

전류 고조파 관찰을 통한 영구자석 동기전동기의 권선 단락 고장 진단 기법

金庚和[†], 具本瑄^{*}, 鄭因城^{**}

A Fault Detecting Scheme for Short-Circuited Turn in a Permanent Magnet Synchronous Motor through a Current Harmonic Monitoring

Kyeong-Hwa Kim, Bon-Gwan Gu, and In-Soung Jung

요 약

영구자석 동기전동기에서 고정자 권선의 단락으로 인해 발생하는 권선 고장을 동작 중 실시간으로 검출할 수 있는 고장 진단 기법을 제시한다. 제안된 기법은 고조파 분석을 통해 q축 전류의 2차 고조파를 관찰함으로써 이루어지며 고장이 없는 정상 조건에서의 고조파 데이터와 비교를 통해서 고장을 판별한다. 임의의 정상 동작 조건에서의 고조파 데이터는 선형 보간법과 몇 개의 사전 측정된 고조파 데이터를 통해서 구해진다. 제안된 고장 검출 기법의 타당성을 입증하기 위해 내부 고정자의 권선 단락이 가능한 전동기가 제작되었으며 전체 구동 시스템과 고조파 분석 알고리즘 및 고장 검출 알고리즘이 DSP TMS320F28335에 의해 구현되어 실험이 수행된다. 제안된 방법은 부가적인 진단 장비를 필요로 하지 않으며 정상 상태 조건만 만족된다면 동작 중 실시간으로 고장을 검출할 수 있다.

ABSTRACT

To diagnose a stator winding fault caused by a short-circuited turn in a permanent magnet synchronous motor (PMSM), an on-line based fault detecting scheme during motor operation is presented. The proposed scheme is based on monitoring the second-order harmonic components in q-axis current obtained through the harmonic analysis and a winding fault is detected by comparing these components with those in normal conditions. The linear interpolation method is employed to determine harmonic data in arbitrary normal operating conditions. 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 system including harmonic analysis algorithm and fault detecting algorithm is implemented using DSP TMS320F28335. The proposed scheme does not require any additional hardware and can effectively detect a fault during motor operation so long as the steady-state condition is satisfied.

Key Words : Fault detecting scheme, Stator turn-fault, Current harmonics, DSP TMS320F28335, PMSM

1. 서 론

점점 더 다양해지는 산업사회의 고급 시스템에서 공정의 신뢰성, 안정성 및 유효성 등은 매우 중요한 관심이 되고 있으며, 이러한 변화로 인해 영구자석 동기전동기는 더욱 주목을 받고 있다. 다양한 공정에서 사용되고 있는 영구자석 동기전동기에 고장이 발생할 경우 사용 효율이 저하되거나 공정이 중단되는 상황에 직면하며 심지어 사고에 의한 큰 손실이 발생될 수도

[†]교신저자 : 정희원, 서울산업대 전기공학과 부교수
E-mail : k2h1@snut.ac.kr

^{*}정희원, 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터 선임연구원

^{**}정희원, 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터 센터장

접수일자 : 2009. 12. 23 1차 심사 : 2010. 2. 1
2차 심사 : 2010. 3. 9 심사완료 : 2010. 3. 10

있다. 이러한 사용자의 자산 손실을 최소화하기 위해 효과적인 시스템 모니터링과 정확한 고장 진단이 중요한 과제가 되고 있다^{[1]-[8]}.

영구자석 동기전동기에서 발생하는 고장의 유형은 크게 고정자 및 회전자 관련 고장, 인버터 및 전력 회로 부분 고장, 축 센서 및 전류 센서 등의 센서 류 고장 그리고 기타 기계적 고장으로 분류할 수 있으며^[1] 각각 유형 별로 활발히 연구가 진행되고 있는 상태이다. 이러한 고장 중에 고정자 권선의 전압 및 전류 스트레스 혹은 열에 의한 절연파괴로 발생하는 권선의 단락 (turn short) 고장은 고정자에서 가장 흔히 발생하는 고장으로 열에 의해 권선의 절연 파괴가 더 많은 권선으로 쉽게 전파되어 더 큰 손실을 초래하는 특징을 가지며 단락 권선에 과도한 열을 발생할 수 있는 순환전류를 일으킨다^[7]. 권선의 일부에 단락이 발생하더라도 전동기의 동작은 가능하나 초기 고장 단계에서 검출되지 않으면 빠르게 절연 파괴가 심화되는 특징을 갖는다. 따라서 인접 코일 혹은 고정자 코어로의 고장의 전파를 방지하기 위해서는 초기 단계에서 동작 중 on-line으로 고장이 검출되어야 한다. 고정자 권선의 부분적 단락으로 인한 고장을 진단하기 위해 많이 연구들이 수행되었다. 이러한 기법들은 주로 서치코일을 이용한 검사^[5], 웨이브렛 변환을 이용한 기법^[1], DFT 등의 수치해석적 방법^[7], 지능제어 기법에 의한 실험적 방법^{[2], [4]} 및 전류 관찰에 의한 방법을^[14] 사용하고 있다. 하지만 이러한 방법들은 부가적인 신호 처리 장비 혹은 측정 장비를 필요로 하며 지능 제어 기법은 진단 시스템의 상세한 고장 특성의 추출을 요한다. 따라서 주 제어가 제어를 수행하는 동시에 부가적인 진단 장비 없이 on-line 방식으로 고장을 진단하는 것이 매우 선호된다. 전류 고조파 스펙트럼 관찰과 신경망에 의한 on-line 고장 검출이 구현되었다^[15]. 이 방식은 전문가의 지식을 필요로 하지 않고 제어가 고장을 판단하는 방식이나 상전류의 전체 고조파 스펙트럼을 사용하고 정상 고조파의 학습을 필요로 하며 회전자 편심에 의한 고장을 진단하는 방식이다.

본 논문에서는 이러한 고정자 권선의 일부 단락 (short-circuited turn)으로 인해 발생하는 권선 고장을 동작 중 실시간으로 검출할 수 있는 기법을 제시한다. 전동기의 일부 권선에 단락으로 인한 고장 발생 시 저항, 인덕턴스 및 역기전력에는 변화가 일어나며 고장 권선에는 큰 단락전류가 발생하고 3상 전류는 더 이상 평형 상태를 유지하지 못한다. 이로 인해 상전류에는 기본 주파수의 3차 고조파 성분이 dq축 전류에는 2차

고조파 성분이 나타난다. 우선, 고장이 발생하여 3상 평형 조건이 성립하지 않는 경우에도 적용 가능한 전동기의 선전압 고장 모델이 제시된다. 고조파 관측을 통한 고장 검출의 타당성을 보이기 위해 특정 턴에서 고정자 권선이 단락될 수 있도록 영구자석 동기전동기가 설계되고 이를 이용한 고장 실험을 수행한다. 전동기의 권선 단락 고장을 on-line으로 검출하기 위해 q 축 전류의 2차 고조파가 사용되며 이는 고장이 없는 정상 조건에서의 고조파 특성과 비교를 통해서 이루어진다. 임의의 정상동작 조건에서의 고조파 데이터는 선형 보간법과 몇 개의 초기 계산 고조파 데이터를 통해서 구해진다. 제안된 고장 검출 기법의 타당성을 입증하기 위해 내부 고정자의 권선 단락이 가능한 전동기가 제작되었으며 전체 구동 시스템과 고조파 분석 알고리즘 및 고장 검출 알고리즘이 DSP TMS320F28335에 의해 구현되어 실험이 수행된다^[9].

2. 고정자 권선 단락에 의한 고장 모델

고장이 없는 영구자석 동기 전동기의 동적 모델은 3상 평형 상태를 유지하며 다음과 같이 표현된다^[10].

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

여기서 v_{as} , v_{bs} , 및 v_{cs} 는 상전압, i_{as} , i_{bs} , 및 i_{cs} 는 상전류, e_{as} , e_{bs} , 및 e_{cs} 는 역기전력으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_{as} &= \omega_r \lambda_m \cos \theta_r \\ e_{bs} &= \omega_r \lambda_m \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ e_{cs} &= \omega_r \lambda_m \cos(\theta_r + 2\pi/3) \end{aligned}$$

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 전기각을 나타낸다. 또한, 전동기의 발생 토크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{e_{as}i_{as} + e_{bs}i_{bs} + e_{cs}i_{cs}}{\omega_m} \quad (2)$$

여기서 $\omega_m = \omega_r / P$ 이며 P 는 극의 쌍 수를 나타낸다. 일반적으로 전동기의 권선 저항과 역기전력 상수는 권선의 턴수에 비례하고 인덕턴스는 턴수의 제곱에 비례

한다. 권선 단락으로 인한 고장의 정도를 정의하기 위해 다음과 같은 파라미터를 정의한다.

FTR (Faulty Turn Ratio):

$$\sigma = N_f / N_T \quad (0 \leq \sigma \leq 1) \quad (3)$$

HTR (Healthy Turn Ratio):

$$\tau = 1 - \sigma \quad (0 \leq \tau \leq 1) \quad (4)$$

여기서 N_T 는 전체 턴수를 나타내고 N_f 는 고장 턴수를 나타낸다. 단락 권선에 흐르는 단락 전류를 i_{fs} 로 표시하면 단락 경로 상의 저항 $R_f = \sigma R_s$ 가 되고 단락 경로 상에는 역기전력 $e_{fs} = \omega_r \lambda_{mf} \cos(\text{고장상의 위상})$ 이 나타나며 이 때 $\lambda_{mf} = \sigma \lambda_m$ 이 된다. 단락에 의한 권선 고장이 전동기의 b상에서 일어난다면 다음과 같은 파라미터가 구해진다.

$$R_a = R_c = R_s, \quad R_b = \tau R_s, \quad R_f = \sigma R_s$$

$$\lambda_{ma} = \lambda_{mc} = \lambda_m, \quad \lambda_{mb} = \tau \lambda_m, \quad \lambda_{mf} = \sigma \lambda_m$$

$$e_{as} = \omega_r \lambda_{ma} \cos \theta_r$$

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

$$e_{cs} = \omega_r \lambda_{mc} \cos(\theta_r + 2\pi/3)$$

$$e_{fs} = \omega_r \lambda_{mf} \cos(\theta_r - 2\pi/3)$$

또한, 고장이 일어나는 b상의 단락 권선에는 단락된 경로를 통해 전류가 흐르며 인덕턴스 성분에 의한 동특성을 가진다. b상에 고장이 발생하는 경우 식 (1)의 인덕턴스 행렬과 4개의 권선 전류 사이의 관계를 고려하여 전동기의 고장 상전압 (line to neutral voltage) 모델을 다음과 같이 구할 수 있다^[6].

$$\mathbf{v}_s = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_s + \mathbf{L}_F \dot{\mathbf{i}}_s + \mathbf{e}_s \quad (5)$$

여기서 $\mathbf{v}_s = (v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs} \ v_{fs})^T$

$$\mathbf{i}_s = (i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs} \ i_{fs})^T$$

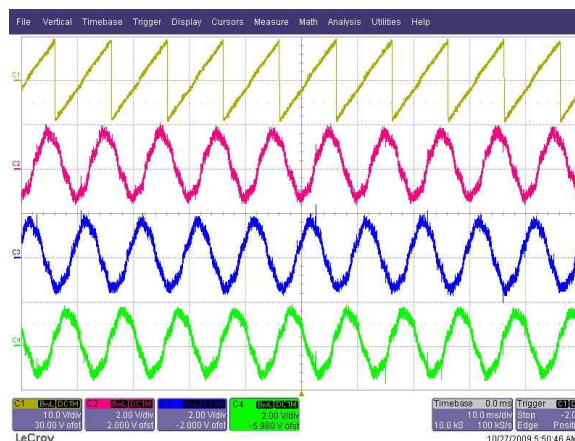
$$\mathbf{e}_s = (e_{as} \ e_{bs} \ e_{cs} \ e_{fs})^T$$

$$\mathbf{R}_s = \begin{pmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f \end{pmatrix}$$

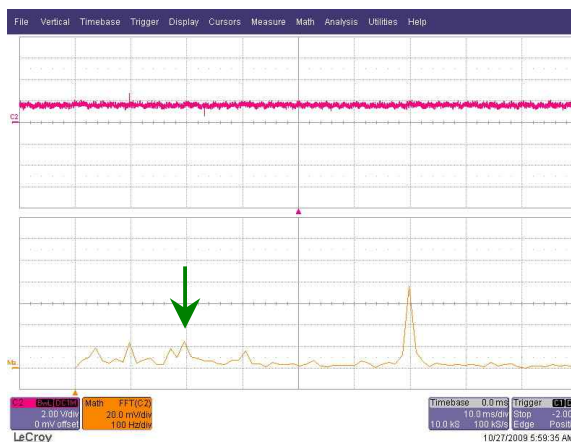
$$\mathbf{L}_F = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L & \tau M & M & \sigma M \\ \tau M & \tau^2 L & \tau M & \tau \sigma L \\ M & \tau M & L & \sigma M \\ \sigma M & \tau \sigma M & \sigma M & \sigma^2 L \end{pmatrix}$$

또한, e_{fs} 는 고장난 b상의 위상을 갖는다. 식 (5)는 상전압 모델로 전동기가 정상인 (Healthy) 상태에서는 3상 평형 조건이 성립하여 인버터의 스위칭 상태에 따른 극전압을 이용하여 쉽게 전동기의 상전압 입력이 구해질 수 있다. 하지만, 권선 고장 시에는 3상 평형 조건이 성립하지 않아 전동기의 상전압 입력을 구하기가 쉽지 않으므로 인버터의 극전압으로부터 쉽게 구해지는 선전압 (Line-to-Line Voltage) 모델을 사용할 필요가 있다. 전동기의 선전압과 인버터 극전압의 관계는 다음과 같이 구해진다.

$$v_{ab} = v_{ao} - v_{bo} \quad (6)$$

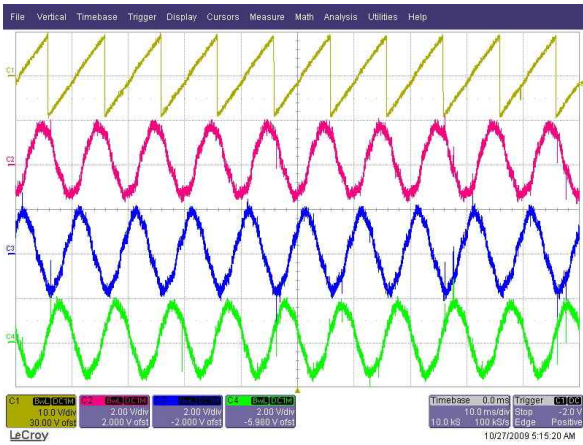


θ_r [0.32rad/1V], i_{cs} [2A/1V], i_{bs} [2A/1V], i_{as} [2A/1V]
 (a) 위치 및 상전류 응답

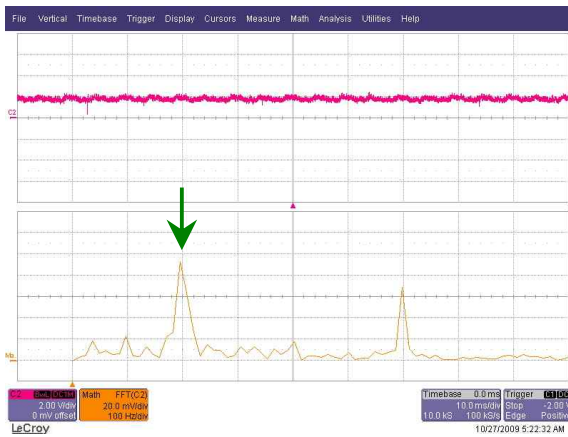


i_{qs} [2A/1V], FFT of i_{qs} [2A/1V]
 (b) q축 전류 및 고조파 특성

그림 1 정상조건에서의 실험 결과 (2000 rpm, 무부하)
 Fig. 1 Experimental results at 2000 rpm without stator turn fault



$\theta_r [0.32\text{rad}/1\text{V}]$, $i_{cs} [2\text{A}/1\text{V}]$, $i_{bs} [2\text{A}/1\text{V}]$, $i_{as} [2\text{A}/1\text{V}]$
 (a) 위치 및 상전류 응답



$i_{qs} [2\text{A}/1\text{V}]$, FFT of $i_{qs} [2\text{A}/1\text{V}]$
 (b) q축 전류 및 고조파 특성

그림 2 고정자 권선 고장 시 2000 rpm에서의 실험 결과 (무부하, 코일의 1/36 단락, FTR=2.78%)
 Fig. 2 Experimental results at no load 2000 rpm under stator fault due to short turn of 2.78%

$$v_{bc} = v_{bo} - v_{co} \quad (7)$$

$$v_{ca} = v_{co} - v_{ao} \quad (8)$$

3상 Y 결선 부하에서 $i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0$ 이 항상 성립하므로 3상 전류 중 두 상에 대한 선전압 관계식을 구하면 다음과 같은 상태 방정식을 구할 수 있다.

$$(L_{11} - L_{13} - L_{21} + L_{23})\dot{i}_{as} + (L_{12} - L_{13} - L_{22} + L_{23})\dot{i}_{bs} + (L_{14} - L_{24})\dot{i}_{fs} = v_{ab} - e_{as} + e_{bs} - R_a \dot{i}_{as} + R_b \dot{i}_{bs} = u_1 \quad (9)$$

$$(L_{21} - L_{23} - L_{31} + L_{33})\dot{i}_{as} + (L_{22} - L_{23} - L_{32} + L_{33})\dot{i}_{bs} + (L_{24} - L_{34})\dot{i}_{fs} = v_{bc} - e_{bs} + e_{cs} - R_b \dot{i}_{bs} - R_c (\dot{i}_{as} + \dot{i}_{bs}) = u_2 \quad (10)$$

$$(L_{41} - L_{43})\dot{i}_{as} + (L_{42} - L_{43})\dot{i}_{bs} + L_{44}\dot{i}_{fs} = v_{fs} - e_{fs} - R_f \dot{i}_{fs} \quad (11)$$

3. 고정자 권선 고장 검출

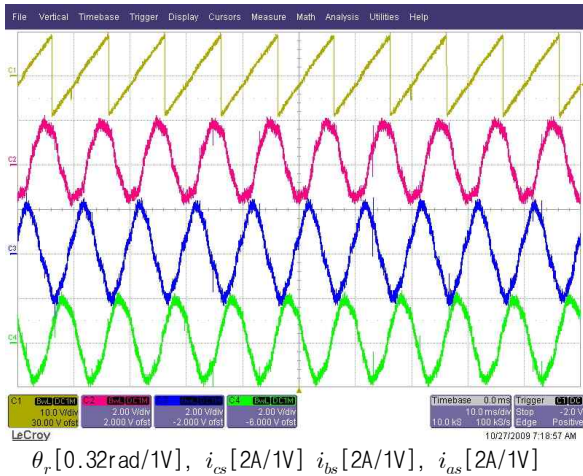
전동기의 권선 단락에 의한 고장 발생 시 저항, 인덕턴스 및 역기전력에는 변화가 일어나며 고장 권선에는 큰 단락전류가 발생하고 3상 전류는 더 이상 평형 상태를 유지하지 못한다. 이로 인하여 상전류에는 기본 주파수의 3차 고조파 성분이 dq축 전류에는 2차 고조파 성분으로 나타나게 된다. 고조파 관측을 통한 고장 검출의 타당성을 보이기 위해 특정 턴에서 고정자 권선이 단락될 수 있도록 설계된 영구자석 동기전동기를 이용하여 고장 실험을 수행한다.

그림 1은 2000 rpm, 무부하 시 고장이 없는 정상조건에서의 실험 결과를 나타낸다. 고장이 없는 정상조건에서 q축 전류 및 3상 전류의 응답 성능과 3상전류의 평형 상태를 확인할 수 있으며 그림 1(b)에서와 같이 q축 전류의 2고조파가 대략 60mA 정도임을 확인할 수 있다.

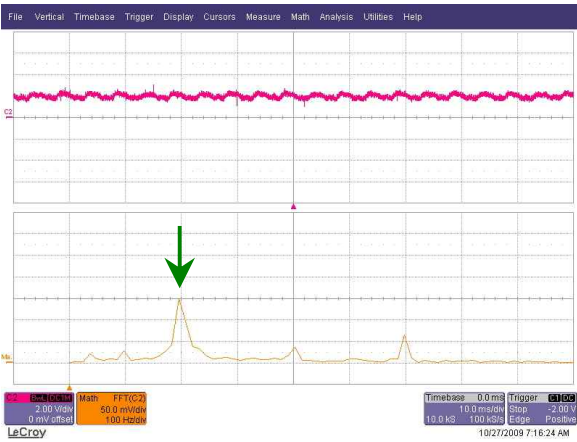
그림 2는 2000 rpm, 무부하 시 고정자 권선의 1/36이 (FTR=2.78%) 권선 단락으로 고장을 일으킨 경우의 실험 결과를 나타낸다. 그림 1에 비해 q축 전류의 6배 고조파는 비슷하게 유지되나 2 고조파가 상당히 증가하여 180mA 정도임을 확인할 수 있다. 이러한 2차 고조파 크기의 증가는 일반적으로 동작 속도와 고장 권선의 양인 FTR에 비례하며 이 2차 고조파의 크기가 권선 단락에 의한 고장을 판단할 수 있는 지표로 사용될 수 있다.

그림 3은 2000 rpm, 무부하 시 고정자 권선의 1/24이 (FTR=4.17%) 권선 단락으로 고장을 일으킨 경우의 실험 결과이다. 그림 2에 비해 고장 권선의 양이 증가하여 q축 전류의 2차 고조파가 약 300mA 정도로 증가하게 된다.

고장 시의 비교 실험을 통해 권선 단락에 의한 고장 시 3상 전류에는 불평형에 의한 3차 고조파 성분이 나타나며 dq 변환 시 이 성분이 기본과 성분과 곱해지므로 dq축 전류에는 2차 고조파 성분이 나타나게 된다. 이러한 2차 고조파 전류 성분은 단락된 경로의 역기전력에 따라 증가하게 되므로 이는 단락 권선의 양과 동작 속도에 직접 비례하게 된다.



$\theta_r [0.32\text{rad}/1\text{V}]$, $i_{cs} [2\text{A}/1\text{V}]$, $i_{bs} [2\text{A}/1\text{V}]$, $i_{as} [2\text{A}/1\text{V}]$
 (a) 위치 및 상전류 응답



$i_{qs} [2\text{A}/1\text{V}]$, FFT of $i_{qs} [2\text{A}/1\text{V}]$
 (b) q축 전류 및 고조파 특성

그림 3 고정자 권선 고장 시 2000 rpm에서의 실험 결과 (무부하, 코일의 1/24 단락, FTR=4.17%)
 Fig. 3 Experimental results at no load 2000 rpm under stator fault due to short turn of 4.17%

고장 검출을 위해서는 상전류에 포함된 3차 고조파 성분을 관찰하거나 혹은 q축 전류에 포함된 2차 고조파 성분을 관찰하여 이루어질 수 있다. 시뮬레이션을 통하여 동일 고장 조건에서 각각 q축 전류의 고조파와 상전류의 고조파를 검출하여 각 성분을 주기 함수로 재구성한 결과 q축 전류를 이용한 방식이 파형의 변동 폭이 작아 고조파 해석 오차가 작아짐을 확인 하였다. 따라서 본 논문에서는 구동 시스템의 고장 검출을 위해 q축 전류의 2차 고조파를 관찰하는 방식을 사용한다.

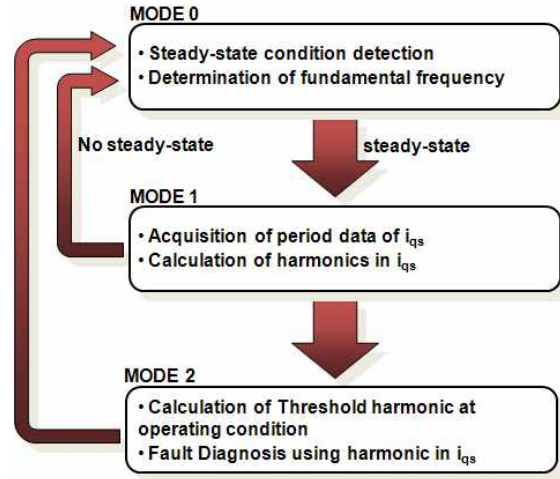
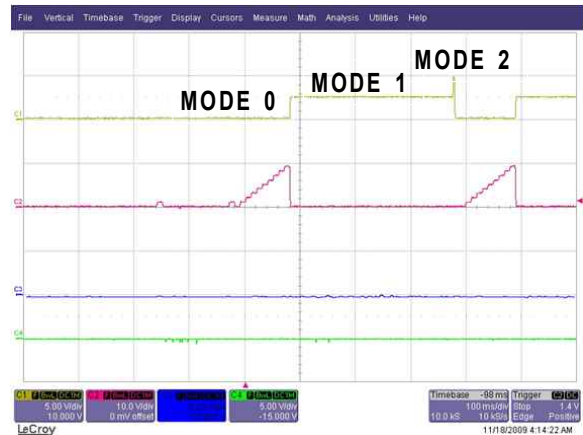


그림 4 고장 진단 동작 모드
 Fig. 4 Operating mode for fault diagnosis



MODE[1/2.5V], speed_ss_flag[1/1V],
 fault_index[1/1V], fault_flag[1/5V]

그림 5 정상상태 조건 검사
 Fig. 5 Detection of steady-state condition

고장 검출을 위해 q축 전류의 2차 고조파를 계산하기 위해서는 시스템이 정상상태일 필요가 있다. 그림 4는 고장 검출을 위한 구동 시스템의 정상상태 요구조건 등을 고려한 고장 진단 동작 모드를 나타낸다. 우선 동작모드 0에서는 정상상태에서만 고조파 특성이 분석될 수 있으므로 속도 변화를 이용하여 구동 시스템이 정상상태에 도달하였는지 여부를 조사한다. 이는 현재 속도와 전 스텝에서의 속도 차이를 비교하여 다음 식과 같이 속도 변화가 이전 속도 값의 1% 이하인지를 조사함으로써 결정한다.

$$|\omega_r - \omega_{r,prev}| \leq |0.01 \cdot \omega_{r,prev}| \quad (12)$$

정상상태 조건의 정확성을 위해 식 (12)의 조건이 10회 이상 만족되면 정상상태로 간주하였다. 정상상태 조건이 만족되지 않으면 동작모드 0에서 계속 대기하며 정상상태 조건 만족 시 속도 정보로부터 고조파 해석을 위한 기본파 주파수, 주기, 및 주기 데이터 수를 결정하고 동작 모드 1로 전환한다. 이 때 기본파 주파수는 속도 정보로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\omega_o = 2\pi P \frac{\omega_{r, rpm}}{60} \quad [\text{elec rad/sec}] \quad (13)$$

그림 5는 정상상태 조건 검사 과정을 나타낸다. 두 번째 파형인 “speed_ss_flag”는 식 (12)가 만족되는 횟수를 나타내며 진단 알고리즘은 식 (12)가 연속으로 10회 이상 만족될 때 구동 시스템의 정상상태 도달 여부를 확인하고 동작 모드를 1로 전환함을 확인할 수 있다.

정상상태 조건이 만족되는 동작모드 1에서는 고장을 판별하기 위해 q축 전류의 주기 데이터를 수집하여 q축 전류에 포함된 2차 고조파를 계산한다. q축 전류의 2차 고조파 계산 수행을 완료하면 진단 알고리즘은 동작모드 2로 전환하여 주어진 동작 조건에서 고장 여부를 판별한다. 고장 판별을 위해서는 q축 전류의 평균치와 2차 고조파 값만이 필요하므로 고조파 분석은

Fourier series를 이용하여 수행된다. 주기 파형을 나타내는 Fourier series의 관계식이 식 (14)에서 (19)에 나타나 있다.

$$f(t) = a_v + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t) \quad (14)$$

$$\text{여기서 } a_v = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt \quad (15)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \cos(k\omega_0 t) dt \quad (16)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \sin(k\omega_0 t) dt \quad (17)$$

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

$$f(t) = a_v + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t - \theta_n) \quad (18)$$

$$\text{여기서 } a_n - jb_n = A_n \angle -\theta_n \quad (19)$$

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

본 논문에서는 고조파 분석 데이터 수를 늘려 보다 정확한 고조파 성분을 검출하기 위해 q축 전류의 12 주기 데이터를 사용하였으며 구해진 2 고조파 데이터를 Moving Average로 평균하여 고장 판별에 사용하였다.

q축 전류의 평균치와 2차 고조파 계산을 완료하면 진단 모드인 동작모드 2로 전환하여 동작 조건에서의 고장 판별이 이루어진다. 그림 6은 고조파와 선형 보간법을 이용한 고장 진단 방법을 나타낸다. 고장 판별을 위해 q축 전류의 2차 고조파를 검출할 수 있는 알고리즘이 DSP로 구현되어 그림 6에서와 같이 고장이 없는 정상조건에서 무부하시 및 0.4Nm의 부하시 각각 6개의 속도 영역에서 q축 전류의 2차 고조파가 검출된다. 1000 rpm ~ 2000 rpm까지 6개의 동작속도에서 측정된 q축 전류의 2차 고조파 데이터를 토대로 선형 보간법을 이용하여 임의의 특정 동작속도에서의 2차 고조파가 구해질 수 있다. 임의의 특정 동작속도 조건에서 구해진 2차 고조파는 무부하시 및 부하시의 데이터를 토대로 다시 선형 보간법을 이용하여 q축 전류 레벨 (평균치) 변화에 따른 값으로 보정된다.

표 1은 선형 보간법을 이용하여 임의의 동작속도에

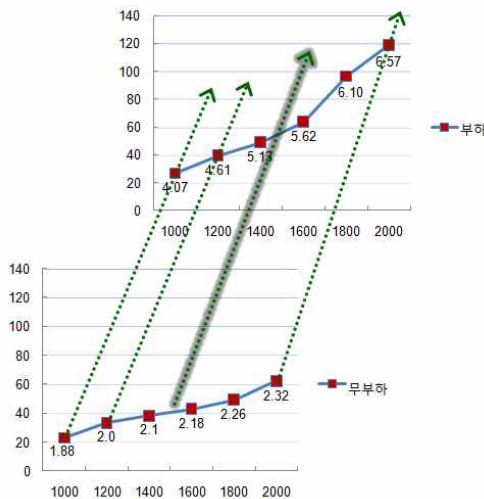


그림 6 선형 보간법을 이용한 정상 동작 조건에서의 q축 전류 2차 고조파 계산

Fig. 6 Calculation of second order harmonic in q-axis current using linear interpolation

서의 2차 고조파를 결정하는 방법을 나타낸다. 표 1의 처음 두 행은 그림 6의 1000 rpm과 1200 rpm에서 측정된 데이터를 나타내며 마지막 행은 선형 보간법을 이용해 결정된 q축 전류의 평균치와 2차 고조파를 나타낸다. 다른 임의의 속도에서도 유사한 방법으로 전류의 평균치와 고조파를 결정할 수 있다.

표 1 선형 보간법을 이용한 임의의 동작속도에서의 2차 고조파 결정

Table 1 Determination of second order harmonic at arbitrary speed using interpolation

속도[rpm]	무부하		부하	
	iq 평균 [A]	2 고조파[mA]	iq 평균 [A]	2 고조파[mA]
1000	1.88	23.0	4.07	26.7
1200	2.00	33.2	4.61	39.4
1100	1.94	28.1	4.34	33.05

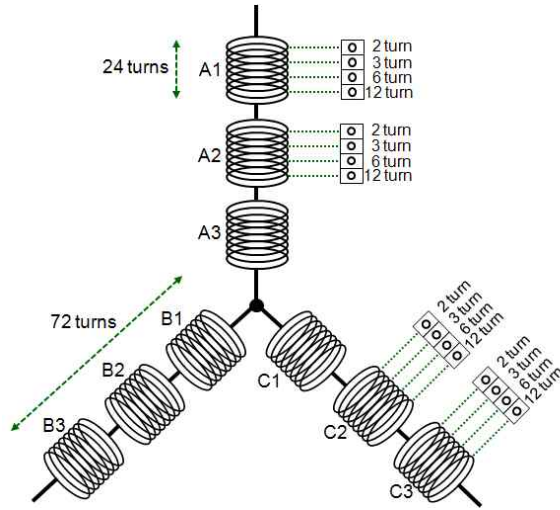
표 1의 마지막 행과 같이 임의의 동작속도에서 q축 전류의 평균치와 2차 고조파가 결정되면 다시 선형 보간법으로 주어진 동작속도에서 전류 레벨 변화에 따른 고조파가 식 (20)과 같이 결정된다.

$$h_{iq2,threshold} = \frac{h_{iq2,b} - h_{iq2,a}}{i_{qavg,b} - i_{qavg,a}} (i_{qavg} - i_{qavg,a}) + h_{iq2,a} \quad (20)$$

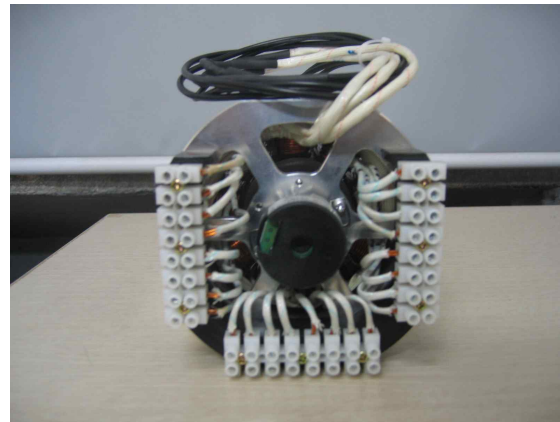
여기서 $i_{qavg,b}$ 와 $h_{iq2,b}$ 는 각각 부하 조건에서 결정된 q축 전류의 평균치와 2차 고조파이며 $i_{qavg,a}$ 와 $h_{iq2,a}$ 는 각각 무부하 조건에서 결정된 q축 전류의 평균치와 2차 고조파이다. 식 (20)에서 결정된 $h_{iq2,threshold}$ 는 임의의 동작속도 및 전류 조건에서 고장이 없는 구동 시스템이 가지게 되는 q축 전류의 2차 고조파를 나타낸다. 본 논문에서의 고장 진단은 선형 보간법을 이용하여 정상 동작 조건에서 계산된 이 값과 실시간으로 구해지는 구동 시스템의 q축 전류 2차 고조파를 비교함으로써 고정자 권선 고장 여부를 판별하는 것으로 이를 위해 다음의 고장 지수가 정의된다.

$$\text{Fault index} = \frac{h_{iq2}}{h_{iq2,threshold}} \quad (21)$$

식 (21)에서 고장 지수가 1 보다 크다는 것은 시스템이 고장이 없는 정상 조건에서 운전될 때 가지게 되는 전류의 2차 고조파보다 현재 상태의 2차 고조파가 더 크다는 것을 의미한다. 본 논문에서는 확실한 고장의 검출을 위해 고장 지수가 1.5 이상일 때 고장으로



(a) 권선 구조



(b) 외형

그림 7 고장 검출 실험에 사용된 전동기의 구조
Fig. 7 Configuration of test motor used for fault detection

판단하여 고장 플래그 (Fault flag)를 1로 설정하고 Fault flag=1이 유지되는 횟수를 Fault count로 카운트하여 10회 이상일 때 고장으로 진단하도록 구성하였다. 이상의 방법을 요약하면 다음과 같다.

- 시스템 정상 조건에서 각각 무부하 및 부하 시 몇 개의 속도 영역에서 q축 전류 2차 고조파 계산
- 선형 보간법을 이용하여 임의의 동작속도에서의 2차 고조파 결정
- 무부하 및 부하 시 데이터와 식 (20)을 이용하여 q축 전류 레벨 변화에 따른 2차 고조파 계산
- 고장 지수 계산

- 고장 지수가 1.5 이상이면 Fault flag를 1로 설정
- Fault flag=1이 10회 이상 유지되면 고장으로 진단하고 고장을 인식

4. 전체 시스템 구성

그림 7은 고장 검출 실험에 사용된 PMSM의 직렬 권선 구조와 외형을 나타낸다. 고정자의 3상 권선은 각각 24턴의 3개 직렬 권선으로 구성되어 중성점에 연결되어 있으며 인위적인 권선 단락에 의한 고장을 발생시키기 위해 그림 7(a)와 같이 고정자 권선의 2, 3, 6, 및 12번째 턴에 탭 단자를 구성하였다. 각 탭 단자를 연결하여 발생할 수 있는 고정자 권선 단락의 양은 전체 권선의 1/72에서 최대 1/6까지이며 고장 검출 실험에는 1/36 (FTR = 2.78%), 1/24 (FTR=4.17%), 및 1/12 (FTR=8.33%)의 권선 단락이 사용되었다.

그림 8은 실험 시스템의 구성을 나타낸다. 전체 시스템은 속도 제어기, 전류 제어기, 인버터, 및 PMSM으로 구성된다. 전체 알고리즘은 32-bit 부동소수점 DSP인 TI사의 TMS320F28335 프로그램에 의해 구현되었다. DSP TMS320F28335은 연산 속도가 빠르고

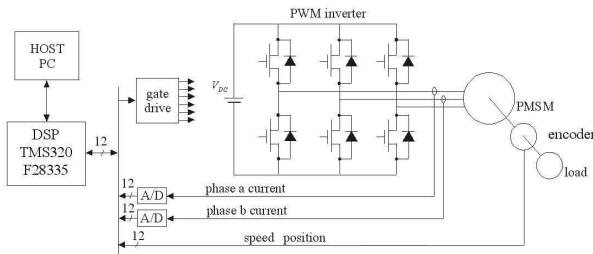


그림 8 실험 시스템의 구성
Fig. 8 Configuration of the experimental system

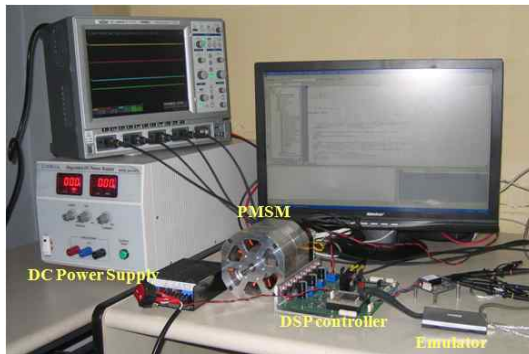
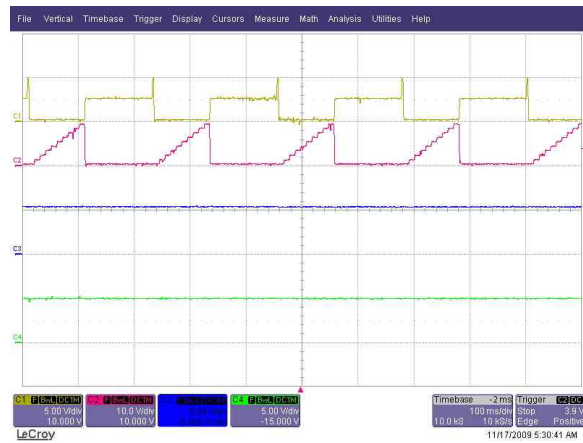


그림 9 실험 시스템 사진
Fig. 9 Experimental system



MODE[1/2.5V], speed_ss_flag[1/1V],
fault_index[1/1V], fault_flag[1/5V]
(a) 고정자 권선 1/36 단락 (FTR=2.78%)



MODE[1/2.5V], speed_ss_flag[1/1V],
fault_index[1/1V], fault_flag[1/5V]
(b) 고정자 권선 1/24 단락 (FTR=4.17%)

그림 10 무부하 2000 rpm에서 고정자 권선 고장 시 진단 실험 결과
Fig. 10 Experimental results for fault detection at no load 2000 rpm

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
쇄교 자속	0.017 Wb	고정자 저항	0.25 Ω
인덕턴스	2.5 mH		

내장 메모리를 보유하고 있으며 AD Converter와 PWM 포트 등이 내장되어 있다^[9]. 샘플링 시간은 100

[μsec]로 설정된다. 전동기는 10 kHz 스위칭 주파수의 3상 PWM 인버터로 구동되며 PWM으로 공간 벡터 PWM 기법이 사용된다^[11]. 회전자 위치는 엔코더를 통해 감지되어 DSP의 내장 eQEP 모듈에 의해 입력되고 각 상전류는 전류 센서를 통해 측정되어 $40/2^{11}$ [A]의 분해능으로 12-bit A/D 컨버터에 의해 DSP에 입력된다. 그림 9는 시험 전동기, 인버터, 및 에플레이터 등으로 구성된 전체 실험 시스템의 구성을 나타낸다. 시험 전동기의 정격 및 파라미터는 표 2에 나타난다.

속도 제어기로는 PI 제어기가 사용되었으며 속도 제어기 이득은 $k_p=0.07$, $k_f=0.07$ 이다. 내부 루프의 전류 제어기로는 동기좌표계 PI 비결합 전류 제어기^[12] 사용되었으며 전류 제어기의 대역폭은 200 Hz로 설정되었다^[13]. 또한, 3절에서 설명된 고정자 권선 고장을 검출할 수 있는 진단 알고리즘이 구현되었으며 시스템이 정상인 상태에서 q축 전류의 2차 고조파를 검출할 수 있는 알고리즘이 DSP로 구현되어 그림 6의 데이터가 사전에 측정되었다.

5. 실험결과

이 절에서는 제안된 고장 진단 알고리즘의 타당성과 유용성을 입증하기 위해 여러 고정자 권선 고장 및 동작 조건에서의 고장 검출 결과를 제시한다.

그림 10은 무부하 2000 rpm에서 각각 고정자 권선의 1/36 및 1/24이 단락되었을 때의 권선 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. 동작 모드 0에서 식 (12)가 10회 이상 만족되는지 확인하며 정상상태 플래그가 10이 되는 순간 동작 모드가 1로 전환되어 데이터 수집 및 고조파 분석이 이루어진다. 계산된 고조파와 식 (20) 및 (21)을 이용하여 고장지수가 계산된다. 고정자 권선의 1/36이 단락 고장일 때 고장지수는 3.06이며 이는 정상인 조건에서의 동일 속도, 동일 전류 레벨에 비해 q축 전류의 2차 고조파가 60mA에서 180mA 정도로 3배 정도 증가하였음을 의미한다. 고장지수가 1.5 보다 크므로 고장으로 진단되어 고장 플래그가 1로 설정된다. 고정자 권선의 1/24이 단락 고장일 때 고장지수는 5.34이며 마찬가지로 고장지수가 1.5 이상의 값이므로 고장 플래그가 1로 설정된다.

그림 11은 부하 시 2000 rpm에서 각각 고정자 권선의 1/36 및 1/24이 단락되었을 때의 권선 고장 검출 결과를 나타낸다. 고정자 권선의 1/36 및 1/24이 단락



MODE[1/2.5V]), speed_ss_flag[1/1V],
fault_index[1/1V], fault_flag[1/5V]
(a) 고정자 권선 1/36 단락 (FTR=2.78%)



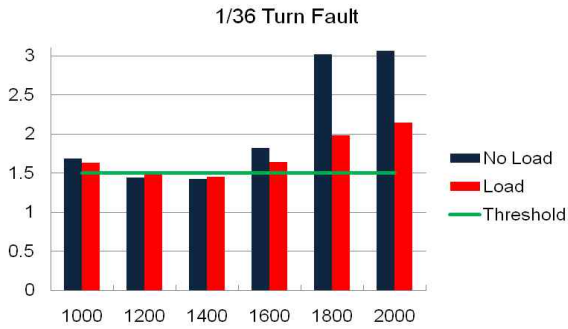
MODE[1/2.5V], speed_ss_flag[1/1V],
fault_index[1/1V], fault_flag[1/5V]
(b) 고정자 권선 1/24 단락 (FTR=4.17%)

그림 11 부하 2000 rpm에서 고정자 권선 고장 시 진단 실험 결과

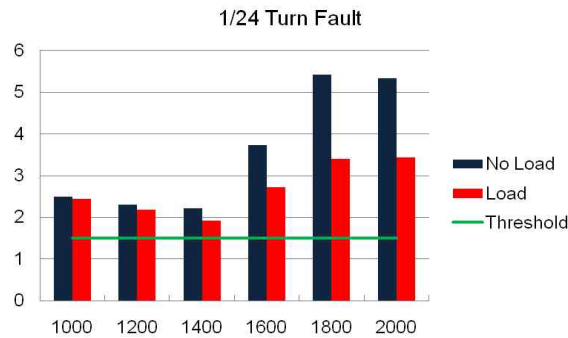
Fig. 11 Experimental results for fault detection at 2000 rpm with load

고장일 때 고장지수는 각각 2.15 및 3.44 정도로 이는 역시 1.5 이상의 값이므로 고장으로 판단됨을 확인할 수 있다.

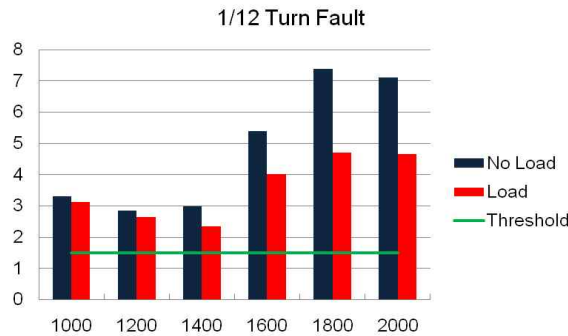
그림 12는 무부하 및 부하 시 여러 동작 속도에서의 고정자 권선 고장 검출 실험 결과를 나타낸다. 그림에 고장으로 판별되는 기준인 고장지수 1.5 값이 문턱 값 (Threshold)으로 함께 나타나 있다. 그림 12(a)는 고정자 권선의 1/36이 단락 (FTR=2.78%) 되었을 때의 고장 검출 결과로 권선 단락 정도가 작은 1/36의 권선 고장에서는 1000 rpm에서 1400 rpm의 속도 영역에서



(a) 고정자 권선 1/36 단락 (FTR=2.78%)



(b) 고정자 권선 1/24 단락 (FTR=4.17%)



(c) 고정자 권선 1/12 단락 (FTR=8.33%)

그림 12 무부하 및 부하 시 여러 동작 속도에서의 고정자 권선 고장 검출 실험 결과

Fig. 12 Experimental results for stator turn fault detection at various operating speeds

고장지수가 1.43에서 1.69 정도로 고장 판별의 경계선 근처에 놓여 있음을 확인할 수 있다. 일반적으로 권선 단락에 의한 고장 시 q축 전류의 2차 고조파 성분은 단락 권선의 양과 단락된 경로의 역기전력, 따라서 속도에 비례하게 된다. 이와 같은 이유로 1/36의 권선 고장에서 1400 rpm 이하 영역은 단락 권선의 양이 작고

동작 속도 역시 작아 q축 전류의 2차 고조파 성분이 크게 증가하지 않아 고장 판별이 명확히 이루어지지 않음을 확인할 수 있다. 하지만, 그림 12(b)와 (c)에서와 같이 1/24과 1/12의 권선 단락에서는 단락 권선의 양이 증가하여 고장지수가 전 속도 영역에서 2.2 이상의 값을 가지며 1000 rpm 이상의 모든 속도 영역에서 명확한 고장 검출이 이루어짐을 확인할 수 있다. 실험 결과 고장 권선의 양이 작을 경우 높은 속도에서만 명확한 고장 검출이 가능 하였으나 고장 권선의 양의 증가할수록 보다 낮은 속도에서도 고장 검출이 가능 하였다. 권선 고장 정도가 가장 낮은 1/72의 권선 단락 (FTR =1.39%) 에서는 1800 rpm 이상의 속도 영역에서만 고장이 검출됨을 확인할 수 있다.

표 3에서 표 5는 고정자 권선의 1/36, 1/24, 및 1/12의 권선 단락 시 진단 실험을 수행한 결과인 그림 12의 결과 데이터를 도표로 정리한 것이며 각 표에는 진단 실험 결과인 고장 플래그 (fault flag) 및 고장지수 (fault index)가 나타나 있다. 보다 효과적인 신호 처리 방법의 채택 및 정확한 고조파 해석을 통해 고조파 계산의 정확도를 높일 수 있다면 고장지수의 고장 판별 기준을 1.5 이하로 낮출 수 있으며 이 경우 보다 낮은 단락 권선의 정도와 속도 영역에서도 고장 검출이 가능한 시스템을 구축할 수 있다고 판단된다.

표 3 1/36 권선 고장 시 고장 검출 실험 결과(FTR=2.78%)

Table 3 Fault detecting results under 1/36 stator turn fault

1/36 Turn Fault	No Load Condition			Load Condition		
	Fault flag	Fault count	Fault index	Fault flag	Fault count	Fault index
1000 rpm	1	10	1.69	1	10	1.63
1200 rpm	0	0	1.44	0	0	1.48
1400 rpm	0	0	1.43	0	0	1.45
1600 rpm	1	10	1.82	1	10	1.64
1800 rpm	1	10	3.02	1	10	1.98
2000 rpm	1	10	3.06	1	10	2.15

표 4 1/24 권선 고장 시 고장 검출 실험 결과(FTR=4.17%)

Table 4 Fault detecting results under 1/24 stator turn fault

1/24 Turn Fault	No Load Condition			Load Condition		
	Fault flag	Fault count	Fault index	Fault flag	Fault count	Fault index
1000 rpm	1	10	2.5	1	10	2.44
1200 rpm	1	10	2.3	1	10	2.19
1400 rpm	1	10	2.22	1	10	1.93
1600 rpm	1	10	3.73	1	10	2.73
1800 rpm	1	10	5.42	1	10	3.41
2000 rpm	1	10	5.34	1	10	3.44

표 5 1/12 권선 고장 시 고장 검출 실험 결과(FTR=8.33%)
Table 5 Fault detecting results under 1/12 stator turn fault

1/12 Turn Fault	No Load Condition			Load Condition		
	Fault flag	Fault count	Fault index	Fault flag	Fault count	Fault index
1000 rpm	1	10	3.31	1	10	3.12
1200 rpm	1	10	2.85	1	10	2.65
1400 rpm	1	10	2.98	1	10	2.35
1600 rpm	1	10	5.4	1	10	4.01
1800 rpm	1	10	7.39	1	10	4.71
2000 rpm	1	10	7.11	1	10	4.66

6. 결 론

영구자석 동기전동기에서 고정자 권선의 단락(short-circuited turn)으로 인해 발생하는 권선 고장을 동작 중 실시간으로 검출할 수 있는 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 고조파 해석을 통해 q축 전류의 2차 고조파를 관찰함으로써 이루어지며 고장이 없는 정상 조건에서의 고조파 데이터와 비교를 통해서 고장을 판별한다. 임의의 정상 동작 조건에서의 고조파 데이터는 선형 보간법과 몇 개의 사전 측정된 고조파 데이터를 통해서 구해진다. 제안된 고장 검출 기법의 타당성을 입증하기 위해 내부 고정자의 권선 단락이 가능한 전동기가 제작되었으며 전체 구동 시스템과 고조파 분석 알고리즘 및 고장 검출 알고리즘이 DSP TMS320F28335에 의해 구현되어 실험이 수행되었다. 진단 실험 결과로, 고정자 권선 고장 FTR=2.78%에서는 1600 rpm 이상의 속도 영역에서, 보다 고장의 정도가 큰 FTR=4.17% 이상에서는 1000 rpm 이상의 대부분 속도 영역에서 고장 판별이 가능함을 확인할 수 있다. 제안된 방법은 부가적인 진단 장비 없이 제어기가 q축 전류의 2차 고조파를 계산함으로써 구현 가능하며 정상 상태 조건만 만족된다면 동작 중 on-line 방식으로 고장을 검출할 수 있어 유용하게 적용될 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [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. on Ener. Conv.*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-8, 2006.
- [2] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and P. Vas, "Recent developments of induction motor drives fault diagnosis using AI techniques", *IEEE Trans. on Ind. Elec.*, Vol. 47, No. 5, pp. 994-1004, 2000.
- [3] R. M. Tallam, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Stator winding turn-fault detection for closed-loop induction motor drives", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 39, No. 3, pp. 720-724, 2003.
- [4] 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. on Ener. Conv.*, Vol. 20, No. 2, pp. 253-259, 2005.
- [5] 박현준, 장동욱, 김길동, 최종선, 김정수, "과도서지에 의한 건인전동기 고정자 코일의 상태진단 연구", *전력전자학회 논문지*, 제8권, 제3호, pp. 247-252, 2003. 6.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 이정대, 박병건, 김태성, 류지수, 현동석, "BLDC 전동기 운전 특성을 이용한 고장 검출 기법 구현", *전력전자학회 논문지*, 제13권, 제2호, pp. 88-95, 2008. 4.
- [9] TMS320F28335 Digital Signal Controller (DSC) - Data Manual. Texas Instrument, 2008.
- [10] P. C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", New York, McGraw-Hill, 1986.
- [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. on Ind. Appl.*, Vol. 24, No. 1, pp. 142-150, 1988.
- [12] T. M. Rowan and R. J. Kerkman, "A new synchronous current regulator and an analysis of current-regulated PWM inverters", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 22, No. 4, pp. 678-690, 1986.
- [13] R. C. Dorf and R. H. Bishop, "Modern Control Systems", Prentice-Hall International Editions, 2005.
- [14] A. Stavrou, H. G. Sedding, and J. Penman, "Current monitoring for detecting inter-turn short circuits in induction motors", *IEEE Trans. on Ener. Conv.*, Vol. 16, No. 1, pp. 32-37, 2001.
- [15] R. R. Schoen, B. K. Lin, T. G. Habetler, J. H. Schlag, and S. Farag, "An unsupervised, on-line system for induction motor fault detection using stator current monitoring", *IEEE Trans. on Indus. Appl.*, Vol. 31, No. 6, pp. 1280-1286, 1995.

저 자 소 개



김경화(金庚和)

1969년 3월 11일생. 1991년 한양대 전기공학과 졸업. 1993년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 졸업(공학). 1998년~2000년 삼성전자 선임연구원. 2000년~2002년 KAIST 연구교수. 2002년~현재 서울산업대 전기공학과 부교수, 당 학회 JPE 편집위원.



구본관(具本琯)

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



정인성(鄭因城)

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