 분야에서 사용되는 영구자석 동기 전동기는 높은 효율, 높은 역률, 광범위한 속도제어 영역 등의 장점을 갖고 있으며 모터의 신뢰성과 안정성을 확보하기 위하여 고장시의 대체적 운전방법에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다.

기존 인버터 고장 시 지속적인 운전을 위하여 다상 인버터(Multi Phase inverter)와 Redundant[1] [2] 구조의 회로를 사용하여 인버터를 구성하였지만 스위치가 추가됨에 따라 경제성이 좋지 않고, 부피가 커지는 단점을 갖고 있다.

본 논문에서는 삼상 인버터의 한 상 고장 시 감지방법과 인버터에 스위치를 추가하지 않고, 공진제어기를 추가하여 토크의 맥동률(Ripple)을 줄이고 평균토크를 증가 시키는 제어기를 제안한다.

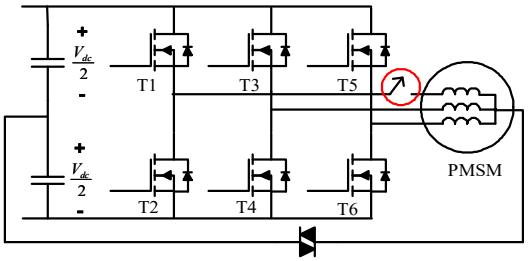

그림 1 Non-redundant 회로와 한상 개방 고장
Fig. 1 Non-redundant Circuit and One Phase Open Fault

2. 본 론

2.1 PMSM 인버터의 단상 개방고장

인버터 시스템의 단상 개방에 따른 토크 지령치에 의한 두 상의 전류는 아래 식(1) (3)의 유도 방식으로 식(4)를 유도 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \\ i_n^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_d^r \\ i_q^r \\ i_n^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r & 0 \\ -\sin\theta_r & \cos\theta_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \\ i_n^s \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$i_d^r = i_q^s \sin\theta_r$$
$$i_q^r = i_d^s \sin\theta_r \quad (3)$$

$$I_b = \frac{\sqrt{3}\, I_{q-ref}^r}{2\cos(\theta_r)}, I_c = -\frac{\sqrt{3}\, I_{q-ref}^r}{2\cos(\theta_r)} \quad (4)$$

a상 전류가 0이 됨에 따라 b상과 c상은 같은 크기의 180°의 위상차를 갖는 것을 확인 할 수 있고, 회전자 각 θ_r의 값에 따라 무한한 값으로 커질 수 있게 된다. 실제 구동회로에서도 큰 전류가 발생하여 회로에 손상을 입힐 수 있다.

2.2 RMS 고장 진단방법

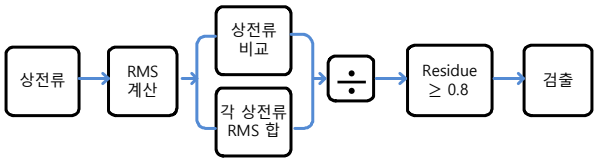

그림 2 RMS 고장진단 블럭도
Fig. 2 RMS Fault Detection Block diagram

$$\frac{i_{a-rms} - i_{b-rms}}{\sqrt{i_{a-rms}^2 + i_{b-rms}^2 + i_{c-rms}^2}} \quad (5)$$

그림2와 식(5)은 각 상전류의 RMS 값을 계산하여 각 상의 비교를 통한 고장진단 블록도와 계산식이다. 정상 작동하는 인버터의 경우 전류의 균형을 이루고 있으므로 검출 값은 0이다. 전류의 불균형이 발생하면 고장 상의 상전류만 0이 검출되고 나머지 2상의 검출 값은 증가한다. 생성된 나머지(Residue) 값은 고장을 검출하기 위하여 임계값을 설정하도록 도움을 주고 표준화 시킬 수 있고, 인버터의 스위치 개방고장 조건에서 감지 실패를 막을 수 있다.

2.2.1 RMS고장 시뮬레이션 결과

그림 3은 한상 개방고장이 발생 했을 때 계산된 전류 RMS 값의 조건이 만족 했을 경우 고장검출 시뮬레이션 결과 파형이다. 고장이 검출 되면 한상의 값은 0이 나오며 정상의 상전류 검출 값은 1이 되는 것을 확인할 수 있다.

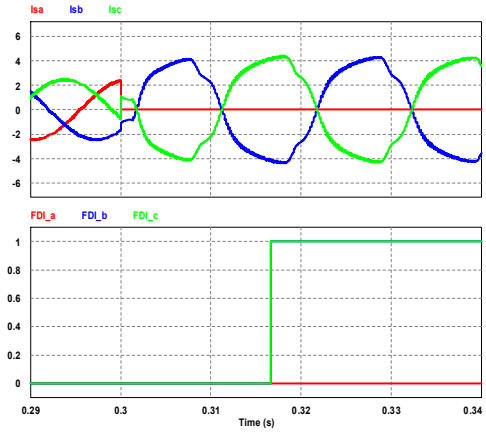

그림 3 한 상 개방 고장 검출 시뮬레이션 파형
Fig. 3 One Phase Open Fault Detection Simulation

2.3 제안된 제어 알고리즘

고장상황이 발생하였을 경우 그림 4와 같이 3차 고조파의 크기가 기본파의 50% 가까운 값으로 커지는 것을 확인 할 수 있다.

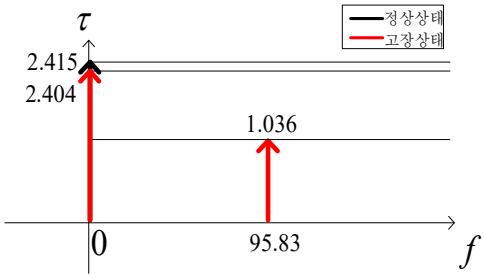

그림 4 정상상황과 고장상황 인버터의 기본파와 3차 고조파
Fig. 4 Fundamental & 3th Harmonics of Normal and Fault Inverter

이러한 3차 고조파를 줄이기 위하여 추가적인 제어기를 선정한다. 그림 5는 기존 PI제어기에 공진제어기를 추가하여 제어기를 구성한 블록도이다.

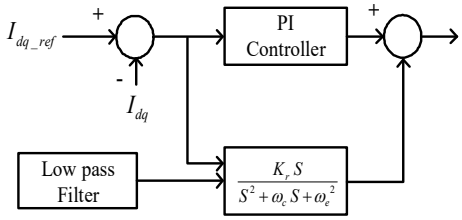

그림 5 인버터 제어기 구성
Fig. 5 Component of Inverter Controller

ω_c인 차단 주파수, ω_e 기본파 주파수(rad/s) 그리고 K_r 제어 게인 값을 이용하여 제어기 전달함수를 구성한다. 고주파를 제거하기 위하여 Low pass Filter를 추가한다.

3 시뮬레이션 결과

400W급 모터를 사용하여 직류 전압 지령치 50V, 스위칭 주파수는 1kHz로 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6에서 고장 상황의 토크는 4.24Nm의 결과 값을 나타내며 그림 7의 알고리즘 적용 후 토크는 3.64Nm로 맥동률이 16% 감소하였고, 평균 토크는 2.022에서 2.051로 1.4%의 증가를 확인 할 수 있다.

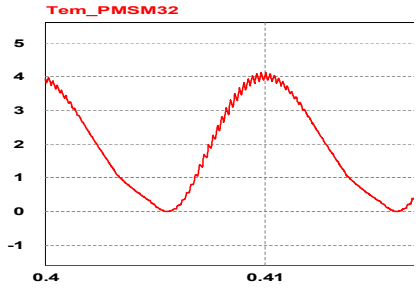

그림 6 한 상 개방 고장 검출 시 토크
Fig. 6 One Phase Open Fault Detection Simulation

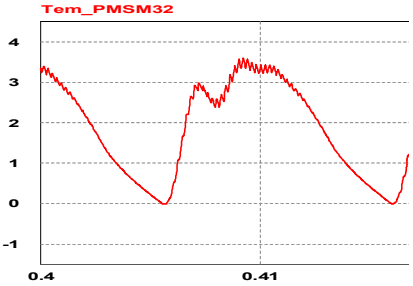

그림 7 알고리즘 적용 후 토크
Fig. 7 One Phase Open Fault Detection Simulation

3. 결 론

본 논문에서는 삼상 인버터의 한상 고장 발생 시 검출기법과 공진제어기 알고리즘을 적용하였다. 400W 급의 시뮬레이션을 통해 공진제어기의 추가로 인하여 토크 맥동률 감소와, 평균 토크의 증가를 확인하였다.

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

(NO. 20134030200340)

참 고 문 헌

[1] M. Kazmierkowski, "A novel vector control scheme for transistro PWM inverter fed induction Motor Drive", IEEE Trans, on Industrial Electronics, Vol38, No.1 pp. 41 47, 1991, Feb.

[2] Fabien Meinguet, "Control Strategies and Reconfiguration of Four Leg Inverter PMSM Drives in Case of Single Phase Open Circuit Faults", IEEE, Electric Machines & Drives Conference, pp. 299 304, 2009, May.