

# 연동해석을 통한 영구자석 동기전동기의 오프라인 Inter-Turn 고장진단법

## A Method for Offline Inter-Turn Fault Diagnosis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor through the Co-Analysis

조수영\* · 오예준\* · 이강석\* · 배재남\*\* · 이주†  
(Sooyoung Cho · Ye Jun Oh · GangSeok Lee · Jae-Nam Bae · Ju Lee)

**Abstract** - In this paper, inter-turn fault diagnosis of the interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) is performed in offline state by linking the finite element analysis (FEA) tool and control simulation tool. In order to diagnose the inter-turn fault, it is important to select the current value to determine the fault. First, the basic principles for inter-turn fault diagnosis of IPMSM are explained and co-analysis model for fault diagnosis is constructed. Further, in order to select the appropriate high frequency voltage, the change of the current value to be judged as failure was analyzed at various voltage and frequency conditions, and the change of the current value according to the number of the failed windings was analyzed. Finally, the current value to be judged as failure is selected.

**Key Words** : Interior permanent magnet synchronous motor(IPMSM), Fault diagnosis, Inter-turn fault, Co-analysis, Fault resistance

### 1. 서론

영구자석 동기전동기(interior permanent magnet synchronous motor ; IPMSM)는 설계 및 제어 성능 개선에 대한 연구가 주를 이루었지만, 최근에는 전동기의 신뢰성 향상을 위해서 고장진단의 중요성이 증가하고 있다. 고장진단은 크게 온라인방식과 오프라인 방식으로 나눌 수 있다. 먼저 온라인 고장진단은 운전 중에 고장을 검출할 수 있는 방법으로써 인버터가 상시 구동되는 어플리케이션에 적용할 경우 유용하다. 하지만 온라인 방식은 전동기 제어와 고장진단 알고리즘이 동시에 수행되기 때문에 DSP(digital signal processor)의 부하를 증가시킨다. 따라서 고장진단 알고리즘의 간소화가 요구되며 이는 진단 성능을 저하시키게 된다[1,2]. 또한 차량과 같이 잦은 가감속을 수행하는 어플리케이션의 경우 과도 상태에서 수행되기 때문에 정확한 고장 진단이 어렵다. 이와 같은 문제점에 대한 해결책이 오프라인 고장진단법이다. 오프라인 고장진단법은 전동기 정지해 있을 때 수행되기 때문에 외란에 의한 영향을 최소화할 수 있고 정상 상태에서 진단하기 때문에 온라인 고장진단법보다 우수한 성능을 가진다. 또한 EV(electric vehicle)와 같은 차량 어플리케이션에서는 정지와

운행이 반복되므로 오프라인 고장진단법이 적용 가능하다[3].

현재 오프라인 고장진단법은 주로 고주파 주입신호를 이용한 방식이 연구되고 있다. 고주파주입을 이용한 기존의 연구들은 주로 내부 단락저항에 대해서만 다루고 있으며 turn-fault시 발생하는 인덕턴스의 변화에 대해서는 자세히 다루고 있지 않다. 하지만 고장이 발생한 턴 수에 따라서 고장이 발생한 영역과 고장이 발생하지 않은 영역의 인덕턴스 비율이 변화되기 때문에 고장 전류 값이 바뀌게 된다. 따라서 본 논문은 고장이 발생한 턴 수에 따른 영향을 반영하기 위해서 유한요소해석(finite element analysis ; FEA) 툴인 Maxwell과 제어회로 시뮬레이션 툴인 Simpler를 연동하여 오프라인 inter-turn 고장진단 알고리즘을 구현하였다.

논문의 2장에서는 고장진단을 위한 이론을 다루었으며, 3장에서는 연동해석에 사용된 IPMSM의 모델과 고장진단을 위한 제어 블록도를 나타내었다. 4장에서는 고장진단을 위해 인가한 전압의 크기와 고주파수 크기에 따른 고장진단전류의 값을 분석하였다. 또한 고장이 발생한 턴 수에 따른 고장진단전류의 크기도 분석하였다.

### 2. Inter-turn 고장진단을 위한 이론

IPMSM의 고정자 권선에 inter-turn 고장이 발생하면, 고장영역에 고장저항이 병렬로 발생하게 된다. 그림 1은 a상에 inter-turn 고장이 발생하였을 때를 나타내고 있다. 그림을 통해 a상의 저항과 인덕턴스는 고장이 발생한 부분과 고장이 발생하지 않은

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.  
E-mail: julee@hanyang.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.

\*\* Dept. of Electrical Engineering, Dongyang Mirae University, Korea.

Received : November 22, 2017; Accepted : January 30, 2018

부분으로 나누어짐을 확인할 수 있다. 따라서 한 상에 대한 직렬 턴 수와 고장이 발생한 턴 수의 비를 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\mu = \frac{N_f}{N_{ph}} \quad (1)$$

여기서  $N_{ph}$ 는 한 상에 대한 직렬 턴 수를 의미하며,  $N_f$ 는 고장이 발생한 턴 수를 의미한다.

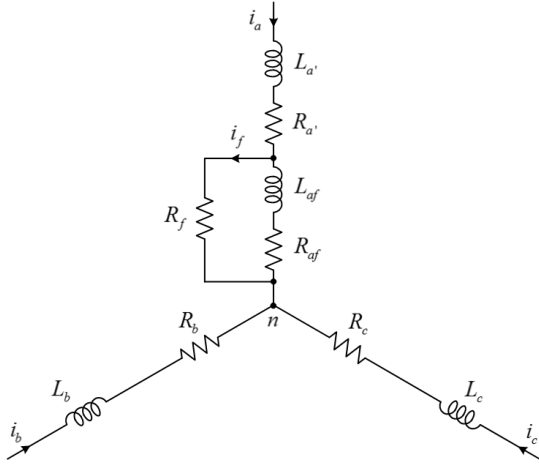


그림 1 Inter-turn 고장 개략도

Fig. 1 Schematic of the inter-turn fault

### 2.1 IPMSM의 방정식

a상 권선에 고장이 발생한 영역과 고장이 발생하지 않은 영역을 가진 IPMSM의 전압방정식은 식 (2)와 같다[4]-[6].

$$\begin{aligned} [v_{abc}] &= [R_{abc}] [i_{abc}] + \frac{d}{dt} ([L_{abc}] [i_{abc}] + [\lambda_{PM,abc}]), \\ [v_{abc}] &= [v_a - v_n, v_b - v_n, v_c - v_n, 0]^T, \\ [i_{abc}] &= [i_a, i_b, i_c, i_f]^T, \\ [R_{abc}] &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & \mu R_s \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ \mu R_s & 0 & 0 & \mu R_s + R_f \end{bmatrix}, \\ [L_{abc}] &= \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} & \mu L_{aa} \\ M_{ab} & L_{bb} & M_{bc} & \mu M_{ab} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_{cc} & \mu M_{ac} \\ \mu L_{aa} & \mu M_{ab} & \mu M_{ac} & \mu^2 L_{aa} \end{bmatrix}, \\ [\lambda_{PM,abc}] &= [\lambda_{PM,a}, \lambda_{PM,b}, \lambda_{PM,c}, \mu \lambda_{PM,a}]^T \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $v_a, v_b, v_c$ 는 각 상의 전압,  $v_n$ 은 중성점 전압,  $i_a, i_b, i_c$ 는 각 상의 전류,  $i_f$ 는 고장저항에 흐르는 전류,  $R_s$ 는 한 상에 대한 고정자 저항,  $R_f$ 는 고장저항,  $L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}$ 는 각 상의 고정자 자기인덕턴스,  $M_{ab}, M_{ac}, M_{bc}$ 는 상호인덕턴스,  $\lambda_{PM,a}, \lambda_{PM,b},$

$\lambda_{PM,c}$ 는 영구자석에 의해 각 상에 쇄교하는 자속이다.

Inter-turn 고장행렬을  $dq0f$  행렬로 변환하기 위해서는 식 (3)에 나타난 Park transform을 사용해야한다.

$$[T_{dq0f}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) & 0 \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 0 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3/2 \end{bmatrix} = T \quad (3)$$

여기서부터는 수식 표현의 간소화를 위해 식 (3)의  $[Tdq0f]$ 를  $T$ 로 대체하겠다.

고장상황에서는 영구자석에 의한 3고조파 요소는 무시할 수 없다. 따라서 영구자석에 의한 자속 중 기본파 요소와 3고조파 요소를 고려하여 전압방정식을  $dq0f$  성분으로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} [v_{dq0f}] &= T \left( [R_{abc}] T^{-1} + [L_{abc}] \frac{dT^{-1}}{dt} + \frac{d[L_{abc}]}{dt} T^{-1} \right) [i_{dq0f}] \\ &+ T [L_{abc}] T^{-1} \frac{d[i_{dq0f}]}{dt} + T \frac{dT^{-1}}{dt} [\lambda_{PM,dq0f}] \\ &+ \frac{d[\lambda_{PM,dq0f}]}{dt}, \\ [v_{dq0f}] &= [v_d, v_q, -v_n, 0]^T, \\ [i_{dq0f}] &= [i_d, i_q, 0, i_f]^T, \\ [\lambda_{PM,dq0f}] &= [\lambda_f, 0, \lambda_{PM,3} \cos 3\theta, \mu \lambda_{PM,a}]^T \end{aligned} \quad (4)$$

이를 정리하여  $d-q$  축 전압을 표현하면 식 (5)와 같고,  $n$  축 전압은 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \lambda_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{df} \\ e_{qf} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} e_{df} \\ e_{qf} \end{bmatrix} &= \frac{2}{3} \mu \begin{bmatrix} R_s \cos\theta i_f + L_d p(\cos\theta i_f) + \omega L_q \sin\theta i_f \\ -R_s \sin\theta i_f - L_d p(\sin\theta i_f) + \omega L_d \cos\theta i_f \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

$$v_n = -\frac{1}{3} \mu R_s i_f - \frac{1}{3} \mu L_s \frac{d}{dt} i_f + 3\omega \lambda_{PM,3} \sin 3\theta \quad (6)$$

여기서  $p=d/dt$ 는 미분연산자이며,  $L_s$ 는 누설인덕턴스이다. 정상상태에서 inter-turn 고장전류는 식 (7)과 같다.

$$i_f = -\frac{\mu(v_a - v_n)}{\mu(1-\mu)R_s + R_f} \quad (7)$$

### 2.2 고주파수 전압을 이용한 Inter-turn 고장진단

IPMSM의 오프라인 inter-turn 고장진단을 위해 고주파수 전압은 인가되어야한다. 고주파수 전압은 고장신호를 증폭시키며 본 논문에서는 식 (8)과 같이 각 상에 고주파수 전압을 인가하였다.

$$[v_{abc}] = \begin{bmatrix} v_{ai} \\ v_{bi} \\ v_{ci} \end{bmatrix} = V_i \begin{bmatrix} \cos\omega_i t \\ \cos(\omega_i t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega_i t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서  $v_{ai}, v_{bi}, v_{ci}$ 는 각 상의 고주파수 전압이고,  $V_i$ 는 주입된 고주파수 크기,  $\omega_n$ 는 주입된 고주파수 각속도이다.

### 2.2.1 고장 발생이 없는 상황

고주파수 인가 시 한 상에 대한 고정자 저항과 영구자석에 의해 고정자권선에 쇄교되는 자속은 무시될 수 있다. 이로 인해 전압방정식은 식 (9)와 같다.

$$[v_{abc}] = \frac{d}{dt}([L_{abc}][i_{abc}]) \quad (9)$$

IPMSM의 3상 전압을  $\alpha$ - $\beta$ 축 정좌표계 전압으로 표현하면 식 (10)과 같다. 이 때  $d$ - $q$ 축 인덕턴스와 회전자 위치각은 변하지 않기 때문에 전류 앞에만 미분연산자가 붙는다.

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha i} \\ v_{\beta i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 - L_2 \cos 2\theta_r & -L_2 \sin 2\theta_r \\ -L_2 \sin 2\theta_r & L_1 + L_2 \cos 2\theta_r \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} i_{\alpha i} \\ i_{\beta i} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$L_1 = \frac{L_d + L_q}{2}, L_2 = \frac{L_q - L_d}{2}$$

여기서  $v_{\alpha i}, v_{\beta i}$ 는  $\alpha$ - $\beta$ 축 고주파수 전압,  $i_{\alpha i}, i_{\beta i}$ 는  $\alpha$ - $\beta$ 축 고주파수 전류,  $L_d, L_q$ 는  $d$ - $q$ 축 인덕턴스,  $\theta_r$ 는 회전자 위치각이다.

$\alpha$ - $\beta$ 축 전류를 표현하면 식 (11)과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha i} \\ i_{\beta i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \cos(\omega_i t - \pi/2) + I_2 \cos(2\theta_r - \omega_i t + \pi/2) \\ I_1 \sin(\omega_i t - \pi/2) + I_2 \sin(2\theta_r - \omega_i t + \pi/2) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$I_1 = \left( \frac{L_1}{L_1^2 - L_2^2} \right) \frac{V_i}{\omega_i}, I_2 = \left( \frac{L_2}{L_1^2 - L_2^2} \right) \frac{V_i}{\omega_i}$$

또한 이를  $d$ - $q$ 축 회전좌표계 전류로 표현하면 식 (12)와 같다.

$$\begin{bmatrix} i_{di} \\ i_{qi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_2 \cos(2\theta_r - 2\omega_i t + \pi/2) \\ -I_1 + I_2 \sin(2\theta_r - 2\omega_i t + \pi/2) \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서  $i_{di}, i_{qi}$ 는  $d$ - $q$ 축 고주파수 전류이다.

$\alpha$ - $\beta$ 축 전류와  $d$ - $q$ 축 전류를 비교해 보면  $d$ - $q$ 축 전류의 주파수가 2배 빠르다는 것을 확인할 수 있다. 또한  $i_{di}$ 의 평균값 0임을 확인할 수 있다.

### 2.2.2 고장 발생 상황

고장상황에서 고주파수 전압이 인가된 전압방정식은 식 (13)과 같다.

$$[v_{abcf}] = \frac{d}{dt}([L_{abcf}][i_{abcf}]) \quad (13)$$

$abcf$  변수 값을  $\alpha\beta 0f$  변수 값으로 변환하기 위해서는 Clarke transform을 이용해야한다.

$$[T_{\alpha\beta 0f}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 & 0 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 & 0 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3/2 \end{bmatrix} = T_{Cf} \quad (14)$$

식 (13)과 (14)를 이용하여  $\alpha$ - $\beta$ 축 전압방정식을 구하면 식 (15)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha i} \\ v_{\beta i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 - L_2 \cos 2\theta_r & -L_2 \sin 2\theta_r \\ -L_2 \sin 2\theta_r & L_1 + L_2 \cos 2\theta_r \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} i_{\alpha i} \\ i_{\beta i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{\alpha i}' \\ e_{\beta i}' \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} e_{\alpha i}' \\ e_{\beta i}' \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \mu \begin{bmatrix} L_1 - L_2 \cos 2\theta_r \\ -L_2 \sin 2\theta_r \end{bmatrix} P i_{fi}$$

여기서  $e_{\alpha i}', e_{\beta i}'$ 는 고장상황에 의해 추가적으로 발생된  $\alpha$ - $\beta$ 축 전압 응답이고,  $i_{fi}$ 는 고장저항에 흐르는 전류이다.

고장상황에서 중성점 전압은 0이 되지 않는다. 따라서 식 (6), (7)에 의해 고장전류는 식 (16)과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} i_{fi} = & -\frac{k_1 V_i}{k_1^2 + k_2^2} \sin \omega_i t - \frac{k_2 V_i}{k_1^2 + k_2^2} \cos \omega_i t \\ & - \frac{9\omega_i \lambda_{PM,3} k_1}{9k_1^2 + k_2^2} \cos 3\omega_i t + \frac{3\omega_i \lambda_{PM,3} k_2}{9k_1^2 + k_2^2} \sin 3\omega_i t, \quad (16) \\ k_1 = & \frac{1}{3} \mu \omega_i L_s, k_2 = \left( 1 - \frac{2}{3} \mu \right) R_s + \frac{R_f}{\mu} \end{aligned}$$

고장상황에서  $\alpha$ - $\beta$ 축 전류를 구하면 식 (17)과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha i}' \\ i_{\beta i}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\alpha i} \\ i_{\beta i} \end{bmatrix} + \frac{2}{3} \mu i_{fi} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서  $i_{\alpha i}', i_{\beta i}'$ 는 고장상황에서  $\alpha$ - $\beta$ 축 고주파수 전류이다.

회전좌표계  $d$ - $q$ 축 상에서 고장전류는 식 (18)과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_{di}' \\ i_{qi}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{di} \\ i_{qi} \end{bmatrix} + \frac{\mu V_i}{3(k_1^2 + k_2^2)} \begin{bmatrix} k_2 (\cos 2\omega_i t + 1) + k_1 \sin 2\omega_i t \\ k_1 (\cos 2\omega_i t - 1) - k_2 \sin 2\omega_i t \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서  $i_{di}', i_{qi}'$ 는 고장상황에서  $d$ - $q$ 축 고주파수 전류이다.

고장상황에서  $\alpha$ - $\beta$ 축 전류와  $d$ - $q$ 축 전류를 비교해 보면  $d$ - $q$ 축 전류의 주파수가 2배 빠르다는 것을 알 수 있다. 또한  $i_{di}'$ 의 평균값은 고장 발생이 없었을 때와 다르게 0이 아닌 것을 확인할 수 있다.

## 3. 연동해석을 통한 고장진단 시스템 구조

고장이 발생한 턴 수에 의존하여 고장이 발생한 영역의 저항 값과 인덕턴스 값은 달라진다. 이로 인해 고장이 발생한 영역의 임피던스가 달라지고, 고장이 발생한 권선과 병렬로 연결된 고정 저항에 흐르는 전류 값은 달라진다. 따라서 각 고장상황에서 임피던스와 전류의 변화를 고려하기 위해서는 연동해석이 필요하다.

### 3.1 IPMSM 모델

그림 2와 표 1은 고장진단을 위한 IPMSM 모델과 사양이다. Inter-turn 고장진단을 위해서 a상 권선은 고장이 발생한 부분과 고장이 발생하지 않은 부분으로 구성되었다.

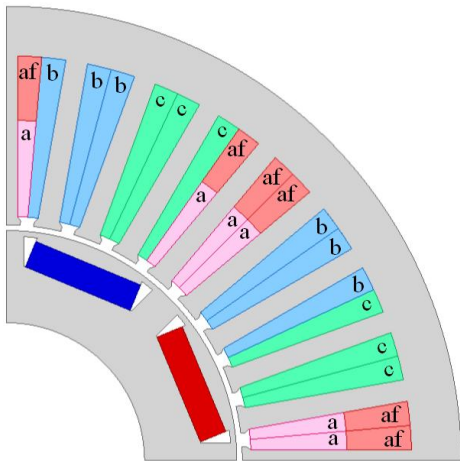


그림 2 IPMSM 모델  
Fig. 2 IPMSM model

표 1 IPMSM 모델의 사양

Table 1 Specification of the IPMSM model

Contents	Value	Unit
Outer diameter of the stator/rotor	165.8/84	mm
Axial length	69	mm
Stator resistance per phase	2.97	$\Omega$
Number of poles	8	-
Rated speed	1,000	rpm
Rated current	5.5	$A_{max}$

### 3.2 연동해석 모델

그림 3은 a상 권선이 분리된 FEA 모델을 이용하여 연동해석 모델을 구축한 회로이며, 그림 4는 고장진단을 위한 제어블럭도를 나타낸다. 또한, IPMSM의 고장진단 알고리즘 블록도는 그림 5와 같다. IPMSM의 inter-turn 고장진단은 3상의 권선에 고주파수 전압을 인가하여 좌표변환을 통해 얻어진 d축 전류의 평균값을 통해 고장을 판단한다. 즉, 고장이 발생하지 않았을 때의 d축 전류 평균값인  $i_{d,h}$ 와 임의의 상태에서의 d축 전류의 평균값인  $i_{d,avg}$  사이의 차가 고장 판단의 기준 전류인  $i_{d,f,d}$  보다 크다면 고장으로 판단하고, 작다면 정상적으로 동작한다고 판단한다. 여기서 고장으로 판단 내릴 d축 전류 값( $i_{d,f,d}$ )은 4장의 다양한 전압과 주파수 조건에 따른 결과를 통해 선정하겠다.

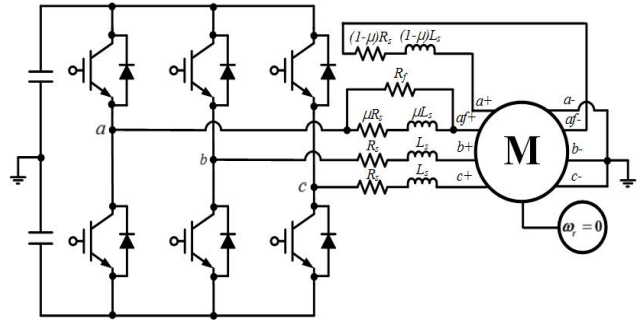


그림 3 고장진단을 위한 연동해석 모델  
Fig. 3 Co-analysis model for fault diagnosis

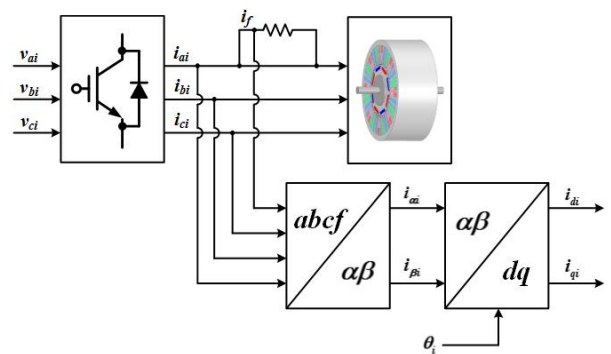


그림 4 고장진단 위한 제어블럭도  
Fig. 4 Control block diagram for fault diagnosis

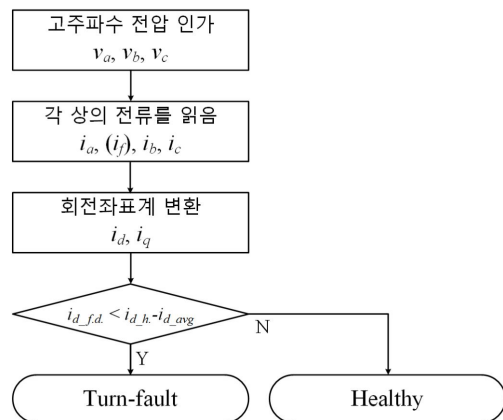


그림 5 IPMSM의 고장진단 알고리즘 블록도  
Fig. 5 Block diagram of fault diagnosis algorithm of IPMSM

## 4. 연동해석을 이용한 고장진단

2장에서 전류는 고주파수 전압의 크기와 고주파수 값의 함수로 표현되었다. 주입된 고주파수는 제어성을 고려하여 스위칭 주파수의 1/10 이하로 선정되어야한다. 본 장에서는 인가된 고주파

수 전압의 크기와 고주파수 값에 따라 고장진단을 위한  $d$ 축 전류의 변화를 분석하였다. 또한 고장이 발생한 권선의 비율에 따라  $d$ 축 전류의 변화를 분석하였다.

**4.1 고주파수 전압의 크기  $V_f$ 와 주입된 고주파수  $f_i$ 에 따른 고장진단**

고주파수 전압의 크기와 고주파수 값에 따른 영향을 알아보기 위하여 표 2와 같은 3가지 경우를 선정하였으며, 이 때 공통 조건은 표 3과 같다.

표 2  $V_f$ 와  $f_i$ 의 시뮬레이션 조건

Table 2 Simulation conditions of  $V_f$  and  $f_i$

Contents	Amplitude of high frequency voltage ( $V_f$ ) [V]	Injected high frequency ( $f_i$ ) [Hz]
조건 1	288.68	500
조건 2	288.68	100
조건 3	57.74	100

표 3 고장진단을 위한 공통 조건

Table 3 Common conditions for fault diagnosis

Contents	Value	Unit
Ratio of the number of faulty winding to the number of series winding per phase ( $\mu$ )	0.4	-
Switching frequency ( $f_{sw}$ )	10	kHz
Stator resistance per phase ( $R_s$ )	2.97	$\Omega$
Fault resistance ( $R_f$ )	0.001, 0.05, 0.1, 1	$\Omega$

**4.1.1 조건 1**

고정자 권선에 고장이 발생하지 않은 상황에서 오프라인 진단 시 3상의 전류는 그림 6과 같다.

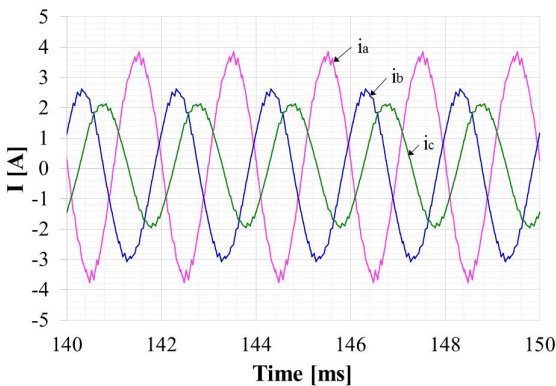


그림 6  $a, b, c$ 상의 전류 (조건 1 : 고장상황이 아닐 때)  
Fig. 6 Currents on  $a, b,$  and  $c$  phases (Condition 1: healthy)

이는 IPMSM의 회전자가 정지한 상태로 3상의 고주파수 전압을 인가하기 때문에, 3상의 전류 값의 크기가 달라진다. 그림 7은 3상의 전류를 정지 및 회전 변환을 통해  $\alpha, \beta, d, q$ 축 전류를 얻은 파형이다. 이 그림을 통해  $d-q$ 축 전류의 주파수가  $\alpha-\beta$ 축 전류의 주파수보다 2배 빠르다는 것을 확인할 수 있다. 그림 8은 고장이 발생하지 않은 상황에서 IPMSM의 인덕턴스 값을 나타낸다.

여러 개의 고장저항 값들 중 0.1[ $\Omega$ ]일 때를 한 예로 들면 다음과 같다. 그림 9는 고장이 발생시 3상의 전류와 고장이 발생한 권선에 흐르는 전류  $i_{af}$ , 고장저항에 흐르는 전류  $i_f$ 를 나타낸다. 이 그림을 통해  $a$ 상의 전류가  $i_{af}$ 와  $i_f$ 로 나뉘어 흐르는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 10은  $\alpha, \beta, d, q$ 축 전류를 나타낸다. 그림 7의  $d$ 축 전류와 그림 10의  $d$ 축 전류를 비교해보면 고장상황 시  $d$ 축 전류의 평균값의 크기가 증가됨을 확인할 수 있다. 고장상황에서 IPMSM의 인덕턴스 값들은 그림 11과 같다.

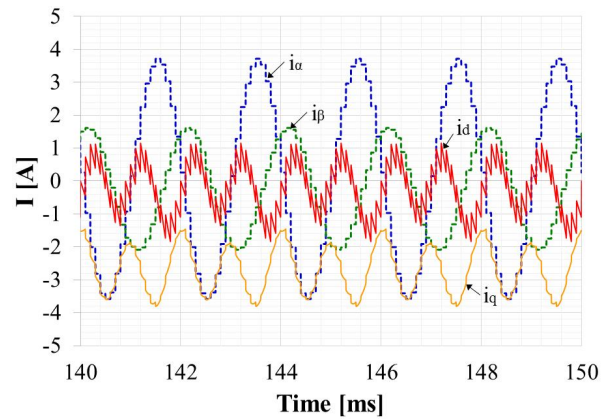


그림 7  $\alpha, \beta, d, q$ 축의 전류 (조건 1 : 고장상황이 아닐 때)  
Fig. 7 Currents on  $\alpha, \beta, d,$  and  $q$  axes (Condition 1: healthy)

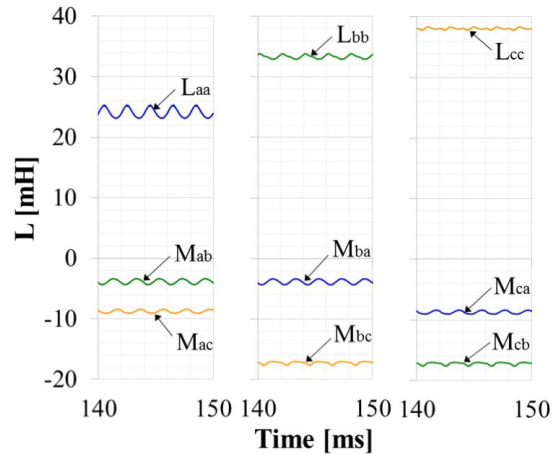


그림 8 인덕턴스 (조건 1 : 고장상황이 아닐 때)  
Fig. 8 Inductances (Condition 1: healthy)

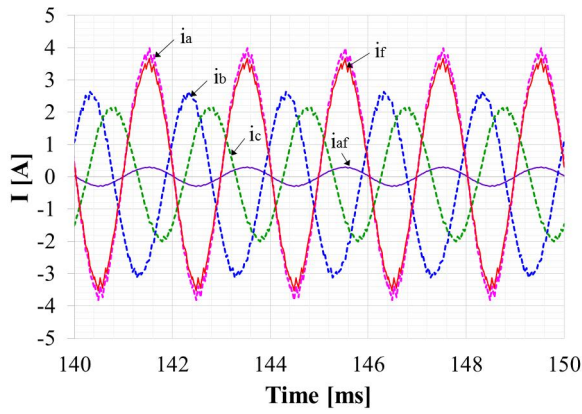


그림 9 a, b, c 상의 전류 (조건 1 :  $R_f=0.1\Omega$ )  
 Fig. 9 Currents on a, b, and c phases (Condition 1:  $R_f=0.1\Omega$ )

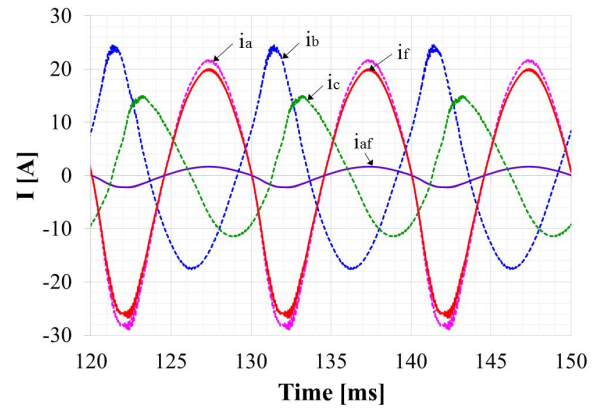


그림 12 a, b, c 상의 전류 (조건 2 :  $R_f=0.1\Omega$ )  
 Fig. 12 Currents on a, b, and c phases (Condition 2:  $R_f=0.1\Omega$ )

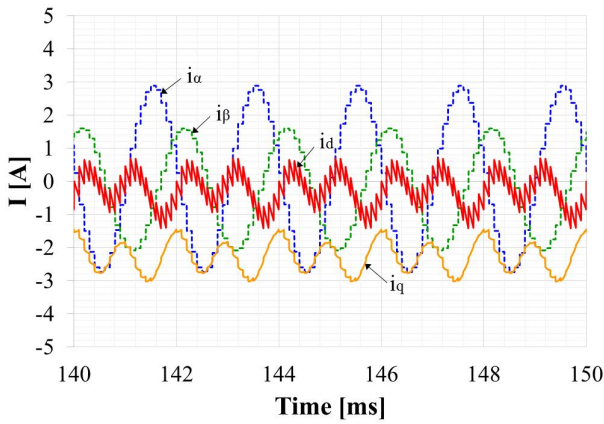


그림 10  $\alpha, \beta, d, q$  축의 전류 (조건 1 :  $R_f=0.1\Omega$ )  
 Fig. 10 Currents on  $\alpha, \beta, d,$  and  $q$  axes (Condition 1:  $R_f=0.1\Omega$ )

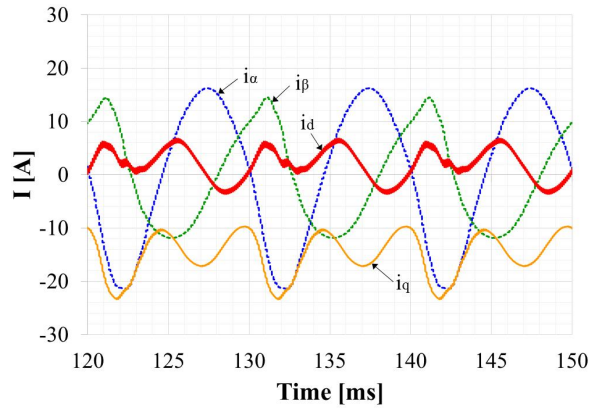


그림 13  $\alpha, \beta, d, q$  축의 전류 (조건 2 :  $R_f=0.1\Omega$ )  
 Fig. 13 Currents on  $\alpha, \beta, d,$  and  $q$  axes (Condition 2:  $R_f=0.1\Omega$ )

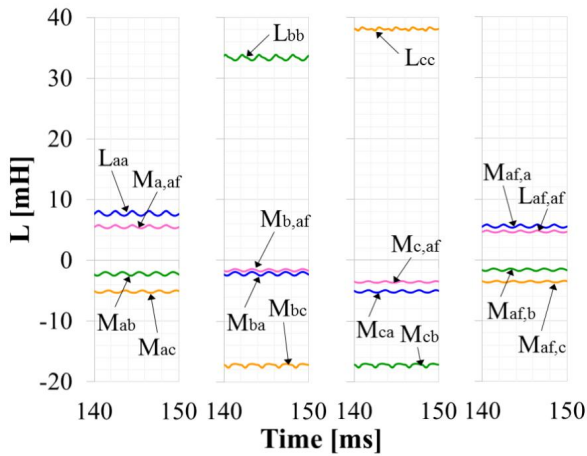


그림 11 인덕턴스 (조건 1 :  $R_f=0.1\Omega$ )  
 Fig. 11 Inductances (Condition 1:  $R_f=0.1\Omega$ )

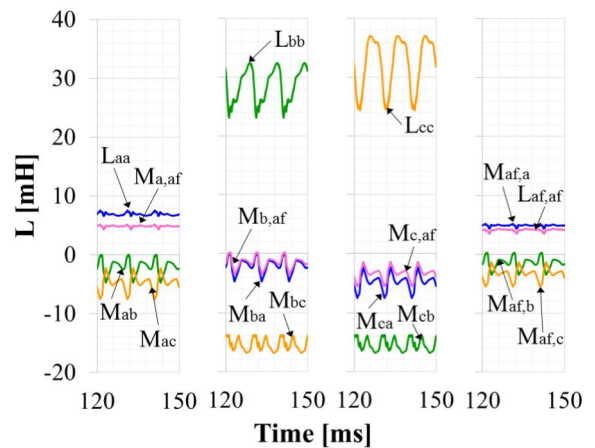


그림 14 인덕턴스 (조건 2 :  $R_f=0.1\Omega$ )  
 Fig. 14 Inductances (Condition 2:  $R_f=0.1\Omega$ )



### 4.1.2 조건 2

조건 1과 동일한 비교를 위하여 여러 개의 고장저항 값들 중 0.1[Ω]일 때를 한 예로 들면 다음과 같다. 그림 12는 고장이 발생한 상황에서 3상의 전류와 고장이 발생한 권선에 흐르는 전류  $i_{af}$ , 고장저항에 흐르는 전류  $i_f$ 를 나타낸다. 그림 13은  $\alpha, \beta, d, q$ 축 전류를 나타낸다. 조건 2에서는 조건 1과 동일한 전압을 가지고 주입된 주파수 값이 1/5이 됨에 따라 전류의 주기가 5배로 증가하였고, 전류의 최댓값들은 약 5~6배가 되었음을 확인할 수 있다. 이는 2장에서 전류 값이 전압에 비례하고 주파수에 반비례한다는 수식에 상응함을 알 수 있다. 또한, 그림 14는 인덕턴스 파형들을 나타낸다.

### 4.1.3 조건 3

조건 1, 2와 동일한 비교를 위하여 조건 3에서도 고장저항 값을 0.1[Ω]일 때를 한 예로 들었다. 그림 15는 고장이 발생한 상

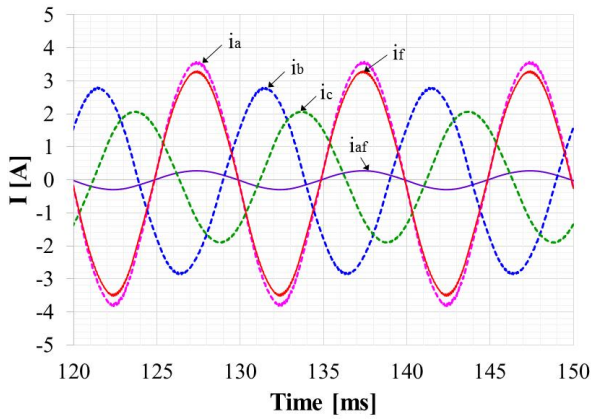


그림 15 a, b, c상의 전류 (조건 3 :  $R_f=0.1\Omega$ )  
 Fig. 15 Currents on a, b, and c phases (Condition 3:  $R_f=0.1\Omega$ )

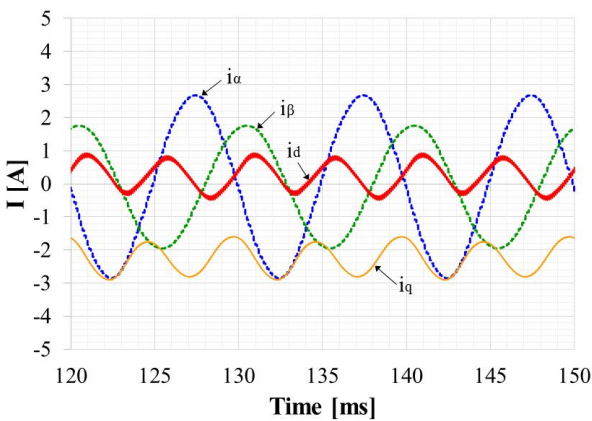


그림 16  $\alpha, \beta, d, q$  축의 전류 (조건 3 :  $R_f=0.1\Omega$ )  
 Fig. 16 Currents on  $\alpha, \beta, d,$  and  $q$  axes (Condition 3:  $R_f=0.1\Omega$ )

황에서 3상의 전류와 고장이 발생한 권선에 흐르는 전류  $i_{af}$ , 고장저항에 흐르는 전류  $i_f$ 를 나타낸다. 그림 16은  $\alpha, \beta, d, q$  축 전류를 나타낸다.

조건 3은 조건 2와 동일한 주파수에서 전압이 1/5로 줄어든 조건이다. 따라서 전류주기는 조건 2와 동일하지만, 인가한 전압의 크기는 전류와 비례한 관계를 가지기 때문에 전류의 피크 값이 약 1/5로 감소함을 확인할 수 있다. 그림 17은 이때의 인덕턴스 파형들을 나타낸다.

### 4.1.4 각 조건에서 고장 저항 값에 따른 d축 전류 변화

표 2에 나타난 3가지 조건에서 고장이 발생하지 않았을 때의 d축 전류 평균값인  $i_{d,h}$ 와 다양한 고장저항 값에 따른 d축 전류 평균값인  $i_{d,avg}$  및 이 둘의 차( $i_{d,h}-i_{d,avg}$ )는 표 4에 나타나있다. 이를 통해  $i_{d,h}-i_{d,avg}$ 의 값이 큰 조건 2가 고장진단을 내리기 위한 적절한 전압과 주파수를 가짐을 알 수 있다.

2장에서 d축 전류는 전압과 주파수의 비에 비례한 값을 가짐

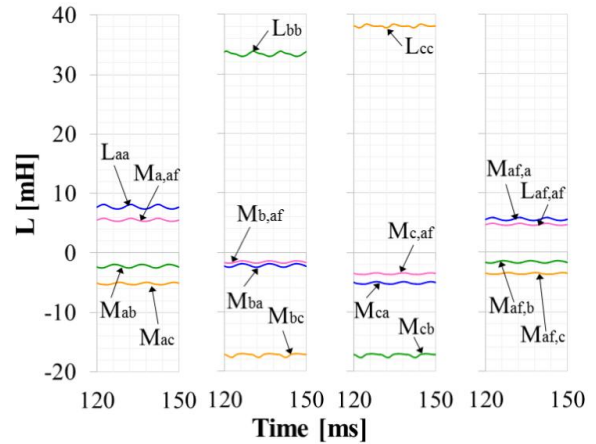


그림 17 인덕턴스 (조건 3 :  $R_f=0.1\Omega$ )  
 Fig. 17 Inductances (Condition 3:  $R_f=0.1\Omega$ )

표 4 조건 1, 2, 3 및 고장저항 값에 따른  $i_{d,h}, i_{d,avg}, i_{d,h}-i_{d,avg}$   
 Table 4  $i_{d,h}, i_{d,avg},$  and  $i_{d,h}-i_{d,avg}$  according to the conditions 1, 2, and 3 and fault resistances

조건 1 ( $i_{d,h} = -0.230$ A)					
	0.001 Ω	0.05 Ω	0.1 Ω	1 Ω	Unit
$i_{d,avg}$	-0.256	-0.256	-0.255	-0.248	A
$i_{d,h}-i_{d,avg}$	0.026	0.026	0.025	0.018	A
조건 2 ( $i_{d,h} = 3.582$ A)					
	0.001 Ω	0.05 Ω	0.1 Ω	1 Ω	Unit
$i_{d,avg}$	1.940	2.000	2.000	2.055	A
$i_{d,h}-i_{d,avg}$	<b>1.642</b>	<b>1.582</b>	<b>1.582</b>	<b>1.527</b>	A
조건 3 ( $i_{d,h} = 0.429$ A)					
	0.001 Ω	0.05 Ω	0.1 Ω	1 Ω	Unit
$i_{d,avg}$	0.224	0.232	0.238	0.312	A
$i_{d,h}-i_{d,avg}$	0.204	0.197	0.190	0.116	A

을 확인하였다. 따라서 조건 2의 전압과 주파수의 비를 이용하여 48[V] 차량용 시스템에 적용하기 위해서는 주파수 값이 16.63 [Hz]가 되어야 한다. 그림 18은 조건 2일 때의 고장저항 값에 따른  $i_{d,h}-i_{d,avg}$  값과 48[V]와 16.63[Hz]가 인가되었을 때의  $i_{d,h}-i_{d,avg}$  값을 비교한 그림이다. 이를 통해 고주파수 전압이 인가되었을 때(조건 2)에는  $i_{d,h}-i_{d,avg}$  값의 차이가 커서  $i_{d,t,d}$  값을 1[A]로 설정한다면 inter-turn 고장진단을 내릴 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 48[V]와 16.63[Hz]의 시스템에 이용된다면  $i_{d,h}-i_{d,avg}$  값이 작기 때문에  $i_{d,t,d}$  값을 0.3[A]로 설정해야만 inter-turn 고장진단을 내릴 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 즉, inter-turn 고장진단은 고주파수 전압 시스템에서 유리하다.

#### 4.2 한 상에 대한 직렬 턴 수에 대한 고장이 발생한 턴 수의 비율에 따른 고장진단

4.1장의 내용을 기반으로 하여 한 상에 대한 직렬 턴 수에 대한 고장이 발생한 턴 수의 비율( $\mu$ )의 변화는 조건 2상태에서 분석하였다. 그림 19는  $\mu$ 값이 0.2, 0.4, 0.6일 때 고장저항 값에 따른  $i_{d,h}-i_{d,avg}$  값을 나타내고 있으며,  $\mu$  값이 큰 값일수록  $i_{d,h}-i_{d,avg}$  값이 커짐을 확인할 수 있다.

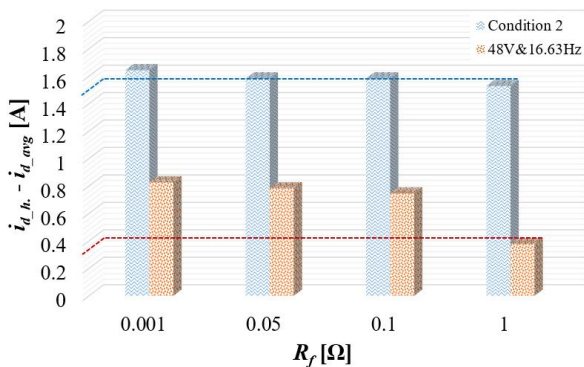


그림 18 조건 2와 48V&16.63Hz시스템의  $i_{d,h}-i_{d,avg}$  값 비교  
 Fig. 18  $i_{d,h}-i_{d,avg}$  value comparison of the condition 2 and 48V&16.63Hz system

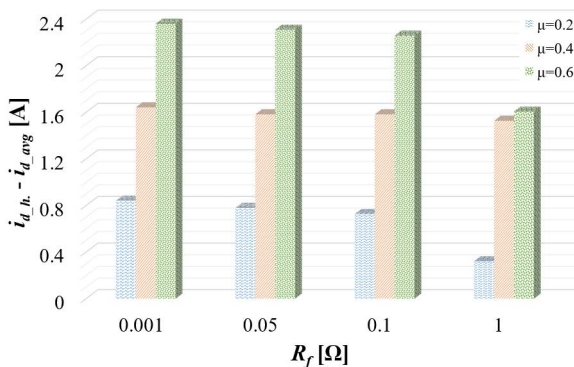


그림 19  $\mu$  값의 변화에 따른  $i_{d,h}-i_{d,avg}$  값의 변화  
 Fig. 19 Variation in  $i_{d,h}-i_{d,avg}$  value based on  $\mu$  value

$\mu$  값이 커진다는 의미는 고장이 발생한 권선의 임피던스가 커진다는 의미이다. 따라서  $\mu$  값이 커짐에 따라서 고장이 발생한 권선의 임피던스가 커져서 고장저항에 흐르는 전류  $i_f$ 가 증가하게 되고 결과적으로  $i_{d,h}-i_{d,avg}$  값이 증가하게 된다.

### 5. 결 론

본 논문은 FEA 툴인 Maxwell과 제어회로 시뮬레이션 툴인 Simplorer를 이용하여 고장진단을 수행하였다. IPMSM의 고정자 권선에 inter-turn 고장이 발생하면 고장이 발생한 턴 수에 따라 임피던스 값이 바뀌게 되고, 고장 진단을 위한 전류 값이 바뀌게 된다. 또한, 고장진단을 위한  $d$ 축 전류의 크기는 인가된 고주파수 전압의 크기에 비례하고 고주파수의 크기에는 반비례한다. 본 논문에서는 앞의 내용을 토대로 하여 inter-turn 고장진단을 위한 적절한 고주파수 전압의 크기와 고주파수 값을 분석하였고, 고장이 발생한 턴 수에 따른 고장전류의 크기를 분석하였다. 이를 통해 inter-turn 고장진단을 내리기 위해서는 조건 2의 고주파수 전압을 선택하는 것이 우수하다는 것을 알 수 있었으며,  $\mu$  값을 고려하여  $i_{d,t,d}$  값을 0.3[A]로 설정해야한다는 것을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20172010105270)  
 이 성과는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. 2016R1A2A1A05005392)

### References

- [1] B. Akin, S. Choi, U. Orguner, and H. A. Toliyat, "A simple real-time fault signature monitoring tool for motor-drive-embedded fault diagnosis systems," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 5, pp. 1990-2001, May 2011.
- [2] S. M. A. Cruz, H. A. Toliyat, and A. J.M. Cardoso, "DSP implementation of the multiple reference frames theory for the diagnosis of stator faults in a DTC induction motor drive," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 2, pp. 329-335, Jun. 2005.
- [3] B. Akin, S. B. Ozturk, H. A. Toliyat, and M. Rayner, "DSP-based sensorless electric motor fault diagnosis tools for electric and hybrid electric vehicle powertrain applications," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 58, no. 6,



pp. 2679-2688, Jul. 2009.

- [4] L. Romeral, J. C. Urresty, J. R. Riba Ruiz, and A. Garcia Espinosa, "Modeling of surface-mounted permanent magnet synchronous motors with stator winding interturn faults," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 5, pp. 1576-1585, May 2011.
- [5] J. C. Urresty, J. R. Riba, and L. Romeral, "Diagnosis of interturn faults in PMSMs operating under nonstationary conditions by applying order tracking filtering," IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 1, pp. 507-515, Jan. 2013.
- [6] B. Du, S. Wu, S. Han, and S. Cui, "Interturn fault diagnosis strategy for interior permanent-magnet synchronous motor of electric vehicles based on digital signal processor," IEEE Trans Ind. Electron., vol. 63, no. 3, pp. 1694-1706, Mar. 2016.
- [7] P. J. Tavner and J. Penman, Condition Monitoring of Electrical Machines. Letchworth, U.K.: Res. Studies Press, 1987.
- [8] S. Cho, H. Ahn, H. C. Liu, H. S. Hong, J. Lee and S. C. Go, "Analysis of Inductance According to the Applied Current in Spoke-Type PMSM and Suggestion of Driving Mode," IEEE Trans. Magn., vol. 53, no. 6, Art. no. 8202404.
- [9] F. Briz, M. W. Degner, A. Zamarron, and J. M. Guerrero, "Online stator winding fault diagnosis in inverter-fed AC machines using high-frequency signal injection," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 4, pp. 1109-1117, Jul./Aug. 2003.

## 저 자 소 개



### 조수영 (Sooyoung Cho)

1991년 5월 17일생. 2013년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2013년~현재 한양대학교 전기공학과 석박사통합과정.  
Tel : 02-2220-0349  
E-mail : jsy0593@naver.com



### 오예준 (Ye Jun Oh)

1983년 7월 20일생. 2010년 명지대 전기공학과 졸업(학사). 2012년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년~2015년 현대모비스 주임연구원. 2015년~현재 한양대 대학원 전기공학과 박사과정.  
Tel : 02-2220-0349  
E-mail : oyejuni@naver.com



### 이강석 (GangSeok Lee)

1988년 10월 09일생. 2013년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2013년~현재 동 대학원 전기공학과 석박사통합과정.  
Tel : 02-2220-0349  
E-mail : gsuoki2001@hanmail.net



### 배재남 (Jae-Nam Bae)

2004년 8월 30일생. 2004년 한양대 전자전기공학부 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년 동 대학원 졸업(박사). 2010~2013 현대중공업. 2013~2015 자동차부품연구원. 2015~현재 동양미래대학교 전기공학과 조교수.  
Tel : 02-2610-1744  
E-mail : jaenam@dongyang.ac.kr



### 이주 (Ju Lee)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대학교 전기생체공학부 교수.  
Tel : 02-2220-0342  
E-mail : julee@hanyang.ac.kr