

# 유한요소법과 프라이자흐 모델을 이용한 동기형 릴럭턴스 전동기( Synchronous Reluctance Motor : SynRM)의 On-line 판정시스템 특성 해석

김홍석, 이명기, 이민명, 이종호  
국립 한밭대학교

## The On-line Identification System Characteristics Analysis of Synchronous Reluctance Motor Using a Coupled FEM & Preisach Model

Hong-Seok Kim, Myoung-Ki Lee, Min-Myung Lee, Jung-Ho Lee  
Hanbat National University

**Abstract** - This study investigates the dynamic characteristics of Synchronous Reluctance Motor (SynRM), with segmental rotor structure, using finite element method in which the moving mesh technique is considered. The focus of this paper is the efficiency of on-line parameter identification system for position sensorless control of a SynRM under saturation and iron loss. Comparisons are given with angle of the observer and those of proposed FEM & Preisach model of synchronous reluctance motor, respectively. The position sensorless control using identified motor parameters is realized, and the effective of the on-line parameter identification system is verified by experimental results.

### 1. 서 론

일반적으로 SynRM의 제어는 회전자 위치를 인식하는 것이 필요하기 때문에 전동기에는 위치센서를 부착해야한다. 그러나 위치센서는 비용, 신뢰도, 부착공간과 케이블의 등과 같은 문제점을 가지고 있다. 이러한 이유로 인해 위치 센서리스 제어가 요구되며, 많은 연구가 수행되어 왔다. 몇몇 방법은 회전자위치와 속도를 측정하기 위한 고정자 인덕턴스와 고정자저항을 포함하는 전동기 파라미터를 필요로 한다.

하지만, 전동기 파라미터는 구동조건에 의해 변화된다. 인덕턴스 파라미터는 자기포화현상을 발생하는 범위에서 전동기 전류에 의해 변화된다. 또한 고정자저항은 권선 온도에 따라 변화된다. 특히, SynRM의 경우에는 인덕턴스 파라미터의 큰 변화가 일어난다. 왜냐하면, 감자의 단점을 가진 SynRM은 자기포화범위 안에서 주로 사용되기 때문이다. 위치측정의 정밀도는 이러한 변화에 따라 감소되기 때문에, 이러한 문제를 다루는 것이 필요하다. 위에서 언급된 이유 때문에 다양한 파라미터 판정방법 (off-line 파라미터 판정방법)들이 제안되어져 왔다.

이러한 방법들은 미리 다양한 구동조건을 간주한 인덕턴스 파라미터를 측정된 다음에 측정된 인덕턴스 파라미터는 테이블화 혹은 모델링된다. 특히 cross-coupling현상이 일어날 때 인덕턴스 파라미터 측정은 매우 복잡해진다. 고정자저항 파라미터 또한 미리 측정된다. 하지만, 고정자저항이 권선온도에 따라 변화되기 때문에 이것을 고정시켜 간주하는 것은 어렵다. 다른 한편으로, 온-라인 파라미터 판정방법은 미리 전동기 파라미터를 측정하는 것을 필요로 하지 않는다. 왜냐하면 이러한 판정방법은 구동 하에서 전동기 파라미터를 확인하는 것이 가능하기 때문이다. 하지만, 센서리스의 경우에 온-라인 파라미터 판정방법은 실제 위치와 속도가 잘 알려져 있지 않다는 문제를 가지고 있다. 그러므로 만약 전동기 파라미터 판정이 위치와 속도를 필요로 한다면, 불가피한 위치측정 오차는 파라미터 판정 오차를 발생한다. 또한, 그 파라미터 판정오차 또한 위치측정 오차를 발생한다. 결과적으로, 위치측정 오차와 전동기 파라미터 판정오차 사이의 오차-약순환은 위치 센서리스 제어의 효율을 감소한다.

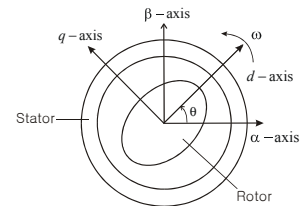
본 논문에서는 새로운 온-라인 파라미터 판정 시스템(Observer : 관측기)을 제안하고 있다. 제안된 시스템은 전동기 파라미터의 복잡한 측정을 필요로 하지 않을 뿐만 아니라, 제한된 시스템이 수학적 모델에 포함되어있는 위치와 속도 사항을 무시할 수 있기 때문에, 파라미터는 위치 측정 오차에 의해 영향을 받지 않는다.[1]-[4] 하지만, 구동조건이 PWM 과 기타사항 때문에 부하, 철손, 고조파 등에 의해 다양해 진다면, 내부 SynRM의 물리적 특성은 등가회로 모델방법으로 정확히 예상할 수 없다. 그리고 이 판정시스템의 성능개선도 제한된다. 다행히도 전압방정식과 달리 유한요소법은 SynRM의 복잡한 내부특성과 높은 정확도까지 자기적 포화를 모델링 할 수 있다.

고속용 철손은 SynRM 손실의 주된 요인이 된다. 그러므로 다른 종류의 기기보다 SynRM의 철손은 더 정확하게 계산해야 한다. 철손의 정확한 예측이 가능한 프라이자흐모델이 비선형 해석을 하기 위해 적용된다.[5]-[7]

제안된 판정시스템을 이용하여 시험 SynRM의 위치 센서리스 제어 실험이 수행되었으며, 실험에 의해 제안된 시스템의 효율성이 입증되었다.

### 2. 본 론

#### 2.1 SynRM의 수학적 모델



<그림 1> SynRM의 좌표계

센서리스 벡터제어를 위해 수학적 모델을 사용한 좌표계는 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며, d-q축은 회전좌표축, α-β축은 고정좌표축이다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $[v_d \ v_q]^T$ :회전좌표상의 전압,  $[i_d \ i_q]^T$ :회전좌표상의 전류, R:고정자 저항,  $L_d$ :d-축의 인덕턴스,  $L_q$ : q-축의 인덕턴스, p: 미분연산자, ω:전기각의 각속도

α - β 고정좌표계로 식(1)을 변형하면, 식(2)가 유도된다.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_\alpha & pL_{\alpha\beta} \\ pL_{\alpha\beta} & R + pL_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $[v_\alpha \ v_\beta]^T$ :고정좌표상의 전압,  $[i_\alpha \ i_\beta]^T$ :고정좌표상의 전류,  $L_\alpha = L_0 + L_1 \cos 2\theta$ ,  $L_\beta = L_0 - L_1 \cos 2\theta$ ,  $L_{\alpha\beta} = L_1 \sin 2\theta$ ,

$$L_0 = (L_d + L_q) / 2 \quad L_1 = (L_d - L_q) / 2$$

식(2)를 다시 쓰면, 식(3)을 얻게 된다.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + pL_0 \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + pL_1 \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

식(3)을 이산상태방정식으로 변형하면, 식(4)와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(n+1) - i_\alpha(n) \\ i_\beta(n+1) - i_\beta(n) \end{bmatrix} = \frac{\Delta T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} -RL_\beta + 2\omega L_0 L_1 \sin 2\theta & RL_{\alpha\beta} - 2\omega L_1 (L_0 \cos 2\theta - L_1) \\ RL_{\alpha\beta} - 2\omega L_1 (L_0 \cos 2\theta + L_1) & -RL_\alpha - 2\omega L_0 L_1 \sin 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(n) \\ i_\beta(n) \end{bmatrix} + \frac{\Delta T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_\beta & -L_{\alpha\beta} \\ -L_{\alpha\beta} & L_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha(n) \\ v_\beta(n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(n) \\ i_\beta(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha(n) \\ v_\beta(n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

#### 2.2 파라미터 행렬 Θ의 판정

파라미터 판정시스템의 첫 번째 단계는 모터의 파라미터를 내포하고 있는 파라미터 행렬 Θ을 판정하는 것이다.

식(5)를 다시 쓰면, 식(6)과 같이 변형하여 쓸 수 있다.

$$y = [i_\alpha(n+1) - i_\alpha(n) \quad i_\beta(n+1) - i_\beta(n)]^T = [i_\alpha(n) \quad i_\beta(n) \quad v_\alpha(n) \quad v_\beta(n)]^T \Theta \quad (6)$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & b_{11} & b_{12} \\ a_{21} & a_{22} & b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} y, z$$

파라미터 행렬 Θ을 확인하기 위해서, 반복 최소자승법을 사용하여 식(7)과 식(8)으로 나타낸다. 여기서 forgotten coefficient로 정의된 λ는 운전상태의 변화에 따라 전류와 전압입력신호의 불필요한 과거 데이터를 지우는 것이다. 식(7)과 식(8)의 계산으로부터 파라미터행렬 Θ이 반복적으로 확인된다.

$$\Theta(n) = \Theta(n-1) + (y - \Theta(n-1)z)z^T P(n) \quad (7)$$

$$P(n-1) = \frac{1}{\lambda} \{P(n-1) - P(n-1)z(\lambda + z^T P(n-1)z)^{-1} z^T P(n-1)\} \quad (8)$$

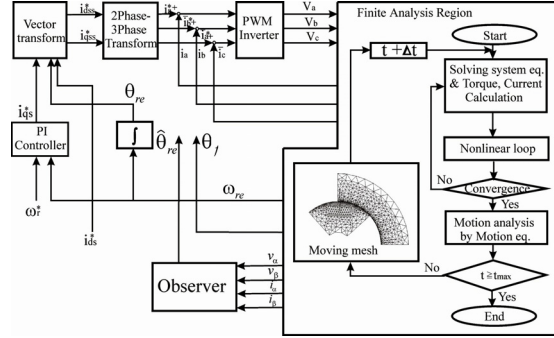
확인된 파라미터 행렬 Θ로부터 회전자위치  $\theta_{re}$ 는 식(9)로 구할 수 있다.

$$\hat{\theta}_{re} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{b_{12} + b_{21}}{b_{11} - b_{22}} \right) \quad (9)$$

$$\left( \frac{b_{12} + b_{21}}{b_{11} - b_{22}} \right) = \frac{-L_1 \sin 2\theta_{re} - L_1 \sin 2\theta_{re}}{(L_0 - L_1 \cos 2\theta_{re}) - (L_0 - L_1 \cos 2\theta_{re})} = \frac{\sin 2\theta_{re}}{\cos 2\theta_{re}}$$

로서 회전자 위치  $\hat{\theta}_{re}$ 는 모터의 파라미터가 포화, 철손 등으로 인해 변화하여도 그것에 영향을 받지 않고 정확한 위치를 얻을 수 있음을 이론적으로 증명하고 있다.

그림 2는 시뮬레이션과 실험에 있어 제한한 관측기가 고려된 시스템 블록선도를 보여준다.



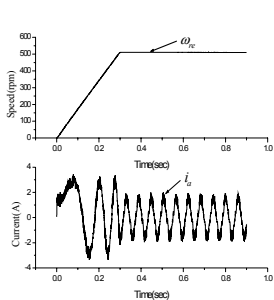
〈그림 2〉 시스템 블록선도

### 2.3 시뮬레이션 및 실험 분석

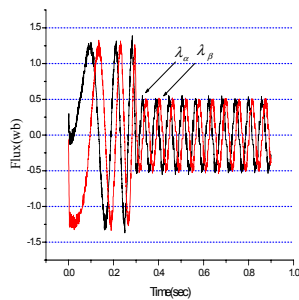
그림 3-(a),(b)는 제안된 모델의 속도응답특성과 상전류 특성을 각각 나타낸다. 상전류 응답특성인 그림3-(b)은 히스테리시스현상과 포화현상 때문에 약간의 왜곡을 볼 수 있다.

그림 4은 제안된 분석모델에서 FE영역의  $\alpha-\beta$  자속결합 응답특성을 나타낸다. 또한 그림 5은 속도제어 시뮬레이션에서 움직임 각  $\hat{\theta}_{re}$ 과 자속 각  $\theta_f$  사이의 관정오차 각  $\Delta\theta_{re}$ 을 나타낸다. 그림 6에서 가속 중 오차  $\Delta\theta_{re}$ 이 생성되어 전압명령이 성립될 때 거의 0에 수렴한다는 것을 확인할 수 있다. 이 시뮬레이션에서  $\lambda$ 의 값은 0.998이다.

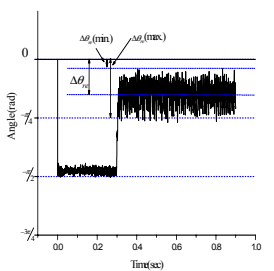
그림 7에서 그림 12까지는 1000rpm, 2000rpm, 3000rpm 에 있어 각각 속도 응답특성 및 관측기에서 계산되어지는 위치  $\hat{\theta}_{re}$ 와 엔코더의  $\theta_{re}$ 의 응답특성을 보여준다. 응답결과에서 볼 수 있는 바와 같이 각각의 rpm에서 빠른 수렴을 보임을 알 수 있다. 그러나 약간의 오차를 수반하여 응답함을 볼 수 있는데 이는 초기 회전자위치 선정과정을 정확히 한다던 해결할 수 있으리라 사료된다.



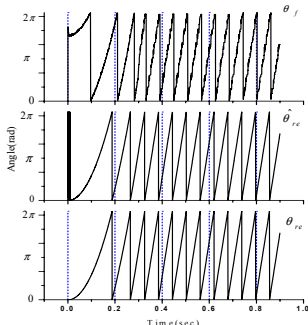
〈그림 3〉속도와 상전류 응답특성



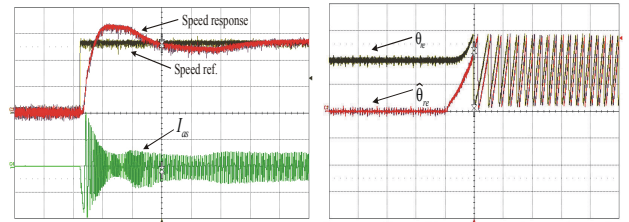
〈그림 4〉 d-q 자속결합 응답특성



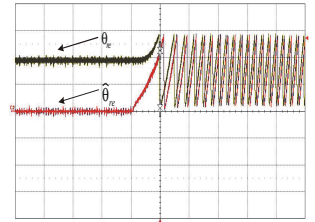
〈그림 5〉Angle 오차 응답특성



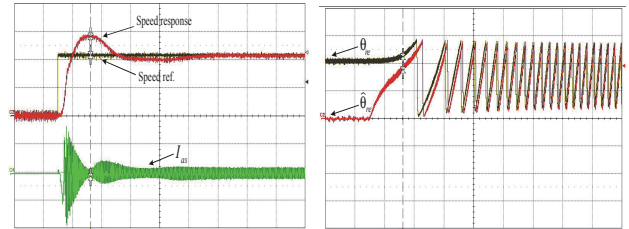
〈그림 6〉 Angle 응답 특성



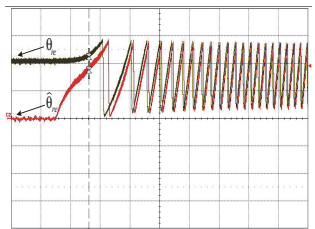
〈그림 7〉속도 및 상전류응답특성



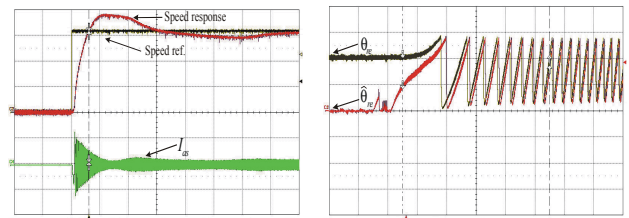
〈그림 8〉Angle응답특성(1000rpm)



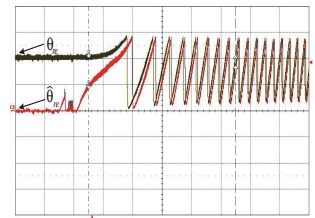
〈그림 9〉속도 및 상전류응답특성



〈그림 10〉Angle응답특성(2000rpm)



〈그림 11〉속도 및 상전류응답특성



〈그림 12〉Angle응답특성(3000rpm)

## 3. 결 론

본 연구에서는 모터 포화 및 손실 등 파라미터 변동에 무관한 온라인 파라미터 관정시스템(관측기)를 수학적 모델로부터 구현하였다. 시뮬레이션을 통해 관측기설계의 가능성을 확인하였으며, 실험시스템에 구현하여 비교적 양호한 응답을 얻었다. 본 연구결과는 SynRM의 상용화를 앞당길 것으로 사료된다. 향후 과제로서는 부하변동에 따른 양호한 응답특성을 가질 수 있도록 시스템 안정성에 관한 연구가 뒤따라야 할 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] S.Ichikawa, "low speed Sensorless Control and Initial Position Estimation of Synchronous Motors based on system Identification Theory" *The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp.975-980, Nov.2-6, 2004, Busan,Korea.
- [2] S.Ichikawa, M.Tomita, "Sensorless Controls of Synchronous Motors based on an Extended EMF Model and Initial Position Estimation". *Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE*, pp. 2150-2155 Vol.3, Nov. 2003
- [3] K.Kawai, "Sensorless Controls of Synchronous Motors based on an Extended EMF Model and Initial Position Estimation". Vol.122-D, No.12, pp.2150-2155, 2003, (in Japanese).
- [4] A.Iwata, S.Ichikawa, M.Tomita, S.Doki and S.Qkuma, "Position and Velocity sensorless control of SynRMs using on line parameter identification", *Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE*, pp. 2156- 2161 Vol.3, Nov. 2003
- [5] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Dynamic Characteristic Analysis of Synchronous Reluctance Motor Considering Saturation and Iron Loss by FEM", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 34, No. 5, pp. 2629-2632, Sep. 1998.
- [6] J. H. Lee, D. S. Hyun, "HysteresisCharacteristics Computation on PWM Fed Synchronous Reluctance Motor Using Coupled FEM & Preisach Modeling", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 36, No. 7, pp 1209-1213, July 2000.
- [7] J. H. Lee, J. C. Kim, I. S. Jung, D. S. Hyun, "Vector Control Scheme of Synchronous Reluctance Motor Considering Iron Core Loss", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 34, No. 5, pp 3522-3525, September, 1998.
- [8] D. H. Everett, A general approach hysteresis, Part III, "A formal treatment of the independent domain model of hysteresis", *Trans. on Faraday Soc.*, Vol. 50 pp1077-1096, 1954.