

영구자석 동기전동기 구동을 위한 인버터의 개방고장 특성

(Open Fault Characteristic of Inverter for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive)

김경화* · 최동욱* · 구본관** · 정인성**

(Kyeong-Hwa Kim · Dong-Uk Choi · Bon-Gwan Gu · In-Soung Jung)

*서울산업대학교 전기공학과, **전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터

Abstract

This paper presents analyses and performance evaluations of a PWM inverter for a permanent magnet synchronous motor drive under open fault conditions caused by the open fault in one switching device or isolation between the inverter and motor terminal. A fault model for a PWM inverter is derived and experiment is carried out by using DSP TMS320F28335 to provide the basis of fault diagnosis for such a case.

1. 서론

다양한 산업 공정에서 자동화가 확산되어 감에 따라 전동기의 정밀한 제어가 요구되고 있으며 제어시스템의 신뢰성 및 안정성 등이 중요한 연구 분야가 되고 있다. 최근 영구자석 동기전동기는 고정밀, 고효율 및 저소음 등의 장점들로 인해 다양한 분야에서 폭넓게 사용되고 있으며 이러한 영구자석 동기전동기에 고장이 발생할 경우 공정의 효율이 저하되거나 중단되어 손실이 발생 될 수 있다. 이러한 자산손실을 최소화하기 위해 빠르게 고장 등 동작 상태를 확인하는 것이 중요하다.[1],[2]

영구자석 동기전동기의 제어에 사용되는 인버터에 고장이 발생할 경우 제어 실패로 이어지게 된다. 인버터의 고장은 스위칭 소자의 파괴에 의한 개방 고장이 발생한 경우, 신호 전송 과정에 문제가 발생한 경우 및 인버터와 전동기 터미널이 분리된 경우 주로 발생하게 되며 이 때 스위칭 소자의 개방 상태가 유지되어 인버터는 원하는 출력 전압을 합성할 수 없게 되고 이는 효율 저하로 나타나며 심지어 기동 실패로 이어질 수 있다.[3]

본 연구에서는 인버터의 하나 혹은 두개의 스위칭 소자가 개방된 고장 및 인버터와 전동기 터미널의 분리에 의한 PWM 인버터의 고장상태 특성을 분석하여 고장을 해석하고 진단할 수 있는 기반을 제시하고자 한다. 영구자석 동기전동기 구동 인버터의 제어로는 고성능의 32 bit 부동소수점 DSP인 TI사의 TMS320F28335가 사용되어 고장 특성 실험에 사용된다.[5]

2. 영구자석 동기전동기 모델

정상상태에서 영구자석 동기전동기의 모델은 3상 변수를 이용하여 다음과 같이 구해진다.[4]

$$\begin{pmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 L 은 자기 인덕턴스, M 은 상호 인덕턴스, R_s 는 저항, v_{as} , v_{bs} , 및 v_{cs} 는 상전압, i_{as} , i_{bs} , 및 i_{cs} 는 상전류, e_{as} , e_{bs} , 및 e_{cs} 는 3상 역기전력을 나타내며 역기전력은 다음과 같다.

$$e_{as} = \omega_r \lambda_m \cos \theta_r \quad (2)$$

$$e_{bs} = \omega_r \lambda_m \cos(\theta_r - 2\pi/3) \quad (3)$$

$$e_{cs} = \omega_r \lambda_m \cos(\theta_r + 2\pi/3) \quad (4)$$

ω_r 은 전기 각속도, λ_m 은 쇄교 자속, θ_r 은 전기각을 나타낸다. 3상평형 조건에서 식 (1)의 전동기 모델은 동기 기준 좌표로 변환하여 다음과 같이 d-q 축에서의 전압 방정식을 얻을 수 있다.

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + L_q \dot{i}_{qs} + L_d \omega_r i_{ds} + \lambda_m \omega_r \quad (5)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L_d \dot{i}_{ds} - L_q \omega_r i_{qs} \quad (6)$$

여기서 L_q 및 L_d 는 q축과 d축 고정자 인덕턴스, v_{qs} 및 v_{ds} 는 q축과 d축 전압, i_{qs} 및 i_{ds} 는 q축과 d축 전류를 나타내며 ‘·’는 미분을 나타낸다. 또한, 전동기의 발생 토크 및 부하와 전기각의 관계는 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} P [\lambda_m i_{qs} + (L_d - L_q) i_{qs} i_{ds}] \\ &= J \left(\frac{1}{P} \right) \dot{\omega}_r + B \left(\frac{1}{P} \right) \omega_r + T_L \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 P 는 극수, J 는 관성, B 는 점성 마찰 계

수 및 T_L 은 부하 토크를 나타낸다.

3. 인버터 개방고장 모델

인버터의 개방 고장으로 인한 구동 시스템의 모델을 유도하기 위해 인버터 b상의 두 스위치 모두에 개방 고장이 일어나는 경우를 고려한다. b상의 스위치가 모두 개방되면 b상 전류는 영으로 유지되며 $i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0$ 이므로 $i_{as} + i_{cs} = 0$ 과 $i_{as}' = -i_{cs}'$ 이 구해진다.

개방된 한 상의 전류가 영이므로 개방되지 않은 두 상의 전류를 이용하여 미분 방정식을 수립할 수 있으며 이 때 정상인 경우 2개인 전압 방정식은 차수가 감소하게 된다. 상전압 v_{as} 와 v_{cs} 로부터 선전압 관계식을 구하면 v_{as} 는 다음과 같다.

$$v_{as} = v_{cs} - v_{bs} = 2(L-M)\dot{i}_{cs} + 2R_c i_{cs} + e_{cs} - e_{as} \quad (8)$$

인버터의 한 스위치 T_{b+} 에 개방 고장이 일어나는 경우 b상 극전압 v_{bo} 는 전압 벡터 T_{b+} 가 도통해야 하는 벡터에서 인버터는 기준전압과 같은 전압을 합성할 수 없으며 T_{b+} 고장 시 극전압 v_{bo} 는 환류 다이오드 D_{b+} 와 D_{b-} 에 의해 값이 다음과 결정된다.

$$v_{bo} = \begin{cases} V_{DC} & \text{when } i_{bs} < 0 \\ 0 & \text{when } i_{bs} > 0 \\ v_{so} + e_{bs} & \text{when } i_{bs} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

이 때 v_{so} 는 다른 상의 도통 관계에 의해 결정된다. 이러한 b상 극전압의 결정 관계를 이용하여 T_{b+} 에서 개방 고장이 발생할 때 고장모델이 구해진다.

4. 시스템 구성

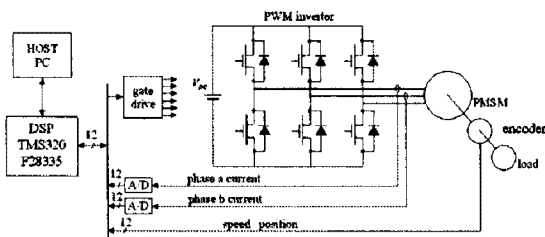


그림 1. 실험 시스템 구성
Fig. 1. Configuration of experimental system

그림 1은 속도 제어기, 전류 제어기, 인버터, 및 전동기 등으로 구성된 전체 시스템을 나타낸다. DSP는 TI사의 TMS320F28335로 연산 속도가 빠르고 내장 메모리를 보유하며 AD 컨버터와 PWM

포트 등이 내장되어 있다.[5] 샘플링 시간은 100

표 1. 시험 전동기의 정격 및 파라미터
Table 1. Ratings of a test motor

정격 용량	400 W	정격 속도	3500 rpm
정격 토크	1.1 Nm	극 수	6
최고 자속	0.02 Wb	고정자 저항	0.05 Ω
인덕턴스	0.2 mH		

[μsec]로 설정되며 인버터는 3상 PWM 인버터로 공간 벡터 PWM 기법을 통하여 10 [kHz] 스위칭 주파수로 구동되고 있다. 그림 2는 시험 전동기, 인버터 드라이버, 및 에뮬레이터로 구성된 전체 실험 시스템의 사진을 나타낸다. 시험 전동기의 정격 및 파라미터는 표 1에 나타난다.

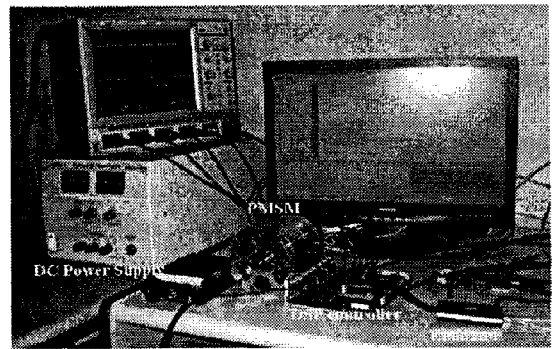


그림 2. 실험 시스템 사진
Fig. 2. Experimental system

5. 실험결과

이 절에서는 인버터 스위치의 개방형 고장 발생 특성을 분석하기 위해 여러 동작 조건 실험 결과가 제시된다. 속도 제어기로 PI제어기가 사용되며 이 때 $k_p = 0.04$, $k_f = 0.04$ 로 설정 되었고 전류 제어기로는 동기좌표계 PI 비결합 전류 제어가 사용된다.

그림 3과 그림4는 인버터의 개방고장이 전혀 없는 정상상태에서의 실험 결과를 나타내며 무부하 1000[rpm]과 0.5[Nm] 부하 시의 1000[rpm] 일 때의 실험결과이다. 실험 데이터는 DA 컨버터를 통해 출력되어 측정되었다. 개방 고장이 없는 정상상태에서 dq축 전류 및 상전류를 통하여 3상 전류의 평형 상태를 관찰 할 수 있으며 전동기 역기전력의 고조파 특성으로 인해 약간의 고조파가 포함되어 있음을 확인할 수 있다. 그림 4에서는 부하의 인가로 상전류가 크게 증가함을 확인할 수 있다.

그림 5와 그림 6은 인버터 스위치 중 b상의 상단 스위치인 T_{b+} 가 개방 고장 상태로 무부하 1000[rpm]과 0.5[Nm] 부하 시의 1000[rpm] 일 때

의 실험결과를 나타낸다. 이 경우 3상 전류가 더

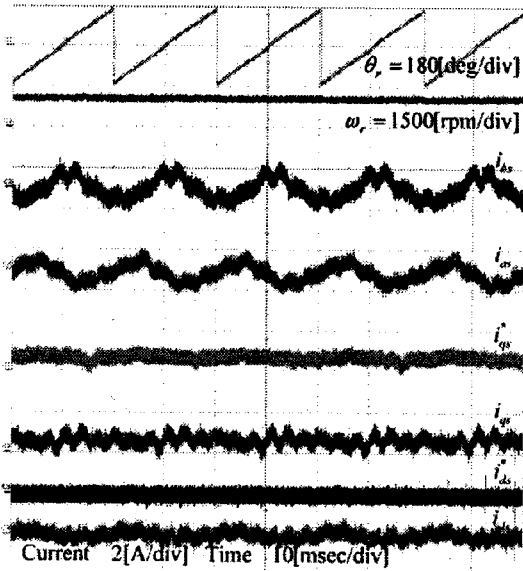


그림 3 정상상태 실험 결과
Fig. 3. Experimental results under non-fault condition

체 스위치의 개방으로 b상은 전류를 공급받지 못

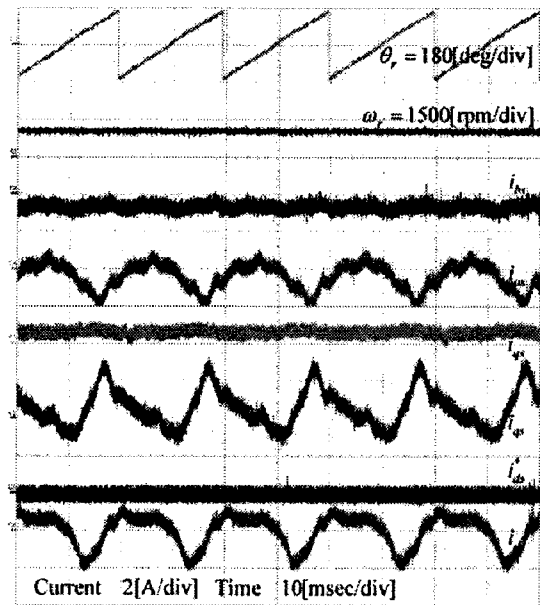


그림 5 인버터 T_{b+} 개방고장 시 실험 결과
Fig. 5. Experimental results under T_{b+} open fault of inverter

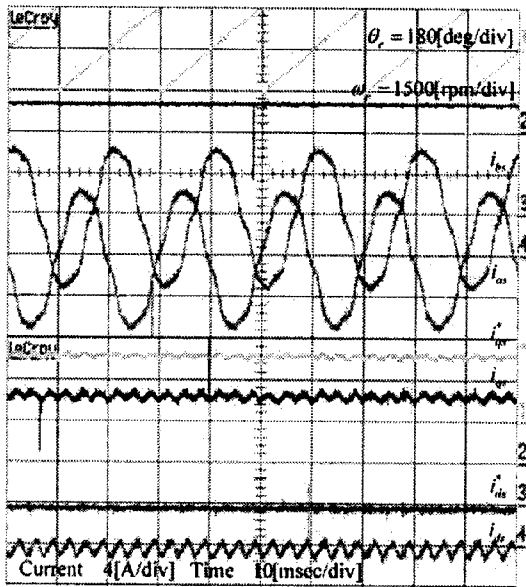


그림 4 정상상태 0.5(Nm) 부하 시 실험 결과
Fig. 4. Experimental results at 0.5(Nm) under non-fault condition

이상 평형을 유지 하지 못하고 b상의 전류는 T_{b-} 를 통하여 음의 전류는 흐를 수 있지만 T_{b+} 가 개방되어 양의 전류가 흐를 수 없게 되고 부하가 인가된 그림 6에서 부하의 인가로 상전류가 크게 증가됨을 볼 수 있으며 공간 벡터 PWM 제어에서 전압 명령을 합성할 수 있는 구간이 제한되어 매우 작은 음의 전류가 흐르게 된다.

그림 7과 그림 8은 b상의 모든 스위치가 개방 고장 상태에서 무부하 1000[rpm]과 0.5[Nm] 부하 시의 1000[rpm] 일 때의 실험결과를 나타낸다. 전

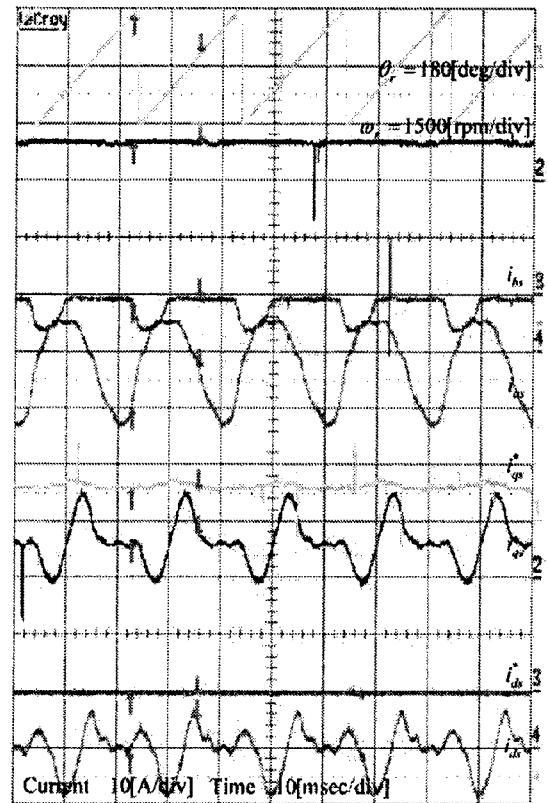


그림 6 인버터 T_{b+} 개방고장 및 0.5(Nm) 부하 시 실험 결과
Fig. 6. Experimental results at 0.5(Nm) under T_{b+} open fault of inverter

하고 단지 환류 다이오드를 통하여 전류가 순간적으로 흐를 수 있지만 그 효과가 작기 때문에 인버터와 전동기 b상이 분리 된 경우와 유사하다. b상

전류는 영으로 유지되며 a상과 c상의 전류에 의해

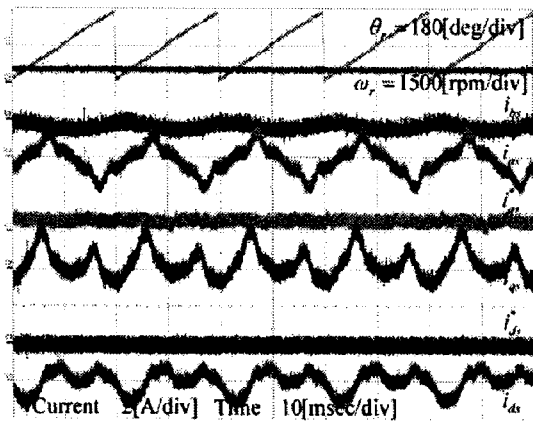


그림 7. 인버터 b상 개방고장 시 실험 결과
Fig. 7. Experimental results under entire switch open fault of inverter

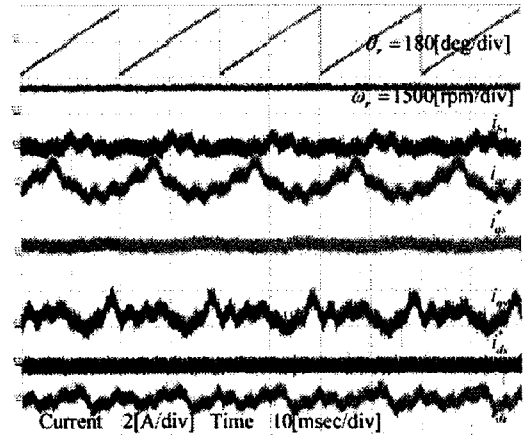


그림 9. 인버터 T_{b-} 개방고장 시 실험 결과
Fig. 9. Experimental results under T_{b-} open fault of inverter

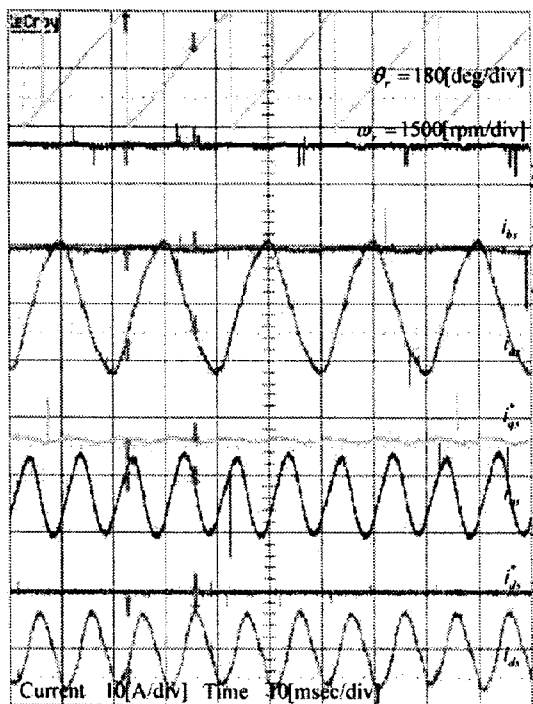


그림 8. 인버터 b상 개방고장 및 0.5(Nm) 부하 시 실험 결과
Fig. 8. Experimental results at 0.5(Nm) under entire switch open fault of inverter

dq 축 전류를 발생하게 된다.

그림 9는 T_{b-} 가 개방 고장 시 1000[rpm] 무부하에서의 실험결과를 나타낸다. 이 경우 역시 3상 전류가 더 이상 평형을 유지 하지 못하며 b상의 류는 T_{b+} 를 통하여 양의 전류는 흐를 수 있지만 T_{b-} 가 개방되어 음의 전류가 흐를 수 없음을 확인할 수 있다.

6. 결론

인버터의 하나 혹은 두개의 스위칭 소자가 개방된 고장 및 인버터와 전동기 터미널의 분리에 대한 PWM 인버터 고장상태에서의 제어 특성을 분석하여 고장을 해석하고 진단할 수 있는 기반을 제시하였다. 실험적 특성 해석과 분석을 위해 전체 시스템이 DSP TMS320F28335에 의해 구현되어 특성 해석이 수행되었다.

본 연구는 부천산업진흥재단의 (BIPF) 부천로봇공동연구센터 기술 개발사업 지원에 의하여 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] T. H. Liu, J. R. Fu, and T. A. Lipo, "A strategy for improving reliability of field-oriented controlled induction motor drives", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29, no. 5, pp. 910-918, 1993.
- [2] R. L. A. Ribeiro, C. B. Jacobina, E. R. C. Silva, and A. M. N. Lima, "Fault detection of open-switch damage in voltage-fed PWM motor drive systems", IEEE Trans. Pow. Elec., vol. 18, no. 2, pp. 587-593, 2003.
- [3] B. A. Welchko, T. A. Lipo, T. M. Jahns, and S. E. Schulz, "Fault tolerant three-phase AC motor drive topologies: A comparison of features, cost, and limitations", IEEE Trans. Pow. Elec., vol. 19, no. 4, pp. 1108-1116, 2004.
- [4] P. C. Krause, Analysis of Electric Machinery. New York: McGraw-Hill, 1986.
- [5] TMS320F28335 Digital Signal Controller (DSC) - Data Manual. Texas Instrument, 2008.