

매입형 영구자석 동기전동기 구동용 인버터 스위칭 소자의 개방 고장 진단

(A Diagnosis Scheme of Switching Devices under Open Fault in Inverter-Fed Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive)

최동욱* · 김경화**

(Dong-Uk Choi · Kyeong-Hwa Kim)

Abstract

This paper deals with a fault diagnosis algorithm for open faults in the switching devices of PWM inverter-fed IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) drive. The proposed diagnostic algorithm is realized in the controller using the informations of three-phase currents or reference line-to-line voltages, without requiring additional equipments for fault detection. Under switch open fault conditions, the conventional dq model used to control an AC motor cannot directly be applied for the analysis of drive system, since three-phase balanced condition does not hold. To overcome this limitation, a fault model based on the line-to-line voltages is employed for the simulation studies. For comparative performance evaluation through the experiments, the entire control system is implemented using digital signal processor (DSP) TMS320F28335. Simulations and experimental results are presented to verify the validity of the proposed diagnosis algorithm.

Key Words : PWM Inverter, Open Fault, Diagnosis, DSP TMS320F28335, IPMSM

1. 서 론

최근 전동기 시장에서 가장 이슈가 되고 있는 전기 자동차응용을 포함한 다양한 응용분야에서 소형 경량화와 고효율의 전동기가 요구되고 있다. 영구자석 동

기전동기는 이러한 조건을 만족하는 전동기로 특히 매입형 영구자석 동기전동기의 경우 표면부착형 영구자석 동기전동기에 비해 기계적인 강도가 높아 고속화하여 같은 출력에서 더 소형화할 수 있기 때문에 여러 구동 응용분야에서 많은 연구가 이뤄지고 있다 [1-3]. 이러한 매입형 영구자석 전동기는 회전자의 형상 또는 슬롯의 형상과 같은 전동기 설계에 대한 연구와 돌극비를 이용한 다양한 제어기법이 활발하게 이루어지고 있는 반면 고장을 진단하는 방법에 대한 연구는 부족한 실정이다.

영구자석 동기전동기 구동 시스템의 고장은 베어링

* 주저자 : 서울과학기술대학교 전기공학과 석사과정

** 교신저자 : 서울과학기술대학교 전기공학과 부교수

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

E-mail : k2h1@seoultech.ac.kr

접수일자 : 2012년 1월 11일

1차심사 : 2012년 1월 14일, 2차심사 : 2012년 2월 16일

심사완료 : 2012년 2월 20일

또는 자석의 파손과 같은 모터의 기구적인 고장, 권선의 단락 또는 단선과 같은 전기적인 고장[4], 전류센서 및 위치센서의 고장 및 인버터를 포함한 전력회로부의 고장 등으로 분류할 수 있다.

이 중 인버터의 고장은 전력공급원에서 발생하는 고장, 정류기 다이오드의 고장, 커패시터의 파괴로 인한 고장, 및 인버터의 스위칭 소자 파손과 같은 구동소자의 고장[5-7] 등으로 분류할 수 있는데 이러한 고장의 원인 중에 인버터 스위칭 소자의 고장은 과전류에 의해 소손이 발생하거나 보호회로에 의한 강제 단선 등의 이유로 빈번하게 발생하고 있는 고장이다. 이러한 인버터 스위칭 소자의 고장 검출을 위해 다양한 연구들이 수행되었으며 고장 시 대응 운전을 허용하는 기법들에 대한 연구도 수행되었다[8]. 이들은 각각 인버터 하단 스위치의 전압강하를 검출하는 기법이나[9], 지능제어 기법을 사용하고 있어[10-11] 부가적인 하드웨어가 요구되거나 연산량이 많아진다는 단점을 가지고 있다.

인버터의 스위칭 소자에 고장이 발생할 경우 정확한 3상 전원을 합성할 수 없으며 전류의 고조파 성분이 증가하게 되어 시스템을 정확하게 제어하고 구동할 수 없게 된다.

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기 구동 인버터의 스위칭 소자에 개방 고장이 발생한 경우의 모델 및 응답 특성을 분석하여 스위치의 개방 고장을 진단할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 제안한 진단 알고리즘은 상전류를 이용한 진단 알고리즘과 선간전압을 이용한 진단 알고리즘으로 구성된다. 상전류를 이용한 진단 알고리즘은 두 개의 전류 센서를 통해 측정된 상전류를 사용하여 고장을 진단하며 시뮬레이션 결과와 비교 실험을 통해 타당성을 입증한다. 선간전압을 이용한 진단 알고리즘은 기본적인 시스템이 아닌 추가로 전압을 측정할 수 있는 장비를 필요로 하기 때문에 시뮬레이션을 사용하여 선간전압과 기준 선간전압의 유사성을 확인한 후 기준 선간전압을 사용하여 진단 알고리즘을 구현한다. 제안한 진단 알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 고성능 DSP인 TI사의 TMS320F28335가 적용된 제어기를 이용하여 전체 비교 실험을 수행하였다[12].

2. 인버터 개방 고장 모델

인버터 스위칭 소자에 개방 고장이 발생할 경우 3상 평형 조건이 유지되지 않기 때문에 인버터의 상전압 모델로부터 전동기 입력전압을 구하는 것이 어렵게 된다. 따라서 이러한 고장을 해석하기 위해서는 d-q 좌표계 모델이 아닌 선간전압을 이용한 모델을 사용해야 한다. 고장이 발생하지 않은 정상 조건에서 전동기의 상전압 방정식은 식 (1)과 같이 구해진다[13].

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_a + pL & pM & pM \\ pM & R_a + pL & pM \\ pM & pM & R_a + pL \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 R_a 는 상저항, L 은 자기 인덕턴스, M 은 상호 인덕턴스, p 는 미분연산자, v_a , v_b 및 v_c 는 각각 상전압을, i_a , i_b 및 i_c 는 각각 상전류를, e_a , e_b 및 e_c 는 각각 3상 역기전력을 나타내며 역기전력은 다음 식 (2)~(4)와 같다.

$$e_a = \omega_r \lambda_m \cos \theta_r \quad (2)$$

$$e_b = \omega_r \lambda_m \cos(\theta_r - 2\pi/3) \quad (3)$$

$$e_c = \omega_r \lambda_m \cos(\theta_r + 2\pi/3) \quad (4)$$

여기서 ω_r 은 전기 각속도를, λ_m 은 쇄교 자속을, θ_r 은 전기각을 나타내며, 3상 역기전력과 상전류를 이용하여 전동기의 발생 토크를 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_r} \quad (5)$$

인버터의 스위칭 소자에 고장이 발생한 경우에는 3상 평형 조건이 성립하지 않기 때문에 응답 특성을 분석하기 위해서는 인버터의 극전압 정보로부터 쉽게 구할 수 있는 선간전압을 이용한 모델을 전개할 필요가 있다. 선간전압 모델을 전개하기 위해 식 (1)을 사용하여 선간전압에 대한 방정식을 구하면 식 (6)~(8)과 같이 전개할 수 있다.

$$v_{ab} = R_a i_a - R_a i_b + p(L-M)i_a - p(L-M)i_b + e_a - e_b \quad (6)$$

$$v_{bc} = R_a i_b - R_a i_c + p(L-M)i_b - p(L-M)i_c + e_b - e_c \quad (7)$$

$$v_{ca} = R_a i_c - R_a i_a + p(L-M)i_c - p(L-M)i_a + e_c - e_a \quad (8)$$

식 (6)~(8)을 키르히호프의 전류법칙과 상전류 i_a 와 i_b 를 이용하여 정리하면 식 (9)~(10)과 같이 선간전압을 이용한 상태 방정식으로 나타낼 수 있다[14].

$$u_1 = p(L-M)i_a - p(L-M)i_b = v_{ab} - e_a + e_b - R_a i_a + R_a i_b \quad (9)$$

$$u_2 = p(L-M)i_a + 2p(L-M)i_b = v_{bc} - e_b + e_c - R_a i_b + R_a (i_a + i_b) \quad (10)$$

인버터의 b상에 스위치 개방고장이 발생하였을 때의 상황을 고려하면 b상의 상전류와 상전압은 각각 $i_b = 0, v_b = e_b$ 로 나타나게 되어 $i_a = -i_c, \dot{i}_a = -\dot{i}_c$ 가 된다. 이러한 전류관계를 이용하여 식 (9)~(10)을 정리하면 b상에 고장이 발생한 경우의 상태 방정식은 식 (11)과 같이 하나의 식으로 간소화 된다.

$$v_{ca} = 2(L-M)\dot{i}_c + 2R_a i_c + e_c - e_a \quad (11)$$

마찬가지로 a상에 스위치 개방고장이 발생한 경우 $i_b + i_c = 0, \dot{i}_b = -\dot{i}_c$ 이 되고 상태 방정식은 식 (12)와 같이 표현된다.

$$v_{bc} = 2(L-M)\dot{i}_b + 2R_a i_b + e_b - e_c \quad (12)$$

마찬가지로 c상에 스위치 개방고장이 발생한 경우 $i_a + i_b = 0, \dot{i}_a = -\dot{i}_b$ 이 되고 상태 방정식은 식 (13)과 같이 표현된다.

$$v_{ab} = 2(L-M)\dot{i}_a + 2R_a i_a + e_a - e_b \quad (13)$$

3. 고장 진단 시뮬레이션

인버터 스위칭 소자가 개방되는 고장이 발생하였을 경우 개방된 상에는 전류가 흐르지 못하고, 공간벡터 PWM 기법에서 능동벡터의 일부를 정상적으로 합성할 수 없어 제어가 불가능한 구간이 발생하게 된다. 또한 이 경우 모든 영벡터의 합성이 불가능하게 되어 정상적인 제어가 어렵게 된다. 이러한 고장 상태는 전류와 전압 파형에 그 특성이 나타나게 되며 각각의 특징을 분석함으로써 고장의 진단이 가능하게 된다.

이 절에서는 고장 진단 알고리즘의 타당성을 입증하기 위하여 선간전압을 이용한 모델을 사용하여 고장이 발생한 상태의 특징을 시뮬레이션을 통해 확인하고 진단하는 알고리즘을 구현한다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 IPMSM의 파라미터를 나타낸다. 샘플링 시간은 100[μsec]로 설정되었으며 PWM 방식으로는 공간 벡터 기법이 사용된다. 그림 1과 그림 2는 고장이 없는 정상 동작조건에서의 상전류와 선간전압 응답에 대한 시뮬레이션 결과이다. 진단 알고리즘이 적용되는 정상상태에 도달한 시점에서의 결과로 3상 성분이 평형을 이루고 있으며 각 상의 전류와 선간전압이 120[°]의 위상차를 갖고 있음을 확인할 수 있다.

표 1. IPMSM의 정격 및 파라미터
Table 1. Ratings and parameters of IPMSM

정격용량	400[W]	정격속도	3,500[rpm]
정격토크	1.1[Nm]	극수	6
쇄교자속	0.02[Wb]	고정자저항	0.05[Ω]
Ld	0.157[mH]	Lq	0.254[mH]

그림 3과 그림 4는 인버터의 b상 스위칭 소자에 개방고장이 발생한 경우의 시뮬레이션 결과로 그림 3에서는 고장이 발생한 b상의 측정 전류는 영으로 나타나는 것을 볼 수 있으며 고장이 발생하지 않은 a상과 c상의 전류만이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 상전류를 사용하는 진단 알고리즘은 고장이 발생한 상에 전류가 흐르지 못하는 특성을 사용하여 고장을 진단할 수 있다. 그림 4에서는 고장이 발생한 b상을 포함하는 선간전압인 v_{ab} 와 v_{bc} 에서 이상전압을 출력하

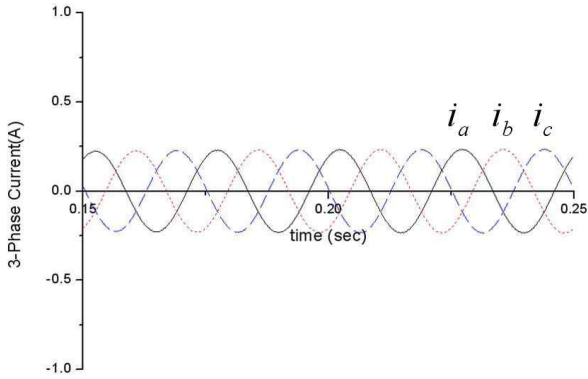


그림 1. 정상동작 조건에서 3상전류의 시뮬레이션 결과
Fig. 1. Three-phase current responses under non-fault condition

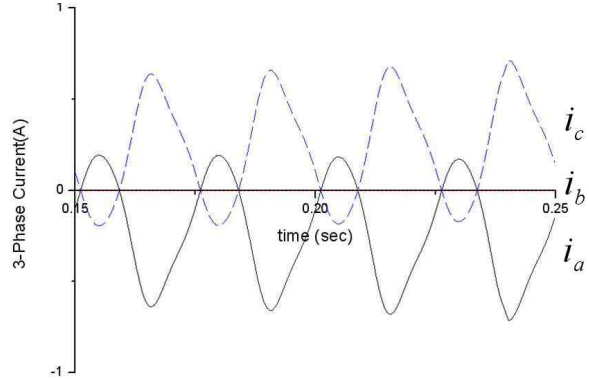


그림 3. b상 스위치 개방 고장 발생 시 3상 전류 응답
Fig. 3. Three-phase current responses under switch open fault in b-phase

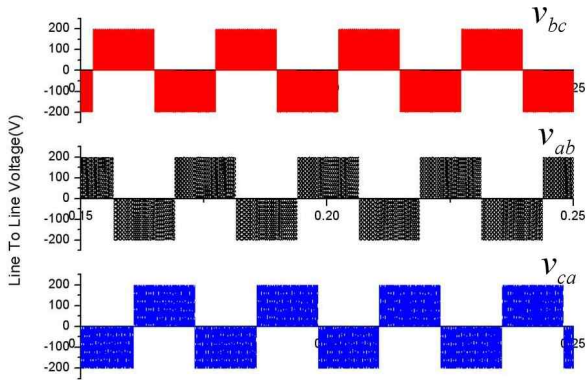


그림 2. 정상동작 조건에서 선간전압의 시뮬레이션 결과
Fig. 2. Line to line voltage responses under non-fault condition

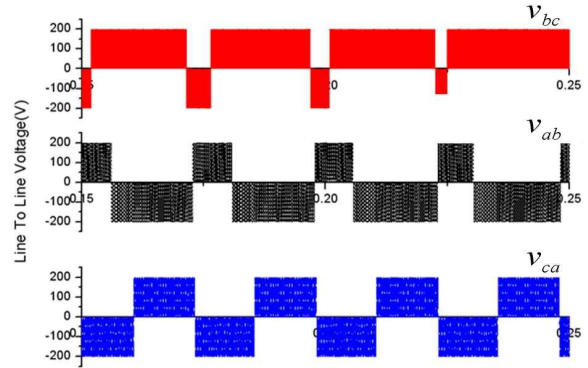


그림 4. b상 스위치 개방 고장 발생 시 선간전압 응답
Fig. 4. Line to line voltage responses under switch open fault in b-phase

는 현상을 확인할 수 있으며 이러한 특성을 사용하여 고장을 진단 할 수 있다.

그림 5와 그림 6은 인버터의 b상 스위칭 소자에 개방 고장이 발생하였을 때 각각 상전류와 선간전압을 사용하여 고장을 진단한 결과를 나타내고 있다. 제안된 알고리즘은 한 주기 동안 데이터를 수집하고 이상을 검출하여 이상이 발견되면 고장 여부에 대하여 분석한 후 고장이 발생한 상을 확인하여 표시하며 구동을 정지시키는 것으로 구성된다. 고장이 발견되지 않을 경우 고장진단을 위해 다시 데이터를 수집하고 이상 유무를 검출하는 반복수행을 진행한다. 그림 5는 상전류를 사용하여 고장을 진단하는 알고리즘을 수행한 결과이다.

시뮬레이션 결과에서 “Mode”는 동작 모드를 나타내는데 “Mode=0”은 데이터 수집 상태를, “Mode=1”은 이상이 검출된 상태를, “Mode=2”은 고장을 진단하고 구동이 정지된 상태를 나타낸다. 또한 phase 값은 a상에 고장이 발생한 경우는 “1”로, b상에 고장이 발생한 경우는 “2”로, c상에 고장이 발생한 경우는 “3”으로 표시하였다. 이 경우는 b상에 고장이 발생하였기 때문에 제어기에서 phase 값을 “2”로 표시하고 구동을 정지하였다. 제안된 알고리즘에서는 전류데이터를 수집하여 실효값을 계산하고 한상의 실효값이 영에 가까운 값을 가지며 다른 상과의 크기 차이가 10배 이상이라면 고장이라고 판단하였다.

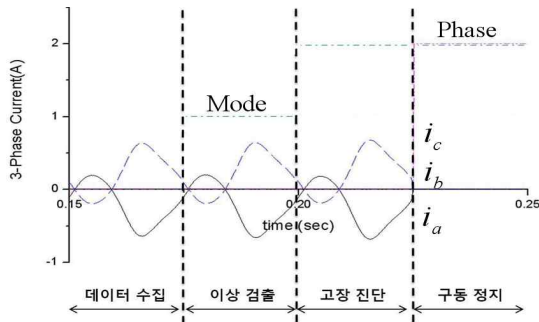


그림 5. b상 스위치 개방 고장 발생 시 전류를 이용한 진단
 Fig. 5. Diagnosis using current information under switch open fault in b-phase

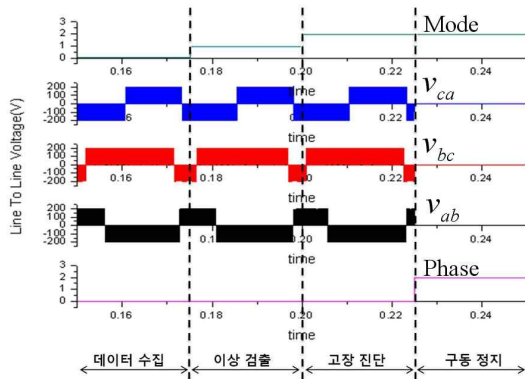


그림 6. b상 스위치 고장 발생 시 선간전압을 이용한 진단
 Fig. 6. Diagnosis using line to line voltage information under switch open fault in b-phase

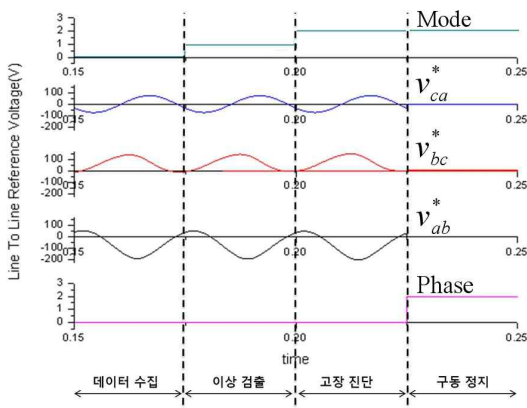


그림 7. b상 스위치 고장 발생 시 기준 선간전압을 이용한 진단
 Fig. 7. Diagnosis using reference line to line voltage information under switch open fault in b-phase

그림 6은 선간전압을 이용한 진단 알고리즘을 수행한 결과로 마찬가지로 제어기에서 최종적인 Mode 값은 “Mode=2”, phase 값을 “2”로 나타내고 구동을 정지한 것을 확인할 수 있다. 선간전압의 데이터는 주기 데이터 수집 후 평균값을 계산하고 두 상에 영이 아닌 값이 나타날 때를 고장으로 진단하게 된다. 이와 같이 선간전압을 진단 알고리즘에 사용할 경우 실제 상황에서는 선간전압을 측정할 수 있는 전압센서 혹은 파워미터와 같은 추가 장비가 필요하며 제어기만으로 진단이 어려워진다. 제어기에서 추가 장비 없이 직접 고장을 진단하기 위해 선간전압을 측정하지 않고 전류제어기에서 계산된 기준 선간전압을 사용하여 선간전압을 이용한 진단 알고리즘에 적용하면 그림 7과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 7에서와 같이 고장이 발생하였을 때 기준 선간전압에 의한 진단 특성이 선간전압을 사용했을 때의 특성과 유사하게 나타남을 확인할 수 있고 동일한 진단 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

4. 비교 실험 결과

이 절에서는 제안된 진단 알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 진단 알고리즘을 적용한 실험결과를 제시한다. 그림 8은 실험 시스템의 구성을 그림 9는 제어 시스템의 구성을 나타낸다. 실험에 사용된 IPMSM의 정격 및 파라미터는 시뮬레이션에 사용된 IPMSM과 같다. 전체 시스템은 속도 제어기, 전류 제어기, 인버터, 및 IPMSM으로 구성되며 전체 알고리즘은 TI사의 32-bit 고성능 DSP인 TMS320F28335에 의해 구현되었다[8]. 샘플링 시간은 100[μsec]로 설정되고 전동기는 10[kHz] 스위칭 주파수의 인버터로 구동되며 PWM방식으로는 공간 벡터 기법이 사용된다. 속도 제어기로는 PI 제어가 사용되었으며 전류 제어기로는 동기좌표계 PI 비결합 전류 제어가 사용되었다[15]. 전류센서는 두 개의 홀센서가 사용되며 두 개의 전류센서에서 측정된 a상과 b상의 전류를 12-bit 분해능 A/D컨버터를 사용하여 DSP에 입력하였다.

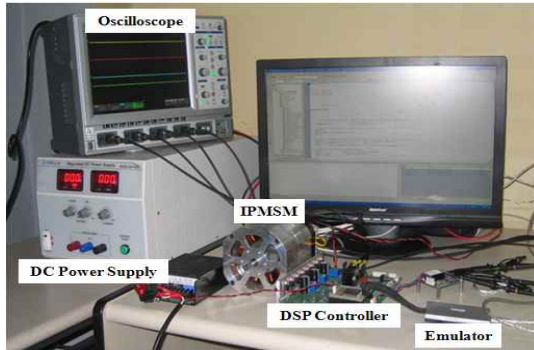


그림 8. 실험 시스템 구성
Fig. 8. Configuration of experimental system

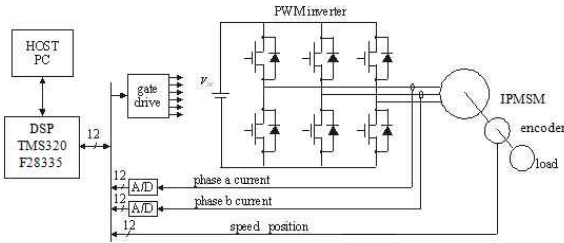


그림 9. 제어 시스템 구성
Fig. 9. Configuration of control system

그림 10과 그림 11은 각각 정상 동작 조건에서와 b상 스위치 개방 고장 발생 시의 상전류 응답에 대한 실험 결과를 나타낸다. 그림에서 위치는 180[deg/div], 시간은 20[msec/div], 상전류는 4[A/div]의 스케일로 나타나고 있으며, 그림에 나타난 전류파형은 시뮬레이션 결과인 그림 1과 그림 3에 일치함을 확인할 수 있어 주어진 고장모델의 타당성을 입증할 수 있다.

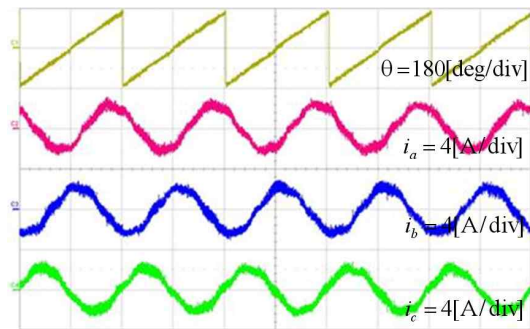


그림 10. 정상동작 조건에서 실험 결과
Fig. 10. Experimental result under non-fault condition

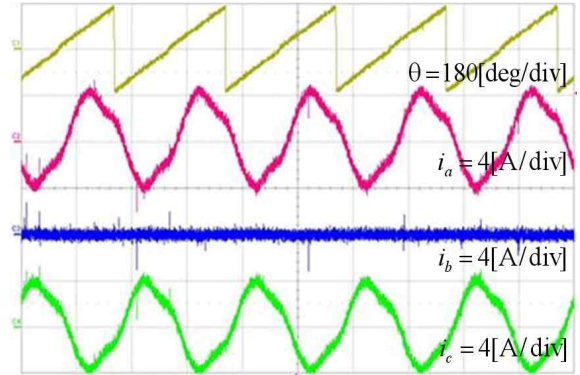
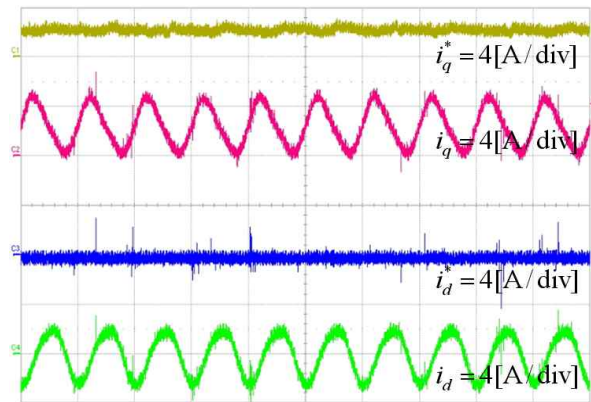


그림 11. b상 스위치 개방 고장 발생 시 실험 결과
Fig. 11. Experimental result under switch open fault in b-phase



(a) q축 및 d축 전류 응답



(b) 과도상태 d축 전류 응답

그림 12. 인버터 b상 Arm 전체 스위치의 개방 고장 시 실험 결과
Fig. 12. Experimental results under switch open faults in b-phase arm

그림 12의 (a)는 1,000[rpm]에서 인버터 b상의 Arm 전체 스위치가 (T_{b+} and T_{b-}) 개방 고장 시 q축과 d축 전류에 대한 실험 결과를 나타내며 그림 12의 (b)는 정상 운전 중에 개방 고장이 발생한 순간의 q축 전류 응답을 나타낸다. 실험결과에서 q축 전류의 2차 고조파가 상당히 증가함을 확인할 수 있다.

그림 13은 IPMSM이 구동 중 b상 스위칭 소자에 개방 고장이 발생된 경우 상전류 정보를 사용하여 고장을 진단하는 실험 결과를 나타낸다. 파형은 DSP의 변수를 D/A 컨버터로 출력 후 오실로스코프로 측정하여 구해진다. 여기서 Mode는 고장 진단 알고리즘의 수행 상태를 나타내며 “Mode=0”은 데이터 수집 상태를 “Mode=1”은 이상이 검출된 상태를 “Mode=2”는 고장을 진단하고 구동이 정지된 상태를 나타낸다.

또한 phase는 a상에 고장이 발생한 경우는 “1”로, b상에 고장이 발생한 경우는 “2”로, c상에 고장이 발생한 경우는 “3”으로 표시하였다. 이 경우는 b상에 고장이 발생하였기 때문에 제어기에서 phase 값을 “2”로 표시하고 구동을 정지하였다. 여기서는 b상의 스위칭 소자에 개방고장이 발생하여 phase 값을 “2”로 나타내고 구동을 정지하였다.

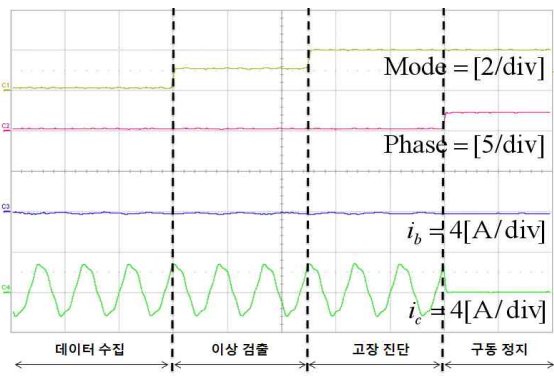


그림 13. b상 스위치 고장 발생 시 3상 전류를 이용한 진단 실험 결과
 Fig. 13. Experimental result for diagnosis using three-phase current information under switch open fault in b-phase

그림 14는 정상동작 조건에서의 기준 선간전압 특성을 나타내며 고장진단을 위해서 사용될 수 있음을 확인할 수 있다.

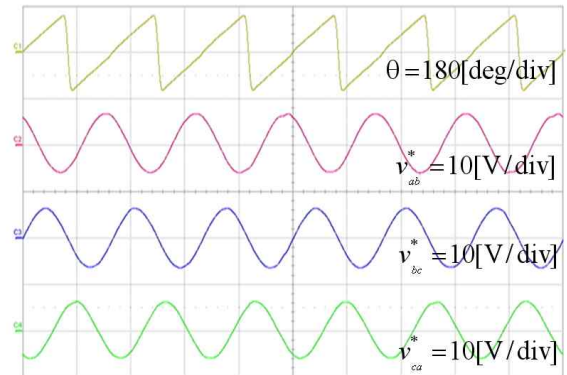


그림 14. 정상동작 조건에서 기준 선간전압 특성
 Fig. 14. Experimental result for reference line to line voltage under non-fault condition

그림 15는 b상 스위칭 소자에 개방 고장이 발생된 경우 기준 선간전압을 사용하여 고장을 진단하는 실험 결과를 나타낸다. 그림 15의 구동정지 부분의 경우 시뮬레이션 결과와 달리 기준 선간전압이 진동을 하며 서서히 발산하는 형태로 나타나게 된 것을 확인할 수 있는데 이것은 모터의 구동은 정지완료 하였으나 제어기가 동작하는 결과로 나타나는 현상이다.

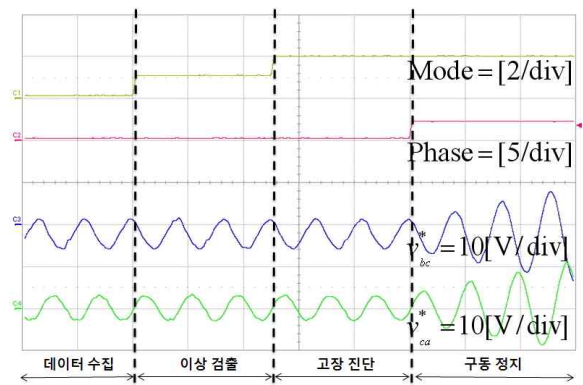


그림 15. b상 스위치 고장 발생 시 기준 선간전압을 이용한 진단 실험 결과
 Fig. 15. Experimental result for diagnosis using line to line voltage information under switch open fault in b-phase

5. 결 론

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기 구동용

인버터의 스위칭소자에 개방 고장이 발생한 경우 모델 및 응답 특성을 분석하여 고장을 진단하는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 상전류와 선간전압을 이용한 진단 방법으로 고장이 발생한 경우 고장이 발생한 상의 전류가 영으로 수렴하며 다른 두 상의 전류만 흐르는 특성을 이용하여 진단을 수행하였으며, 선간전압의 경우 고장이 발생하지 않은 두 상으로 구성된 선간전압은 고장이 발생하지 않은 상태와 같다는 점을 이용하여 진단하였다. 선간전압을 이용한 진단 알고리즘의 경우 선간전압을 측정하기 위해 전압센서 또는 파워미터와 같은 추가 장비가 필요하기 때문에 전류제어기에서 계산된 기준 선간전압을 이용하여 진단 알고리즘을 수행하였다. 진단 알고리즘의 타당성이 일반적인 d-q 좌표계의 모델이 아닌 선간전압 관계식을 이용한 고장 모델을 이용한 시뮬레이션 결과와 비교 실험을 통하여 입증되었다. 전체 시스템이 DSP TMS320F28335를 사용하여 구현되었으며 이를 통해 시뮬레이션과 동일한 고장 조건에서의 비교 실험 결과를 제시하였다. 제안된 고장 진단 알고리즘은 인버터 스위치의 개방에 의한 고장 발생 시 인명 피해를 줄이고 장비를 보호하기 위해 유익하게 사용될 수 있으리라 기대된다.

References

[1] H. W. Van Der Broeck, H. C. Skdelny, and G. V. Stanke, "Analysis and realization of a pulsewidth modulator based on voltage space vectors", IEEE Trans. Ind. App., Vol. 24, No. 1, pp. 142-150, Jan./Feb. 2008.

[2] R. Spee and A. K. Wallace, "Remedial strategies for brushless DC drive failures", IEEE Trans. Ind. App., Vol. 26, No. 2, pp. 259-266, Mar./Apr. 1990.

[3] 정진우, 최영식, "영구자석 동기전동기의 퍼지 속도제어기 및 퍼지 각속도 관측기 설계", 한국조명·전기설비학회 논문지, 제25권 2호, pp. 103-113, 2011년 2월.

[4] 김경화, 최동욱, 구본관, 정인성, "고장진단을 위한 영구자석 동기전동기의 권선 단락에 의한 고장모델 연구 및 특성해석", 한국조명·전기설비학회 논문지, 제23권 5호, pp. 18-28, 2009년 5월.

[5] D. Katttha and B. K. Bose, "Investigation of fault modes of voltage-fed inverter system for induction motor drive", IEEE Trans. Ind. App., Vol. 30, No. 4, pp.1028-1038, Jul./Aug. 1994.

[6] 이광운, "인버터 직류링크 전압 평활용 전해 커패시터의 고장 진단", 전력전자학회 논문지, 제12권 5호, pp.

372-377, 2007년 10월.

[7] 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. Ele., Vol. 18, No. 2, pp. 587-593, Mar. 2003.

[8] 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. App., Vol. 29, No. 5, pp. 910-918, Sep./Oct. 1993.

[9] O. S. Yu, N. J. Park, and D. S. Hyun, "A novel fault detection scheme for voltage-fed PWM inverter", IEEE IECON 2006 Conference, Paris France, pp. 2654-2659, 2006.

[10] J. H. Park, D. H. Kim, S. S. Kim, D. J. Lee, and M. G. Chun, "C-ANFS based fault diagnosis for voltage-fed PWM motor drive systems", IEEE Annual Meeting of the Fuzzy Information 2004, Banff, Canada, pp. 379-383, 2004.

[11] R. Peugeot, S. Courtine, and J. P. Rognon, "Fault detection and isolation on a PWM inverter by knowledge-based model", IEEE Trans. on Ind. App., Vol. 34, No. 6, pp. 1318-1326, Nov./Dec. 1998.

[12] TMS320F28335 Digital Signal Controller, Data Manual. Texas Instrument, 2008.

[13] P. C. Krause, Analysis of Electric Machinery. New York: McGraw-Hill, 1986.

[14] R. C. Dorf and R. H. Bishop, Modern Control Systems. Prentice-Hall International Editions, 2005.

[15] T. M. Rowan and R. J. Kerkman, "A new synchronous current regulator and an analysis of current-regulated PWM inverters", IEEE Trans. Ind. App., Vol. 22, No. 4, pp. 678-690, Jul. 1986.

◇ 저자소개 ◇



최동욱 (崔東旭)

1983년 1월 24일생. 2001년 2월 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2012년 2월 서울과학기술대학교 산업대학원 졸업예정(석사). 2010년~현재 LS메카피온 연구원.



김경화 (金庚和)

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