

## 영구자석 동기전동기 구동 인버터 스위치의 개방 고장에 의한 제어 특성해석 및 고장모델 연구

(A Study on Fault Model and Performance Evaluation under Power Switch Open Fault in an Inverter-Driven Permanent Magnet Synchronous Motor)

김경화\* · 최동욱 · 구분관 · 정인성

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

### 요 약

인버터 스위치의 개방 혹은 인버터와 모터 터미널의 분리로 인해 발생하는 고장을 해석하고 진단 알고리즘의 시험 평가를 위해 효과적으로 사용할 수 있는 영구자석 동기전동기 구동 인버터의 개방 고장에 의한 제어 특성해석 및 고장모델이 제시된다. 기존의 전동기의 해석과 제어에 많이 사용되는 dq 모델은 상전압 모델을 변환한 것으로 고장 상황에서는 3상평형 조건이 성립하지 않기 때문에 개방 회로의 입력 전압을 구하기가 쉽지 않아 고장 모델의 해석을 위해 직접 사용하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 스위치 개방에 따른 전동기의 선전압 관계를 이용한 인버터의 고장 모델이 제안되고 제안된 고장모델의 타당성을 입증하기 위해 시뮬레이션이 수행된다. 전체 시스템이 DSP TMS320F28335에 의해 구현되어 동일 고장 조건에서의 비교 실험과 특성 해석이 수행된다.

### Abstract

To analyze influences under open faults in switching devices of the PWM inverter and under the isolation between the inverter and motor terminal, a faulty model for the inverter-driven permanent magnet synchronous motor is presented. Even though the conventional dq motor model obtained through the transformation of phase voltage model is widely used to analyze and control AC motor, it can not be used under open faults in switching devices since the 3-phase balanced condition is no longer hold under the open fault and it is not easy to obtain motor input voltages in open phase from the pole voltage. To deal with this problem, a faulty model for an inverter-driven permanent magnet synchronous motor is derived by using the line voltage of motor according to switch open, which can be effectively used for performance evaluation of the diagnostic algorithm. The validity of the proposed faulty model is verified through comparative simulations and experiments using DSP TMS320F28335.

Key Words : Inverter Open, Fault Model, Diagnostic Evaluation, Simulation, DSP TMS320F28335

\* 주저자 : 서울산업대학교 전기공학과 부교수

Tel : 02-970-6406, Fax : 02-978-2754

E-mail : k2h1@snut.ac.kr

접수일자 : 2009년 3월 10일

1차심사 : 2009년 3월 16일

심사완료 : 2009년 3월 31일

## 1. 서 론

최근, 다양한 산업 공정 및 제품에서 자동화의 정도가 확산되고 더 복잡한 시스템의 출현으로 인해 가변속 AC 전동기 구동 시스템의 신뢰성 및 공정의 안정성 분야는 상당히 중요한 분야로 대두되고 있다. 다양한 공정에서 사용되고 있는 영구자석 동기전동기에 고장이 발생할 경우 사용 효율이 저하되거나 공정이 중단되는 상황에 직면하며 심지어 사고에 의한 큰 손실이 발생 될 수도 있다. 이와 같은 사용자의 자산 손실을 최소화하기 위해 효과적인 시스템 모니터링과 정확한 고장 진단이 중요한 과제가 되고 있다[1-8].

영구자석 동기전동기에서 발생하는 고장의 유형을 조사해 보면 크게 고장자 및 회전자 관련 고장[1], 인버터 및 전력 회로 부분 고장[2-6], 축 센서 및 전류 센서 등의 센서 류 고장[7] 그리고 기타 기계적 고장으로 분류 할 수 있으며 각각 유형 별로 어느 정도 연구가 진행되고는 있지만 아직 고장의 정도에 대한 판단 기준 및 고장 모델 등이 명확히 확립되지 않았으며 실험적 방법에 의존하며 대응 운전도 부족한 실정이다. 인버터의 고장은 전원 공급선에서의 단락, 정류기 다이오드의 고장, 커패시터의 파괴로 인한 고장, 전동기 터미널에서의 고장 및 스위칭 소자의 고장 등이 있다[2,8]. 이들 중 인버터에서는 드라이브 회로의 문제 및 소자 파괴로 인한 스위칭 소자의 도통 실패와 게이트 드라이브로의 신호 전송 과정에서의 문제로 인해 소자에 개방 상태가 유지되는 고장이 주로 발생한다. 또한, 과전류에 의한 소자 파괴 혹은 단락 방지를 위한 퓨즈의 용해에 의해서도 스위칭 소자의 개방 고장이 발생할 수 있다[5]. 인버터에 소자의 개방 고장이 발생하는 경우 인버터는 원하는 출력 전압을 합성할 수 없으며 전류의 고조파 증가, 토크 리플 발생, 효율 저하가 나타나며 심한 경우 기동 실패로 이어져 최근까지 인버터 스위칭 소자의 개방 고장을 진단하기 위한 연구들이 수행되었다. 고장의 진단과 검출 방법의 고려 시 가장 중요한 사항은 고장의 진위 여부로 “False alarm”을 차단하는 것이며 이를 위해서는 정확한 고장 모델과 신호 처리 기법 및 실험적 특성해석이 필수적으로 요

구된다. 하지만, 여러 문헌에서 인버터 스위치의 개방 고장 발생으로 인한 특성해석과 고장모델은 아직 명확히 제시되지 않았으며 주로 실험적인 방법에 의해 고장을 진단하는 방법에 치중하고 있다.

본 논문에서는 인버터 스위치의 개방으로 인해 발생하는 고장을 해석하고 진단 알고리즘의 시험 평가를 위해 효과적으로 사용할 수 있는 영구자석 동기전동기 구동 인버터의 개방 고장에 의한 제어 특성 해석 및 고장모델이 제시된다. 기존의 전동기 dq 모델은 상전압 모델을 변환한 것으로[9] 정상인 경우 쉽게 스위칭 상태에 따른 상전압 입력이 구해지나 고장 상황에서는 3상평형 조건이 성립하지 않기 때문에 개방 회로의 입력 전압을 구하기가 쉽지 않아 고장 모델의 해석을 위해 직접 사용하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 스위칭 개방에 따른 전동기의 선전압 관계를 이용한 고장 모델이 제안된다. 제안된 고장모델의 타당성을 입증하기 위해 시뮬레이션이 수행되어 실제 동일 고장 조건에서의 실험 결과와 비교 된다. 시뮬레이션과 실험적 비교 평가를 위해 전체 구동 시스템이 DSP TMS320F28335에 의해 구현되었다[10].

## 2. 인버터 개방에 따른 고장모델

고장이 없는 정상 조건에서 3상평형 영구자석 동기전동기의 동적 모델은 3상변수를 이용하여 다음과 같이 구해진다[9].

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

여기서  $v_{as}$ ,  $v_{bs}$ , 및  $v_{cs}$ 는 각각 상전압,  $i_{as}$ ,  $i_{bs}$ , 및  $i_{cs}$ 는 각각 상전류,  $e_{as}$ ,  $e_{bs}$ , 및  $e_{cs}$ 는 각각 3상 역기전력으로 다음과 같이 나타난다.

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

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

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

또한,  $L$ 은 자기 인덕턴스,  $M$ 은 상호 인덕턴스,  $R_s$ 는 저항,  $\omega_r$ 은 전기 각속도,  $\lambda_m$ 은 쇄교 자속, 및  $\theta_r$ 은 전기각을 나타낸다. 전동기의 발생 토크 및 부하와 전기각의 관계는 다음과 같이 나타난다.

$$T_e = \frac{e_{as}i_{as} + e_{bs}i_{bs} + e_{cs}i_{cs}}{(\omega_r/P)} = J\left(\frac{1}{P}\right)\dot{\omega}_r + B\left(\frac{1}{P}\right)\omega_r + T_L \quad (5)$$

$$\dot{\theta}_r = \omega_r \quad (6)$$

여기서  $P$ 는 극의 쌍수,  $J$ 는 관성,  $B$ 는 점성 마찰 계수 및  $T_L$ 은 부하 토크이다. 그림 1은 PWM 인버터와 영구자석 동기전동기를 나타낸다. 인버터 극전압  $v_{ao}$ ,  $v_{bo}$ ,  $v_{co}$ 는 DC 링크 "o"에 대한 전동기의 터미널 전압으로 정의된다. a상의 극전압은 스위치와 다이오드의 도통 상태에 따라 다음과 같이 구해진다.

$$v_{ao} = V_{DC} \text{ for } T_{a+} \text{ or } D_{a+} \text{ on} \quad (7)$$

$$v_{ao} = 0 \text{ for } T_{a-} \text{ or } D_{a-} \text{ on} \quad (8)$$

전동기의 상전압은 전동기의 중성점 "s"에 대한 터미널의 전압으로  $v_{as}$ ,  $v_{bs}$ ,  $v_{cs}$ 로 나타내며 선전압은 터미널 간의 전압으로 전동기의 선전압, 상전압 및 극전압의 관계식은 다음과 같이 구해진다.

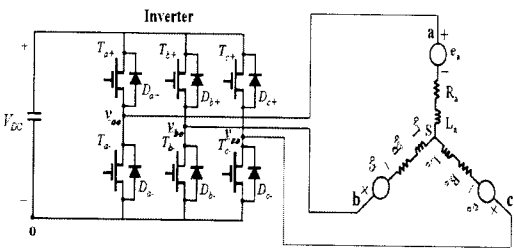


그림 1. PWM 인버터  
Fig. 1. PWM inverter

$$v_{ab} = v_{as} - v_{bs} = v_{ao} - v_{bo} \quad (9)$$

$$v_{bc} = v_{bs} - v_{cs} = v_{bo} - v_{co} \quad (10)$$

$$v_{ca} = v_{cs} - v_{as} = v_{co} - v_{ao} \quad (11)$$

정상인 상태에서는 3상평형 조건이 성립하여 인버터 스위칭 상태에 따른 극전압을 이용하여 쉽게 전동기의 상전압 입력을 구할 수 있다. 하지만, 개방 고장 상황에서는 3상평형 조건이 성립하지 않아 상전압 입력을 구하기가 쉽지 않기 때문에 우선 인버터의 극전압 정보로부터 쉽게 구해지는 선전압 모델을 전개할 필요가 있다. 식 (9)-(11)의 선전압 관계를 이용하여 고장이 없는 정상 조건에서 식 (1)은 다음과 같이 나타난다.

$$(L-M)\frac{d}{dt}i_{as} - (L-M)\frac{d}{dt}i_{bs} = v_{ab} - e_{as} + e_{bs} - R_s i_{as} + R_s i_{bs} = u_1 \quad (12)$$

$$(L-M)\frac{d}{dt}i_{as} + 2(L-M)\frac{d}{dt}i_{bs} = v_{bc} - e_{bs} + e_{cs} - R_s i_{bs} - R_s(i_{as} + i_{bs}) = u_2 \quad (13)$$

식 (5)-(6)과 식 (12)-(13)을 이용하여 개방 고장이 없는 정상 조건에서의 제어 특성을 구할 수 있다. 인버터의 개방 고장으로 인한 구동 시스템의 모델을 유도하기 위해 개방 고장 중 그림 1에 있는 인버터 Arm의 두 스위치 모두에 개방 고장이 일어나는 경우를 고려한다. b상의 스위치  $T_{b+}$ 와  $T_{b-}$  전체가 개방되는 경우 전동기 b상은 인버터로부터 전혀 전력을 공급받을 수 없고 단지 환류 다이오드를 통해서만 전류가 순간적으로 흐를 수 있으며 그 효과가 작아 이는 b상 권선이 인버터와 완전히 개방된 경우와 유사하다. 또한, 과전류로 인해 해당 Arm 스위치가 소손되거나 퓨즈 용해에 의해 분리된 경우도 이에 해당한다. 이 때 b상 전류는 영으로 유지되며 구동 시스템은 2상 여자 방식과 유사하게 구동된다. 즉,  $i_{bs} = 0$ 이고 3상 Y결선 부하에서  $i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0$ 이므로  $i_{as} + i_{cs} = 0$ 과  $i_{cs} = -i_{as}$ 이 구해진다. 또한, 식 (1)과  $i_{bs} = 0$ 으로부터  $v_{bs} = e_{bs}$ 를 구할 수 있다. 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  $v_{ca}$ 는 다음과 같다.

$$v_{ca} = v_{cs} - v_{as} = 2(L-M)\dot{i}_{cs} + 2R_s\dot{i}_{cs} + e_{cs} - e_{as} \quad (14)$$

식 (5)-(6)과 식 (14)를 이용하여 b상 스위치의 전체가 개방 고장인 경우의 모델이 구해지며 이를 이용하여 고장 특성이 해석될 수 있다. 표 1은 인버터 각 Arm의 두 스위치 모두에 개방 고장이 발생할 때의 고장 전압 모델을 나타낸다.

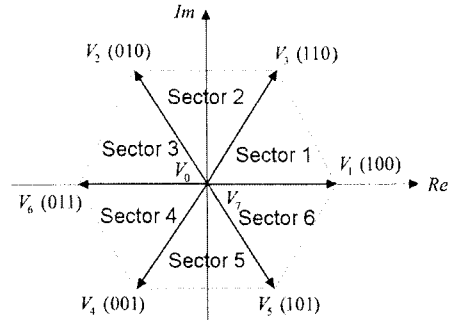
표 1. 인버터 Arm 전체 스위치 개방 고장 시 전압모델

Table 1. Voltage model under open fault in total switch of inverter arm

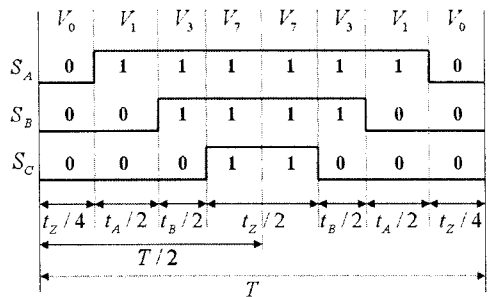
고장 상	전압 모델
a상	$i_{as} = 0, v_{as} = e_{as}, i_{bs} + i_{cs} = 0, \dot{i}_{bs} = -\dot{i}_{cs}$ $v_{bc} = v_{bs} - v_{cs} = v_{bo} - v_{co}$ $= 2(L-M)\dot{i}_{bs} + e_{bs} - e_{cs} + 2R_s\dot{i}_{bs}$
b상	$i_{bs} = 0, v_{bs} = e_{bs}, i_{as} + i_{cs} = 0, \dot{i}_{as} = -\dot{i}_{cs}$ $v_{ca} = v_{cs} - v_{as} = v_{co} - v_{ao}$ $= 2(L-M)\dot{i}_{cs} + e_{cs} - e_{as} + 2R_s\dot{i}_{cs}$
c상	$i_{cs} = 0, v_{cs} = e_{cs}, i_{as} + i_{bs} = 0, \dot{i}_{as} = -\dot{i}_{bs}$ $v_{ab} = v_{as} - v_{bs} = v_{ao} - v_{bo}$ $= 2(L-M)\dot{i}_{as} + e_{as} - e_{bs} + 2R_s\dot{i}_{as}$

다음으로 그림 1의 인버터 6개 스위치 중 하나에서 개방 고장이 일어나는 경우를 고려한다. b상의 상단 스위치인  $T_{b+}$ 에서 개방 고장이 일어나는 경우  $T_{b+}$ 가 도통할 수 없으므로 그림 2 (a)의 전압 공간벡터 중  $T_{b+}$ 가 도통되어야 하는  $V_2, V_3, V_6$  및  $V_7$  벡터가 정확히 발생될 수 없다. 이러한 전압 벡터의 생성 여부는 b상 전류의 방향에 의존하게 된다. 공간 벡터 PWM에서는 회전자의 위치에 따라 각 섹터 별 인접한 전압 벡터를 사용하고 섹터 1, 2, 3, 및 4는  $T_{b+}$ 가 도통되어야 하는 전압 벡터를 사용해야 하므로 이 구간에서 인버터는 기준전압과 같은 전압을 합성할 수 없게 된다. 섹터 5와 6에서는 인접한 전압 벡터가  $T_{b-}$ 의 도통을 필요로 하지는 않으나 그림 2(b)의 대칭 공간 벡터 PWM에서 사용되는 영벡터  $V_7$ 을 정확히 발생될 수 없어 마찬가지로 인버터는 기준전압과

같은 전압을 합성할 수 없게 된다. 한 스위치의 개방 고장이 일어나는 경우 b상 극전압  $v_{bo}$ 는 전압 벡터  $V_0, V_1, V_4$ , 및  $V_5$ 에서는 고장이 없는  $T_{b-}$ 가 도통되 영으로 결정되나  $T_{b+}$ 가 도통하는 벡터  $V_2, V_3, V_6$  및  $V_7$ 에서는 스위치와는 관계 없이  $v_{bo}$ 는 환류 다이오드  $D_{b+}$ 와  $D_{b-}$ 에 의해 값이 다음과 결정된다.



(a) 섹터와 공간전압벡터



(b) 대칭 공간 벡터 PWM

그림 2. 대칭 공간 벡터 PWM의 스위칭 패턴

Fig. 2. Switching pattern in symmetrical SVPWM

$$v_{bo} = \begin{cases} V_{DC} & \text{when } i_{bs} < 0 \\ 0 & \text{when } i_{bs} > 0 \\ v_{so} + e_{bs} & \text{when } i_{bs} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

이 때  $v_{so}$ 는 다른 상의 도통 관계에 의해 결정된다. 이러한 b상 극전압의 결정 관계가 표 2에 정리되어 있으며 식 (5)-(6), 식 (12)-(13) 및 식 (15)를 이용하여  $T_{b+}$ 에서 개방 고장이 발생할 때의 고장모델과 제어 특성이 구해진다. 다른 임의의 한 스위치의 개방 고장이 일어나는 경우도 유사하게 해석할 수 있다.

표 2.  $T_{b+}$  고장 시 전압벡터에서의 극전압 값  
Table 2. Pole voltage according to voltage vector

전압벡터	$v_{ao}$	$1v_{bo}$	$v_{co}$
$V_0$	0	0	0
$V_1$	$V_{DC}$	0	0
$V_2$	0	$v_{bo}$	0
$V_3$	$V_{DC}$	$v_{bo}$	0
$V_4$	0	0	$V_{DC}$
$V_5$	$V_{DC}$	0	$V_{DC}$
$V_6$	0	$v_{bo}$	$V_{DC}$
$V_7$	$V_{DC}$	$v_{bo}$	$V_{DC}$

### 3. 전체 시스템 구성

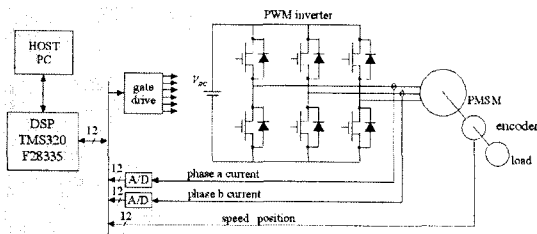


그림 3. 실험 시스템 구성  
Fig. 3. Configuration of the experimental system

그림 3은 실험 시스템의 구성을 나타낸다. 전체 알고리즘은 고성능의 32 bit 부동소수점 DSP인 TI사의 TMS320F28335에 의해 구현된다. TMS320F28335는 연산 속도가 빠르고 내장 메모리를 보유하며 AD 컨버터와 PWM 포트 등이 내장되어 있다[10]. 샘플링 시간은 100[μsec]로 설정되며 PWM으로는 공간 벡터 PWM 기법이 사용된다[11]. 전동기는 10[kHz] 스위칭 주파수의 3상 PWM 인버터로 구동되며 회전자 속도와 위치는 IRT310-3000-325 엔코더를 통해 감지되어 DSP 내장 eQEP 모듈에 의해 입력되고 각 상전류는 홀 센서를 통해 측정되어  $40/2^{11}$ [A]의 분해능으로 DSP 내장 12-[bit] A/D 컨버터에 의해 입력된다. 그림 4는 DSP 제어기, 시험 전동기, 인버터 드라이버, 및 에뮬레이터로 구성된 전체 실험 시스템의 구성을 나타낸다. 시험 전동기의 정격 및 파라미터는 표 3에 나타난다.

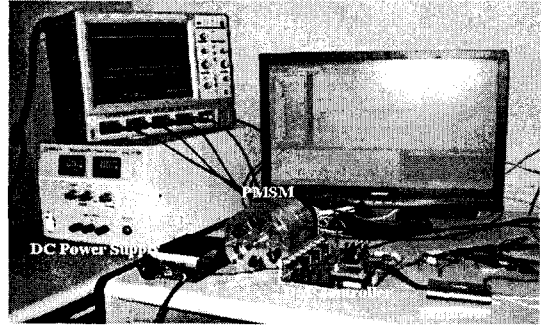


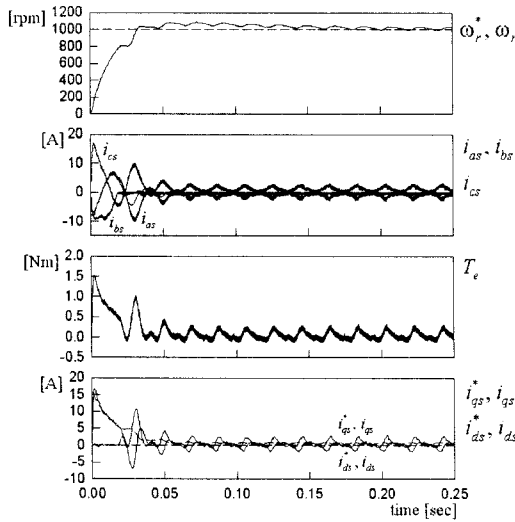
그림 4. 실험 시스템 사진  
Fig. 4. Experimental system

표 3. 시험 전동기의 정격 및 파라미터  
Table 3. Ratings and parameters of a test motor

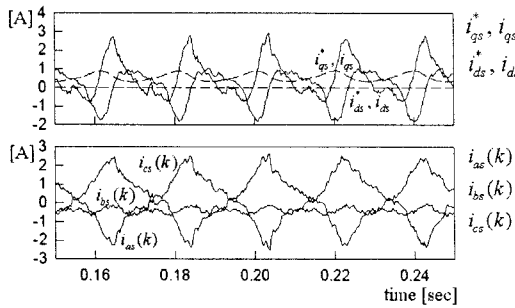
정격 용량	400[W]	정격 속도	3,500[rpm]
정격 토크	1.1[Nm]	극 수	6
채교 자속	0.02[Wb]	고정자 저항	0.05[Ω]
인덕턴스	0.2[mH]		

### 4. 시뮬레이션 및 실험결과

이 절에서는 인버터 스위치의 개방형 고장 발생 시 제안된 고장 모델의 타당성과 유용성을 입증하기 위해 여러 동작 조건에서의 비교 시뮬레이션과 실험 결과가 제시된다. 그림 5는 인버터 b상 상단 스위치인  $T_{b+}$ 에 개방 고장 발생 시 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 이 경우는 b상 스위치 중 상단 스위치만 고장인 경우로 b상 모두가 개방되어 b상전류가 항상 영으로 유지되는 상태와는 달리  $T_{b+}$ 를 통한 양의 전류가 흐를 수 없게 된다. 속도 명령은 1,000[rpm]이고 속도 제어기로는 PI 제어기가 사용되었으며 제어기 이득은  $k_p=0.05$ ,  $k_i=0.5$ 가 사용되었다[12]. 전류 제어로는 동기좌표계 PI 비결합 전류 제어가 사용된다[13]. 시뮬레이션 결과에서 점선은 명령치를 나타내며 실선은 실제 변수 양을 나타낸다. 전류 제어가 동기 좌표에서 이루어지므로 인버터 상의 한 스위치 개방 고장 시에도 3상전류는 평형 상태를 유지하지 못하며 고장이 없는 스위치의 상전류도 제어되지 못하는 특징이 나타난다. 전류 파형에는 옅색이 존재하며 이러한 전류로 인해 식 (5)로 구한 토크에는 기



(a) 과도 응답



(b) 정상상태 응답

그림 5. 인버터  $T_{b+}$  스위치 개방 고장 시 1,000(rpm)에서의 시뮬레이션 결과  
 Fig. 5. Simulation results at 1,000(rpm) under  $T_{b+}$  switch open fault in b-phase of inverter

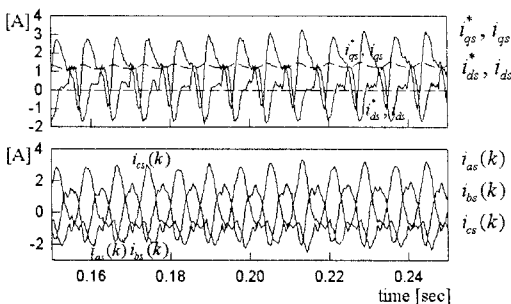
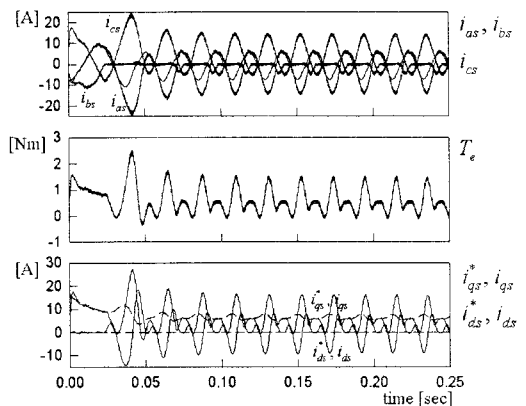


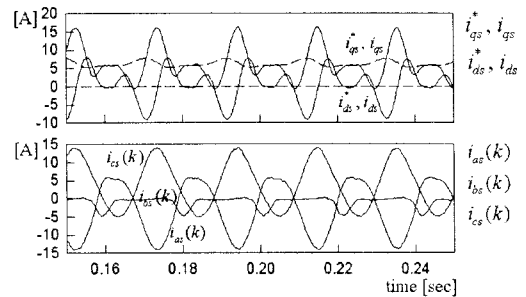
그림 6. 인버터  $T_{b+}$  스위치 개방 고장 시 2,500(rpm)에서의 시뮬레이션 결과 (정상상태)  
 Fig. 6. Simulation results at 2,500(rpm) under  $T_{b+}$  switch open fault in b-phase of inverter

본 주파수 성분의 토크 리플이 존재하게 된다. dq 축 전류 제어도 효과적으로 이루어지지 못하는데 인버터의 정상 동작 시 dq 축 전류는 DC 값인 반면 스위치 고장 시 이 전류는 기본파 주파수 성분의 리플을 갖는다.

그림 6은 인버터 스위치  $T_{b+}$ 의 개방 고장 시 속도 명령 2,500[rpm]일 때의 시뮬레이션 결과이다. 3상전류의 불평형 정도와 전류 파형의 움셋이 더 심화됨을 확인할 수 있으며 dq 축 전류에 기본 주파수 성분의 리플도 더 증가함을 확인할 수 있다.



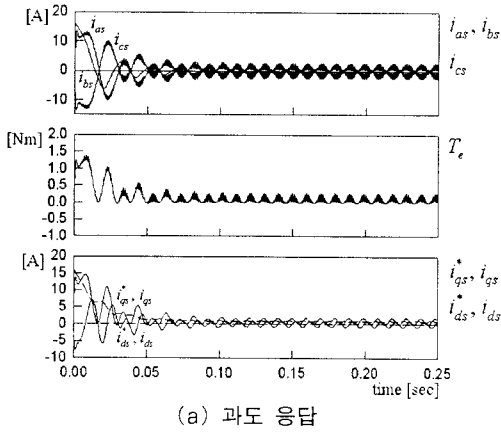
(a) 과도 응답



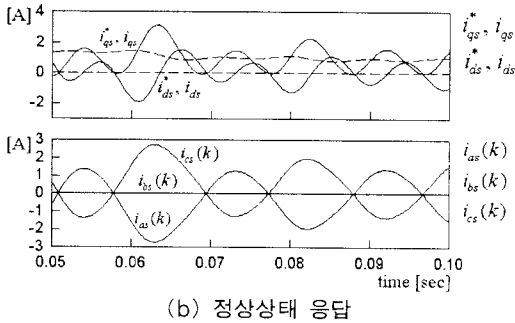
(b) 정상상태 응답

그림 7. 인버터  $T_{b+}$  스위치 개방 고장 시 1,000(rpm), 0.5(Nm)에서의 시뮬레이션 결과  
 Fig. 7. Simulation results at 1,000(rpm) and 0.5(Nm) under  $T_{b+}$  switch open fault

그림 7은 인버터 스위치  $T_{b+}$ 의 개방 고장 시 속도 명령 1,000[rpm]과 부하 토크 0.5[Nm]가 가해질 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 부하의 인가로 상전류가 크게 증가되었으며 이로 인해 토크 리플이



(a) 과도 응답

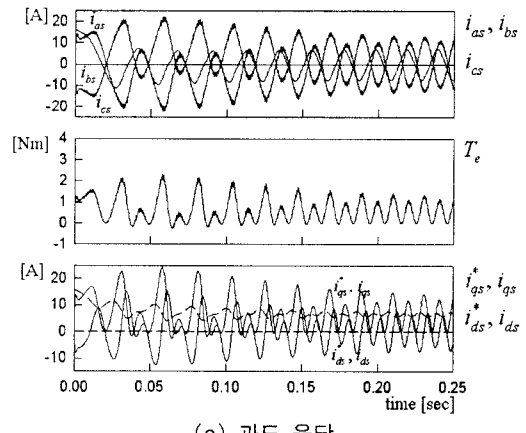


(b) 정상상태 응답

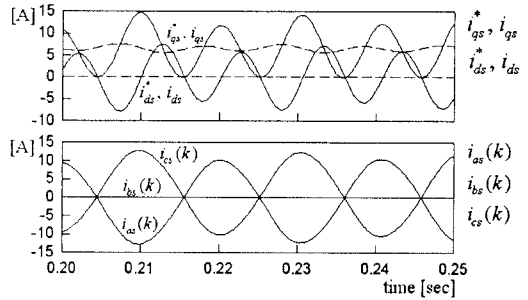
그림 8. 인버터 b상 전체 스위치 개방 고장 시 1,000[rpm]에서의 시뮬레이션 결과  
Fig. 8. Simulation results at 1,000(rpm) under entire switch open fault in b-phase of inverter

상당히 증가함을 확인할 수 있다. 스위치  $T_{b+}$  만 고장이 일어나므로  $T_{b-}$  스위치의 도통에 의해 음의 b 상전류가 흐르는 것을 관찰할 수 있으나 앞에서 설명한 것처럼 대칭 공간 벡터 PWM 방식에 의해 인버터가 정확히 전압 명령을 합성할 수 있는 구간은 섹터 5와 6에만 국한하므로 음의 전류가 매우 작음을 알 수 있다.

그림 8은 인버터 b상 전체 스위치의 개방 고장 시 속도 명령 1,000[rpm]에서의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 전체 스위치의 개방 시 전동기 b상은 인버터로부터 전혀 전력을 공급받을 수 없고 단지 환류 다이오드 경로를 통해서만 전류가 순간적으로 흐를 수 있으나 그 효과가 매우 작아 이는 전동기의 b상 권선이 인버터와 완전히 개방된 경우와 유사하다. b상



(a) 과도 응답



(b) 정상상태 응답

그림 9. 인버터 b상 전체 스위치 개방 고장 시 1,000[rpm], 0.5[Nm]에서의 시뮬레이션 결과  
Fig. 9. Simulation results at 1,000(rpm) and 0.5(Nm) under entire switch open fault

전류는 영으로 유지되며 나머지 두 상전류가 서로 반대의 부호로 전류를 흘려 dq 축 전류와 토크를 발생함을 확인할 수 있다. 인버터 b상 전체 스위치의 개방 고장 시에도 3상전류의 불평형 상태와 전류 윗셋이 관측되며 또한 토크와 dq 축 전류에 기본 주파수 성분의 리플이 확인된다.

그림 9는 인버터 b상 전체 스위치의 개방 고장 시 속도 명령 1,000[rpm]과 부하 토크 0.5[Nm]가 가해질 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 부하의 인가로 상전류와 토크 리플이 크게 증가되나 스위치  $T_{b+}$  만 개방 고장이 있는 그림 7과 달리 b상전류가 거의 영으로 유지됨을 확인할 수 있다.

그림 10에서 그림 12는 비교를 위해 측정한 인버터 스위치의 개방 고장이 전혀 없을 때의 실험 결과

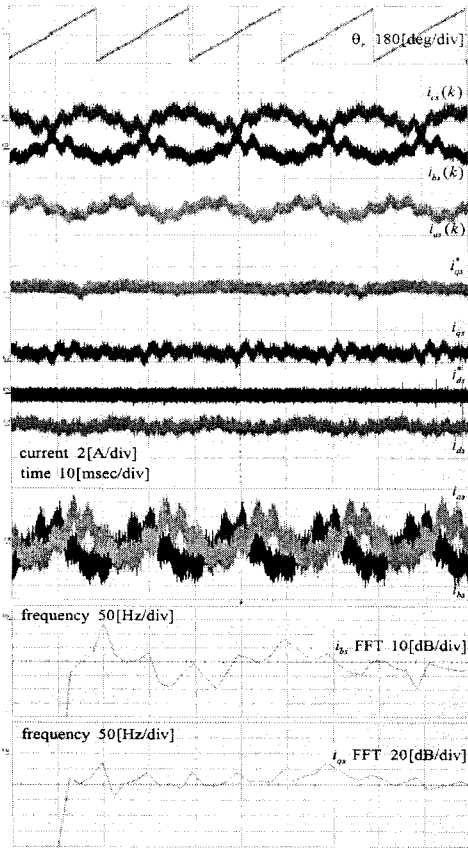


그림 10. 정상조건 1,000(rpm)에서의 실험 결과  
Fig. 10. Experimental results at 1,000(rpm) under non-fault condition

를 나타내며 각각 그림 10은 속도 명령 1,000[rpm], 그림 11은 속도 명령 2,500[rpm], 및 그림 12는 속도 명령 1,000[rpm]에서 0.5[Nm]의 부하가 인가된 경우의 실험 결과이다. 시뮬레이션과 동일한 속도 제어기와 전류 제어가 사용되었으며 실험 데이터는 DA 컨버터를 통해 출력되어 측정되었다. 스위치의 개방 고장이 없는 정상 조건에서 dq축 전류 및 3상 전류의 제어 성능과 3상전류의 평형 상태를 관찰할 수 있으며 실험에 사용한 전동기가 갖는 역기전력 고조파 특성으로 인해 전류 파형에 약간의 고조파가 포함되어 있음을 확인할 수 있다.

그림 13과 그림 14는 인버터  $T_{b+}$  스위치의 개방 고장 시 각각 1,000[rpm]과 2,500[rpm]의 속도 명령이 가해진 경우의 실험 결과를 나타낸다. 그림 5와

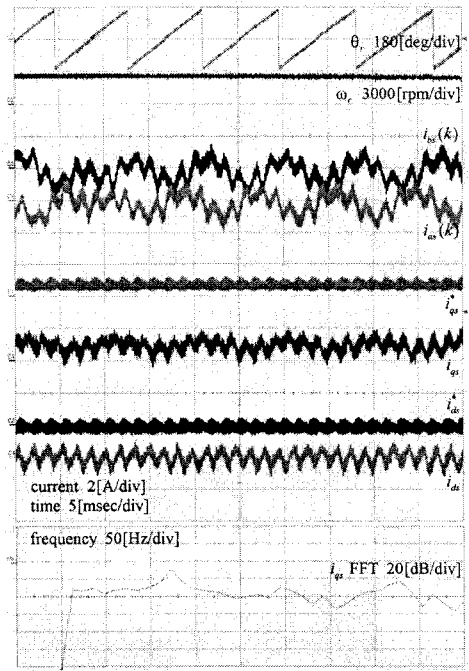


그림 11. 정상조건 2,500(rpm)에서의 실험 결과  
Fig. 11. Experimental results at 2,500(rpm) under non-fault condition

그림 6의 시뮬레이션 결과와 유사하게 스위치 개방 시 3상전류가 더는 평형 상태를 유지할 수 없고 전류 파형에 움푹이 존재함을 확인할 수 있으며 앞에서 설명한 것처럼 경부하 조건에서  $T_{b+}$ 의 개방 시 고장상의 전류는 음의 움푹 전류를 형성함을 볼 수 있다. 또한, 그림 10과 그림 11의 고장이 없는 정상 조건에서의 실험 결과에 비해 각각의 동작 속도에서 3상전류 간의 불평형 정도와 상전류 움푹을 관찰할 수 있고 DC 값이 아닌 기본과 주파수 성분으로 변하는 dq축 전류 리플을 확인할 수 있다. 이러한 전류로 인해 토크에도 상당한 토크 리플이 존재할 것이라 생각된다.

그림 15는 인버터  $T_{b+}$  스위치의 개방 고장 시 속도 명령 1,000[rpm]에서 0.5[Nm]의 부하가 인가된 경우의 실험 결과이다. 그림 7의 시뮬레이션 결과와 유사한 상전류 및 dq축 전류 파형을 관찰할 수 있으며 스위치  $T_{b+}$ 의 개방 시 섹터 5와 6의 구간에서  $T_{b-}$  스위치의 도통에 의한 작은 음의 전류가 흐르는 현상을 확인할 수 있다. 또한, 정상조건인 그림 12의 실



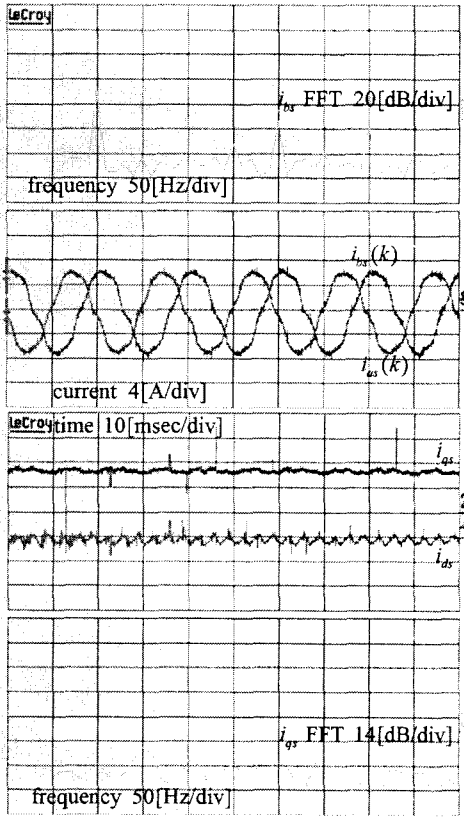


그림 12. 정상조건 1,000(rpm), 0.5(Nm) 에서의 실험 결과  
 Fig. 12. Experimental results at 1,000(rpm) and 0.5(Nm) under non-fault condition

험 결과에 비해 q축 전류의 모든 고조파 성분이 증가하며 특히 기본 주파수 성분의 크기가 상당히 증가함을 관찰할 수 있다.

그림 16과 그림 17은 인버터 b상 전체 스위치에 개방 고장이 일어난 경우 속도 명령 1,000[rpm]에서 각각 무부하와 0.5[Nm]의 부하가 인가될 때의 실험 결과를 나타낸다. 그림 8과 그림 9의 시뮬레이션 결과와 유사하게 b상의 모든 스위치가 개방되므로 전동기 b상은 인버터에서 전혀 전력을 공급받을 수 없어 b상 전류는 영으로 유지되며 dq축 전류에는 큰 리플을 관찰할 수 있다.

인버터 스위치에 개방 고장이 발생하면 기동 시 초기 회전자 위치에 따라 기동 실패가 일어날 수 있

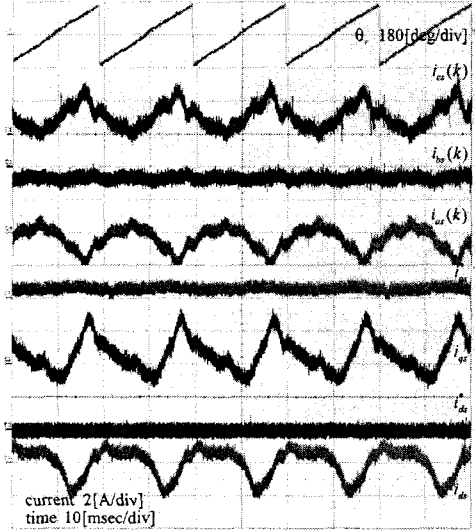


그림 13. 인버터  $T_{b+}$  스위치 개방 고장 시 1,000(rpm)에서의 실험 결과  
 Fig. 13. Experimental results at 1,000(rpm) under  $T_{b+}$  switch open fault in b-phase of inverter

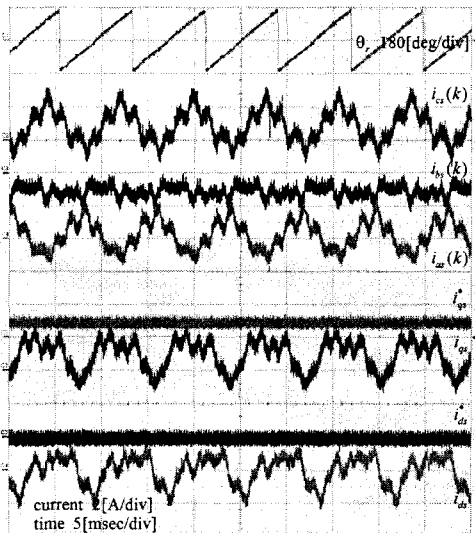


그림 14. 인버터  $T_{b+}$  스위치 개방 고장 시 2,500(rpm)에서의 실험 결과  
 Fig. 14. Experimental results at 2,500(rpm) under  $T_{b+}$  switch open fault in b-phase of inverter

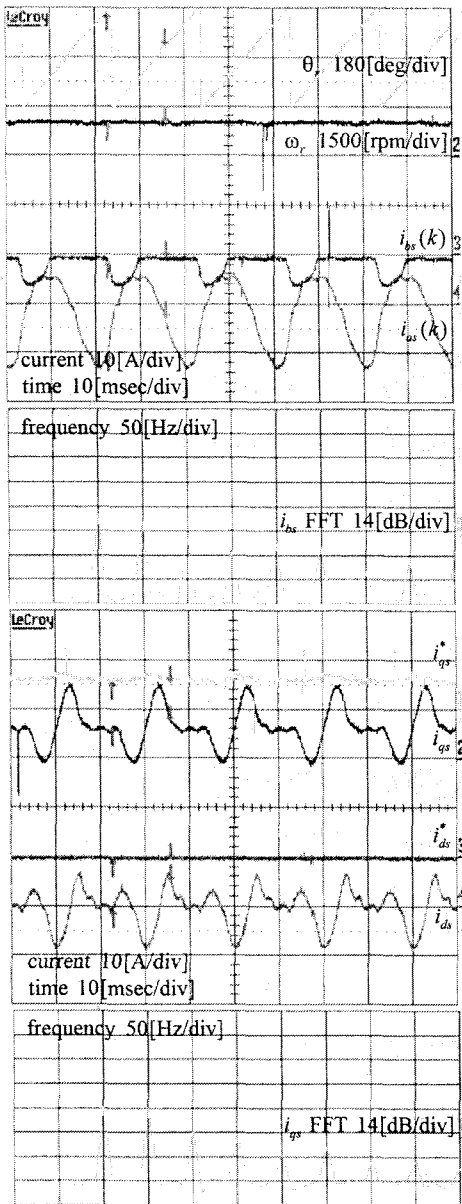


그림 15. 인버터  $T_{b+}$  스위치 개방 고장 시 1,000(rpm), 0.5(Nm)에서의 실험 결과  
 Fig. 15. Experimental results at 1,000(rpm) and 0.5(Nm) under  $T_{b+}$  switch open fault

다. 이러한 기동 실패는 6개 회전자 위치 영역에서 존재하며 표 4에 기동 실패를 발생하는 초기 회전자 위치와 인버터 개방 고장 스위치와의 관계가 나타나 있다.  $T_{a+}$ 에 개방 고장이 발생하면 초기 회전자 위

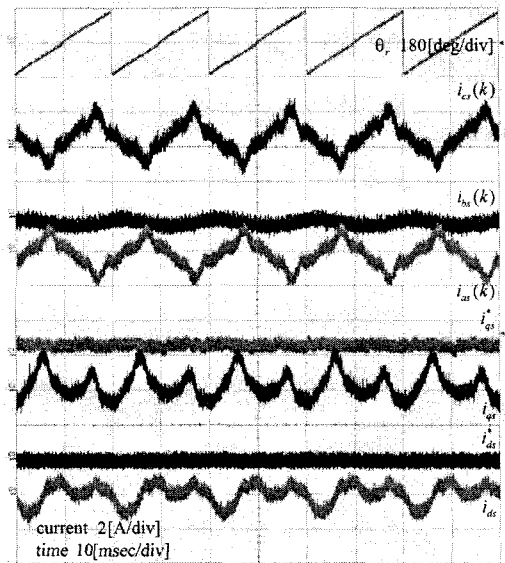


그림 16. 인버터 b상 전체 스위치 개방 고장 시 1,000(rpm)에서의 실험 결과  
 Fig. 16. Experimental results at 1,000(rpm) under entire switch open fault in b-phase of inverter

표 4. 기동 실패를 주는 초기 회전자 위치와 인버터 개방 스위치 관계  
 Table 4. Relation between the initial rotor position and open-fault switch yielding start failure

초기 회전자 위치	개방고장 스위치
0[°]	$T_{a+}$
60[°]	$T_{c-}$
120[°]	$T_{b+}$
180[°]	$T_{a-}$
240[°]	$T_{c+}$
300[°]	$T_{b-}$

치  $\theta_{ro}$ 가 영일 때 전동기는 기동할 수 없다.  $\theta_{ro} = 0$ 에서 기동 시 3상전류는 모두 영이고 스위칭 주기 동안 가해지는 벡터는 거의  $V_1$ 이 된다.  $V_1$ 에서는  $T_{a+}$ 가 도통되어야 하나 개방 고장이므로 전류  $i_{as}$ 는 증가되지 못하고 영으로 유지된다. 또한,  $V_1$ 에 의해 b상과 c상의 하단 스위치가 도통되어 선전압  $v_{bc}$ 도 영이 되어 b상과 c상 전류도 흐를 수 없다. 이 경우 기동 실패

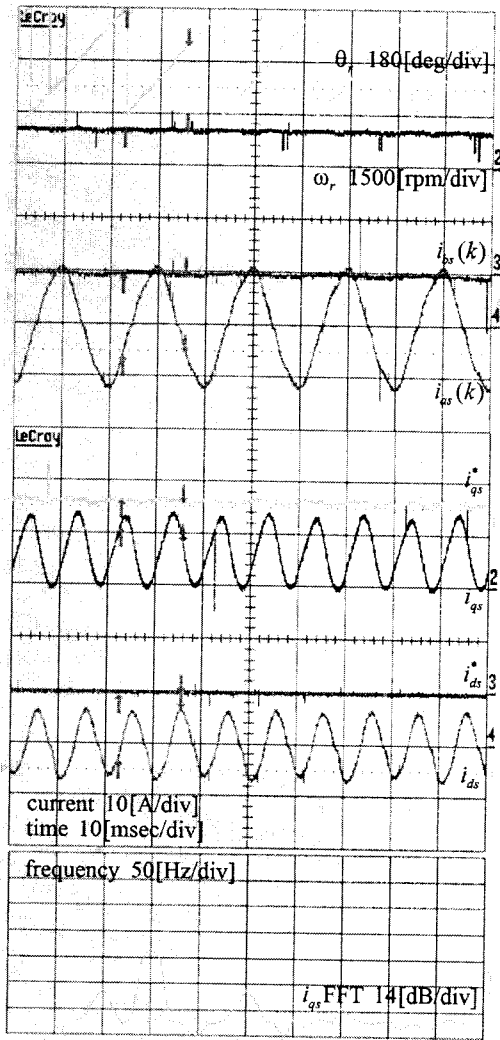


그림 17. 인버터 b상 전체 스위치 개방 고장 시 1,000(rpm), 0.5(Nm)에서의 실험 결과  
 Fig. 17. Experimental results at 1,000(rpm) and 0.5(Nm) under entire switch open fault

패가 (Start Fail) 발생하게 된다. 만약  $\theta_{ro}$ 가 영 근처의 값을 갖는다면  $\theta_{ro}$ 의 값에 따라 인버터 벡터  $V_1$ 과  $V_3$ , 혹은  $V_1$ 과  $V_5$ 가 교대로 사용되어  $V_1$  이외의 다른 벡터에 의해 전류가 증가할 수 있어 기동 실패를 피할 수는 있으나  $i_{bs} \approx -i_{cs}$ 가 유지되어 토크의 진동이 심하고  $\theta_{ro}$ 가 영 근처를 벗어나는데 오랜 시간이 소요되어 과도 상태가 길어지게 된다.

## 5. 결론

인버터 스위칭 소자의 개방으로 인해 발생하는 고장을 해석하고 진단 알고리즘의 시험 평가를 위해 유용하게 사용할 수 있는 영구자석 동기전동기 구동 인버터의 개방 고장에 의한 제어 특성해석과 고장모델이 제시된다. 인버터의 개방 고장으로 하나 혹은 두개 스위치의 개방 고장과 인버터와 전동기의 개방이 고려된다. 기존에 전동기의 해석과 제어에 많이 사용되는 dq 모델은 상전압 모델을 변환한 것으로 인버터 개방 시에는 고장 모델의 해석을 위해 직접 사용하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 스위치 개방에 따른 전동기의 선전압 관계를 이용한 고장 모델이 제안된다. 제안된 고장모델의 타당성을 입증하기 위해 시뮬레이션이 수행되어 동일 고장 조건에서의 실험 결과와 비교 된다. 시뮬레이션과 실험적 비교 평가 및 특성 해석을 위해 전체 시스템이 DSP TMS320F28335에 의해 구현되었다. 제안된 고장 모델은 인버터 스위치의 개방에 의한 고장 발생 시 구동 시스템의 특성해석과 고장 진단 알고리즘의 효과적인 시험 평가 및 알고리즘 연구를 위해 유익하게 사용될 수 있으리라 기대된다.

## References

- [1] M. A. Awadallah, M. M. Morcos, S. Gopalakrishnan, and T. W. Nehl, "Detection of stator short circuits in VSI-fed brushless DC motors using wavelet transform", IEEE Trans. Ener. Conv., vol. 21, no. 1, pp. 1-8, 2006.
- [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] R. Spee and A. K. Wallace, "Remedial strategies for brushless DC drive failures", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 26, no. 2, pp. 259-266, 1990.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] K. J. Lee, N. J. Park, and D. S. Hyun, "Fault detection and compensation of switch open-fault in VSI for two-phase excitation drive", Transaction of KIPE, vol. 12, no. 1, pp. 74-80, 2007.

- [7] H. S. Mok, J. M. Lee, G. H. Choe, S. H. Kim, and Y. H. Cho, "Analysis and a compensation method for torque ripple caused by position sensor error in PMSM's vector control", Transaction of KJPE, vol. 12, no. 6, pp. 449-456, 2007.
- [8] K. W. Lee, "Fault diagnosis of a electrolytic capacitor for inverter DC-link voltage smoothing", Transaction of KJPE, vol. 12, no. 5, pp. 372-377, 2007.
- [9] P. C. Krause, Analysis of Electric Machinery. New York: McGraw-Hill, 1986.
- [10] TMS320F28335 Digital Signal Controller (DSC) - Data Manual. Texas Instrument, 2008.
- [11] H. W. van der Broeck, H. C. Skudelny, and G. V. Stanke, "Analysis and realization of a pulsewidth modulator based on voltage space vectors, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 24, no. 1, pp. 142-150, 1988.
- [12] R. C. Dorf and R. H. Bishop, Modern Control Systems. Prentice-Hall International Editions, 2005.
- [13] T. M. Rowan and R. J. Kerkman, "A new synchronous current regulator and an analysis of current-regulated PWM inverters, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 22, no. 4, pp. 678-690, 1986.

◇ 저자소개 ◇

**김경화 (金庚和)**

1969년 3월 11일생. 1991년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1993년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사). 1998년 2월 동 대학원 졸업(박사). 1998~2000년 삼성전자 선임연구원. 2000년~2002년 한국과학기술원 연구교수. 2002년~현재 서울산업대 전기공학과 부교수.

**최동욱 (崔東旭)**

1983년 1월 24일생. 2009년 2월 서울산업대 전기공학과 졸업. 2009년 3월~현재 서울산업대 대학원 전기공학과 석사과정.

**구본관 (具本管)**

1976년 2월 6일생. 1998년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업. 2000년 2월 포항공과대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2005년 2월 동 대학원 졸업(박사). 2005~2007년 LG전자 선임연구원. 2007년~현재 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터 선임연구원.

**정인성 (鄭因城)**

1971년 3월 10일생. 1993년 2월 한양대학교 전기공학과 졸업. 1995년 8월 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 2월 동 대학원 졸업(박사). 2000년~현재 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터 센터장.