

권선 단락 및 스위치 개방 고장 시의 인버터 구동 영구자석 동기전동기의 고장 진단 기법

(A Fault Diagnosis Technique of an Inverter-fed PMSM under Winding Shorted Turn and Inverter Switch Open Fault)

김경화*

(Kyeong-Hwa Kim)

요 약

인버터 구동 영구자석 동기전동기에서 고정자 권선과 인버터 스위치에 고장이 존재할 때 동작 중 실시간으로 고장을 검출하고 고장의 유형을 판별할 수 있는 진단 기법이 제시된다. 제안된 기법은 q축 전류의 2차 고조파를 실시간으로 관찰함으로써 이루어지며 고장이 없는 정상 조건에서의 고조파 데이터와 비교를 통해서 고장을 판별한다. 임의의 정상 동작 조건에서의 고조파 데이터는 선형 보간법을 이용해 구해진다. 고장 검출 시 진단 알고리즘은 고장 유형 판별모드로 전환되어 상전류의 파형 분석을 통해 고장의 유형을 판별한다. 제안된 고장 검출 기법의 타당성을 입증하기 위해 내부 권선 단락이 가능한 전동기가 제작되었으며 전체 시스템과 고조파 분석 및 고장 검출 알고리즘이 DSP TMS320F28335에 의해 구현된다. 제안된 방법은 부가적인 진단 장비를 요구하지 않으며 정상상태 조건이 만족된다면 동작 중 실시간으로 고장을 검출할 수 있다.

Abstract

To detect faults in an inverter-fed permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive under the circumstance having faults in a stator winding and inverter switch, an on-line basis fault detecting scheme during operation is presented. The proposed scheme is achieved by monitoring the second-order harmonic component in q-axis current and the fault is detected by comparing these components with those in normal conditions. The linear interpolation method is employed to determine the harmonic data in normal operating conditions. As soon as the fault is detected, the operating mode is changed to identify a fault type using the phase current waveform. To verify the effectiveness of the proposed fault detecting scheme, a test motor to allow inter-turn short in the stator winding has been built. The entire control algorithm is implemented using DSP TMS320F28335. Without requiring an additional hardware, the fault can be effectively detected by the proposed scheme during operation so long as the steady-state condition is satisfied.

Key Words : Fault Detection, Stator Turn Fault, Inverter Open, PMSM, DSP

* 주저자 : 서울산업대학교 전기공학과 부교수

Tel : 02-970-6406, Fax : 02-978-2754, E-mail : k2h1@snut.ac.kr

접수일자 : 2010년 1월 21일, 1차심사 : 2010년 1월 22일, 심사완료 : 2010년 2월 16일

1. 서 론

다양한 산업 공정에서 자동화의 정도가 확산됨에 따라 시스템의 신뢰성, 안정성 및 유효성 등은 중요한 관심사가 되고 있다. 여러 공정에서 사용되고 있는 PMSM에 고장이 발생할 경우 사용 효율이 저하되거나 공정이 중단되는 상황에 직면하며 심지어 사고에 의한 큰 손실이 발생될 수도 있다. 이러한 사용자의 자산 손실을 최소화하기 위해 정확한 고장 진단과 모니터링이 중요한 과제가 되고 있다. PMSM 구동 시스템에서 발생하는 고장의 유형은 크게 고정자 및 회전자 관련 고장, 인버터 및 전력 회로 부분 고장, 센서 류 고장 그리고 기계적 고장으로 분류될 수 있다[1]. 이러한 고장 중에 고정자 권선의 전압 및 전류 스트레스나 열에 의한 절연파괴로 발생하는 권선의 단락 고장은 가장 흔히 발생하는 고정자 고장으로 절연 파괴가 더 많은 권선으로 쉽게 전파되어 더 큰 손실을 초래하는 특징을 가지며 단락 권선에 과도한 열을 발생시키는 순환전류를 일으킨다[2]. 권선의 일부에 단락이 발생하더라도 전동기의 동작은 가능하나 초기 단계에서 검출되지 않으면 절연 파괴가 빠르게 심화되는 특징을 갖는다. 따라서, 인접 코일 혹은 고정자 코어로의 고장의 전파를 차단하기 위해서는 초기 단계에서 on-line으로 고장이 검출되어야 한다. 고정자 권선의 부분적 단락으로 인한 고장을 진단하기 위해 많은 연구들이 수행되었다[1-7]. 이러한 기법들은 주로 서치코일을 이용한 검사[3], 웨이브렛을 이용한 기법[1], DFT 등의 수치해석적 방법[2], 지능제어 기법에 기반한 실험적 방법을[4-5] 사용하고 있다.

인버터 및 전력 회로 고장은 전원 공급선에서의 단락, 정류기 다이오드의 고장, 커패시터의 파괴 및 스위칭 소자의 고장 등으로 분류될 수 있으며[8-9], 이중 게이트 드라이브 회로의 문제 혹은 소자 파괴로 인해 도통이 실패하는 스위치의 개방형 고장이 주로 발생한다. 과전류에 의한 소자 파괴나 단락 방지를 위해 사용한 퓨즈의 용해에 의해서도 스위치의 개방 고장이 발생된다[10]. 스위치에 개방 고장이 발생하는 경우 인버터는 기준 출력 전압을 합성할 수 없고 전류의 고조파 증가, 토크 리플 발생, 효율 저하가 나타나며

심한 경우 기동 실패로 이어져 스위치의 개방 고장을 진단하기 위한 연구들이 수행되었다[8-12].

본 논문에서는 고정자 권선의 단락(short-circuited turn) 고장과 인버터 스위치의 개방 고장이 동시에 존재할 때 동작 중 실시간으로 고장을 검출하고 고장의 유형을 판별할 수 있는 진단 기법이 제시된다. 전동기의 일부 권선에 단락으로 인한 고장 발생 시 고장 권선에는 큰 단락전류가 발생하고 3상전류는 평형 상태를 유지하지 못한다. 인버터 스위치의 개방 고장으로 하나 혹은 Arm 스위치 전체의 개방이 고려되며 이와 같은 고장 시에도 3상전류는 평형 상태를 유지하지 못해 상전류에는 3차 고조파 성분이 dq축 전류에는 2차 고조파 성분이 나타난다. 구동 시스템의 고장을 on-line으로 검출하기 위해 q축 전류의 2차 고조파가 사용되며 이는 고장이 없는 정상 조건에서의 고조파 특성과 비교를 통해서 이루어진다. 임의의 정상동작 조건에서의 고조파 데이터는 선형 보간법과 몇 개 구간에서 계산된 고조파 데이터를 통해 구해진다. 구동 시스템에 고장 검출 시 상전류의 파형 분석을 통해 고장의 세 가지 유형이 판별된다. 제안된 고장 검출 기법의 타당성을 입증하기 위해 특정 턴에서 내부 고정자의 권선 단락이 가능한 PMSM이 설계되었으며 전체 시스템과 고조파 분석 및 고장 검출 알고리즘이 DSP TMS320F28335에 의해 구현되어 실험이 수행된다[13].

2. 고정자 권선의 단락 고장 특성

고장이 없는 정상 조건에서 PMSM의 동적 모델은 평형 3상변수를 이용하여 다음과 같이 구해진다[14].

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

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 역기전력으로 다음과 같다.

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

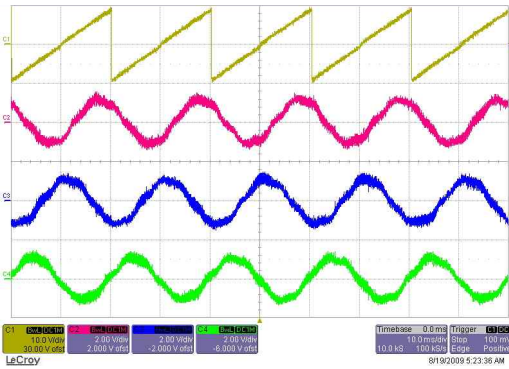
$$e_{bs} = \omega_r \lambda_m \cos(\theta_r - 2\pi/3) \quad (3)$$

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

또한, L 은 자기 인덕턴스, M 은 상호 인덕턴스, R_s 는 저항, ω_r 은 전기 각속도, λ_m 은 쇄교 자속, 및 θ_r 은 전기 각을 나타낸다. 권선 단락으로 인한 고장의 정도를 정의하기 위해 다음의 파라미터가 정의된다.

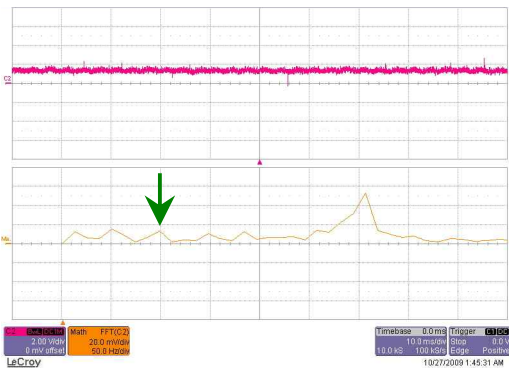
FTR (Faulty Turn Ratio):

$$\sigma = N_f / N_T \quad (0 \leq \sigma \leq 1) \quad (5)$$



x축 : time [10msec/div], y축 : θ_r [0.32rad/1V], i_{cs} [2A/1V], i_{bs} [2A/1V], i_{as} [2A/1V]

(a) 위치 및 상전류 응답



x축 : time [10msec/div], y축 : θ_r [0.32rad/1V], i_{cs} [2A/1V], i_{bs} [2A/1V], i_{as} [2A/1V]

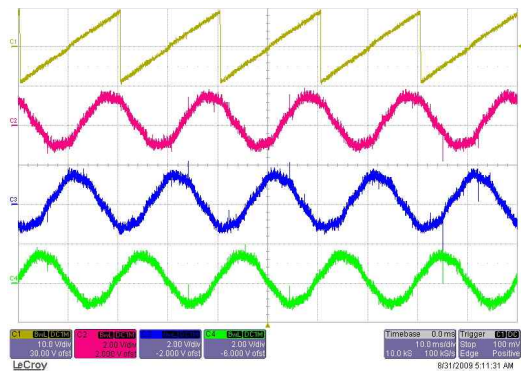
(b) q축 전류 및 고조파 특성

그림 1. 무부하 1,000[rpm] 정상조건에서의 실험 결과
Fig. 1. Experimental results at no load 1,000[rpm] without fault

HTR (Healthy Turn Ratio):

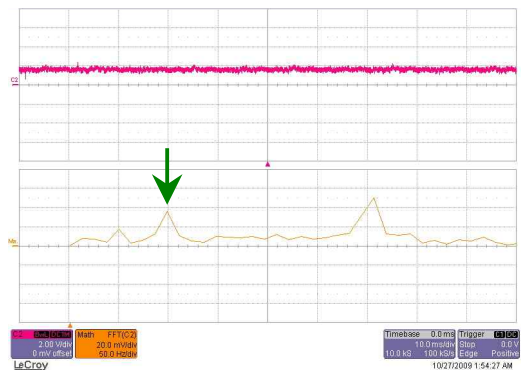
$$\tau = 1 - \sigma \quad (0 \leq \tau \leq 1) \quad (6)$$

여기서 N_T 는 전체 턴수를 나타내고 N_f 는 고장 턴수를 나타낸다. 이를 이용하면 단락 전류가 흐르는 단락 권선의 저항 $R_f = \sigma R_s$ 가 되고 단락 권선의 역기전력 $e_{fs} = \omega_r \lambda_{mf} \cos(\text{고장상의 위상})$ 이 되며 이 때 $\lambda_{mf} = \sigma \lambda_m$ 이 된다. 이러한 파라미터 변화를 이용하여 권선 단락에 의한 고장 시의 선전압 모델이 전개되었다[15]. 권선 단락에 의한 고장 발생 시 저항, 인덕턴스 및 역기



x축 : time [10msec/div], y축 : θ_r [0.32rad/1V], i_{cs} [2A/1V], i_{bs} [2A/1V], i_{as} [2A/1V]

(a) 위치 및 상전류 응답



x축 : time [10msec/div], y축 : i_{qs} [2A/1V]
x축 : frequency [50Hz/div], y축 : FFT of i_{qs} [2A/1V]

(b) q축 전류 및 고조파 특성

그림 2. 무부하 1,000[rpm]에서 고장자 권선 1/24의 단락 고장(FTR=4.17[%]) 시 구동 특성
Fig. 2. Experimental results at no load 1,000[rpm] under stator fault due to 1/24 shorted turn

전력에는 변화가 일어나며 고장 권선에는 큰 단락전류가 발생하고 3상전류는 더 이상 평형 상태를 유지하지 못한다. 이로 인하여 상전류에는 3차 고조파 성분이 dq축 전류에는 2차 고조파 성분이 나타나게 된다. 고조파 관측을 통한 고장 검출의 타당성을 보이기 위해 특정 턴에서 고정자 권선이 단락될 수 있도록 설계된 PMSM을 이용한 비교 고장 실험이 수행된다. 그림 1은 고장이 없는 무부하 정상조건, 1,000[rpm]에서의 구동 특성을 나타낸다. 고장이 없는 경우의 q축 및 3상전류의 응답 성능과 3상전류의 평형 상태를 확인할 수 있으며 그림 1 (b)에서 q축 전류의 2차 고조파는 대략 20[mA]임을 확인할 수 있다.

그림 2는 무부하 1,000[rpm]에서 고정자 권선의 1/24이 (FTR=4.17[%]) 단락 고장을 일으킨 경우의 실험 결과를 나타낸다. 그림 1에 비해 q축 전류의 6차 고조파는 비슷하게 유지되나 2차 고조파가 상당히 증가하여 70[mA] 정도임을 확인할 수 있다. 이러한 2차 고조파 크기는 일반적으로 동작 속도와 고장 권선의 양인 FTR에 비례하여 증가하므로 권선 단락 고장을 판단할 수 있는 지표로 사용될 수 있다.

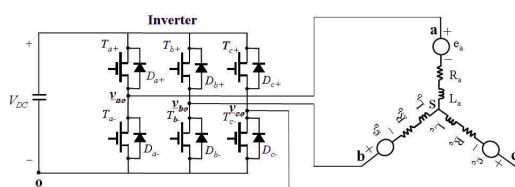


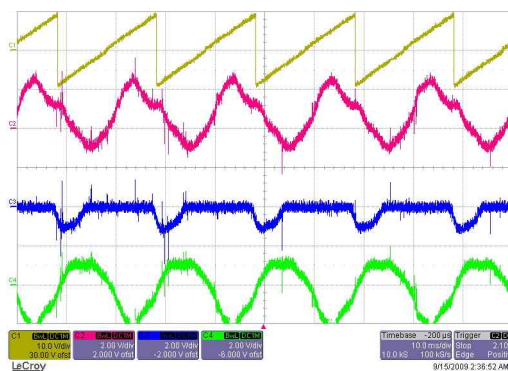
그림 3. PWM 인버터
Fig. 3. PWM inverter

3. 인버터 스위치의 개방 고장 특성

스위치에 개방 고장이 일어나는 경우에도 3상평형 조건이 성립하지 않아 기존의 dq 모델은 사용할 수 없다. 한 스위치에서 개방 고장이 일어나는 경우 스위치가 도통할 수 없어 인버터는 기준 전압벡터와 같은 전압을 합성할 수 없다. 그림 3의 인버터 스위치 중 b상 상단 스위치인 T_{b+} 에 개방 고장이 일어나는 경우 인버터 극전압은 환류 다이오드 D_{b+} 와 D_{b-} 의 도통에 따라 다음과 같이 결정된다.

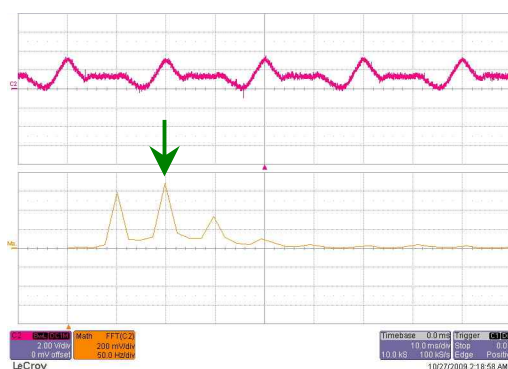
$$v_{bo} = \begin{cases} V_{DC} & \text{when } i_{bs} < 0 \\ 0 & \text{when } i_{bs} > 0 \\ v_{so} + e_{bs} & \text{when } i_{bs} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

인버터의 고장 중에서 Arm의 두 스위치 모두에 개방 고장이 일어나는 경우 고장 상은 인버터로부터 전력을 공급받을 수 없고 단지 환류 다이오드를 통해서만 전류가 순간적으로 흐를 수 있어 이는 전동기의 해당 상이 인버터와 분리된 경우와 유사하다. 과전류로 인해 해당 Arm 스위치가 소손되거나 퓨즈 용해에 의해 분리된 경우도 이에 해당한다. 이러한 고장 시 구



x축 : time [10msec/div], y축 : θ_r [0.32rad/1V], i_{cs} [2A/1V]
 i_{bs} [2A/1V], i_{as} [2A/1V]

(a) 위치 및 상전류 응답



x축 : time [10msec/div], y축 : i_{qs} [2A/1V]
x축 : frequency [50Hz/div], y축 : FFT of i_{qs} [2A/1V]

(b) q축 전류 및 고조파 특성

그림 4. 인버터 스위치 T_{b+} 의 개방 고장 시 무부하 1,000[rpm]에서의 구동 특성
Fig. 4. Experimental results at no load 1,000[rpm] under T_{b+} inverter switch open fault

동 시스템에는 2상 여자 방식과 유사한 모델 차수의 축소가 일어나며 해당 고장 상의 전류는 영으로 유지되게 된다.

그림 4는 무부하 1,000[rpm]에서 인버터 스위치 T_{b+} 의 개방 고장 시 구동 특성을 나타낸다. q축 전류에 큰 2차 고조파 성분을 관찰할 수 있으며 정상 조건인 그림 1의 2차 고조파가 20[mA] 정도인데 비해 그림 4의 2차 고조파는 상당히 증가하여 1.3[A] 정도임을 확인할 수 있다. 그림 5는 무부하 1,000[rpm]에서 인버터 b상 Arm 스위치 전체에 개방 고장이 일어날 때의 구동 특성을 나타낸다. 정상 조건에서 보다 q축 전류의 2차 고조파가 상당히 증가하여 대략 2[A] 정도임을 확인할 수 있다.

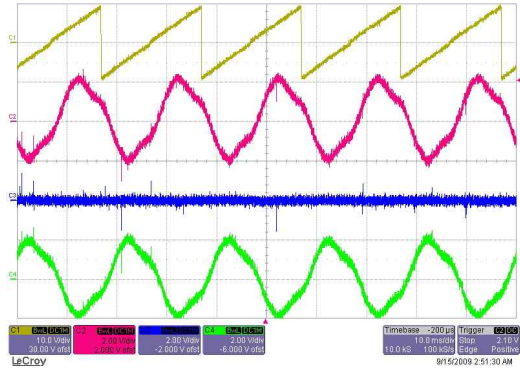
4. 고장 검출 알고리즘

비교 고장 실험을 통해 권선 단락 및 스위치 개방 고장 시 3상전류에는 불평형에 의한 3차 고조파 성분이 나타나며 dq 변환 시 이 성분이 기본파 성분과 곱해지므로 dq축 전류에는 2차 고조파 성분이 나타나게 된다. 이러한 2차 고조파 성분은 권선 고장 시 단락 권선의 양과 동작 속도에, 스위치 개방 고장 시 전류 레벨에 비례하게 된다.

고장 검출을 위해 q축 전류의 2차 고조파를 계산하기 위해서는 시스템이 정상상태일 필요가 있다. 그림 6은 정상상태 조건 검사를 포함한 고장진단 동작모드를 나타낸다. 우선 동작모드 0에서는 정상상태에서만 고조파 특성이 분석될 수 있으므로 시스템이 정상상태에 도달하였는지 여부를 조사한다. 이는 현재 속도와 전 스텝에서의 속도 변화가 다음과 같이 특정 값 이하인지를 조사함으로써 결정된다.

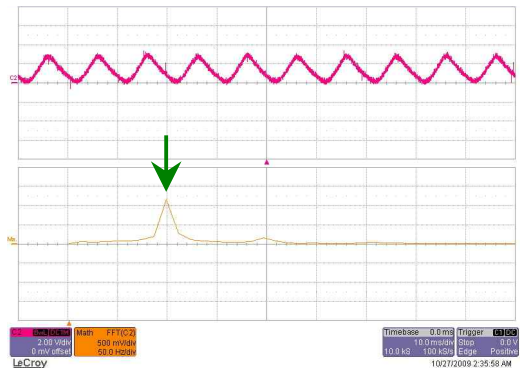
$$|\omega_r - \omega_{r,prev}| \leq |0.01 \cdot \omega_{r,prev}| \quad (8)$$

정상상태 조건이 만족되지 않으면 동작모드 0을 계속 유지하며 정상상태 조건 만족 시 속도 정보로부터 주파수와 주기 데이터 수를 결정하고 동작모드 1로 전환한다. 이 때 기본파 주파수는 속도 정보로부터 다음과 같이 계산된다.



x축 : time [10msec/div], y축 : θ_r [0.32rad/1V], i_{qs} [2A/1V], i_{ds} [2A/1V], i_{as} [2A/1V]

(a) 위치 및 상전류 응답



x축 : time [10msec/div], y축 : i_{qs} [2A/1V]
x축 : frequency [50Hz/div], y축 : FFT of i_{qs} [2A/1V]

(b) q축 전류 및 고조파 특성

그림 5. 인버터 b상 Arm 전체 스위치 개방 고장 시 무부하 1,000[rpm]에서의 구동 특성

Fig. 5. Experimental results at no load 1,000[rpm] under entire switch open fault in b-phase arm

$$\omega_o = 2\pi P \frac{\omega_{r,rpm}}{60} \quad [\text{elec} \quad \text{rad/sec}] \quad (9)$$

고장 검출을 위해 데이터 수집 및 해석을 수행하는 동작모드 1은 “고장 진단모드”와 “고장 유형 판별모드”로 구성되며 고장이 검출되지 않은 단계에서는 고장 진단모드를 수행한다. 고장 진단모드에서는 고장이 발생 하였는지를 검사하기 위해 q축 전류의 주기 데이터가 수집되어 2차 고조파가 계산된다. 고장 판별

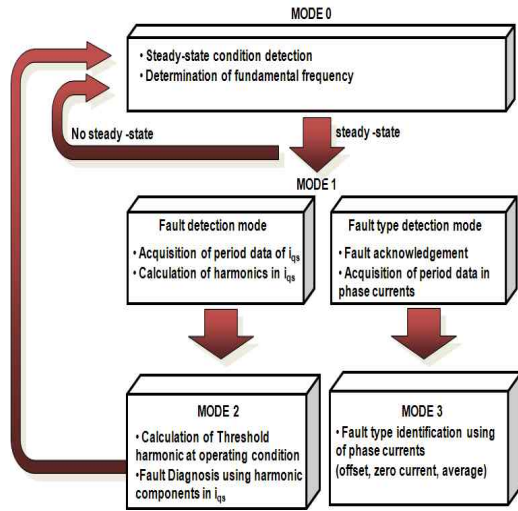


그림 6. 고장 진단 동작 모드
Fig. 6. Operating mode for fault diagnosis

을 위해서는 q축 전류의 평균치와 2차 고조파 값이 필요하며 고조파 분석은 푸리에 급수를 이용하여 수행된다. 주기 파형에 대한 푸리에 급수 관계식이 식 (10)에서 (13)에 나타나 있다.

$$f(t) = a_v + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t) \quad (10)$$

$$\text{여기서 } a_v = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt \quad (11)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \cos(k\omega_0 t) dt \quad (12)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \sin(k\omega_0 t) dt \quad (13)$$

이며 T 는 주기이다. 고장 판별을 위해 a_v , a_2 및 b_2 가 계산되고 이를 이용하여 q축 전류의 2차 고조파가 다음과 같이 계산된다.

$$f(t) = a_v + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t - \theta_n) \quad (14)$$

$$\text{여기서 } a_n - jb_n = A_n \angle -\theta_n \quad (15)$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \theta_n = \tan^{-1} \frac{b_n}{a_n}$$

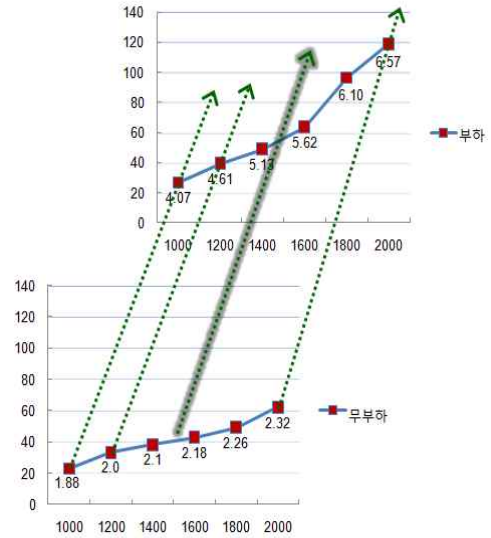


그림 7. 선형 보간법을 이용한 정상 동작 조건에서의 q축 전류 2차 고조파 계산
Fig. 7. Calculation of second order harmonic in q-axis current using linear interpolation

본 논문에서는 더 정확한 고조파 성분을 검출하기 위해 데이터 수를 늘려 q축 전류의 12 주기 데이터를 사용하였고 구해진 고조파 데이터를 Moving Average로 평균하여 고장 판별에 사용하였다. 동작 모드 1에서 2차 고조파 계산이 완료되면 진단 알고리즘은 동작모드 2로 전환되어 고장 여부를 판별한다. 그림 7은 2차 고조파와 선형 보간법을 이용한 고장 진단 방법을 나타낸다. 우선 q축 전류의 2차 고조파를 검출할 수 있는 알고리즘이 DSP로 구현되어 그림 7에서와 같이 고장이 없는 시스템의 무부하 및 0.4[Nm]의 부하 조건 각각 6개의 속도에서 계산된다. 1,000[rpm]에서 2,000[rpm] 구간의 6개 동작속도에서 계산된 2차 고조파 데이터를 토대로 선형 보간법을 이용하여 임의의 속도에서의 2차 고조파가 구해질 수 있다. 이 값은 무부하시 및 부하시의 데이터를 토대로 다시 선형 보간법과 평균치를 이용하여 전류 레벨에 따른 값으로 다음과 같이 보정된다.

$$h_{iq2,normal} = \frac{h_{iq2,b} - h_{iq2,a}}{i_{qavg,b} - i_{qavg,a}} (i_{qavg} - i_{qavg,a}) + h_{iq2,a} \quad (16)$$

여기서 $i_{qavg,b}$ 와 $h_{iq2,b}$ 는 각각 부하 조건에서 결정된 q축 전류의 평균치와 2차 고조파이며 $i_{qavg,a}$ 와 $h_{iq2,a}$ 는 각각 무부하 조건에서 결정된 q축 전류의 평균치와 2차 고조파이다. 식 (16)의 $h_{iq2,normal}$ 은 임의의 동작속도 및 전류 조건에서 고장이 없는 구동 시스템이 가지게 되는 q축 전류의 2차 고조파를 나타낸다. 고장 검출은 선형 보간법을 이용하여 정상 동작 조건에서 구해진 이 값과 시스템의 q축 전류 2차 고조파를 실시간으로 구해 비교함으로써 이루어지며 이를 위해 다음의 고장 지수가 정의된다.

$$\text{Fault index} = \frac{h_{iq2}}{h_{iq2,normal}} \quad (17)$$

1보다 큰 고장 지수는 시스템의 2차 고조파가 고장이 없는 정상 조건에서 운전될 때 가지게 되는 값보다 더 증가함을 의미한다. 본 논문에서는 확실한 고장의 검출을 위해 1.5 이상인 고장 지수를 고장으로 판단하여 고장 플래그 (Fault flag)를 1로 설정하고 고장 플래그가 1로 유지되는 횟수를 Fault count로 카운트하여 10회 이상일 때를 고장으로 진단한다.

고장의 검출 유무에 관계없이 동작모드 2를 완료한 후 알고리즘은 동작모드 0으로 전환된다. 고장이 검출되지 않은 경우에는 계속 고장 진단모드를 수행하게 되나 고장이 발생한 경우에는 동작모드 0을 거쳐 동작모드 1의 “고장 유형 판별모드”로 전환된다. 이 동작모드에서는 q축 전류가 아닌 3상전류의 주기 데이터가 수집되고 이는 동작모드 3에서 파형 분석을 통해 고장 발생의 원인을 찾는 데 사용된다. 고장 유형 판별 모드에서는 CPU 메모리의 크기를 고려하여 3상전류의 2주기 데이터가 수집된다.

동작모드 3에서는 수집된 3상전류의 파형 정보와 고장특성을 이용하여 권선 고장, 스위치 개방 고장 및 Arm 스위치 개방 고장의 세 가지 유형으로 고장의 원인을 구분한다. 일반적으로 권선 고장에서는 q축 전류

의 2차 고조파가 증가하며 고장 상과 고장이 아닌 상 모두에 상전류의 평균치가 영으로 DC 옵셋이 존재하지 않는다. 한 스위치의 개방 고장 시 역시 q축 전류의 2차 고조파가 증가하나 증가폭이 상당히 크며 모든 상전류에 DC 옵셋이 존재하게 된다. Arm 스위치 개방 고장 시에는 q축 전류의 2차 고조파가 상당히 크며 고장 상전류는 거의 전 구간에서 영으로 유지되고 고장이 아닌 상전류의 DC 옵셋은 거의 영으로 나타나는 특징이 있다. 상전류에 옵셋 존재 유무는 평균치가 영인지를 조사하여 확인 가능하며 이 때 비교 기준으로는 q축 전류 평균치의 10[%]를 사용하여 $0.1i_{q,avg}$ 보다 작은 경우 영으로 판단하도록 한다. 표 1은 각 고장별 특징과 고장 유형을 표시하기 위한 Fault_type_flag의 값을 나타낸다.

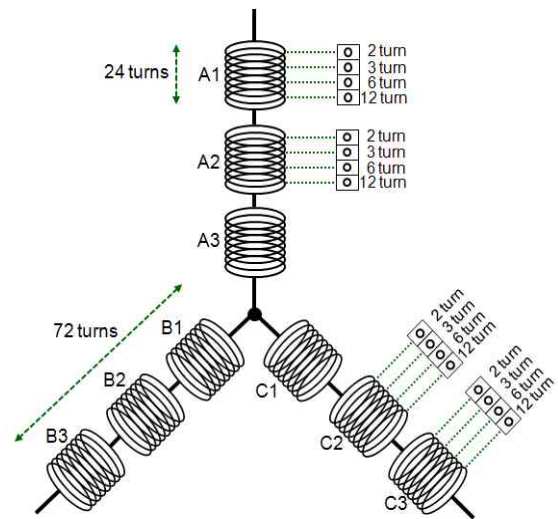


그림 8. 고장검출실험에 사용된 전동기의 권선구조
Fig. 8. Winding configuration of a test motor

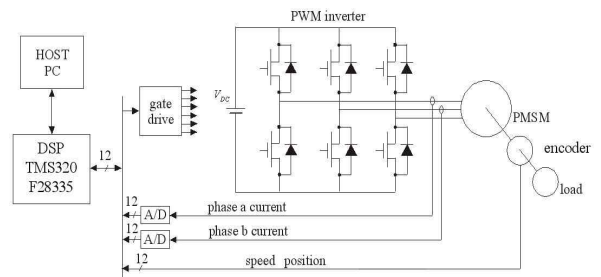


그림 9. 실험 시스템 구성
Fig. 9. Configuration of the experimental system

표 1. 각 고장별 특징 및 Fault type flag의 값
Table 1. Characteristics according to respective faults

권선 고장	<ul style="list-style-type: none"> • Fault_type_flag = 1 • 모든 3상전류에 윽셋 없음 • Absolute of average of phase current $\leq 0.1 \cdot i_{q,avg}$
스위치 개방 고장	<ul style="list-style-type: none"> • Fault_type_flag = 2 • q축 전류의 2차 고조파가 상당히 증가 • 모든 상전류에 DC 윽셋이 존재 • Absolute of average of phase current $> 0.1 \cdot i_{q,avg}$
Arm 스위치 개방 고장	<ul style="list-style-type: none"> • Fault_type_flag = 3 • q축 전류의 2차 고조파가 상당히 증가 • 고장 상전류는 거의 전 구간에서 영

5. 전체 시스템 구성

그림 8은 고장 검출 실험에 사용된 PMSM의 권선 구조를 나타낸다. 3상 권선은 각각 24턴의 3개 직렬 권선으로 구성되어 있으며 권선 단락 고장을 발생시키기 위해 권선의 2, 3, 6, 및 12번째 턴에 탭 단자를 구성하였다. 각 단자를 연결함으로써 고정자의 권선 단락 고장 발생이 가능하며 본 실험에서는 1/24 (FTR=4.17[%]) 및 1/12 (FTR=8.33[%])의 권선 단락이 사용되었다.

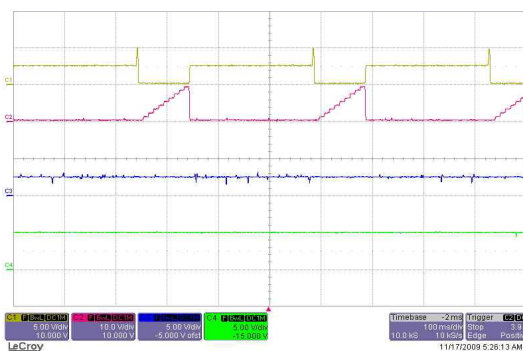


그림 10. 실험 시스템 사진
Fig. 10. Experimental system

표 2. 시험 전동기의 정격 및 파라미터
Table 2. Ratings and parameters of a test motor

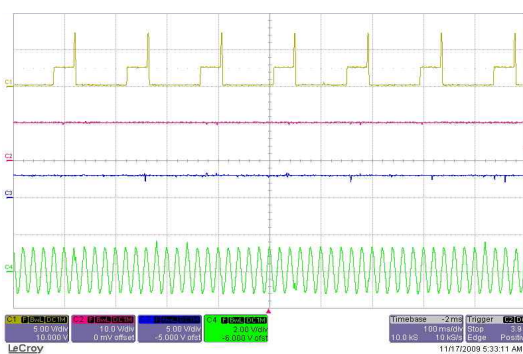
정격 용량	400[W]	정격 속도	3500[rpm]
정격 토크	1.1[Nm]	극 수	6
최고 자속	0.017[Wb]	고정자 저항	0.25[Ω]
인덕턴스	2.5[mH]		

그림 9는 실험 시스템의 구성을 나타낸다. 전체 알고리즘은 32-bit DSP TMS320F28335에 의해 구현되며[13] 샘플링 시간은 100[μsec]로 설정되었다. 고장의 검출 및 유형을 판별하기 위하여 4절에서 기술한



x축 : time [0.1sec/div], y축 : Mode[1/2.5V], speed_ss_flag[1/1V], fault index[1/1V], fault flag[1/5V]

(a) 고장 진단모드



x축 : time [0.1sec/div], y축 : Mode[1/2.5V], fault count[1/1V], fault_type_flag[1/3V], i_{bs} [2A/1V]

(b) 고장 유형 판별모드

그림 11. 무부하 1,000[rpm]에서 고정자 권선의 1/24 단락 고장(FTR=4.17[%]) 시 진단 실험 결과
Fig. 11. Experimental results for stator turn fault detection due to 1/24 shorted turn at no load 1,000[rpm]

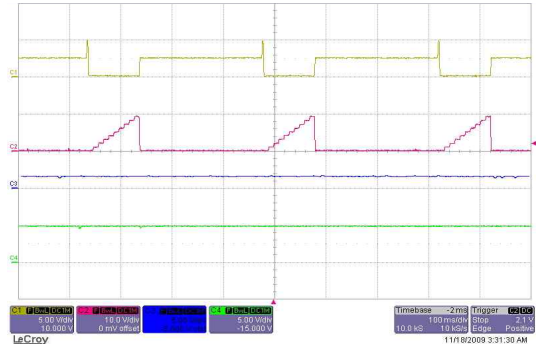
고장 진단 알고리즘이 DSP로 구현되었다. 전동기는 10[kHz] 스위칭 주파수의 PWM 인버터로 구동되며 PWM으로 공간 벡터 기법이 사용된다[16]. 회전자 위치는 엔코더를 통해 감지되며 전류는 홀 센서를 통해 측정되어 40/211[A]의 분해능으로 A/D 컨버터를 통해 DSP에 입력된다. 그림 10은 DSP 제어기, 시험 전동기 및 PMDC 발전기로 구성된 전체 실험 시스템의 구성을 나타낸다. 시험 전동기의 정격 및 파라미터는 표 2에 나타나 있다.

6. 실험결과

이 절에서는 제안된 고장 진단 알고리즘의 타당성과 유용성을 입증하기 위해 여러 고장 및 동작 환경에서 고장 검출 실험 결과가 제시된다.

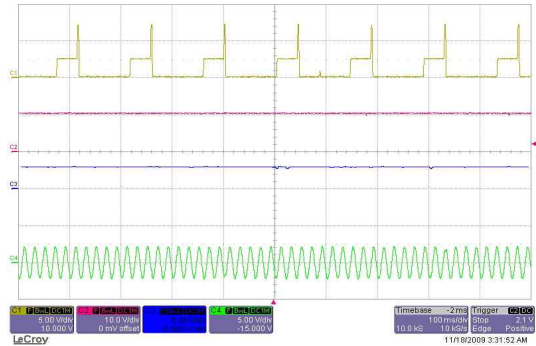
그림 11은 무부하 1,000[rpm]에서 고정자 권선의 1/24이 단락 고장일 때의 고장 검출 실험 결과를 나타낸다. 파형은 위로부터 동작 모드(Mode), 정상상태 플래그(speed_ss_flag), 고장 지수(fault index) 및 고장 플래그(fault flag)를 나타낸다. 동작모드 0에서 식(8)이 10회 이상 만족되어 정상상태 플래그가 10이 되는 순간 동작모드가 1로 전환되어 데이터 수집 및 고조파 분석이 이루어진다. 계산된 고조파와 식(16) 및 (17)을 이용하여 고장지수가 계산된다. 고장지수는 2.5 정도로 이는 정상 조건에서의 동일 속도, 동일 전류 레벨에 비해 q축 전류의 2차 고조파가 2.5배 증가하였음을 의미한다. 고장지수가 1.5 보다 크므로 고장으로 진단되고 고장 플래그가 1로 설정된다. 고장 플래그가 1로 유지되는 횟수를 Fault count로 카운트하여 10 이상이면 그림 11 (b)에서와 같이 고장 유형 판별모드로 전환하여 3상전류 데이터를 이용해 고장의 원인을 조사하게 된다. 그림 11 (b)는 동작 모드 (Mode), Fault count, Fault_type_flag, 및 b상전류를 나타내며 고장 유형을 나타내는 Fault_type_flag가 1이어서 고장의 원인이 고정자 권선 고장임을 보여주고 있다.

그림 12는 1,000[rpm] 부하조건에서 고정자 권선의 1/24이 단락 고장일 때의 검출 결과를 나타낸다. 고장 지수는 2.44 정도로 1.5보다 커 고장 플래그가 1로 설정되고 Fault count가 10으로 증가한 후 고장 유형 판



x축 : time [0.1sec/div], y축 : Mode[1/2.5V], speed_ss_flag[1/1V], fault index[1/1V], fault flag[1/5V]

(a) 고장 진단모드



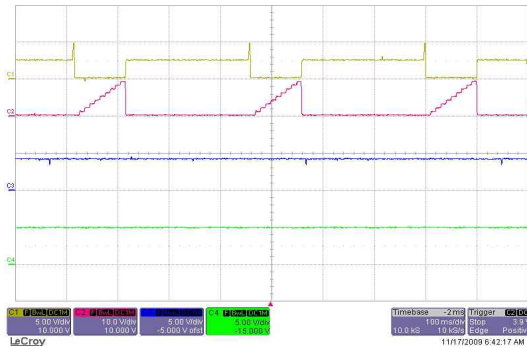
x축 : time [0.1sec/div], y축 : Mode[1/2.5V], fault count[1/1V], fault_type_flag[1/3V], i_{bs} [2A/1V]

(b) 고장 유형 판별모드

그림 12. 부하 1,000[rpm]에서 고정자 권선의 1/24 단락 고장(FTR=4.17%) 시 진단 실험 결과
Fig. 12. Experimental results for stator turn fault detection due to 1/24 shorted turn at 1,000[rpm] with load

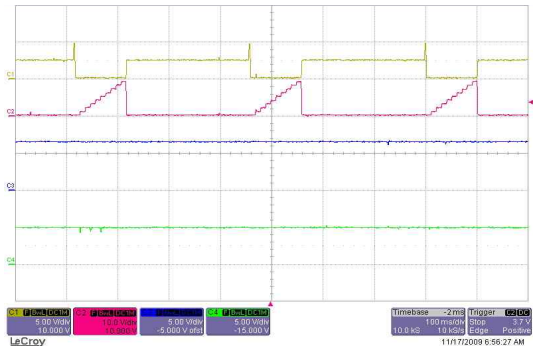
별모드에서 Fault_type_flag가 1로 역시 고장의 원인이 고정자 권선 고장임을 나타낸다.

그림 13은 무부하 1,000[rpm]에서 인버터 b상 상단 스위치 T_{b+} 에 개방 고장이 발생한 경우의 고장 검출 결과를 나타낸다. T_{b+} 의 고장 시 3상전류는 평형 상태를 유지하지 못하고 전류 파형에는 움푹이 존재하며 q축 전류는 큰 2차 고조파를 갖는다. 고장지수는 40 정도로 고정자 권선 고장인 경우에 비해 크게 증가한다. 고장의 검출 후 고장 유형 판별모드에서는 Fault_type_flag가 2(6[V])로 고장의 원인이 인버터 한 스위치의 개방 고장임을 보여주고 있다.



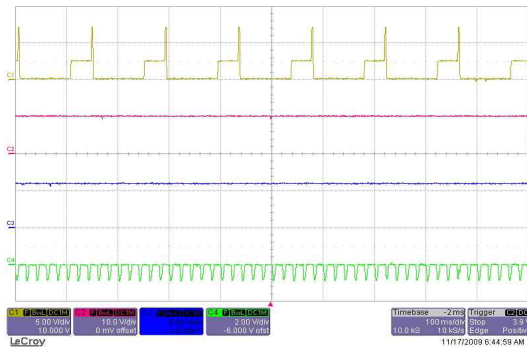
x축 : time [0.1sec/div], y축 : Mode[1/2.5V], speed_ss_flag[1/1V], fault index[10/1V], fault flag[1/5V]

(a) 고장 진단모드



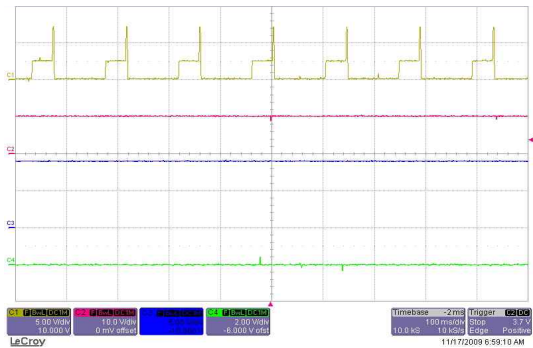
x축 : time [0.1sec/div], y축 : Mode[1/2.5V], speed_ss_flag[1/1V], fault index[10/1V], fault flag[1/5V]

(a) 고장 진단모드



x축 : time [0.1sec/div], y축 : Mode[1/2.5V], fault count[1/1V], fault_type_flag[1/3V], i_{bs} [2A/1V]

(b) 고장 유형 판별모드



x축 : time [0.1sec/div], y축 : Mode[1/2.5V], fault count[1/1V], fault_type_flag[1/3V], i_{bs} [2A/1V]

(b) 고장 유형 판별모드

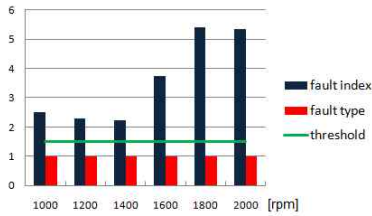
그림 13. 인버터 T_{b+} 스위치의 개방 고장 시 무부하 1,000[rpm]에서의 진단 실험 결과
Fig. 13. Experimental results at no load 1,000[rpm] under inverter T_{b+} switch open fault

그림 14. 인버터 b상 Arm 전체 스위치의 개방 고장 시 무부하 1,000[rpm]에서의 진단 실험 결과
Fig. 14. Experimental results at no load 1,000[rpm] under entire switch open fault in b-phase arm

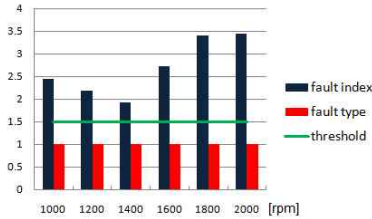
그림 14는 무부하 1,000[rpm]에서 인버터 b상 Arm 전체 스위치의 개방 고장 시 고장 검출 결과를 나타낸다. 이는 전동기의 b상이 인버터와 완전히 분리된 경우와 유사하며 b상전류는 영으로 유지되고 나머지 두 상에는 서로 반대 부호의 전류가 흐르게 된다. 고장지수는 65로 크게 증가하며 고장 검출 후 고장 유형 판별모드에서 Fault_type_flag가 3(9[V])으로 고장의 원인이 Arm 스위치 전체의 개방임을 나타내고 있다.

그림 15는 여러 동작 속도와 고정자 권선 고장에서 고장 검출 결과를 나타낸다. 그림에 고장 판별의 기준인 고장지수 1.5가 문턱 값으로 (Threshold) 나타나

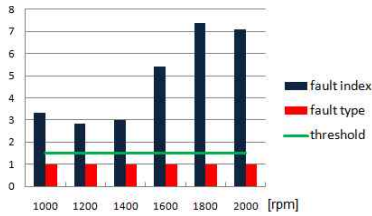
있다. 그림 15 (a)와 (b)는 권선의 1/24이 단락된 (FTR=4.17[%]) 경우의 무부하 및 부하 시 결과이다. 1,000[rpm]에서 2,000[rpm]까지의 전 속도 영역에서 고장지수는 1.9 이상의 값을 가져 명확히 고장이 검출되며 Fault_type_flag가 1로 고장의 원인이 권선 고장임을 보여주고 있다. 그림 15 (c)와 (d)는 권선의 1/12이 단락된 (FTR=8.33[%]) 경우의 결과이다. 고장지수는 2.35 이상을 가져 효과적으로 고장이 검출되고 고장 유형이 권선 고장으로 판별되고 있음을 알 수 있다. 권선 단락 고장 시, q축 전류의 2차 고조파는 단락된 경로의 역기전력, 즉, 단락 권선의 양과 속도에 따라



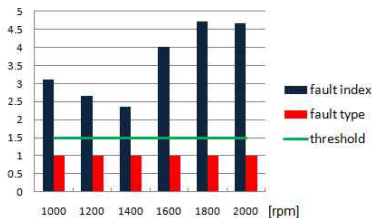
(a) 무부하, 고정자 권선의 1/24 단락 FTR=4.17[%]



(b) 부하, 고정자 권선의 1/24 단락(FTR=4.17[%])



(c) 무부하, 고정자 권선의 1/12 단락(FTR=8.33[%])

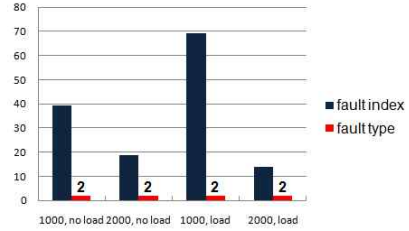


(d) 부하, 고정자 권선의 1/12 단락(FTR=8.33[%])

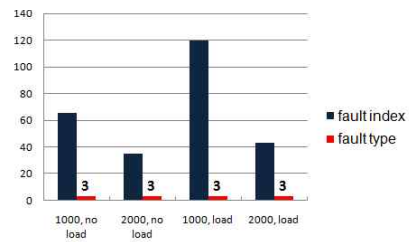
그림 15. 고정자 권선 고장 시 여러 동작 조건에서의 고장 검출 및 고장 유형 판별 결과

Fig. 15. Experimental results for fault detection and fault type identification at various operating conditions under stator turn fault

증가하므로 단락 권선의 양과 속도가 증가할수록 고장지수도 더 증가하여 고장 검출이 명확해진다. 표 3은 권선의 1/24이 단락 고장일 때의 결과 데이터를 정리한 것으로 고장 플래그, 고장지수 및 고장의 종류가 나타나 있다.



(a) 인버터 T_{b+} 스위치 개방 고장



(b) 인버터 b상 Arm 전체 스위치 개방 고장

그림 16. 스위치 고장 시 여러 동작 조건에서의 고장 검출 및 고장 유형 판별 실험 결과

Fig. 16. Experimental results for fault detection and fault type identification at various operating conditions under switch fault

표 3. 권선의 1/24 단락 고장 시 고장 검출 실험 결과
Table 3. Detecting results under 1/24 turn fault

1/24 Turn Fault	No Load Condition			Load Condition		
	Fault flag	Fault index	Fault type	Fault flag	Fault index	Fault type
1,000[rpm]	1	2.5	1	1	2.44	1
1,200[rpm]	1	2.3	1	1	2.19	1
1,400[rpm]	1	2.22	1	1	1.93	1
1,600[rpm]	1	3.73	1	1	2.73	1
1,800[rpm]	1	5.42	1	1	3.41	1
2,000[rpm]	1	5.34	1	1	3.44	1

그림 16은 여러 동작 속도에서 스위치 개방 고장 시의 고장 검출 실험 결과를 나타낸다. 그림 16 (a)는 스위치 T_{b+} 개방 고장 시의 고장 검출 결과로 부하 인가 여부에 관계없이 고장지수는 1.5보다 훨씬 커 명확히 고장이 검출되며 Fault type flag는 2로 스위치의 개방 고장으로 고장 유형을 판별한다. 그림 16 (b)는 인버터 b상 Arm 전체 스위치에 개방 고장이 일어난 경우의

결과로 고장이 잘 검출되고 Fault type flag는 3으로 고장의 원인이 Arm 전체 스위치의 개방 고장임을 확인할 수 있다.

7. 결 론

PMSM에서 고장자 권선의 단락과 인버터 스위치의 개방 고장이 동시에 존재하는 환경에서 동작 중 실시간으로 고장을 검출하고 고장의 유형을 판별할 수 있는 진단 기법이 제안된다. 제안된 기법은 고조파 해석을 통해 q축 전류의 2차 고조파를 실시간으로 관찰함으로써 이루어지며 고장이 없는 정상 조건에서의 고조파 데이터와 비교를 통해서 고장을 판별한다. 임의의 정상 동작 조건에서의 고조파 데이터는 선형 보간법과 정상 조건에서 계산된 몇 개의 고조파 데이터를 통해서 구해진다. 고장 검출 시 진단 알고리즘은 고장 유형 판별모드로 전환하여 상전류의 파형 분석을 통해 고장의 유형을 판별한다. 제안된 고장 검출 기법의 타당성을 입증하기 위해 내부 고장자 권선의 단락이 가능한 전동기가 제작되었으며 전체 시스템과 고조파 분석 알고리즘 및 고장 검출 알고리즘이 DSP TMS320F28335에 의해 구현되어 실험이 수행되었다. 진단 실험 결과로, 여러 동작 조건에서 고장의 검출과 유형 판별이 가능함을 확인할 수 있다. 제안된 방법은 부가적인 진단 장비 없이 제어기만으로 고조파를 계산하여 구현할 수 있으며 정상 상태 조건만 만족된다면 동작 중 on-line으로 고장을 검출할 수 있다.

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] G. M. Joksimovic, and J. Penman, "The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors", IEEE Trans. Ind. Elec., vol. 47, no. 5, pp. 1078-1084, 2000.

[3] 박현준, 장동욱, 김길동, 최종선, 김정수, "과도서지에 의한 견인전동기 고정자 코일의 상태진단 연구," 전력전자학회 논문지, 제8권 3호, pp. 247-252, 2003년 6월.

[4] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and P. Vas, "Recent developments of induction motor drives fault

diagnosis using AI techniques", IEEE Trans. Ind. Elec., vol. 47, no. 5, pp. 994-1004, 2000.

[5] M. A. Awadallah, M. M. Morcos, S. Gopalakrishnan, and T. W. Nehl, "A neuro-fuzzy approach to automatic diagnosis and location of stator inter-turn faults in CSI-fed PM brushless DC motors", IEEE Trans. Ener. Conv., vol. 20, no. 2, pp. 253-259, 2005.

[6] R. M. Tallam, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Stator winding turn-fault detection for closed-loop induction motor drives", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 3, pp. 720-724, 2003.

[7] L. Li, A. David, and L. Wenxin, "Application of particle swarm optimization to PMSM stator fault diagnosis", Int. Conf. on Neural Networks, Vancouver, pp. 1969-1974, 2006.

[8] KATTHA, D., and BOSE, B.K.: 'Investigation of fault modes of voltage-fed inverter system for induction motor drive', IEEETrans.1994,IA-30,(4),pp.1028-1038.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 이정대, 박병건, 김태성, 류지수, 현동석, "BLDC 전동기 운전 특성을 이용한 고장 검출 기법 구현," 전력전자학회 논문지, 제13권 2호, pp. 88-95, 2008년 4월.

[13] TMS320F28335 Digital Signal Controller (DSC) - Data Manual. Texas Instrument, 2008.

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

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

[16] 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.

◆ 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. 2000~2002년 한국과학기술원 연구교수. 2002년~현재 서울산업대 전기공학과 부교수.