

# 선형보간법을 이용한 매립형 영구자석 동기모터의 감자고장진단

## Demagnetization Fault Diagnosis in IPMSM Using Linear Interpolation

정혜윤\* · 문석배\* · 이호진\* · 김상우†

(Hyeyun Jeong · Seokbae Moon · Hojin Lee · Sang Woo Kim)

**Abstract** - This paper proposes a demagnetization fault diagnosis method for interior permanent magnet synchronous motors(IPMSMs). In particular, a demagnetization fault is one of the most frequent electrical faults in IPMSMs. This paper proposes an estimation method for permanent magnet flux. The method is based on linear interpolation. The effectiveness of the proposed method for diagnose demagnetization faults is verified through various operating conditions by finite element simulation.

**Key Words** - Fault diagnosis, Permanent Magnet Synchronous Machines(PMSM), Demagnetization faults, Permanent Magnet(PM), Model-based analysis.

### 1. 서론

매립형 영구자석 동기모터(IPMSM: Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)는 효율성, 전력밀도, 운전 속도 영역 등에서 유도모터, BLDC 모터, 릴럭턴스 모터 등에 비해 장점을 갖는다. 이런 이유로 최근 전 세계적으로 각광받고 있는 전기 자동차 및 하이브리드 자동차와 같은 친환경자동차에 사용될 구동 모터로 IPMSM이 강력한 후보로 각광받고 있다[1],[2]. 이러한 모터에 고장이 발생하게 되면, 한정된 에너지를 사용하는 친환경 자동차의 출력과 효율에 직접적인 영향을 주게 되며, 심각하게는 인명피해까지 발생하는 상황이 초래될 수 있다. 그러므로 고장의 초기단계에서의 진단방법이 매우 중요하다[3].

IPMSM의 경우 기존 모터들과 달리 영구자석(permanent magnet)이 중요한 요소 중 하나인데 이러한 영구자석에 여러 가지 요인으로 인해 영구자석의 자속이 약해지는 감자고장이 발생할 수 있다. 고장자 코일 회로의 선간단락 등으로 발생할 수 있으며, 물리적 충격이나 고온에서의 장시간 동작으로 인한 열화, 혹은 오랜 시간 사용함으로써 노화 등이 주요 원인으로 꼽힌다[4],[5]. IPMSM의 특성상 감자 고장이 일어날 경우, 모터의 성능과 효율 모두에 직접적인 영향을 미치게 되며 이는 자동차의 운행에 있어 목표한 거리를 가지 못하는 등의 결과를 유발할 수 있다. 따라서 일정 수준 이하로 영구자석의 세기가 약해질 경우에 대한 정확한 진단이 필요하다.

감자 고장을 진단하기 위해서 다양한 기법들이 연구되어 왔다. 대표적으로 푸리에 변환(fourier transform) 등을 비롯한 주파수 분석 기법이 있으며 모터 모델을 이용한 모델 기반 기법 등이 있다[6],[7]. 주파수 분석 기법의 경우 고장으로 인해 특정 주파수에서 발생하는 성분을 찾아내어 고장을 진단한다. 이 때 고장 성분은 불균일한 감자의 경우에만 발생하며 동작 주파수의  $(1 \pm 2k/P)$ 배수의 주파수에서 나타나게 된다[6].  $k$ 는 임의의 정수,  $P$ 는 모터의 극수이다. 그러므로 균일한 감자의 경우 고장 진단을 수행할 수 없다. 뿐만 아니라 고장 정도와 고장 성분의 크기가 비례하지 않기 때문에 감자의 진행 정도를 파악하기에 부적합하다. 모델 기반 기법의 경우 IPMSM 전압-전류 모델을 바탕으로 다양한 파라미터 추정 기법을 이용해 영구자석의 자속을 추정하여 감자의 진행정도를 판단한다. 이 방법을 사용하게 되면 감자고장의 유무를 알 수 있을 뿐더러 감자의 정도도 알 수 있는 장점이 있다[7]. 기존의 연구된 모델 기반 방법은 자석의 종류와 구조, 철심의 종류와 모양, 공극 등 물리적 내부구조를 분석을 통해 인덕턴스를 유도하며 이 식과 전압-전류 모델을 이용해 영구자석의 자속을 추정한다. 이러한 방법은 주파수 분석 기법과 다르게 감자의 정도를 알 수 있을뿐더러 균일 감자의 경우에도 진단이 가능하다. 그러나 모터의 사양이 바뀔 때 마다 물리적 내부 구조를 새롭게 분석하여 인덕턴스 식을 다시 구해야 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 단점을 보완하고자 IPMSM이 바뀌어도 물리적 내부 구조에 대한 정보 없이 감자고장의 유무 뿐 아니라 감자의 정도를 알 수 있는 방법을 제안한다. 정상모터의 IPMSM d-q축 전압-전류 모델에서 q축 전압은 정상상태(steady-state)에서 d축 인덕턴스와 영구자석의 자속으로 표시되며 d축 인덕턴스는 근사적으로 영구자석의 자속 및 투자율과 선형관계가 있음을 보일 수 있다. 이와 같은 사실로부터 정상(healthy)모터의 d축 인덕턴스와 기지의 양만큼 감자된 모터의 d축 인덕턴스를 알 수

† 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 : February 1, 2017; Accepted : February 22, 2017

있으면 복잡한 인덕턴스 식이 없어도 간단한 선형보간법을 이용하여 감자의 유무와 감자의 정도를 추정할 수 있다. d축 인덕턴스는 영구자석의 자속 세기를 알 경우 간단한 실험으로 얻은 데이터를 이용하여 구할 수 있다.

논문의 구성은 다음과 같다. 본문에서 IPMSM의 d-q축 등가 모델에 대해 설명하고, d축 인덕턴스와 영구자석의 자속 및 투자율이 근사적으로 선형임을 보인 뒤 선형보간법을 이용하여 영구자석의 자속을 추정하는 감자고장진단 알고리즘에 대해 소개한다. 유한요소 해석 모델을 이용하여 선형보간법의 타당성을 보이고 다양한 동작조건 및 고장조건에 따라 알고리즘의 성능을 확인한다. 결론에서는 제안된 방법의 응용가능성을 제시한다.

## 2. 본 론

### 2.1 IPMSM의 d-q축 등가모델

IPMSM의 감자특성을 분석하기 위해서는 d-q축 등가 모델이 유용하다. 다음은 d-q축 동기좌표계에서 자속-전류 관계식이다.

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_{PM} \tag{1}$$

$$\psi_q = L_q i_q \tag{2}$$

이 때,  $\psi_d$ 와  $\psi_q$ 는 각각 d와 q축의 자속,  $L_d$ 와  $L_q$ 는 각각 d와 q축의 인덕턴스,  $i_d$ 와  $i_q$ 는 각각 d와 q축의 전류,  $\psi_{PM}$ 은 영구자석의 자속을 의미한다.

영구자석의 자속 성분은 d축에 나타나게 되며, 이를 바탕으로 d-q축의 전압-전류 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_{PM} \end{bmatrix} \tag{3}$$

이러한 d-q축 등가모델의 전류, 전압, 자속에 대해 입력전류, 입력전압 및 역기전력과의 관계를 도식적으로 확인하기 위해 벡터 다이어그램으로 나타내면 그림 1과 같다.

이 때,  $I_a$ 와  $\beta$ 는 각각 입력전류의 크기와 위상,  $\psi_0$ 은 영구자

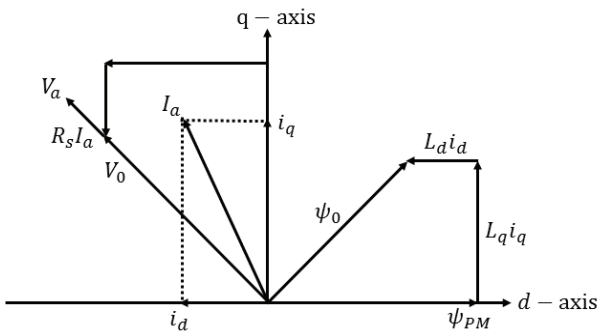


그림 1 IPMSM의 벡터 다이어그램

Fig. 1 Vector diagram of IPMSM

석에 의한 자계와 전기자 반작용 자계에 의한 합성 자속,  $V_0$ 는  $\psi_0$ 에 의한 부하 역기전력,  $V_a$ 는 입력전압을 의미한다. 그림 1에서  $I_a$ 와  $\beta$ 가 2사분면에 위치할 때  $\psi_0$ 가 d-q 평면의 1사분면에 만들어진다.  $V_0$ 은 2사분면에 위치하고  $V_a$ 에 저항의 전압 강하 성분이 추가된 전압  $V_e$ 가 표현된다.

다음은 영구자석의 자속과 모터의 관계를 알아보기 위해 나타낸 IPMSM의 토크 식이다.

$$T_e = \frac{3P}{4} [\psi_{PM} i_q - (L_q - L_d) i_d i_q] \tag{4}$$

IPMSM의 토크는 전류가 클수록, 영구자석의 자속이 클수록 큰 토크를 나타냄을 식 (4)를 통해 확인할 수 있다. 주어진 환경에서 최적의 효율과 최대 토크를 내기 위해 단위 전류 당 최대 토크(maximum torque per ampere) 제어 및 약계자 영역에서의 제어 등 다양한 제어 이론과 방법이 있지만, 일차적으로 영구자석의 자속의 크기가 감소할 경우 모터가 낼 수 있는 토크가 줄어들어 모터의 성능과 효율에 직접적으로 영향을 주게 된다.

### 2.2 감자고장진단

#### 2.2.1 정상상태에서 IPMSM 모델식

정상상태(steady-state)에서  $L_q \frac{di_q}{dt} = 0$ 이므로 식 (3)에서 영구자석의 자속은 다음과 같이 표현된다.

$$\psi_{PM} = \frac{v_q}{\omega_e} - L_d i_d - \frac{r_s i_q}{\omega_e} \tag{5}$$

그러므로  $L_d$ 와  $r_s$ 를 알고 있으면 측정된  $v_q$ ,  $i_d$ ,  $i_q$ ,  $\omega_e$ 로부터 감자된  $\psi_{PM}$ 을 추정할 수 있다. 그러나 감자가 되면  $L_d$ 가 변하게 되므로 추정된  $\psi_{PM}$ 에서  $L_d$ 를 다시 구하여 식에 반영해야 정확한  $\psi_{PM}$ 을 추정할 수 있다.

#### 2.2.2 d축 인덕턴스와 영구자석의 자속과의 관계

그림 2는 IPMSM의 d축 자로(flux path)를 나타낸다. 이때 d축 자로는 q축에서 확인할 수 있고 q축 전류에 대해 암페어 법칙을 적용하면 다음과 같다[9].

$$\frac{B}{\mu_{PM}} 2h_m + \frac{B}{\mu_0} 2g + \frac{B}{\mu_{Fe}} l_{core} = N i_d \tag{6}$$

$B$ 는 공극의 자기장,  $\mu_{Fe}$ ,  $\mu_0$ ,  $\mu_{PM}$ 은 각각 철심, 진공, 영구자석의 투자율이고,  $h_m$ 은 영구자석의 두께,  $g$ 는 공극,  $l_{core}$ 은 철심 부분을 지나는 자로의 총 길이,  $N$ 은 d축 권선이 감긴 횟수이다.

덧붙여 IPMSM의 극수가 변화하여도 q축 전류에 대한 암페어 법칙을 적용하면 식 (6)과 동일하다.  $\mu_{Fe} \approx 4000\mu_0$ 이므로  $\frac{B}{\mu_{Fe}} l_{core}$

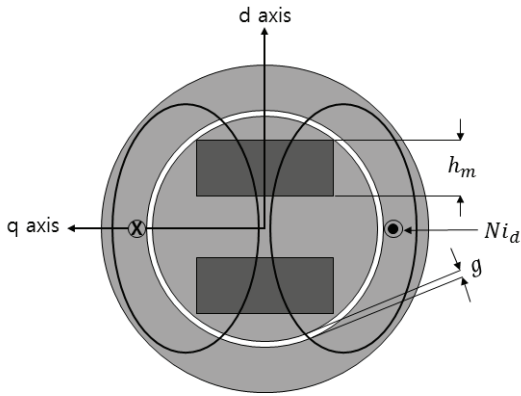


그림 2 IPMSM의 자로  
Fig. 2 Flux paths of IPMSM

는 상대적으로 매우 작은 값을 갖고,  $\mu_{PM} \approx \mu_0$ ,  $h_m \gg g$ 이므로  $\frac{B}{\mu_0} 2g$  또한 상대적으로 작은 값을 갖는다. 따라서 식 (6)은 다음과 같이 근사된다.

$$\frac{B}{\mu_{PM}} 2h_m \approx N i_d \quad (7)$$

A를 자속을 지나는 공극 면적이라고 하면  $NB \times A = L_d i_d$ 에 의해 d축 인덕턴스는 식 (8)과 같다.

$$L_d = \frac{\mu_{PM} N^2 A}{2h_m} \quad (8)$$

식 (8)에서 d축 인덕턴스는 영구자석의 투자율과 비례함을 알 수 있다. 한편, 감자가 발생하면 영구자석의 자기장 및 자속  $\psi_{PM}$ 이 감소하고 이에 따라 영구자석의 퍼미언스도 감소한다[8]. 영구자석의 퍼미언스는 [8]에서와 같이 영구자석의 투자율에 비례하므로 감자가 발생하면 d-축 인덕턴스는 감소한다. 따라서 임의의  $\psi_{PM,0}$ 과  $\psi_{PM,1}$ 에서 d축 인덕턴스를 알 경우  $\psi_{PM,0} < \psi_{PM,2} < \psi_{PM,1}$ 인  $\psi_{PM,2}$ 에서 d축 인덕턴스를 선형보간법으로 구할 수 있다.

2.2.3 감자고장진단 알고리즘

모터가 감자고장이 발생하지 않았을 경우 ( $\psi_{PM,0}$ )의 d축 인덕턴스와 감자가 발생하여 영구자석의 자속이  $\psi_{PM,1}$ 으로 감소하였을 때의 d축 인덕턴스를 각 동작환경에서 알고 있고  $\psi_{PM,0}$ 와  $\psi_{PM,1}$  사이에 감자가 발생했을 경우 영구자석의 자속  $\psi'_{PM}$ 을 추정하는 알고리즘은 그림 3과 같다. 먼저, 정상모터의 d축 인덕턴스와 측정된 전압, 전류, 회전속도 값을 이용하여 영구자석의 자속을 추정한다. 이 때, 정확한 계산을 위해 측정된 물리량 등은 대역 통과 필터(band pass filter)를 통과한 값을 이용한다. 추정된 자속 ( $\hat{\psi}_{PM}$ )이  $\psi_{PM,0}$ 와  $\psi_{PM,1}$  사이에 있으면 선형보간법을 이

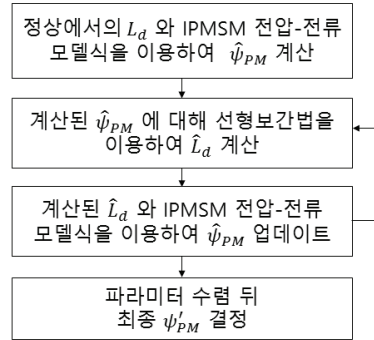


그림 3 감자고장진단 알고리즘 흐름도  
Fig. 3 Flow chart for demagnetization faults diagnosis

용하여 새로운 d축 인덕턴스 ( $\hat{L}_d$ )를 구한다. 이 인덕턴스를 이용하여 다시  $\hat{\psi}_{PM}$ 를 구한다. 이 과정을  $\hat{\psi}_{PM}$ 이 수렴할 때까지 반복한다. 알고리즘 종료 시의 영구자석의 자속이 실제 감자된 모터의 영구자석의 자속의 추정 값  $\psi'_{PM}$ 이다.

2.3 시뮬레이션 설계

2.3.1 유한요소해석 모델

본 논문에서는 IPMSM의 특성을 해석하기 위해 JMAG을 이용하여 2차원 유한요소 해석을 수행하였다. 이 때 전류는 이상적인 정현파로 가정하였다. 시뮬레이션 모터의 주요 사양은 표 1과 같으며 그림 4는 해당 모터의 정상(healthy) 상태의 고정자와 회전자 코어 형상을 보여준다.

표 1 시뮬레이션 모터의 사양  
Table 1 Specifications of IPMSM for simulation

Parameters	Values (Units)
Plot/slot	8/48
Max power	102 (kW)
Max torque	310 (Nm)
Max speed	9220 (rpm)
Input voltage	340 (Vdc)
Input current	400 (Arms)
Stator resistance	22 (mΩ)

2.3.2 동작조건 및 Look-up table

유한요소해석 모델의 데이터를 수집하기 위해 회전속도는 3142 rpm으로 일정하게 설정하였고, 토크는 전류의 크기와 위상을 표 2와 같이 설정하여 이들의 조합인 총 81가지의 동작조건에서의 시뮬레이션을 수행하였다. 위와 같은 동작조건을 정상(healthy) 뿐 아니라 1/8 감자모델에서도 동일하게 적용하여 각 동작조건에서의 d축 및 q축 인덕턴스에 대한 look-up table을 완성하였다.

표 2 전류의 크기와 위상 변화

Table 2 Amplitude and phase variations of current

전류의 크기 (Arms)	전류의 위상 (°)
5	1
50	10
100	20
150	30
200	40
250	50
300	60
350	70
400	80

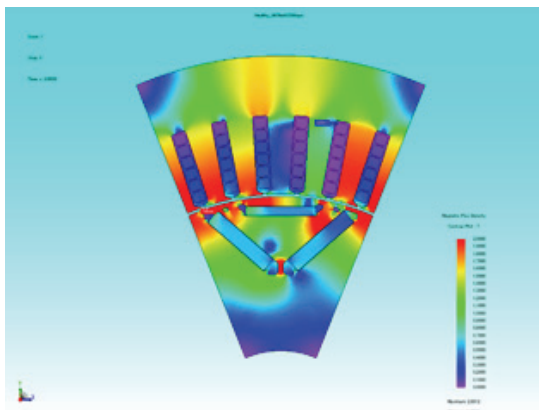


그림 4 2D 유한요소 모델

Fig. 4 2D finite-element model

본 논문에서 제안하는 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 전류의 크기와 위상이 각각 250A, 30°일 때 감자의 정도를 정상, 1/128 감자, 1/64 감자, 2/64(1/32) 감자, 3/64 감자, 4/64(1/16) 감자, 5/64 감자, 6/64(3/32) 감자, 7/64 감자, 8/64(1/8) 감자에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 제안하는 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 1/16 감자에 대해 전류의 위상은 30°로 일정하게 하고 전류의 크기가 각각 50, 250, 350A인 경우 및 전류의 크기는 200A로 일정하고 전류의 위상이 각각 20, 50, 80°인 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

## 2.4 시뮬레이션 결과 및 분석

### 2.4.1 데이터 분석

#### 2.4.1.1 선형보간법 타당성 검증

그림 5는 제안한 방법에 사용된 선형 보간법이 감자고장진단 알고리즘에 적합여부를 확인하고자 시뮬레이션 모델에서 전류의 크기와 위상이 각각 250A, 30°일 때 감자가 발생하였을 때의 영구자석의 자속 및 d축 인덕턴스를 나타낸다. 이는 감자발생시 영구자석의 자속의 세기와 d축 인덕턴스는 선형적으로 변화함을 나타내고 있다. 따라서 선형보간법을 이용하여 감자고장진단을 수행할 수 있음을 보여준다.

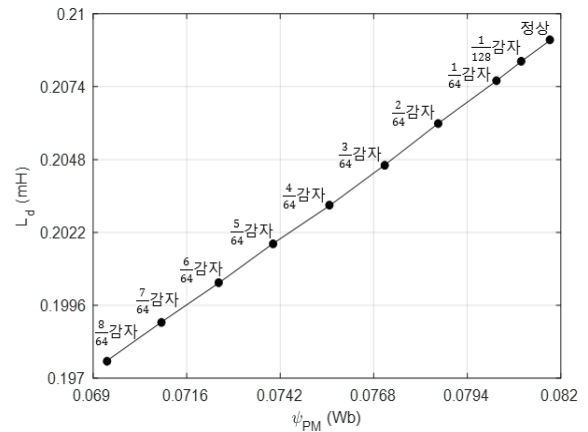


그림 5 감자하의 영구자석의 자속에 대한 d축 인덕턴스

Fig. 5 d-axis inductance with varying PM flux under demagnetization

#### 2.4.1.2 감자정도와 전류 크기에 따른 인덕턴스 변화

표 3은 정상과 감자정도에 따라 전류의 크기를 변화하였을 때 d축 인덕턴스 변화를 나타낸다. 표 3에서 전류의 크기가 동일할 때 감자의 정도가 증가할수록 d축 인덕턴스가 선형적으로 감소함을 확인할 수 있었다. 또한 동일한 감자정도에 대해 전류의 크기가 증가할수록 d축 인덕턴스가 선형적으로 감소하는 특성을 보였다.

표 3 3142 rpm, 전류의 위상이 30°일 때 감자정도와 전류 크기에 따른 d축 인덕턴스

Table 3 d-axis inductance according to demagnetization and current under 3142 rpm and 30°

전류의 크기 (Arms)	정상	1/16 감자	1/8 감자
50	0.281523	0.281111	0.280064
100	0.253540	0.251010	0.247962
150	0.237330	0.234160	0.254594
200	0.228091	0.224947	0.221427
350	0.200012	0.194625	0.189004
400	0.195429	0.190227	0.184811

### 2.4.2 알고리즘 성능 평가

#### 2.4.2.1 전류의 세기에 따른 감자고장진단

다음은 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 정상에서의 모터 파라미터와 1/8 감자에서의 모터 파라미터를 이용하여 1/16 감자 고장을 진단하였다. 그림 6은 3142rpm, 전류의 위상 30°에서 알고리즘 반복횟수에 따른 영구자석 자속의 추정치를 나타낸다. 정상은 Healthy로 표현된 선이고 1/16 감자는 1/16 Demag로 표현된 선인데 1번의 수행(처음은 정상 모터 파라미터를 이용하여 추

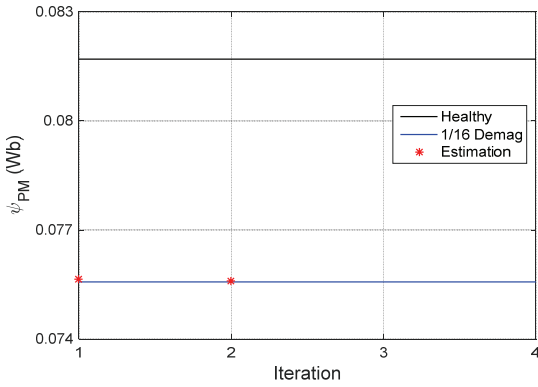


그림 6 알고리즘 반복횟수에 따른 50A, 30°에서의 영구자석의 자속 추정

Fig. 6 Estimation of PM flux with the number of algorithm iteration under 50A and 30°

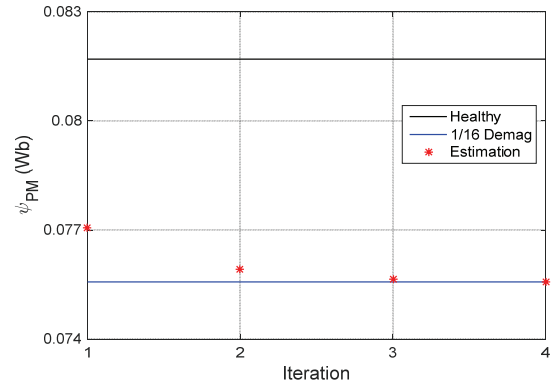


그림 8 알고리즘 반복횟수에 따른 350A, 30°에서의 영구자석의 자속 추정

Fig. 8 Estimation of PM flux with the number of algorithm iteration under 350A and 30°

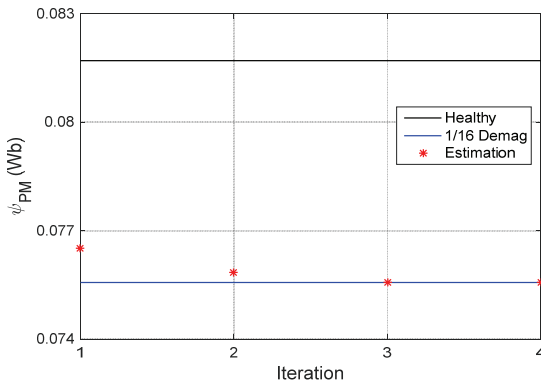


그림 7 알고리즘 반복횟수에 따른 250A, 30°에서의 영구자석의 자속 추정

Fig. 7 Estimation of PM flux with the number of algorithm iteration under 250A and 30°

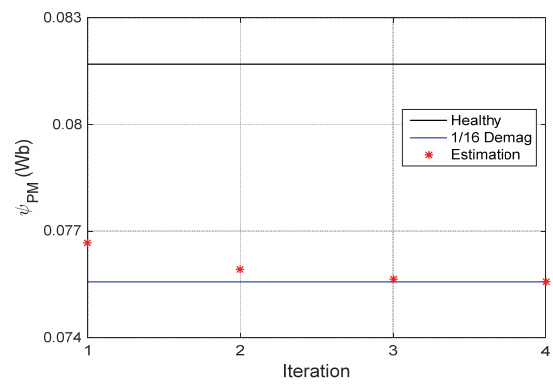


그림 9 알고리즘 반복횟수에 따른 200A, 20°에서의 영구자석의 자속 추정

Fig. 9 Estimation of PM flux with the number of algorithm iteration under 200A and 20°

정한 영구자석의 자속을 의미)을 통해 잘 이루어짐을 확인할 수 있다. 마찬가지로 그림 7, 8은 각각 전류의 크기가 250A과 350A 일 때 알고리즘 반복횟수에 따른 영구자석 자속의 추정치를 나타낸다. 각각의 그림에서 1/16 감자고장진단이 잘 이루어짐을 확인할 수 있다. 또한 그림 6, 7, 8에서 전류의 크기가 증가할수록 정상 대비 인덕턴스의 변화가 크므로 알고리즘의 반복횟수가 증가함을 알 수 있다.

#### 2.4.2.2 전류의 위상에 따른 감자고장진단

그림 9는 3142 rpm, 전류의 크기 200 A, 위상이 20°에서 알고리즘 반복횟수에 따른 감자의 정도 추정을 나타낸다. 3번의 반복 만에 영구자석 자속 추정이 잘 이루어짐을 확인할 수 있다.

마찬가지로 그림 10, 11은 전류의 위상이 50°, 80°에서 알고리즘 반복횟수에 따른 영구자석 자속의 추정치를 나타낸다. 각각의 그림에서 1/16 감자고장진단이 잘 이루어짐을 확인할 수 있

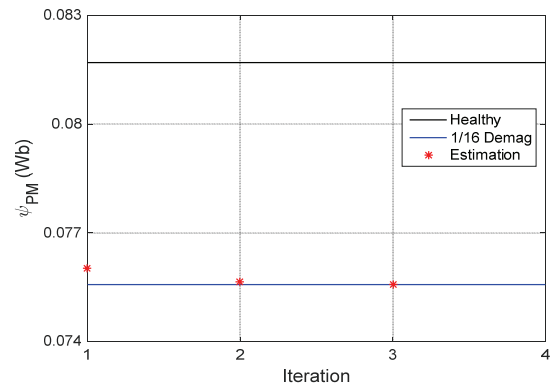


그림 10 알고리즘 반복횟수에 따른 200A, 50°에서의 영구자석의 자속 추정

Fig. 10 Estimation of PM flux with the number of algorithm iteration under 200A and 50°

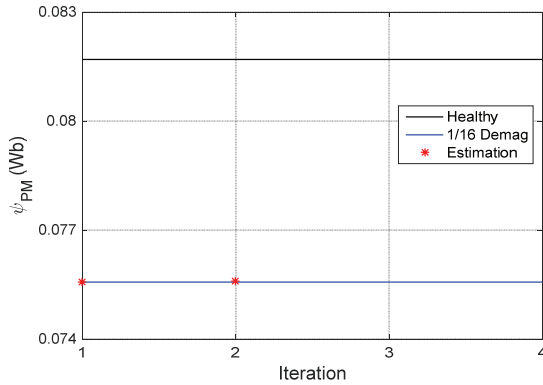


그림 11 알고리즘 반복횟수에 따른 200A, 80°에서의 영구자석의 자속 추정

Fig. 11 Estimation of PM flux with the number of algorithm iteration under 200A and 80°

다. 또한 그림 9, 10, 11에서 전류의 위상이 증가할수록 알고리즘의 반복횟수가 감소함을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 영구자석의 자속세기와 d축 인덕턴스의 관계를 분석하여 선형 보간법을 이용한 매립형 영구자석 동기모터의 감자고장진단 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방법은 모델 기반 기법으로 전류의 크기와 위상의 변화에 대해서 정상과 특정 감자고장에서의 모델 파라미터 정보만 알면 나머지 감자 고장의 정도에 대해 진단이 가능함을 보였다. 유한 요소 시뮬레이션 데이터를 이용하여 제안된 알고리즘의 성능이 우수함을 보였다. 제안된 방법은 모터의 물리적 내부 구조에 대한 정보를 알지 못해도 감자의 정도를 진단할 수 있는 장점을 지닌다. 본 알고리즘은 한정된 에너지로 고효율의 성능을 내야하는 친환경자동차용 IPMSM의 감자고장진단에 매우 유용하게 사용될 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] J. de Santiago, H. Bernhoff, B. Ekegard, S. Eriksson, S. Ferhatovic, R. Waters, and M. Leijon, "Electrical Motor Drivelines in Commercial All-Electric Vehicles: A Review," IEEE Trans. Veh. Tech., vol. 61, no. 2, pp. 475-484, Feb. 2012.

[3] S. 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. 719-729, Dec 2005.

[4] 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.

[5] "IEEE recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems," IEEE Std493-1997[IEEE Cold Book], Appendix H

[6] A. G. Espinosa, J. A. Rosero, J. Cusido, L. Romeral, and J. A. Ortega, "Fault Detection by means of Hilbert-Huang transform of the stator current in a PMSM with demagnetization," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 25, no. 2, pp. 312-318, June 2010.

[7] S. Moon, J. Lee, H. Jeong, and S. W. Kim, "Demagnetization fault diagnosis of a PMSM based on structure analysis of motor inductance," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 6, pp. 3795-3803, June 2016.

[8] J. Farooq, S. Srairi, A. Djerdir, and A. Miraoui, "Use of permeance network method in the demagnetization phenomenon modeling in a permanent magnet motor," IEEE Trans. Ind. Mag., vol. 42, no. 4, pp. 1295-1298, April 2006.

[9] K. Nam, "AC motor control and electric vehicle applications," CRC press, pp. 133-154.

## 저 자 소 개



### 정혜윤 (Hyeyun Jeong)

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

Tel : 054-279-2237

E-mail : jhy90@postech.ac.kr



### 문석배 (Seokbae Moon)

2011년 포항공과대학교 전자전기공학과(공학사). 2011년~현재 포항공과대학교 전자전기공학과 대학원 석박통합과정.

Tel. 054-279-2237,

E-mail : msbworld@postech.ac.kr



**이 호 진 (Hojin Lee)**

2016년 포항공과대학교 전자전기공학과(공학사). 2016년~현재 포항공과대학교 전자전기공학과 대학원 석박통합과정.

Tel. 054-279-2237,

E-mail : [suvvus@postech.ac.kr](mailto:suvvus@postech.ac.kr)



**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 최적 제어, 최적화 알고리즘, 지능제어, 공정자동화.

Tel. 054-279-2237,

E-mail : [swkim@postech.ac.kr](mailto:swkim@postech.ac.kr)