

역상 임피던스를 이용한 매립형 영구자석 동기전동기의 권선간 고장진단

Interturn Fault Diagnosis in Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Using Negative-Sequence Impedance

정혜윤* · 김상우†

(Hyeyun Jeong · Sang Woo Kim)

Abstract - Fault diagnosis is important due to the increasing demand of using interior permanent magnet synchronous machines (IPMSMs). In particular, an interturn fault is one of the most frequent electrical faults in IPMSMs. This paper proposes a fault indicator for diagnosis of interturn faults in IPMSMs. The fault indicator is developed by negative-sequence impedance. The effectiveness of the fault indicator to diagnose interturn faults was verified through various fault conditions.

Key Words : Fault diagnosis, IPMSM, Interturn short circuit faults, Signal-based analysis

1. 서론

전동기는 현대 산업에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 중요한 동력원이다. 특히, 영구자석 동기 전동기(IPMSM: Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)는 효율성과 전력밀도가 높아 공장이나 발전소, 산업용 로봇뿐 아니라 최근 화두에 있는 전기 차량에 이르기까지 다양한 산업현장에서 널리 사용되고 있다[1]. 만일 이러한 전동기에 예기치 못한 사고가 발생하게 되면, 전동기 고장으로 인한 보수비용에 대한 부담 뿐 아니라 해당 산업의 기능을 마비시키고 심각하게는 인명피해까지 발생하는 상황이 초래될 수 있다[2][3]. 따라서 전동기 고장을 미리 대처할 수 있도록 고장이 심각해지기 전의 고장을 감지하는 고장 진단법이 필요하다.

EPRI와 IEEE의 전동기 고장 보고 사례에 의하면, 영구자석 동기 전동기의 고장의 대부분은 코일에서 발생하는 것으로 조사되었으며 이 중 가장 빈번히 발생하는 고장은 권선간 고장이라고 한다[4]. 이 고장은 지속적인 과전류 혹은 물리적 요인 및 노화 등으로 인해 발생하며, 고정자 권선 간에 절연효과가 떨어져 권선 간에 형성된 폐회로에서 큰 전류가 유도되는 현상이다. 그 결과로 국부적인 온도 상승이 나타나게 되는데 이러한 발열로 인해 고장의 범위가 넓어지게 되어 전동기 손실 또는 화재와 같은 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 이런 이유로 권선 간 고장진단에

대한 중요성은 더욱 대두되고 있다.

권선 간 고장을 진단하기 위한 방법에는 아주 오래전부터 이용되어 온 전통적 방법인 전동기 전류 신호 분석(MCSA: Motor Current Signature Analysis)이 있고, 알고리즘을 학습시켜 고장을 진단하는 방법인 데이터 기반 분석(data-driven analysis), 모델 파라미터와 전동기의 모델을 이용하는 모델 기반 분석(model-based analysis), 전압과 전류 뿐 아니라 회전속도, 자속, 진동 등의 다양한 신호를 기반으로 고장을 진단하는 신호 기반 분석(signal-based analysis)이 있다[5].

전동기 전류 신호 분석은 전동기의 전류 정보를 이용한 방법으로 푸리에 해석과 같은 주파수 해석 방법을 통해 전동기의 권선 간 고장을 진단한다. 이 방법은 간단하다는 장점을 가지고 있으나 고장의 정도를 판단할 수 없고 매우 심화된 권선 간 고장에 대해서만 진단이 가능하다[6]. 데이터 기반 방법의 경우는 퍼지 논리, 신경 네트워크, 기계 학습 등을 이용하여 전동기의 권선 간 고장을 진단하는 방법이다. 이 방법은 수많은 데이터가 필요할 뿐 아니라 전동기의 종류 및 특징에 따라 다시 학습을 시켜야 하는 어려움이 있다[7]-[10]. 뿐만 아니라 수많은 고장 데이터를 필요로 하는 데이터 기반 방법에 대해서는 매립형 영구자석 동기 전동기는 유도 전동기에 비해 비교적 최근에 개발되었기 때문에 실제로 발생한 권선 간 고장 데이터가 축적된 경우가 거의 없어 현실적으로 이 진단 방법을 적용하기 힘들다. 모델 기반 방법은 전동기의 파라미터와 모델 식을 이용하여 고장을 진단하는 방법으로 고장의 유무를 판단할 뿐 아니라 고장의 정도 또한 알 수 있어 최근 많이 이용되고 있는 고장 진단 방법 중 하나다[11][12]. 그러나 모델 파라미터와 모델 식을 기반으로 하여 고장을 진단하기 때문에 모델 파라미터에 대한 정보가 주어지지 않았거나 전동기의 고장 및 노화 등으로 인해 모델 파라미터가 부정확할 경우 진단방법의 호응성이 매우 떨어지는 단점을 가지고

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Pohang University of Science and Technology, Professor/ph.D, Korea.

E-mail: swkim@postech.ac.kr

* Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Pohang University of Science and Technology, Korea.

Received : December 16, 2016; Accepted : January 9, 2017

있다. 신호 기반 방법은 전류 정보 뿐 아니라 전압, 회전속도, 진동 등의 다양한 신호정보를 이용하여 권선 간 고장을 진단하는 방법으로 Park's Vector 기법, d-q 축 전류 분석 등이 있다 [13][14]. 이 방법은 진단 방법에 따라 고장의 정도도 판단할 수 있을 뿐 아니라 고장 데이터 및 모터 파라미터에 대한 정보가 필요 없기 때문에 최근에 권선 간 고장 진단 방법으로 많은 개발이 이루어지고 있다.

최근 제안된 신호 기반 방법에는 역상(NS: Negative-Sequence) 전압을 이용한 방법 또는 공간벡터를 이용한 흔들림각(swing angle) 방법 등이 있는데[13][14] 이 방법의 특징은 전압과 전류 정보만을 이용하여 권선 간 고장을 진단한다. 따라서 고정자 저항 및 인덕턴스 등과 같은 전동기의 파라미터에 대한 정보 또는 고장 데이터가 필요 없을 뿐 아니라 전동기의 회전속도와 회전각에 대한 정보도 필요 없기 때문에 센서리스 제어가 적용되는 동작 환경에도 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 현재까지 개발된 신호 기반 방법은 권선 간 고장이 이미 발생하여 어느 정도 진행이 된 경우에 대해서만 진단할 수 있어서 고장이 심화되기 전의 비교적 약한 고장에 대해서는 적용하기 어렵다. 이러한 단점을 극복하기 위해 본 논문에서는 역상임피던스를 이용한 권선간 고장진단 방법을 제안한다. 제안한 방법을 이용하면 고장이 심화되기 전의 약한 고장에 대해서도 고장이 진단될 뿐 아니라 토크가 변화하는 동작 조건에서도 모델 파라미터 등의 정보 없이 고장진단이 가능하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 권선 간 고장 모델에 대해 묘사하고, 기존의 연구 방법 중 하나인 공간벡터를 이용한 흔들림각 방법에 대해 설명한다. 또한 대칭 좌표법의 정상(positive-sequence), 역상 성분을 설명하고 유한요소법(FEM: Finite Element Method)을 기반으로 한 시뮬레이션 데이터를 이용하여 권선 간 고장과 각 성분과의 연관성에 대해 분석한다. 이 결과를 바탕으로 새로운 고장지표를 제안하고, 제안된 고장 지표의 우수성을 다양한 고장 조건 및 동작 환경에 대한 실험을 통해 증명한다. 결론으로 3장에서는 역상 임피던스를 이용한 제안 고장 지표의 성능 및 응용 가능성에 대해 제시한다.

2. 본 론

2.1 권선 간 고장 모델

그림 1은 a상 권선에서 고장이 발생한 전동기 등가 모델이다. 이 때, 각 상(phase)당 전체 권선 수를 N 이라 하고, 단락된 권선 수를 n 이라 하면, 단락된 정도를 나타내는 고장 권선 비는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mu = \frac{n}{N} \tag{1}$$

이 때, μ 는 고장 권선 비로 μ 가 클수록 고장의 정도가 심각함을 의미한다. R_f 는 고장 저항으로 권선이 절연된 정도를 나타낸다. R_f 가 작을수록 같은 전압 대비 고장 전류 i_f 가 많이 흐른

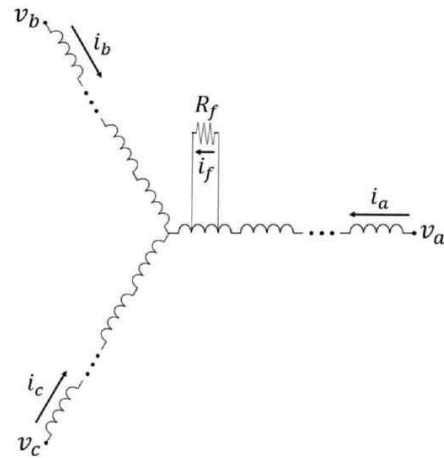


그림 1 a상 권선 간 고장 전동기 등가 모델

Fig. 1 Equivalent model of a Motor with an interturn fault in the phase a

다. 즉, 권선 간 고장은 μ 가 클수록, R_f 가 작을수록 그 정도가 심각해진다.

2.2 권선 간 고장 분석

2.2.1 공간벡터 성질을 이용한 흔들림각

전류의 공간벡터와 전압의 공간벡터의 정의는 다음과 같다 [14].

$$\overrightarrow{i_s(t)} = \frac{2}{3} \{ (i_a - i_b) + \alpha(i_b - i_c) + \alpha^2(i_c - i_a) \} \tag{2}$$

$$\overrightarrow{v_s(t)} = \frac{2}{3} \{ v_{ab} + \alpha v_{bc} + \alpha^2 v_{ca} \} \tag{3}$$

이 때, i_a, i_b, i_c 는 고정자 상전류이며, v_{ab}, v_{bc}, v_{ca} 는 고정자 상간 전압이고, α 는 공간벡터 연산자로 $e^{j\frac{2\pi}{3}}$ 이다.

식 (2)와 식 (3)을 이용하여 공간벡터간의 위상차를 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\delta(t) = \angle \overrightarrow{i_s(t)} - \angle \overrightarrow{v_s(t)}, \quad 0 < \delta(t) < 2\pi \tag{4}$$

이를 바탕으로 흔들림각을 정의하면 식 (5)와 같다.

$$\Delta \delta_{sc}(t) = \max[\delta(t)] - \min[\delta(t)], \quad 0 < \Delta \delta_{sc}(t) < 2\pi \tag{5}$$

2.2.2 유한요소법을 이용한 정상 및 역상 성분 분석

대칭 좌표법의 역상 성분에 대한 정의는 다음과 같다[11].

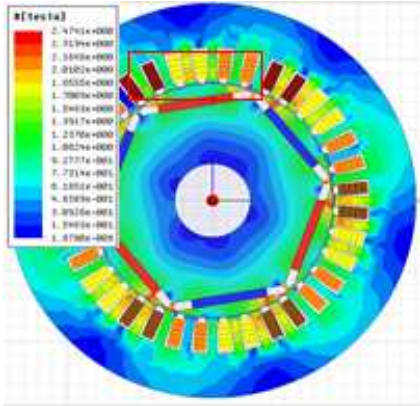


그림 2 유한요소법 시뮬레이션모델
Fig. 2 Simulation model of FEM

표 1 시뮬레이션 전동기 모델 특성

Table 1 Specifications of PMSM model in the simulation

Parameters	Values (Units)
Number of pole pairs	3
Input voltage	220 (V)
Rated output	2.2 (kW)
Rated torque	7 (Nm)
Rated motor speed	4500 (rpm)
Rated current	11 (A)
Stator resistance	0.44 (Ω)

$$x_p = \frac{1}{3}(x_a + \alpha x_b + \alpha^2 x_c) \quad (6)$$

$$x_n = \frac{1}{3}(x_a + \alpha^2 x_b + \alpha x_c) \quad (7)$$

식 (6), (7)은 각각 정상 및 역상 성분을 의미한다. 이 때, α 는 공간벡터 연산자로 $e^{\frac{2\pi}{3}}$ 이며, i_a, i_b, i_c 는 3상과 관련된 물리량이다. 물리량이 전류인 경우는 식 (6)은 정상전류, 식 (7)은 역상전류를 의미하고 물리량이 전압인 경우는 식 (6)은 정상전압, 식 (7)은 역상전압을 의미한다.

권선 간 고장이 발생했을 때 정상성분과 역상성분의 특징을 살펴보기 위해 FEM을 기반으로 한 시뮬레이션 프로그램인 Ansys사의 MAXWELL을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. FEM 시뮬레이션 모델은 그림 2와 같고, 시뮬레이션 전동기 모델의 특성은 표 1과 같다.

그림 3은 0.02초 동안의 시간에 따른 정상전류와 정상전압 변화를 나타낸다. 먼저 정상전류와 정상전압 모두 정상(healthy)과 비교하여 권선 간 고장이 발생하면 크기의 변화는 확인하기 어렵고, 위상에 변화가 발생함을 확인할 수 있었다. 마찬가지로 그림 4는 역상전류와 역상전압에 해당되는데, 정상(healthy)과 비교하여 고장이 발생하면 위상이 변할 뿐 아니라 크기도 변화함을 확인할 수 있다.

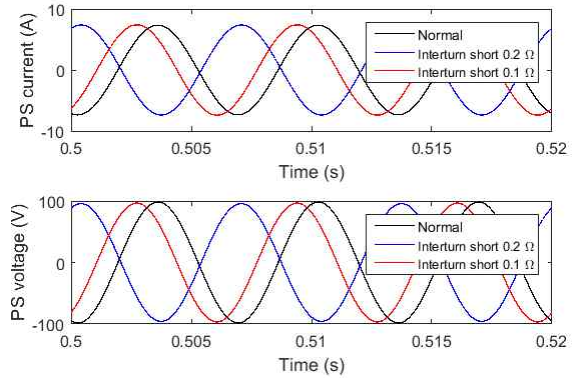


그림 3 3 Nm, 3000 rpm에서 정상전류와 정상전압 (고장의 경우 $\mu = 0.25$)

Fig. 3 Positive-sequence current and voltage under 3 Nm, 3000 rpm ($\mu = 0.25$ in the case of faults)

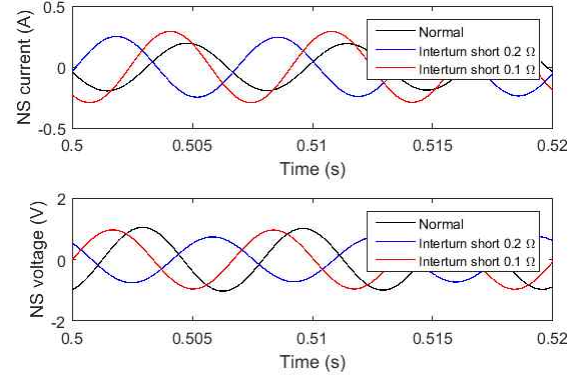


그림 4 3 Nm, 3000 rpm에서 역상전류와 역상전압 (고장의 경우 $\mu = 0.25$)

Fig. 4 Negative-sequence current and voltage under 3 Nm, 3000 rpm ($\mu = 0.25$ in the case of faults)

2.2.3 역상 임피던스

동일한 고장이 발생했을 때 권선 간 고장의 정도를 크기의 측면에서 더욱 뚜렷하게 확인할 수 있는 성분은 역상 성분을 그림 3과 4를 통해 확인하였다. 이를 바탕으로 역상전류와 역상전압의 정보가 모두 포함되어 있는 역상 임피던스를 식 (8)와 같이 표현할 수 있다.

$$Z(i_n, v_n) = \frac{v_n}{i_n} = \frac{v_a + \alpha^2 v_b + \alpha v_c}{i_a + \alpha^2 i_b + \alpha i_c} \quad (8)$$

식 (8)에서 전동기에 고장이 발생하지 않은 경우에는 다음과 같이 표현하기로 한다.

$$Z_h(i_n, v_n) = \frac{v_{n,h}}{i_{n,h}} = \frac{v_{a,h} + \alpha^2 v_{b,h} + \alpha v_{c,h}}{i_{a,h} + \alpha^2 i_{b,h} + \alpha i_{c,h}} \quad (9)$$

이 때, 각 항에 있는, h 접자는 고장이 발생하지 않았을 때의 값을 의미한다.

2.2.4 선형 보간법을 이용한 정상상태의 역상 임피던스

제한한 고장지표를 계산하기 위해서는 전동기에 고장이 발생하지 않았을 때의 역상 임피던스를 미리 알고 있어야 한다. 그림 5는 1 Nm와 4 Nm에서 회전속도에 따른 역상 임피던스 값을 나타낸다.

임의의 동작조건에 대한 역상 임피던스를 계산하기 위해 그림 5에서 선형보간법을 이용하여 $Z_h(i_n, v_n)$ 을 구하였다. 회전속도가 ω_j , 토크가 T_j 일 때, 회전속도가 $\omega_i < \omega_j < \omega_k$ 와 같은 범위 안에 있고, 토크가 $T_i < T_j < T_k$ 와 같은 범위 안에 있다고 하면 식 (10), (11), (12)와 같이 선형보간법을 3번 이용하여 원하는 동작조건에서 역상 임피던스를 계산하였다.

$$Z_{j,h}(i_n, v_n) \text{ at } T_i = \frac{Z_{k,h}(i_n, v_n) \text{ at } T_i - Z_{i,h}(i_n, v_n) \text{ at } T_i}{\omega_k - \omega_i} (\omega_j - \omega_i) + Z_{i,h}(i_n, v_n) \text{ at } T_i \quad (10)$$

$$Z_{j,h}(i_n, v_n) \text{ at } T_k = \frac{Z_{k,h}(i_n, v_n) \text{ at } T_k - Z_{i,h}(i_n, v_n) \text{ at } T_k}{\omega_k - \omega_i} (\omega_j - \omega_i) + Z_{i,h}(i_n, v_n) \text{ at } T_k \quad (11)$$

$$Z_{j,h}(i_n, v_n) \text{ at } T_j = \frac{Z_{k,h}(i_n, v_n) \text{ at } T_k - Z_{i,h}(i_n, v_n) \text{ at } T_i}{T_k - T_i} (T_j - T_i) + Z_{i,h}(i_n, v_n) \text{ at } T_i \quad (12)$$

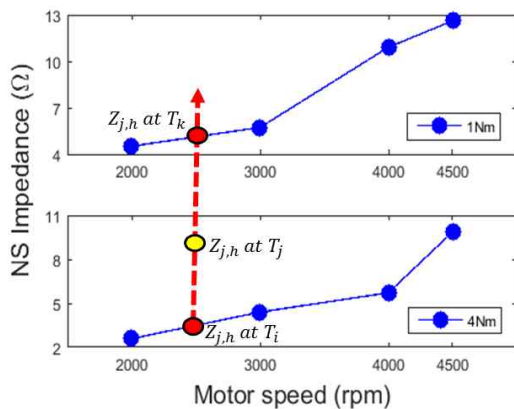


그림 5 선형 보간법을 이용한 임의의 동작 조건에서 고장이 발생하지 않았을 때의 역상 임피던스 계산

Fig. 5 Determination of nonfault NS impedance at arbitrary operating condition using the linear interpolation

2.2.5 역상 임피던스와 선형 보간법을 이용한 제한된 고장지표

앞에서 제한한 역상 임피던스는 권선 간 고장을 잘 나타내는 지표가 될 수 있다. 그러나 역상 임피던스는 권선 간 고장이 발생했을 때 변할 뿐 아니라 동작 조건이 변할 때에도 영향을 받는다. 이는 계산된 역상 임피던스 값에 변화가 발생하였을 때 변화의 원인이 권선 간 고장인지 동작 조건의 변화로 인한 것인지를 구분할 수 없음을 의미한다. 즉, 동작 조건의 변화에 대한 영향 때문에 역상 임피던스 자체를 고장 지표로 사용할 수 없기 때문에 고장이 발생하지 않은 전동기의 경우에는 동작 조건의 변화하여도 일정한 지표 값을 갖는 고장 지표를 다음과 같이 제한한다.

$$FI = \frac{Z(i_n, v_n)}{Z_h(i_n, v_n)} \quad (13)$$

식 (13)은 정상(healthy) 일 때의 역상 임피던스와 측정되는 역상 임피던스의 비를 의미하며, 전동기가 정상(healthy) 일 경우에는 FI 가 1이 되고, 권선간 고장이 발생하게 되면 FI 는 1이 아닌 값을 갖게 된다. 고장지표의 분모에 해당되는 정상(healthy) 상태에서의 역상 임피던스 값 $Z_h(i_n, v_n)$ 은 토크와 회전속도에 따른 look-up table을 만든 뒤, 임의의 동작조건에 대해서는 선형 보간법을 이용하여 그 값을 측정한다.

2.3 실험

2.3.1 실험 장비

영구자석 동기전동기의 동작 시스템은 그림 6과 같다. Higen사에 의해 제조된 FMAIN22-BBFB1 매립형 영구자석 동기전동



그림 6 2.2kW PMSM 제어 시스템의 장비

Fig. 6 Platform of 2.2kW PMSM control system

표 2 매립형 영구자석 동기전동기의 동작 특성

Table 2 Specifications of PMSM

Parameters	Values (Units)
Number of pole pairs	3
Input voltage	220 (V)
Rated output	2.2 (kW)
Rated torque	7 (Nm)
Rated motor speed	4500 (rpm)
Rated current	11 (A)
Stator resistance	0.44 (Ω)

기가 실험에서 사용되었다. 표 2는 실험에 사용된 매립형 영구자석 동기전동기의 특성을 나타낸다. 이 전동기는 3상 220 V 매립형 영구자석 동기전동기로, 6개의 pole과 36개의 slot을 가진다. 각 상은 6개의 권선이 직렬로 연결되어 있는데 각 권선의 수는 20이다.

2.3.2 동작조건

제안된 고장 지표의 성능을 확인하기 위해 정상 전동기 및 고장 전동기 각각의 대해 하나의 동작조건이 아닌 토크를 달리하며 실험을 수행하였다. 토크의 세기는 1, 2, 3, 4 Nm로 하였고, 전동기의 회전속도는 4500 rpm으로 설정하였다.

2.3.3 고장조건

표 3은 정상 조건 및 고장 권선 비와 고장 저항에 따른 고장 조건을 나타낸다. 권선간 고장이 발생하지 않은 전동기는 고장 요소의 측면에서 보았을 때 이론적으로 $\mu = 0$ 이고 $R_f = \infty$ 이기 때문에 정상(healthy) 조건에서의 고장 권선비와 고장 저항은 표 3과 같이 나타내었다. 또한 μ 가 클수록, R_f 가 작을수록 권선간 고장의 정도는 점점 심각해지므로 본 실험에서 가장 악한 고장은 고장 1로 설정하고 고장 권선 비의 변화 혹은 고장 저항의 변화를 통해 고장의 정도를 달리해주었다. 먼저, 고장 저항에 따른 고장의 심각성을 확인하기 위해 고장 1에서 5와 같이 고장 권선 비를 0.042로 고정된 상태에서 고장 저항을 점차적으로 감소시켜 순차적으로 고장의 정도가 심각해지도록 고장 조건을 설정하였으며, 고장 권선 비에 따른 고장의 심각성을 확인하기 위해 고장 3, 6, 7과 같이 고장 저항을 0.597 Ω 로 고정된 상태에서

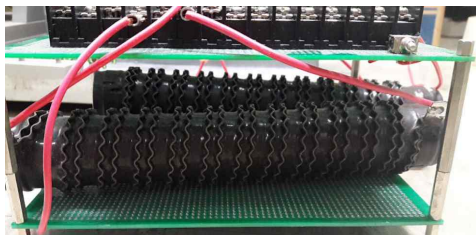


그림 7 실험에 사용된 고장 저항
Fig. 7 Fault resistance used in the experiments

표 3 정상과 고장 조건

Table 3 Healthy and faulty conditions

	고장 권선 비, μ	고장 저항, R_f (Ω)
정상	0	∞
고장 1	0.042	2.138
고장 2	0.042	1.124
고장 3	0.042	0.597
고장 4	0.042	0.366
고장 5	0.042	0.214
고장 6	0.083	0.597
고장 7	0.125	0.597

고장 권선 비를 점차적으로 증가시켜 순차적으로 고장의 정도가 심각해지도록 고장 조건을 설정해주었다. 또한, 이러한 고장 조건들을 가진 권선 간 고장 전동기를 만들기 위해 단락이 되는 권선 양단에 그림 7과 같은 전력저항을 고장 저항으로 연결하여 실험을 수행하였다.

2.4 실험결과 및 분석

위의 실험을 통해 구한 상전류와 상전압 데이터를 이용해 MATLAB R2015a(The Mathworks, Inc)을 사용하여 각 조건에 대한 고장지표를 구하였다.

2.4.1 고장 저항의 변화에 따른 고장지표의 성능 평가

그림 8은 전동기 회전속도가 4500 rpm, $\mu = 0.042$ 일 때 고장저항 R_f 에 따른 제안한 고장지표를 나타낸다. 그림 8의 제안된 고장 지표에서 정상인 경우에는 고장 지표 값이 1이지만 고장이 발생하게 되면 모든 고장 조건들이 1보다 작은 값을 가짐을 확인할 수 있었다. 또한 고장의 정도에 대해 살펴보면 고장 저항의 경우, 그 값이 작을수록 고장의 정도가 심각함을 의미하는데, 고장 저항 값이 작아질수록 제안한 고장 지표 값 또한 점점 작아짐을 확인할 수 있었다. 고장의 정도에 따라 고장 지표 값이 비슷하거나 역전되지 않고 순차적으로 고장 지표가 감소하

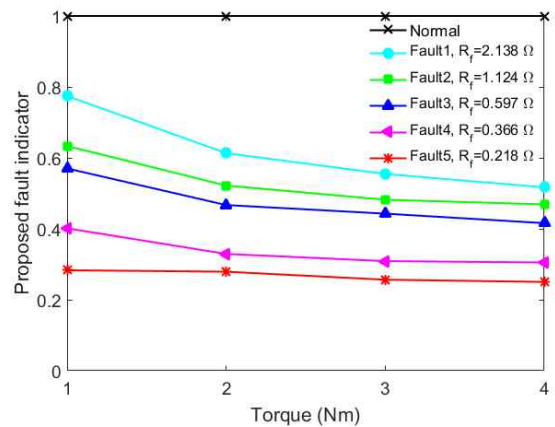


그림 8 4500 rpm, $\mu = 0.042$ 일 때 R_f 에 따른 고장지표

Fig. 8 Fault indicator with R_f under 4500 rpm, $\mu = 0.042$

표 4 토크변화에 따른 고장지표

Table 4 Fault indicator with varying load torque

	1 Nm	2 Nm	3 Nm	4 Nm
정상	1	1	1	1
고장 1	0.7745	0.6133	0.5546	0.5169
고장 2	0.6335	0.5219	0.4820	0.4689
고장 3	0.5702	0.4670	0.4428	0.4160
고장 4	0.4014	0.3292	0.3089	0.3051
고장 5	0.2832	0.2791	0.2565	0.2503

기 때문에 고장의 발생 유무 뿐 아니라 고장의 심각성에 대해서도 나타내는 고장 지표임을 확인할 수 있었다. 또한 토크가 변화할 경우에도 정상과 비교하여 고장이 잘 구분될 뿐 아니라 고장의 정도에 따라 순차적으로 감소함을 확인할 수 있었다. 이는 토크가 변화하는 동작조건에서도 고장의 심각성을 확인하는 지표로 이용될 수 있음을 의미한다. 더욱이 가장 약한 고장에 해당되는 고장 1의 고장지표 값의 경우 정상과 대비하여 확연하게 구분이 이루어졌음을 확인할 수 있었다. 표 4는 그림 8에 해당되는 고장 지표 값을 구체적인 수치로 나타낸 표이다. 토크가 증가할수록 같은 고장에 대해서 고장지표 값이 감소함을 확인할 수 있었고 특히 토크가 낮은 영역에 해당되는 1, 2Nm와 같은 동작조건에 대해서는 더욱 고장의 구분 및 정도가 잘 나타났다.

그림 9와 표 5는 제안된 고장지표의 성능을 비교하기 위해 그림 8 및 표 4와 동일한 동작조건과 고장조건에서 기존 방법 중 하나인 흔들림각 방법을 이용하여 구한 지표를 나타낸다. 먼저 그림 9에서 보이는 바와 같이 흔들림각의 경우에 대해서는 정상 대비 고장의 지표가 고토크 영역에 해당되는 4Nm인 경우를 제외하고 제안된 고장지표에 비해 정상과 비슷한 값을 가져 고장을 구분하는 지표로 사용하기 어려움이 있었다. 뿐만 아니라 정상과 고장이 비교적 구분되는 4Nm에서는 가장 약한 고장에 해당되는 고장 1의 지표 값이 고장 2와 3보다 더 낮은 수치를 나타내었다. 이는 고장이 점점 심각해질 때 고장 지표가 고장의 정도에 따라 비례 혹은 반비례하는 일정한 경향성을 나타내지 못하기 때

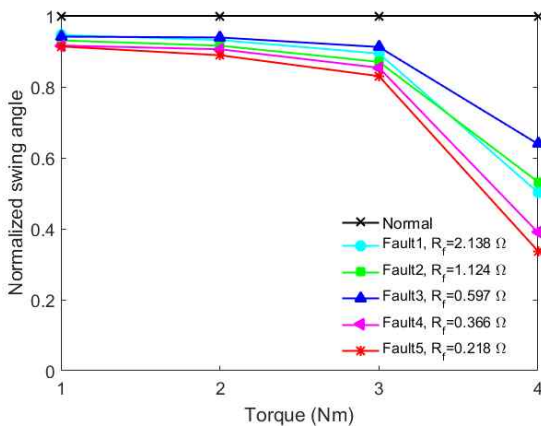


그림 9 4500rpm, $\mu = 0.042$ 일 때 R_f 에 따른 흔들림각
 Fig. 9 Swing angle with R_f under 4500rpm, $\mu = 0.042$

표 5 토크변화에 따른 흔들림각
 Table 5 Swing angle with varying load torque

	1Nm	2Nm	3Nm	4Nm
정상	1	1	1	1
고장 1	0.9462	0.9320	0.8940	0.5027
고장 2	0.9308	0.9161	0.8705	0.5324
고장 3	0.9416	0.9392	0.9124	0.6392
고장 4	0.9165	0.9059	0.8539	0.3897
고장 5	0.9139	0.8890	0.8302	0.3374

문에 고장의 정도를 파악하는 데 어려움이 있다. 또한 표 6에서 토크가 작아질수록 정상 및 각 고장에서의 지표 값이 거의 동일하게 나타나 고장을 진단할 수 없음을 확인할 수 있다. 이는 새롭게 제안한 고장지표의 성능이 기존 방법에 비해 토크 변화 및 심화되지 않은 고장과 고장의 심각성에 대해서도 진단할 수 지표로 사용될 수 있음을 의미한다.

2.4.2 전동기 회전속도 변화에 따른 제안된 고장지표의 성능 평가

그림 10은 전동기 회전속도가 4500rpm, $R_f = 0.597\Omega$ 일 때 고장 권선 비 μ 에 따른 제안한 고장지표를 나타낸다. 고장의 정도에 대해 살펴보면 고장 권선 비는 값이 커질수록 고장의 정도가 심각해짐을 의미하는데, 고장 권선 비가 커질수록 고장 지표 값이 순차적으로 작아짐을 확인할 수 있다. 이는 고장의 유무 뿐 아니라 정도에 따라서도 측정할 수 있는 지표로 사용될 수 있음을 의미한다. 또한 토크가 변화할 경우에도 고장이 잘 구분되었음을 확인할 수 있었다. 표 6은 그림 10에 해당되는 고장지표 값을 수치로 나타낸 표이다. 고장의 정도에 따라서도 진단이 잘 이루어질 뿐 아니라 토크가 변화하여도 고장을 진단할 수 있음이 확인된다.

그림 11과 표 7은 제안된 고장지표의 성능을 기존 방법과 비교하기 위해 그림 10 및 표 6과 동일한 동작조건과 고장조건에 대해 흔들림각 방법을 이용한 지표를 나타낸다. 그림 11에서 보이는 바와 같이 흔들림각의 경우에 대해서는 높은 토크 영역에

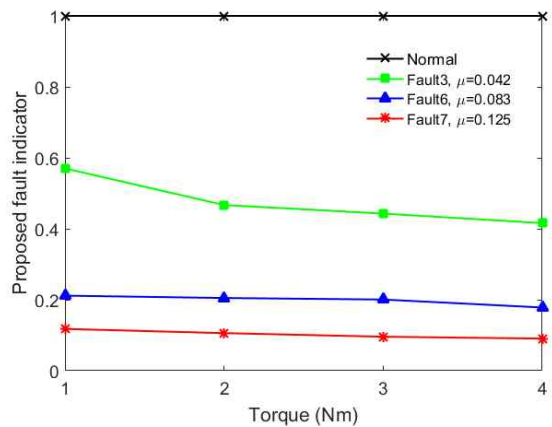


그림 10 4500rpm, $R_f = 0.597\Omega$ 일 때 μ 에 따른 고장지표
 Fig. 10 Fault indicator with R_f under 4500rpm, $\mu = 0.042$

표 6 토크변화에 따른 고장지표
 Table 6 Fault indicator with varying load torque

	1Nm	2Nm	3Nm	4Nm
정상	1	1	1	1
고장 3	0.5702	0.4670	0.4428	0.4160
고장 6	0.2115	0.2049	0.2006	0.1781
고장 7	0.1178	0.1059	0.0958	0.0905

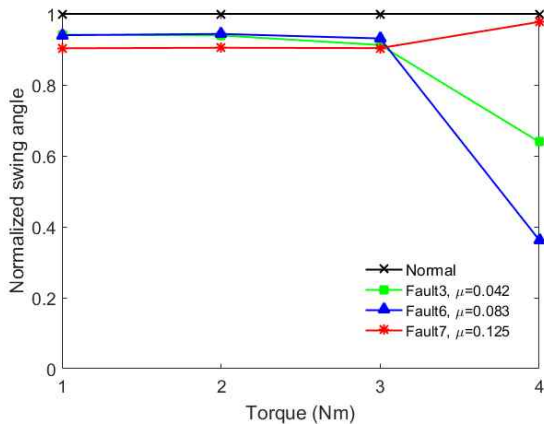


그림 11 4500rpm, $R_f = 0.597 \Omega$ 일 때 μ 에 따른 흔들림각
 Fig. 11 Swing angle with R_f under 4500rpm, $\mu = 0.042$

표 7 토크변화에 따른 흔들림각
 Table 7 Swing angle with varying load torque

	1Nm	2Nm	3Nm	4Nm
정상	1	1	1	1
고장 3	0.9416	0.9392	0.9124	0.6392
고장 6	0.9400	0.9436	0.9308	0.3627
고장 7	0.9031	0.9045	0.9036	0.9775

해당되는 4Nm을 제외한 토크 영역에 대해 제안된 고장지표와 달리 정상과 고장과의 구분이 어려움을 확인할 수 있다. 또한 고장의 정도에 대해서도 고장 3과 고장 6의 구분이 이루어지지 않는다. 뿐만 아니라 4Nm에서는 3가지 고장 중 가장 심각한 고장인 고장 7이 고장 3과 고장 6보다 정상에 더 가까운 수치를 나타내고 있다. 이는 흔들림각 방법은 고장의 정도에 따른 규칙성을 가지지 않고 변동하는 모습을 보이기 때문에 고장의 유무는 판단할 수 있으나 고장의 정도를 나타내는 고장지표로 사용하기에는 어려움이 있음을 의미한다. 이는 표 7의 흔들림각의 수치를 보면 더욱 명확하게 나타난다. 따라서 본 실험을 통해 새롭게 제안한 고장지표는 기존 방법인 흔들림각 방법에서 진단할 수 없는 심화되지 않은 고장 및 토크 변화에 대해서도 권선 간 고장을 진단할 수 있음이 확인된다.

3. 결 론

본 논문에서는 FEM 시뮬레이션을 통해 권선간 고장의 정도와 역상성분의 관계를 분석하여 역상 임피던스를 이용한 고장지표를 제안하였다. 제안된 방법은 신호 기반 방법으로 전동기 파라미터 및 전동기 회전각에 대한 정보가 필요 없이 오직 전압과 전류 신호만으로 고장이 심화되기 전의 권선간 고장에 대해 진단을 수행하였다. 제안된 고장지표는 실험을 통해 고장 저항 혹은 고장 권선 비에 따라 고장의 정보를 진단하였을 뿐 아니라 토크에 따

른 고장지표의 성능을 확인하였고, 권선 간 고장 진단이 잘 이루어졌음을 알 수 있었다. 제안된 고장지표는 센서리스 제어가 적용되는 전동기 및 노화 및 고장 등으로 인해 전동기 파라미터가 변화하여 값을 알 수 없는 경우에 대한 산업현장에서 유용하게 응용될 수 있다.

References

- [1] J. Hur, "Characteristic analysis of interior permanent-magnet synchronous motor in electro hydraulic power steering systems," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 6, pp. 2316-323, 2008.
- [2] FS. Nandi, H. Toliyat, and X. Li, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 4, pp. 719-29, Dec 2005.
- [3] Z. Wang, J. Yang, Y. Huiping, and W. Zhou, "A review of permanent magnet synchronous motor fault diagnosis," in Proc. IEEE ITEC Asia-Pacific, Aug 2014, pp. 1-5.
- [4] "IEEE recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems", IEEE Std493-1997[IEEE Cold Book], Appendix H.
- [5] A. Gandhi, T. Corrigan, and L. Parsa, "Recent advances in modeling and online detection of stator interturn faults in electrical motors," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 5, pp. 1564-575, May 2011.
- [6] W. T. Thomson and M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults," IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 7, no. 4, pp. 26-34, July/Aug. 2001.
- [7] J. F. Martins, V. F. Pires, and A. Pires, "Unsupervised neural-network based algorithm for an on-line diagnosis of three-phase induction motor stator fault," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 1, pp. 259-264, Feb. 2007.
- [8] S. Moosavi, A. Djerdir, Y. Ait-Amirat, and D. Khaburi, "Ann based fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor under stator winding shorted turn," Electric Power Systems Research, vol. 125, pp. 67-82, Apr. 2015.
- [9] Y. Nyanteh, C. Edrington, S. Srivastava, and D. Cartes, "Application of artificial intelligence to real-time fault detection in permanent-magnet synchronous machines," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 49, no. 3, pp. 1205-1214, May/June 2013.
- [10] M. S. Ballal, Z. J. Khan, H. M. Suryawanshi, and R. L. Sonolikar, "Adaptive neural fuzzy inference system for the detection of inter-turn insulation and bearing wear faults in induction motor," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 1, pp. 250-258, Feb. 2007.
- [11] A. Sarikhani and O. A. Mohammed, "Inter-turn fault

detection in pm synchronous machines by physics-based back electromotive force estimation,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 8, pp. 3472-3484, Aug. 2013.

- [12] J. Hang, J. Zhang, M. Cheng, and J. Huang, “Online interturn fault diagnosis of permanent magnet synchronous machine using zero-sequence components,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 12, pp. 6731-6741, Dec. 2015.
- [13] J. He, A. Fatemi, Nabeel A. O. Demerdash, and Dan M. Ionel, “Diagnosis of stator short-circuit faults in series and parallel winding connections of closed-loop controlled PMSMs”, IEEE IMDEC, 2015.
- [14] H. Mahmoud, A. A.-E. Abdallah, N. Bianchi, El-Hakim, A. Shaltout, and L. Dupré, “An inverse approach for interturn fault detection in asynchronous machines using magnetic pendulous oscillation technique”, IEEE Trans. Ind. App., vol. 52, no. 1, JAN/FEB 2016.

저 자 소 개



정 혜 윤 (Hyeyun Jeong)

2014년 포항공과대학교 전자전기공학과(공학사). 2016년 동 대학원 전자전기공학과(공학석사). 2016년~현재 포항공과대학교 전자전기공학과 대학원 박사과정.



김 상 우 (Sang Woo Kim)

1983년 서울대학교 제어계측공학과(공학사). 1985년 동 대학원 제어계측공학과(공학석사). 1990년 동 대학원 제어계측공학과(공학박사). 1992년~현재 포항공과대학교 전자전기공학과 교수. 관심분야는 최적제어, 최적화 알고리즘, 지능제어, 공정자동화.