

# Study on the Offline Inter-turn Fault Diagnosis According to the Parameter of Permanent Magnet Synchronous Motor

영구자석 동기전동기의 파라미터에 따른 오프라인 Inter-turn 고장진단 특성에 대한 연구

Hyunwoo Kim, Yeji Park, Seoung-Taek Oh, Hyungkwan Jang, Jae-Nam Bae, Ju Lee

김현우\* · 박예지\* · 오승택\* · 장형관\* · 배재남\*\* · 이 주<sup>†</sup>

### Abstract

This paper analyzes the characteristic of an inter-turn fault diagnosis according the parameter of permanent magnet synchronous motor (PMSM). If the inter-turn fault occurs in PMSM, the d-axis current is different from the d-axis current in the healthy condition. Through the difference between the d-axis current in the healthy and faulty condition, the inter-turn fault can be detected. Consequently, the magnitude of the d-axis current determined the characteristic of the inter-turn fault diagnosis. The offline diagnosis was performed by applied voltage into the PMSM. The performance of the offline diagnosis depended on the parameter of the PMSM. Thus, the performance of the offline diagnosis was analyzed according parameter of the PMSM that is fault resistance, winding resistance and saliency ratio. In addition, to verify analytical method, inter-turn fault diagnosis is performed by co-analysis that was the link between the finite element analysis (FEA) and the control simulation tool.

### Key Words

Co-analysis, fault diagnosis, finite element analysis (FEA), inter-turn fault, synchronous machine

## 1. 서론

높은 에너지밀도를 가지는 희토류 자석을 이용한 영구자석 동기 전동기는 높은 출력 밀도와 효율을 가지고 있기 때문에 전기 자동차 구동용 전동기로 연구가 활발히 진행되고 있다 [1-3]. 전기 자동차 구동용 전동기로 연구가 활발히 진행함에 따라 안정성의 문제로 전동기의 고장진단에 대한 연구도 진행되고 있다 [4-5]. 전동기의 고장은 그림 1과 같이 기계적 고장 [4], 자기적 고장[6], 전기적 고장[7-8]으로 분류할 수 있으며 가장 치명적으로 일어나는 고장은 절연파괴로 인한 권선 고장이다. 권선 고장은 Inter-turn 고장, 상간의 고장, 상과 접지의 고장 등으로 이루어져 있다[7-8]. 만약 권선 고장이 발생할 경우 과도한 전류가 흐를 수 있으며 권선파괴뿐만 아니라 영구자석의 감자[6]를 발생시킬 수 있다. 이러한 고장을 미리 예측하고 방지할 수 있다면 유지보수 비용을 줄일 수 있기 때문에 고장진단에 대한 여러 가지 연구가 진행되고 있다 [9-10].

Inter-turn 고장은 권선 절연이 파괴됨에 따라 권선과 권선 사이에 고장 저항이 발생하는 고장이다. 권선 고장이 발생할 경우

과도한 전류를 방지하기 위해 인버터로부터 전원을 공급하지 않는다. 하지만 영구자석 기기의 경우 역기전력이 발생하므로 인버터의 스위치를 오프하더라도 Inter-turn 고장에 의한 내부회로를 통해 과도한 순환전류가 발생한다. 따라서 영구자석기기의 경우 Inter-turn 고장은 치명적이며 미리 예측하여 방지해야 한다.



그림 1 전동기 고장 종류  
 Fig. 1 Type of motor fault

일반적으로 고장진단은 온라인과 오프라인 진단법으로 나눌

<sup>†</sup> Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.  
 E-mail: julee@hanyang.ac.kr  
<https://orcid.org/0000-0003-0251-6492>

\* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.  
<https://orcid.org/0000-0003-4121-1851> <https://orcid.org/0000-0002-0095-2103>  
<https://orcid.org/0000-0002-5889-2780> <https://orcid.org/0000-0003-3199-7141>

\*\* Dept. of Electrical Engineering, Dongyang Mirae University, Korea.  
<https://orcid.org/0000-0002-3737-321X>

Received : July 8, 2020 Revised : September 16, 2020 Accepted : September 28, 2020

수 있다[11]. 온라인 진단법의 경우 전동기가 구동하고 있는 상태에서 진단하는 방법으로 주파수 해석법[11], 고주파수 주입법[12], 모델 기반 고장진단법[13] 등의 여러 가지 방법을 사용한다. 구동 중에 고장진단을 수행하기 때문에 구동 알고리즘과 고장 알고리즘을 동시에 수행해야하며 이는 DSP(Digital Signal Processor)에 부하를 줄 수 있고 노이즈에 큰 영향을 받을 수 있다. 반면에 오프라인 진단법의 경우 전동기가 구동하지 않는 상태에서 진단하는 방법이기 때문에 DSP의 부하를 줄일 수 있다[12]. 또한, 오프라인 진단법은 간단한 전류 신호를 통해 고장진단이 가능하므로 EV와 같은 전기 자동차용 전동기에는 온라인 진단법보다 우수한 특성을 보인다.

현재 오프라인 고장진단법은 MCSA (Motor Current Signal Analysis)을 주로 사용하나 복잡한 미분방정식을 풀어야하는 문제로 전동기의 권선저항을 고려하지 않는다[13]. 권선저항을 고려하지 않을 경우 고장이 발생하지 않을 시 전압에 따른 d 축 전류의 평균값은 0이 되고 고장이 발생할 경우 d축 전류의 평균값은 0이 되지 않는다. 이를 이용하여 고장진단 수행이 가능하지만 고정자 저항을 고려할 경우 고장이 발생하지 않을 시 d축 전류가 0이 되지 않으므로 고정자 저항을 고려한 고장진단 알고리즘의 연구가 요구된다. 따라서 본 논문은 고정자 저항을 고려한 미분방정식으로부터 d축 전류를 유도하였다. 유도된 식으로부터 전동기 파라미터의 관계를 도출하였고 이 관계식을 통해 전동기 파라미터에 따른 고장진단 특성을 분석하였다. 또한, 수치해석적 방법을 통해서 분석하기 위해 유한요소해석(Finite Element Analysis; FEA)과 회로 시뮬레이션을 연동해석하여 오프라인 고장진단을 수행하였다. 해석적인 방법과 수치해석적인 방법을 통해 전동기 파라미터에 따른 고장진단 특성을 분석하였다.

## 2. 본론

### 2.1 수학적 모델

영구자석 동기 전동기에 내부 권선 고장이 발생하면 고장이 발생한 상에 고장저항이 병렬로 발생하게 된다. 그림 2는 A상에 고장이 발생한 경우를 나타낸다. 그림 2로부터 A상에 고장이 발생할 경우 영구자석 동기 전동기의 전압방정식은 식 (1)과 같다. 식 (1)로부터 고장에 의해 발생한 고장전류, 고장저항이 모두 전압방정식에 포함되는 것을 알 수 있다. 또한, 고장이 발생한 부분과 고장이 발생하지 않는 부분에 의한 영향으로 라는 변수를 통해 전압방정식에 표현할 수 있다 [12].

$$\begin{aligned}
 [u_{abcf}] &= [R_{abcf}][i_{abcf}] + \frac{d}{dt}([L_{abcf}][i_{abcf}] + [\lambda_{abcf}]) \\
 [u_{abcf}] &= [u_a - u_n, u_b - u_n, u_c - u_n, 0]^T \\
 [i_{abcf}] &= [i_a, i_b, i_c, i_f]^T \\
 [\lambda_{abcf}] &= [\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c, \eta\lambda_a]^T
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [R_{abcf}] &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ \eta R_s & 0 & 0 & \eta R_s + R_f \end{bmatrix} \\
 [L_{abcf}] &= \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & 0 \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & 0 \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & 0 \\ \eta L_{aa} & \eta L_{ab} & \eta L_{ac} & \eta^2 L_{aa} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \lambda_a(\theta) &= \lambda_m \cos\theta + \lambda_{3n} \cos 3\theta \\
 \lambda_b(\theta) &= \lambda_a(\theta - 2\pi/3) \\
 \lambda_c(\theta) &= \lambda_a(\theta + 2\pi/3)
 \end{aligned} \tag{1}$$

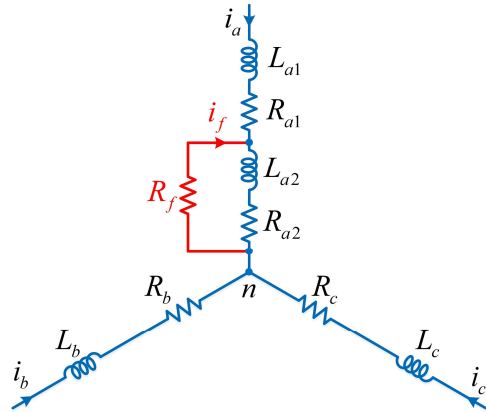


그림 2 Inter-turn 고장 개념도  
Fig. 2 Configuration of the inter-turn fault

여기서  $u_a, u_b, u_c$ 는 각 상의 전압,  $u_n$ 은 중성점 전압,  $i_a, i_b, i_c$ 는 각 상의 전류,  $i_f$ 는 고장저항에 흐르는 전류,  $R_s$ 는 권선저항,  $R_f$ 는 고장 저항,  $\eta$ 는 고장 상의 고장이 발생한 턴수와 직렬 턴수의 비율,  $L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}$ 는 각 상의 인덕턴스,  $L_{ab}, L_{bc}, L_{ca}$ 는 각 상의 상호인덕턴스,  $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ 는 각 상의 영구자석에 의한 쇄교자속,  $\theta$ 는 회전자 위치,  $\lambda_m$ 은 영구자석 쇄교자속의 기본파,  $\lambda_{3n}$ 는 영구자석 쇄교자속의 3고조파이다.

$abc$  전압방정식을  $dq0f$  전압방정식으로 표현하기 위하여 식 (2)와 같은 Park 변환을 이용하였다.

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

여기서  $[T_{dq0f}]$ 는  $abc$ 상을  $dq0f$ 상으로 변환하는 행렬이다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 [u_{dq0f}] &= [T_{dq0f}][R_{abcf}][T_{dq0f}]^{-1} \\
 &+ [T_{dq0f}]\frac{d}{dt}[L_{abcf}][T_{dq0f}]^{-1} \\
 &+ [T_{dq0f}][L_{abcf}]\frac{d}{dt}[T_{dq0f}][i_{dq0f}] \\
 &+ [T_{abcf}][L_{abcf}][T_{abcf}]^{-1}\frac{d}{dt}[i_{abdf}]
 \end{aligned}$$

$$+ [T_{dq0f}]d \frac{[T_{dq0f}]^{-1}}{dt} [\lambda_{dq0f}] + \frac{d[\lambda_{dq0f}]}{dt}$$

$$\begin{aligned} [u_{dq0f}] &= [u_d, u_q, -u_n, 0]^T \\ [i_{dq0f}] &= [i_d, i_q, 0, i_f]^T \\ [\lambda_{dq0f}] &= [\lambda_m, 0, \lambda_{3h} \cos 3\theta, \eta \lambda_m]^T \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)를 정리하면 식 (4)와 같이 dq0f상 전압방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{df} \\ e_{qf} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} e_{df} \\ e_{qf} \end{bmatrix} &= \frac{2}{3}\eta \begin{bmatrix} R_s \cos \theta i_f + L_d p(\cos \theta i_f) + \omega L_q \sin \theta i_f \\ -R_s \sin \theta i_f - L_q p(\sin \theta i_f) + \omega L_d \cos \theta i_f \end{bmatrix} \\ u_n &= -\frac{1}{3}\eta R_s i_f - \frac{1}{3}\eta L_0 p i_f + 3\omega \lambda_{3h} \sin 3\theta \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $u_d, u_q$ 는 dq축 전압,  $i_d, i_q$ 는 dq축 전류,  $L_d, L_q$ 는 dq축 인덕턴스,  $p$ 는 미분연산자,  $\omega$ 는 전기각속도,  $L_0$ 는 누설인덕턴스이다.

식 (4)로부터 d축 전류를 구하기 위해서는 고장저항에 흐르는 전류를 구해야한다. 식 (1)로부터 고장저항에 흐르는 전류는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다 [13].

$$i_f = -\frac{\eta(u_a - u_n)}{\eta(1-\eta)R_s + R_f} \quad (5)$$

### 2.2 오프라인 고장진단법

본 논문에서 제안하는 오프라인 고장진단법은 식 (4)와 같은 3상 평형전압을 전동기에 인가한 후 d축 전류의 응답을 통해 고장진단을 수행한다.

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cos \omega t \\ V_m \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ V_m \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서  $V_m$ 은 인가전압의 최댓값,  $\omega$ 는 인가 각주파수이다.

식 (4)에서와 같이 고장 시 전류는 d축 전류 응답에 영향을 미치므로 3상 평형전압 인가 시 고장전류의 응답을 구해야한다. 식 (4)와 (5)을 이용하여 고장저항에 흐르는 전류를 구하면 식 (7)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} i_f &= -\frac{k_1 V_m}{k_1^2 + k_2^2} \sin \omega t - \frac{k_2 V_m}{k_1^2 + k_2^2} \cos \omega t \\ &\quad - \frac{9\omega k_1 \lambda_{3h}}{9k_1^2 + k_2^2} \cos 3\omega t + \frac{3\omega k_2 \lambda_{3h}}{9k_1^2 + k_2^2} \sin 3\omega t \\ k_1 &= \frac{1}{3}\eta \omega L_0, \quad k_2 = \left(1 - \frac{2}{3}\eta\right)R_s + \frac{R_f}{\eta} \end{aligned} \quad (7)$$

#### 2.2.1 고장이 발생하지 않는 경우

연구자석 기기의 고장이 발생하지 않는 경우  $\alpha\beta$ 좌표계 전압 방정식은 식 (8)와 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^h \\ i_\beta^h \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \lambda_\alpha^h \\ \lambda_\beta^h \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \lambda_\alpha^h \\ \lambda_\beta^h \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L - \Delta L \cos 2\theta & -\Delta L \sin 2\theta \\ -\Delta L \sin 2\theta & L + \Delta L \cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^h \\ i_\beta^h \end{bmatrix} \\ L &= \frac{L_q + L_d}{2}, \quad \Delta L = \frac{L_q - L_d}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $u_\alpha, u_\beta$ 는 축 전압,  $i_\alpha^h, i_\beta^h$ 는 고장이 발생하지 않는 경우  $\alpha\beta$ 축 전류,  $\lambda_\alpha^h, \lambda_\beta^h$ 는 고장이 발생하지 않는 경우  $\alpha\beta$ 축 쇠교자속이다.

오프라인 진단이므로 모터는 정지 상태에 있으므로 모터의 각도에 변화, 인덕턴스의 변화는 없으며 전류에 의한 변화만 고려하면 된다. 따라서 식 (8)의 전류에 대한 미분방정식을 식 (6)의 3상 평형전압에 대한 해를 구하면 식 (9)과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_\alpha^h \\ i_\beta^h \end{bmatrix} &= \frac{1}{k_h} \begin{bmatrix} a_h \cos \omega t + b_h \sin \omega t \\ c_h \cos \omega t + d_h \sin \omega t \end{bmatrix} \\ k_h &= R_s^4 + 2(L^2 + \Delta L^2)\omega^2 R_s^2 + (L^2 - \Delta L^2)^2 \omega^4 \\ a_h &= R_s^3 + \Delta L \sin 2\theta \omega R_s^2 + (L^2 + \Delta L^2 + 2L\Delta L \cos 2\theta)\omega^2 R_s \\ &\quad - \Delta L(L^2 - \Delta L^2)\sin 2\theta \omega^3 \\ b_h &= (L - \Delta L \cos 2\theta)\omega R_s^2 + 2L\Delta L \sin 2\theta \omega^2 R_s \\ &\quad + (L^2 - \Delta L^2)(L + \Delta L \cos 2\theta)\omega^3 \\ c_h &= -(L + \Delta L \cos 2\theta)\omega R_s^2 + 2L\Delta L \sin 2\theta \omega^2 R_s \\ &\quad - (L^2 - \Delta L^2)(L - \Delta L \cos 2\theta)\omega^3 \\ d_h &= R_s^3 - \Delta L \sin 2\theta \omega R_s^2 + (L^2 + \Delta L^2 - 2L\Delta L \cos 2\theta)\omega^2 R_s \\ &\quad + \Delta L(L^2 - \Delta L^2)\sin 2\theta \omega^3 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $\alpha\beta$ 축에서 dq축으로 변환하는 변환행렬을 이용하여 dq축 전류 응답을 계산하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_d^h \\ i_q^h \end{bmatrix} = \frac{1}{2k_h} \begin{bmatrix} (a_h + d_h) + (a_h - d_h)\cos 2\omega t + (b_h + c_h)\sin 2\omega t \\ -(b_h - c_h) + (b_h + c_h)\cos 2\omega t - (a_h - d_h)\sin 2\omega t \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서  $i_d^h, i_q^h$ 는 고장이 발생하지 않는 경우 dq축 전류이다.

고장이 발생하지 않는 경우 3상 평형전압에 따른 dq축 전류 응답은 전동기 파라미터인 권선저항, dq축 인덕턴스에 의해 결정되는 평균값을 가지며 인가 주파수의 2배인 응답이 발생한다. 따라서 d축 전류 응답은 전동기 파라미터에 의해 결정된다.

#### 2.2.2 고장이 발생할 경우

A상에 고장이 발생할 경우  $\alpha\beta$ 축 전압방정식은 식 (11)와 같다.

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^f \\ i_\beta^f \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \lambda_\alpha^f \\ \lambda_\beta^f \end{bmatrix} + \frac{2}{3}\eta \begin{bmatrix} L - \Delta L \cos 2\theta \\ -\Delta L \sin 2\theta \end{bmatrix} p i_f$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_\alpha^f \\ \lambda_\beta^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L - \Delta L \cos 2\theta & -\Delta L \sin 2\theta \\ -\Delta L \sin 2\theta & L + \Delta L \cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^f \\ i_\beta^f \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서  $i_\alpha^f, i_\beta^f$ 는 고장이 발생할 경우  $\alpha\beta$ 축 전류,  $\lambda_\alpha^f, \lambda_\beta^f$ 는 고장이 발생할 경우  $\alpha\beta$ 축 쇠교자속이다.

고장이 발생하지 않는 경우와 마찬가지로 전류에 의한 변화만 고려하면 고장이 발생할 경우 전류는 식 (12)과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^f \\ i_\beta^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha^h \\ i_\beta^h \end{bmatrix} + \frac{1}{k_f} \begin{bmatrix} a_f \cos \omega t + b_f \sin \omega t \\ c_f \cos \omega t + d_f \sin \omega t \end{bmatrix}$$

$$k_f = 3(k_1^2 + k_2^2)k_h a_f = 2\eta k_2(L - \Delta L \cos 2\theta)\omega R_s^3 + 2\eta k_1(L^2 + \Delta L^2 - 2L\Delta L \cos 2\theta)\omega^2 R_s^2 + 2\eta k_2(L^2 - \Delta L^2)(L + \Delta L \cos 2\theta)\omega^3 R_s + 2\eta k_1(L^2 - \Delta L^2)\omega^4$$

$$b_f = -2\eta k_1(L - \Delta L \cos 2\theta)\omega R_s^3 + 2\eta k_2(L^2 + \Delta L^2 - 2L\Delta L \cos 2\theta)\omega^2 R_s^2 - 2\eta k_1(L^2 - \Delta L^2)(L + \Delta L \cos 2\theta)\omega^3 R_s + 2\eta k_2(L^2 - \Delta L^2)\omega^4$$

$$c_f = -2\eta \Delta L \sin 2\theta \{k_2 R_s^2 + 2k_1 L \omega R_s - k_2(L^2 - \Delta L^2)\omega^2\} \omega R_s$$

$$d_f = 2\eta \Delta L \sin 2\theta \{k_2 R_s^2 - 2k_2 L \omega R_s - k_1(L^2 - \Delta L^2)\omega^2\} \omega R_s \quad (12)$$

고장이 발생하지 않는 경우와 마찬가지로 좌표변환을 통해  $dq$ 축 전류를 구하면 식 (13)과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_d^f \\ i_q^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d^h \\ i_q^h \end{bmatrix} + \frac{1}{2k_f} \begin{bmatrix} (a_f + d_f) + (a_f - d_f)\cos 2\omega t + (b_f + c_f)\sin 2\omega t \\ -(b_f - c_f) + (b_f + c_f)\cos 2\omega t - (a_f - d_f)\sin 2\omega t \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서  $i_d^f, i_q^f$ 는 고장이 발생할 경우  $dq$ 축 전류이다.

고장이 발생할 경우  $dq$ 축 전류 응답은 고장이 발생하지 않는  $dq$ 축 전류 응답과 고장 전류에 의해서 발생하는 전류 응답의 합으로 나타낼 수 있다. 또한, 식 (13)에서 알 수 있듯이  $dq$ 축 전류는 전동기 파라미터에 따라 특성이 결정됨을 알 수 있다. 고장이 발생하지 않은 경우와 고장이 발생한 경우의  $d$ 축 전류의 직류 성분을 비교한다면 Inter-turn 고장진단이 가능하다.

### 2.2.3 고장진단 알고리즘

식 (13)로부터 고장이 발생하지 않은 경우와 고장이 발생한 경우의  $d$ 축 전류의 차이가 발생하며 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{index}_{off} = I_d^f - I_d^h = \frac{1}{2k_f}(a_f + d_f) \quad (14)$$

여기서  $I_d^f$ 는 고장이 발생한 경우의  $d$ 축 전류의 평균값,  $I_d^h$ 는 고장이 발생하지 않는 경우의  $d$ 축 전류의 평균값이다. Inter-turn 고장진단을 수행하기 위해  $d$ 축 전류의 직류 성분의

차이를 비교하여 고장발생 여부를 진단하는 알고리즘을 그림 3과 같이 나타내었다. 3상 평형전압을 인가한 후 각 상의 전류를 측정하고 좌표변환을 통해  $dq$ 축 전류로 변환한다. 이때  $d$ 축 전류의 평균값을 계산하여 고장 발생여부를 판단한다. 따라서  $d$ 축 전류의 차이인  $\text{index}_{off}$ 가 클수록 고장진단 특성이 향상된다고 할 수 있다.

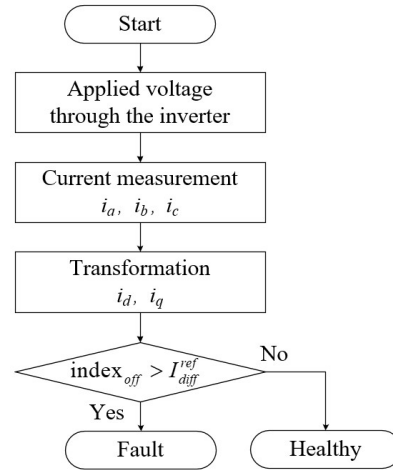


그림 3 고장진단 알고리즘  
Fig. 3 Fault diagnosis algorithm

## 3. 고장진단 특성 분석을 위한 연동해석 시스템

해석적인 방법을 검증하기 위해 수치해석적인 방법인 FEA와 회로 시뮬레이션을 통해 연동해석 시스템을 구축하였다. 연동해석을 통해 전동기 파라미터에 따른 고장진단 특성을 분석하였다. FEA 툴은 Maxwell, 회로 시뮬레이션 툴은 Simplorer를 이용하였다.

### 3.1 고장진단을 위한 FEA 모델수학적 모델

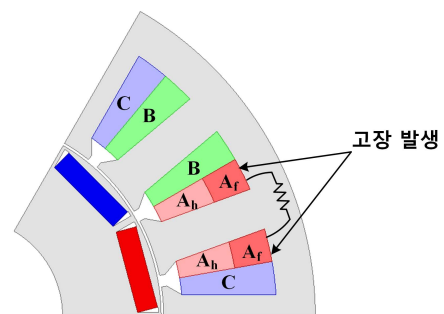


그림 4 연동해석을 위한 FEA 모델  
Fig. 4 FEA model for co-analysis

고장진단을 위해 EV 구동용 전동기를 설계하였다. 표 1은 연동해석을 위한 전동기의 사양을 나타내며 그림 4는 연동해석을 위한 전동기 FEA 모델을 나타낸다. 그림 4에서 알 수 있

듯이 A상에 Inter-turn 고장이 발생함을 FEA를 통해 구현하였다.  $A_f$ 는 고장이 발생한 상,  $A_h$ 는 고장이 발생하지 않는 상을 나타내며 Af에 병렬로 고장저항이 발생하는 것을 나타낸다.

### 3.2 고장진단을 위한 회로 시뮬레이션

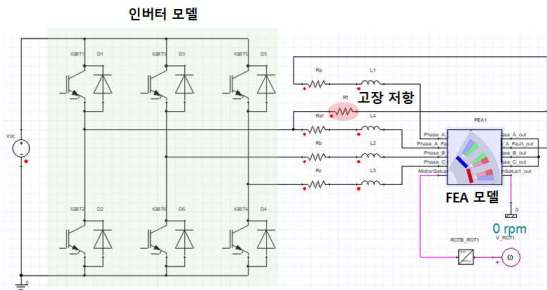


그림 5 고장진단을 위한 연동해석 시스템  
Fig. 5 Co-analysis system for fault diagnosis

그림 5는 회로 시뮬레이션과 FEA 모델의 연동해석 시스템을 나타낸다. A상에 고장이 발생하였으므로 고장저항은 A상에 고장이 발생한 권선과 병렬로 발생함을 알 수 있다. 고장진단을 수행하기 위하여 정지된 상태에서 3상 평형전압을 공간벡터 PWM(space vector pulse width modulation; SVPWM)을 이용하여 인가하였다. 인버터를 통해 전압을 인가한 후 각 상의 전류를 측정하였고 d축 전류를 구하기 위해 dq축 변환하였다. 그림 6은 전압을 인가하고 d축 전류를 구하기 위한 제어블록도를 나타낸다. 또한, 표 2는 인가전압, 주파수, 스위칭 주파수를 나타낸다.

표 1 고장진단을 위한 FEA 모델의 사양

Table 1 Specification of FEA model for fault diagnosis

Contents	Value	Unit
고정자 외경	270	mm
회전자 외경	151	mm
극수	12	-
적층 길이	78	mm
권선 저항	2.17	mΩ
고장 저항	10	μΩ
d축 인덕턴스	0.124	mH
q축 인덕턴스	0.213	mH

표 2 연동해석 전압 및 주파수 조건

Table 2 Voltage and frequency condition of co-analysis

Contents	Value	Unit
DC 링크 전압	5	V
인가 주파수	150	Hz
스위칭 주파수	10	kHz

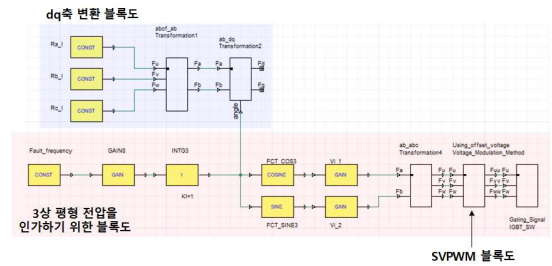


그림 6 고장진단을 위한 제어블록도  
Fig. 6 Control block diagram for fault diagnosis

## 4. 전동기 파라미터에 따른 고장진단 특성

2장에서 d축 전류는 전동기 파라미터에 의해 표현되고 식 (12)를 기반으로 전동기 파라미터인 고장 저항, 권선 저항, 돌극비에 따른 고장진단 특성을 분석하였다. 또한, 해석적인 방법을 검증하기 위하여 3장에서 표현된 FEA와 회로 시뮬레이션의 연동해석을 통해 고장진단 특성을 비교하였다.

### 4.1 고장 저항에 따른 고장진단 특성

고장 저항에 의해 고장 저항에 흐르는 전류가 바뀌므로 축 전류의 응답이 바뀐다. 따라서 고장저항에 따른 고장진단 특성이 달라지는 것을 알 수 있다. 표 3은 고장 저항에 따른 고장진단 특성을 분석하기 위한 고장 저항을 나타낸다. 그림 7은 해석적인 방법과 수치해석적인 방법을 이용하여 고장 저항에 따른 고장진단 특성을 나타낸다. 그림 7에서 알 수 있듯이 고장 저항이 작을수록 고장 전류가 커지므로 고장진단 특성이 향상됨을 알 수 있다.

표 3 고장진단 특성 분석을 위한 고장 저항 Case

Table 3 Case of fault resistance for fault diagnosis

Contents	Value	Unit
Case 1	10	μΩ
Case 2	50	μΩ
Case 3	100	μΩ
Case 4	200	μΩ

### 4.2 권선 저항에 따른 고장진단 특성

식 (12)에서 알 수 있듯이 고장진단 특성은 권선 저항에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 권선 저항에 따른 특성을 분석하기 위해 표 4와 같은 권선 저항을 선정하였다. 그림 8은 해석적인 방법과 수치해석적인 방법을 통해 권선 저항에 따른 고장진단 특성을 나타낸다. 권선 저항이 작을수록 동일한 전압에 대하여 전류가 커지므로 고장이 발생한 경우와 발생하지 않은 경우에 대하여 d축 전류의 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 그림 8과 같이 권선저항이 작을수록 고장 진단 특성이 향상됨을 알 수 있다. 전류에 따른 비선형으로 해석적인

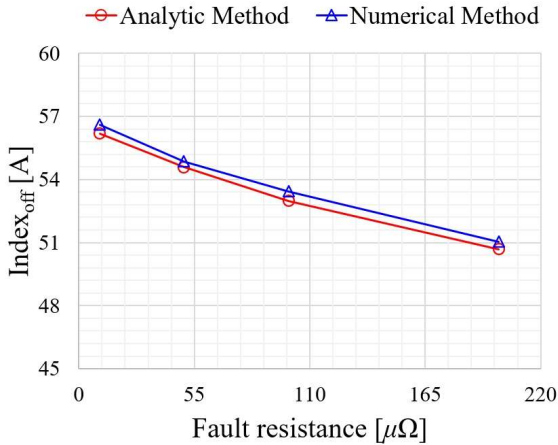


그림 7 고장 저항에 따른 고장진단 특성  
Fig. 7 Characteristic of fault diagnosis according to fault resistance

표 4 고장진단 특성 분석을 위한 고장 저항 Case

Table 4 Case of winding resistance for fault diagnosis

Contents	Value	Unit
Case 1	2.17	m $\Omega$
Case 2	3.34	m $\Omega$
Case 3	4.51	m $\Omega$
Case 4	5.01	m $\Omega$

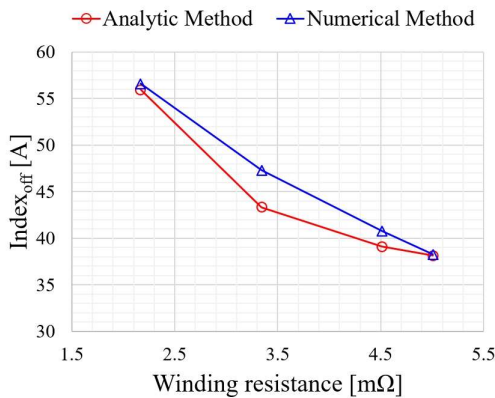


그림 8 권선 저항에 따른 고장진단 특성  
Fig. 8 Characteristic of fault diagnosis according to winding resistance

방법과 수치해석적인 방법의 차이가 발생함을 알 수 있으나 동일한 경향성을 가지는 것을 확인할 수 있다.

### 4.3 돌극비에 따른 고장진단 특성

전동기의 설계 파라미터 중 중요한 돌극비에 따른 특성을 분석하였다. 고장 저항, 권선 저항과 마찬가지로 인덕턴스에 의해 고장진단 특성이 결정된다. 돌극비에 따른 특성을 분석하기 위하여 그림 9와 같이 돌극비가 서로 다른 IPMSM을 설계하였다. 동일한 출력을 조건으로 설계 되었으며 각 회전자 형상별 돌극비는 표 5와 같다. 돌극비가 서로 다른 회전자 형

상에 따른 해석적인 방법과 수치해석적인 방법을 통해 고장진단 특성을 비교하였다. 그림 10은 고장진단 특성을 나타낸 것이며 돌극비가 커질수록 고장진단 특성이 향상됨을 알 수 있다. 돌극비는 자기적 포화도에 영향을 미치므로 해석적인 방법과 수치해석적인 방법의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

표 5 회전자 형상에 따른 돌극비

Table 5 Case of saliency ratio for fault diagnosis

Contents	Value	Unit
Bar type	1.72	-
U type	1.95	-
V type	1.98	-

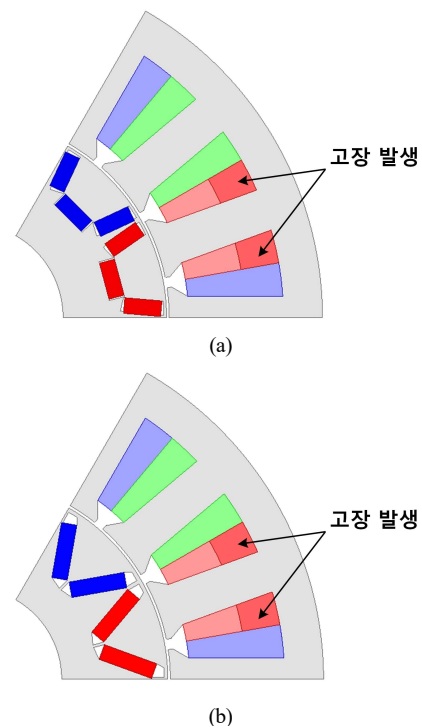


그림 9 돌극비에 따른 회전자 형상 (a) U type (b) V type  
Fig. 9 Rotor structure according to saliency ratio (a) U type (b) V type

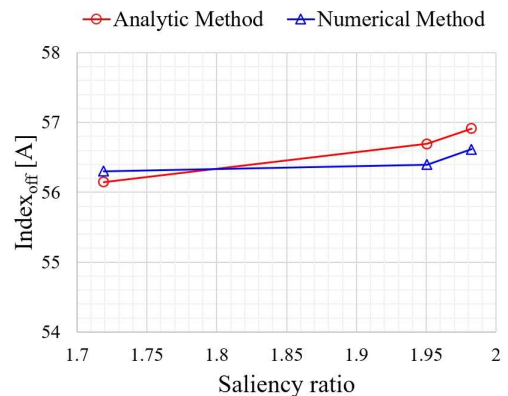


그림 10 돌극비에 따른 고장진단 특성  
Fig. 10 Characteristic of fault diagnosis according to saliency ratio

## 5. 결론

본 논문은 해석적인 방법과 연동해석을 통해 고장진단 특성을 분석하였다. A상에 고장이 발생할 경우 수학적 모델을 통해 전동기 회로 파라미터에 따른 축을 도출하였다. 또한, 고장이 발생한 경우와 고장이 발생하지 않은 경우에 대하여 d축 전류의 평균값 차이가 발생하는 것을 분석하였고 이를 이용하여 고장진단을 수행하였다. d축 전류의 평균값 차이는 전동기 파라미터에 의해 결정되는 것을 수식으로 도출하였다. 해석적인 방법을 통해 고장저항, 권선저항, 돌극비에 따른 고장진단 특성을 분석하였고 고장저항과 권선저항은 작을수록, 돌극비는 클수록 고장진단 특성이 향상되었다. 해석적인 방법을 검증하기 위해 수치해석적인 FEA와 회로 시뮬레이션을 연동해석하여 고장진단 특성을 분석하였다. 비선형으로 인해 차이가 발생하는 것을 알 수 있으나 동일한 경향을 가지는 것을 알 수 있다. 따라서 수치해석적인 방법인 연동해석을 통해 해석적인 방법에 대한 타당성을 검증하였다.

### Acknowledgements

이 논문은 국토부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구사업입니다. (20CTAP-C157784-01)

### References

- [1] F. Mwasilu and J.-W. Jung, "Enhanced Fault-Tolerant Control of Interior PMSMs Based on Adaptive EKF for EV Traction Applications," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 31, no. 8, pp. 5746-5758, Aug. 2016.
- [2] J.-M. Mun, G.-J. Park, S. Seo, D.-W. Kim, Y.-J. Kim and S.-Y. Jung, "Design Characteristics of IPMSM With Wide Constant Power Speed Range for EV Traction," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 53, no. 6, Art ID : 8105104, Jun. 2017.
- [3] T. A. Huynh and M.-F. Hsieh, "Comparative Study of PM-Assisted SynRM and IPMSM on Constant Power Speed Range for EV Applications," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 53, no. 11, Art ID : 8211006, Nov. 2017.
- [4] H. Henaou, G.-A. Capolino, M. Fernandez-Cabanas, F. Filippetti, C. Bruzzese, E. Strangas, R. Pusca, J. Estima, M. Riera-Guasp, and S. Hedayati-Kia, "Trend in Fault Diagnosis for Electrical Machines: a review of diagnostic techniques," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 8, no. 2, pp. 31-42, Jun. 2014.
- [5] S. M. A. Cruz and A. J. M. Cardoso, "Multiple Reference Frames Theory: A New Method for the Diagnosis of Stator Faults," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 20, no. 3, pp. 611-619, Sep. 2005.
- [6] K.-C. Kim, S.-B. Lim, D.-H. Koo, and J. Lee, "The Shape Design of Permanent Magnet for Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Partial Demagnetization," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 42, no. 10, pp. 3485-3487, Oct. 2006.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] B.-G. Gu, "Study of IPMSM Interturn Fault Part II: Online Fault Parameter Estimation," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 31, no. 10, pp. 7214-7223, Oct. 2016.
- [10] K.-H. Kim, B.-G. Gu, and I.-S. Jung, "Online fault-detecting scheme of an inverter-fed permanent magnet synchronous motor under stator winding shorted turn and inverter switch open," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 31, no. 10, pp. 7214-7223, Oct. 2016.
- [11] S. Grubic, J.M. Aller, B. Lu, and T.G. Habetler, "A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 55, no. 12, pp. 4127-4136, Dec. 2008.
- [12] 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.
- [13] B. Vaseghi, N. Takorabet, and F. Meibody-Tabar, "Fault Analysis and Parameter Identification of Permanent-Magnet Motors by the Finite-Element Method," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 45, no. 9, pp. 3290-3295, Sep. 2009.

### 저자소개



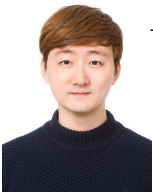
#### 김현우 (Hyunwoo Kim)

2017년 한양대학교 전기공학부 졸업. 2017년 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 석박통합과정.  
Tel : 02-2220-0349  
E-mail : khw7481@hanyang.ac.kr



#### 박예지 (Yeji Park)

2017년 한양대학교 전기전자제어공학부 졸업. 2017년 ~ 현재 한양대학교 대학원 전기공학과 석박통합과정.  
Tel : 02-2220-0349  
E-mail : yejipark@hanyang.ac.kr



**오승택(Seung-Taek Oh)**

2016년 한경대학교 전기전자제어공학부 졸업.  
2018년 한양대학교 전기공학과 졸업(석사). 2018년  
~ 동 대학원 박사과정.  
Tel : 02-2220-0349  
E-mail : ost9107@naver.com



**장형관 (Hyungkwan Jang)**

2010년 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업.  
2012년 동 대학원 전기공학과 석사졸업. 2013년  
~ 2017년 LG전자. 2017년 ~ 현재 동 대학원 전  
기공학과 박사과정  
Tel : 02-2220-0349  
E-mail : jhkinhyu@hanyang.ac.kr



**배재남 (Jae-Nam Bae)**

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



**이 주 (Ju Lee)**

1986년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동  
대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988 ~ 1993년 국  
방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교  
System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국  
철도기술연구원 선임연구원. 1997년 ~ 현재 한양  
대학교 전기생체공학부 교수.  
Tel : 02-2220-0342  
E-mail : julee@hanyang.ac.kr