

PMSM 회전자 자석 결함 위치 검출기법에 관한 연구

최 철*, 이정규**, 이정준*, 김철우*
 부산대*, LG.OTIS**

A study on the magnetic fault position extraction method for PMSM

Cheol Choi*, Jung-Kyu**, Jung-Jun Lee*, Cheol-U Kim
 Pusan National University*, LG.OTIS**

ABSTRACT

본 연구에서는 표면 부착형 영구자석 전동기(PMSM)의 회전자 부착 자석 변동에 따른 영향과 변동 위치를 검출하는 기법에 대하여 연구하였다. 회전자 표면부착 영구자석의 변동은 사용조건에 따른 변화와 자석 단품에 의한 영향으로 구분해 볼 수 있고, 이들 변화 요인 중 제어장치에 치명적인 자석에 의한 변화를 고려하였다. 따라서 자석의 변동 현상 중 고밀도 자성체의 하나인 네오드뉼-보론-철 계열의 고에너지저장을 갖는 자석의 산화 방지를 위한 표면 부식 등의 현상에 의한 자편의 완전 이탈을 가정하고 이와 같은 이탈현상이 발생한 경우의 현상과 일반적으로 사용되는 인크리멘탈 엔코더를 적용한 이탈 발생위치를 추적하는 방법을 보였다.

1. 서 론

영구자석 전동기에 사용되는 자성체의 종류는 일반적으로 페라이트계, 알니코계, 희토류계로 구분해 볼 수 있다. 이 중 최근에 널리 사용되는 재료는 희토류계 자석이고 이것은 화학주기율표상의 원소들 중 란타넘계의 사마륨(Sm)이나 네오드뉼(Nd)등의 원소를 포함하는 자성체를 지칭한다. 이와 같은 희토류자석에는 사용되는 주 원소에 따라 사마륨자석(SmCo)과 네오드뉼자석(Nd-Fe-B)이 있다. 사마륨자석의 경우는 잔류자속밀도나 보자력 등이 매우 높고 온도특성도 매우 좋으나 주원료의 공급제한 등의 이유로 사용사의 제한이 많은 것으로 알려져 있고, 이를 대체한 것이 네오드뉼자석이다.

네오드뉼자석은 잔류자속밀도와 보자력이 사마륨자석을 능가하지만 온도특성변화와 고온사용시의 사용상의 어려움, 특히 공기중의 산화력이 강해 공기 중 쉽게 산화하여 녹이 생기는 단점이 있어 이를 보완하기 위해 반드시 표면 코팅을 해서 사용해야만 한다.

본 연구에서는 네오드뉼자석을 사용한 전동기에 있어서

산화방지처리를 위한 코팅작업의 결함과 전동기 조립과정에서의 코팅면 손상 등에 의한 자석의 부식과 이에 따른 접착력약화를 가정하여 자석이 이탈하는 결함발생을 고려하여 그 현상을 확인하고 이탈 위치를 확인하는 기법에 연구 목적을 두었다.

2. 본 론

2.1 모델링 가정

PMSM의 수학적 모델링을 위한 몇가지 가정은 다음과 같다.

- 1) 전동기는 회전계자형으로 고정자의 3상 권선은 Y결선으로 대칭분포를 이루며 각 권선의 임피던스도 3상 대칭이다.
- 2) 공극의 넓이는 일정하고, 공극에 쇄교하는 자속은 공간적으로 완전한 정현파 형태를 취한다.
- 3) 철심의 자화특성은 선형이고, 히스테리시스 등에 의한 손실은 없다.
- 4) 회전자는 영구자석만으로 일정한 자속을 유지한다.

2.2 영구자석형 동기전동기의 3상 모델링

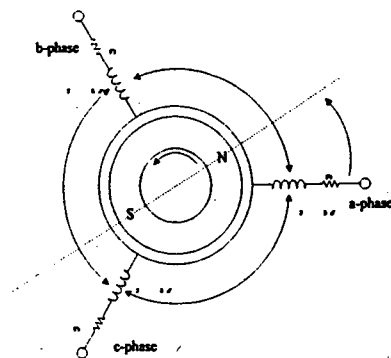


그림 1. PMSM 등가회로

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p(L_s + M) & -\frac{1}{2}pM & -\frac{1}{2}pM \\ -\frac{1}{2}pM & R_s + p(L_s + M) & -\frac{1}{2}pM \\ -\frac{1}{2}pM & -\frac{1}{2}pM & R_s + p(L_s + M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,

V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : 고정자 a, b, c상전압

i_{as}, i_{bs}, i_{cs} : 고정자 a, b, c상전류

e_{as}, e_{bs}, e_{cs} : 속도기전력

R_s : 고정자 권선 저항

L_s : 전기자 권선 누설 인덕턴스

M : 전기자 권선 인덕턴스

p : 미분연산자

이다.

식 (1)로부터 d-q축으로 나타낸 정지 좌표계 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{ds}^s \\ V_{qs}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 \\ 0 & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{ds}^s \\ e_{qs}^s \end{bmatrix} \quad (2)$$

이 식으로부터 동기좌표계로 표현한 전압방정식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{ds}^e \\ V_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_r L_s \\ \omega_r L_s & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{ds}^e \\ e_{qs}^e \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)의 역기전력항은 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} e_{ds}^e \\ e_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\omega_r \phi_f \sin\theta \\ \omega_r \phi_f \cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \phi_f \end{bmatrix} \quad (4)$$

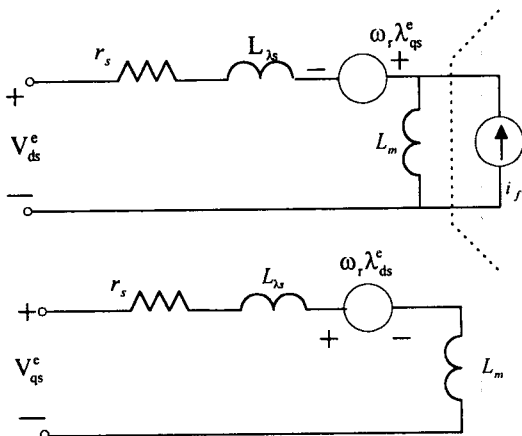


그림 2. 2상 동기좌표계 등가회로

식 (4)로부터 자속쇄교수를 나타내면 다음식과 같다.

$$\begin{bmatrix} \phi_d^e \\ \phi_q^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_f \cos\theta \\ \phi_f \sin\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

역기전력상수는 속도가 증가할수록 커지고, 식(4), (5)로부터 영구자석 계자에 의한 자속 쇄교수는 동기좌표계에서 d축에 집중되고, 이로 인해 발생하는 역기전력은 q축에만 집중함을 알 수 있다.

따라서 영구자석 전동기의 동기좌표계 d-q축 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{ds}^e \\ V_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_r L_s \\ \omega_r L_s & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \phi_f \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.3 기계적 출력 토크

영구자석 동기전동기의 출력 토크는 출력 전력으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{out} &= \frac{3}{2}(V_{ds}^e i_{ds}^e + V_{qs}^e i_{qs}^e) \\ &= \frac{3}{2}R_s(i_{ds}^{e2} + i_{qs}^{e2}) + \frac{3}{2} \frac{L_s}{2} \frac{d}{dt}(i_{ds}^{e2} + i_{qs}^{e2}) + \frac{3}{2}\omega_r \phi_f i_{qs}^e \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)로부터 기계적인 출력항과 극수, 기계각속도를 고려한 토크식은 식 (8)과 같다.

$$T_e = \frac{3P}{2} \phi_f i_{qs}^e = K_T i_{qs}^e \quad (8)$$

2.4 역기전력과 자속밀도분포

파라데이 법칙에 의해 고정자 상 권선에서 유도되는 역기전력은 식 (9)와 같다.

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (9)$$

여기서 Ψ 는 쇄교 자속이고, 고정자 요소코일을 통과

하는 자속은 $\phi = \int_{-\theta}^{\theta} B(\theta) r_l d\theta$, 이때 자석의 형상과 위치에 따른 자속밀도분포가 d축기준으로

$B(\theta) = \hat{B} \cos(p\theta - \omega t - \alpha)$ 이라면 자속은 식 (10)과 같다.

$$\phi = \frac{\hat{B} D l}{p} \sin p\theta \cos(\omega t + \alpha) \quad (10)$$

여기서 $D = 2r_l$, $\theta = \pi / p$, $t = 0$ 라고 할 때 회전자 극당 자속과 고정자 요소 코일의 쇄교자속은 식 (11), (12)와 같다.

$$\phi_M = \frac{\hat{B} D l}{p} \quad (11)$$

$$d\psi = \phi \left[\frac{N_s}{2} \sin p\theta d\theta \right] \quad (12)$$

따라서 p 극기에 대한 고정자 권선의 총 쇄교자속과 역기전력은 식 (13), (14)와 같다.

$$\psi_M = p \int_0^{\pi/p} d\psi = \psi_M \cos(\omega t + \alpha) \quad (13)$$

$$e = -\frac{d\psi_M}{dt} = \omega \psi_M \sin(\omega t + \alpha) \quad (14)$$

식(13), (14)로부터 역기전력의 파형은 자속분포와 동일한 파형임을 알 수 있으므로, 결론적으로 역기전력 파형으로부터 자속의 변동위치를 알 수 있다.

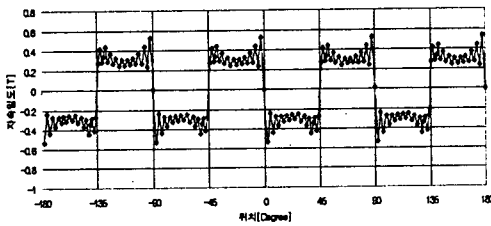


그림 3. SPMSM 자속밀도 분포 예시(8P)

2.5 토크 상수 변동

일반적으로 사용되는 식 (8)의 출력토크는 동기좌표계 q 축전류와 비례하고, 그 비례계수 $K_T = \frac{3P}{2} \phi_f$ 를 토크 상수라고 한다.

그러나 토크 상수는 자석 이탈 등에 의한 자속분포상태의 변화가 발생한 경우에도 그 값을 보정하지 못한다. 따라서 이를 보정하기 위한 속도기전력 상수항 연산은 식 (6)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_f = \frac{1}{\omega_r} (V_{qs}^e - (\omega_r L_s i_{qs}^e + (R_s + pL_s) i_{qs}^e)) \quad (15)$$

그림 3은 자석의 잔류 자속밀도가 1.3T인 경우 공극에서 계산된 자속밀도 분포를 나타냈다. 그림에서 보이는 것과 같이 정상적인 경우에는 자석 형상에 따라 공극의 자속밀도 극성에 따라 분포함을 알 수 있다. 자석의 이탈은 결국 이와 같은 분포상태의 자속밀도에 불연속 구간을 초래하는 것과 같다.

2.6 실험

실험에서는 전동기의 회전자 표면에 부착된 자석중 임의의 1극을 떼어 낸 상태에서의 전동기 특성 변화를 살펴 보았다. 이와 같은 상태에서 그림4는 정격속도로 회전시킨 경우의 상전압을 측정한 것이다. 역기전력 전압의 크기가

전기각에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 엔코더의 전기각 기준 신호로부터 이탈시킨 자극의 위치도 알아낼 수 있었다. 그리고 속도 기전력 상수항에 대한 연산된 결과의 변화 특성을 살펴 보았다.

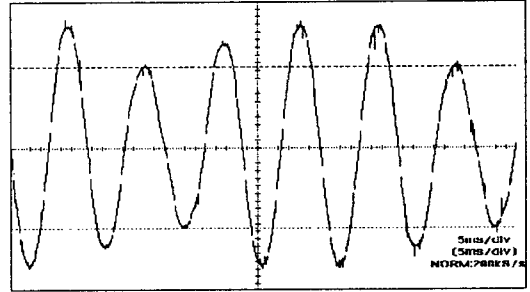


그림 4. 정격속도(2000rpm) 피구동시 역기전력 (자극분리기)

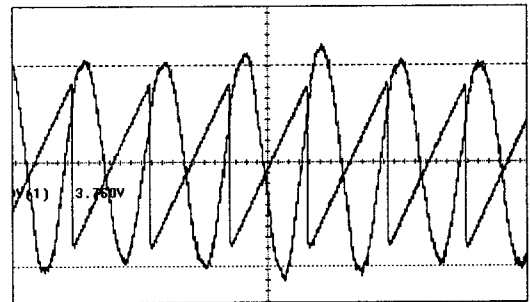


그림 5. 정격속도(2000rpm) 구동시 상전압 출력과 전기각 (자극 분리기)

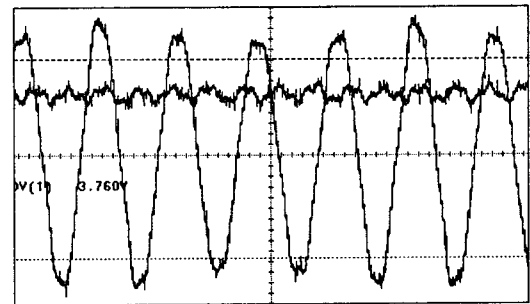


그림 6 정격속도 구동시(2000rpm) 속도기전력 상수분 변동파형 (자극 분리기)

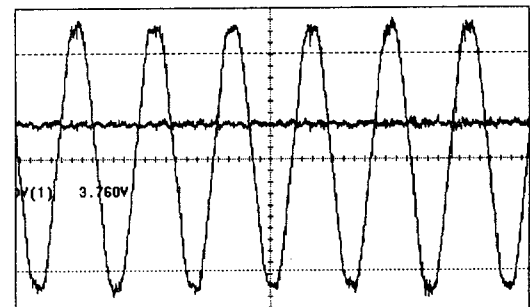


그림 7 정격속도 구동시(2000rpm) 속도기전력 상수분 변동파형 (정상기기)

그림5, 6, 7은 시험용 전동기에 대해 정현파PWM을 적용한 경우 D/A변환으로 출력한 상전압, 전기각 그리고 식(15)로 나타낸 속도기전력 상수의 변동모습을 나타냈다. 실험을 통해 확인된 내용은 다음과 같다.

- 1) 토크 리플과 소음 발생이 현저하게 증가하고,
- 2) 전동기 온도상승이 급격히 진행되며,
- 3) 결과적으로는 온도 상승에 의한 자석의 표면 이탈과 보빈등의 소손으로 이어지고 운전 불능상태를 초래하였다.

또한 상전압 출력향과 역기전력 파형으로부터 전기각과 비교하여 자극 분리위치를 간단하게 할 수 있었고, 실제 구동 상태에서는 속도기전력 상수향에 해당하는 연산된 결과의 급변을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 8극 시험용 전동기의 임의 1극에 대한 자석을 분리한 조건에서 정격속도로 운전하는 경우 상전압 또는 역기전력 의 변화를 이용한 간단한 회전자 변형 위치 추적법과 속도기전력 상수향 특성변동 현상을 고찰해 보았다. 따라서 전동기 자체에 결함이 발생한 경우 이를 진단할 수 있게 됨으로써 제어장치에 의한 과전류발생이나 기동불능현상 등에 관한 원인파악과 전동기 운전불능 현상을 사전에 방지할 수 있었다.

표 1 시험용 전동기 특성표

용량	[KW]	0.3
최고속도	[r/min.]	3000
정격속도	[r/min.]	2000
정격토크	[Kgf-cm]	14.6
정격전압	[V]	103
정격전류	[A]	2.5
역기전력정수	[V/Kr/min.]	37.1

참 고 문 헌

- [1] 김준규, "자석과모터핸드북", 도서출판한진. 1998.
- [2] J.R. Hendershot Jr. and T.J.E. Miller "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors",Oxford Univ Press Inc.1994.
- [3] S. Bolognani, M. Zordan and M. Zigliotto "Experimental Fault-Tolerant Control of a PMSM Drive"IEEE Transaction on Industrial Electronics. vol. 47. no. 5. Oct 2000.