

MATLAB을 이용한 동기형 릴럭턴스 전동기의 단순구조형 센서리스 제어

임진재*, 김솔*, 안준선*, 이주*, 김윤현*
 *한양대학교 전기공학과, **한밭대학교 전기공학과

A Simplified Sensorless Control of Synchronous Reluctance Motor Using MATLAB

*Jin-Jae Lim, *Sol Kim, *Joon-Seon An, *Ju Lee, **Yun-Hun Kim
 *Dept. of Electrical Eng., Hanyang University, **Hanbat National University.

Abstract - Complex sensorless control scheme is difficult to utilize in field of home appliance system because of cost problem. Therefore, it is necessary to introduce simplified sensorless control scheme that is composed of least calculation to estimate the rotor position. This paper presents the principle of the rotor position estimation with comparison of the estimated flux linkage and reference flux linkage. In order to verify the feasibility of control scheme, MATLAB is used for simulation.

1. 서 론

동기형 릴럭턴스 전동기(이하 SynRM)는 유도기 대비 크기 및 토크면에서 경쟁력이 있으며 특히 가변속분야에서 많은 경쟁력을 가지기 때문에 활발한 연구가 진행되고 있다. 하지만 백터제어에 있어서 회전자 위치정보를 얻기위한 엔코더와 같은 위치센서는 필수적이며 이 같은 위치센서는 큰 사이즈와 단가의 상승, 신뢰성의 저하 등의 문제점을 수반한다[2].

따라서 센서리스 제어는 가변속 분야에서 큰 장점이 다. 위에서 언급된 문제점과 특히 환경적인 문제로 인한 신뢰성의 저하로 인해 가전산업분야에서 센서리스 제어의 필요성이 절실해 지고 있다.

SynRM은 일반적인 농형구조의 유도기보다 회전자 위치 추정이 더 용이하다. 왜냐하면 돌극형 구조의 회전자는 고정자 권선에 인덕턴스 차이를 만들기 때문에 회전자 위치정보를 쉽게 얻을 수 있다 결국 고정자 권선의 인덕턴스는 회전자 위치에 종속적이라 할 수 있다[3].

기존 센서리스 논문의 다수가 회전자 위치를 추정하기 위해 복잡한 구조의 알고리즘을 이용해 구현했다[4]-[6]. Matsuo는 고정자의 전류를 관찰하여 회전자의 위치를 추정하였다[4]. 이 방법은 저속영역에서 잘 수행되었지만 고속영역에서는 전동기의 속도와 초기전류에 관계된 3차원보상기를 삽입했으므로 구현하기가 어렵다.

설상기 외는 고주파 전류를 기본과 전류에 삽입하여 위치추정방법을 사용하였다[5]. 하지만 주입된 전류는 고조파의 원인이 되며 토크 맥동을 가져오게 된다. Schroedl은 칼만 필터와 optimal 추정기를 조합해서 사용하였다[6].

위 방법은 전동기 파라미터와 독립적이지만 많은 양의 계산이 요구된다. 따라서 상입화를 위해서는 간단한 구조의 센서리스 알고리즘이 필요하다.

본 논문은 기준자속과 추정된 자속을 비교함으로써 회전자의 위치를 추정할 수 있는 간단한 구조의 센서리스 알고리즘을 소개하고 타당성을 검증한다.

2. 본 론

2.1 동기형릴럭턴스 전동기의 모델링

그림1은 2극 3상 동기형릴럭턴스 전동기의 등가모델을 나타낸 것이다. 평형 3상 입력은 그림1에서와 같이 $d^s - q^s$ 의 평형 2상으로 좌표 변환될 수 있다. 만일 ω_r 과 동기인 회전자좌표계 $d^r - q^r$ 과 ω_r 와 동기인 정지 좌표계로 표현될 때 추정된 로터의 위치는 회전자 좌표계를 기준으로 $\Delta\theta$ 만큼의 차이가 생긴다. 회전자 위치 오차 $\Delta\theta$ 가 0일 때 추정된 회전자 위치와 회전자 좌표계의 기준축인 실제 회전자 위치가 일치하게 된다. 따라서 위치오차를 0으로 보상한다면 센서리스 제어가 가능하게 된다. 추정된 회전자의 위치와 실제 회전자의 위치 관계는 (1) 과 같이 표현된다.

$$\hat{\theta}_{er} = \theta_r + \Delta\theta \quad (1)$$

여기에서 θ_r 과 $\hat{\theta}_{er}$ 은 각각 실제 회전자의 위치와 추정된 로터의 위치를 나타낸다.

식 (2) 는 2상 SynRM 의 전압 방정식 이다.

$$V_{dq}^s = \begin{vmatrix} v_d^s \\ v_q^s \end{vmatrix} = r_s \begin{vmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{vmatrix} + p \begin{vmatrix} L \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{vmatrix} \quad (2)$$

$$|L| = \begin{vmatrix} L^s + L_0^s \cos 2\theta_r & L_0^s \sin 2\theta_r \\ L_0^s \sin 2\theta_r & L^s - L_0^s \cos 2\theta_r \end{vmatrix} \quad (3)$$

$$L^s = \frac{L_d + L_q}{2}, \quad L_0^s = \frac{L_d - L_q}{2}$$

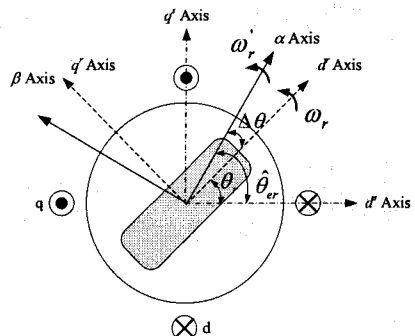


그림 1. 2극 3상 SynRM 의 등가모델.

$$L_d = L_{ls} + L_{md}, \quad L_q = L_{ls} + L_{mq}, \quad \lambda_{err} = \hat{\lambda}_q^* - \lambda_q^* \quad (7)$$

$$L_{md} = \frac{3}{2}(L_0 + L_2), \quad L_{mq} = \frac{3}{2}(L_0 - L_2)$$

여기서 L_{md} : d축 자화 인덕턴스
 L_{mq} : q축 자화 인덕턴스
 L_d : d축 인덕턴스
 L_q : q축 인덕턴스
 L_{ls} : 고정자 누설 인덕턴스

자속방정식은 (4) 와 같다.

$$\lambda_{dq}^s = \int (v_{dq}^s - r_s i_{dq}^s) dt \quad (4)$$

추정된 회전자 위치를 사용해서 회전자 좌표계로 변환된 자속과 전류는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\lambda}_{dq}^r &= S_{dq}^{-1} \lambda_{dq}^s, \\ \hat{i}_{dq}^r &= S_{dq}^{-1} i_{dq}^s \end{aligned} \quad (5)$$

여기서
$$S_{dq}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

2.2 제안된 센서리스 제어법

그림 2 는 쇄교자속의 위치 추정 동작원리를 나타낸 것이다. 만일 위치오차가 실제회전자위치와 추정된 회전자 위치가 다르다면 추정자속은 위치 오차에 따라 변화게 된다. 추정자속은 전압의 적분에 의해 계산이 되고, 기준자속은 동기인덕턴스와 전류에 의해서 구해진다. 위치오차가 0이 된다면 추정된 회전자위치는 실제 위치와 일치하게 된다. 그림 2에서 β 는 추정된 회전자 위치가 (+) 오차인 경우이고, α 는(-) 오차인 경우를 나타낸다. 위치 보상기는 위치오차를 0으로 보상한다. 보상기에 의해 추정된 자속은 기준자속과 일치하고 회전자 위치는 이상적으로 기준자속과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_d^* &= L_d i_d^*, \\ \lambda_q^* &= L_q i_q^* \end{aligned} \quad (6)$$

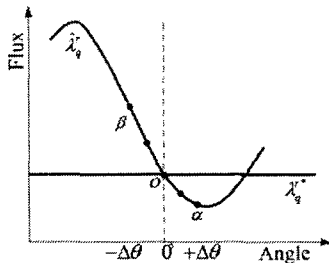


그림 2. 추정자속 비교법의 위치 보상기 동작원리.

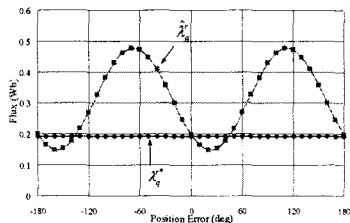


그림 3. $\Delta\theta$ 에 따른 q축 회전자자속과 추정자속의 비교(시뮬레이션 결과).

그림3 은 q축의 기준자속과 위치에 따른 추정자속의 오차를 비교하여 보여주고 있다. SynRM 은 전류각이 $\pm 45^\circ$ 이상에서 부 토크를 발생시키기 때문에 실험상에서는 이 각도를 유념해야 한다. 그림 4 는 위치 보상기의 구성도를 나타낸다.

전동기 파라미터는 센서리스 제어의 수행에 영향을 미친다. 따라서 정확한 파라미터를 사용해야 한다. 전류와 전압은 쉽게 측정되지만 인덕턴스는 그렇지 않다. 보다 정확한 동기 인덕턴스를 얻기 위해서 d-q축 인덕턴스를 FEM을 통해서 계산하였다. 그림 5 는 FEM 해석모델의 d-q축 자속선도를 나타낸다.

2.3 시뮬레이션 결과

그림 6은 MATLAB 시뮬레이션 블록도를 나타낸 것이다. 부정확한 파라미터는 제안된 알고리즘에 영향을 미기 때문에 고정자 권선의 저항 값과 인덕턴스에 따른 영향을 고려할 필요가 있다.

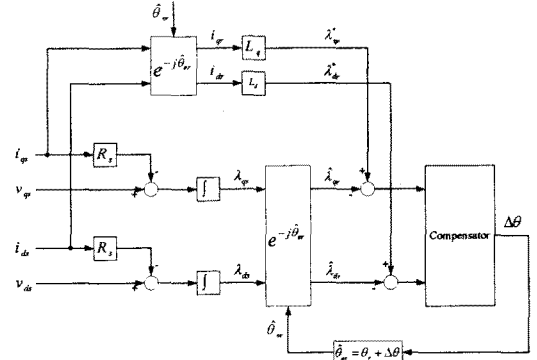
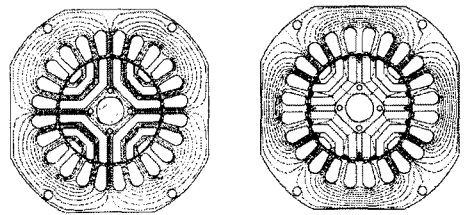


그림 4. 위치 보상기의 구성도



(a) d축 쇄교시 (b) q축 쇄교시

그림 5. SynRM의 자속선도

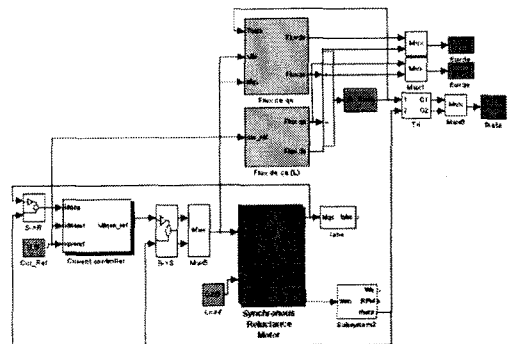


그림 6. 시뮬레이션 블록도

제한된 센서리스 알고리즘은 그림7의 구성도에 의해 속도제어를 수행한다.

그림8은 고정자 권선저항의 변화에 따른 q축 동기좌표계에서 쇄교자속의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 고정자 권선저항이 작거나 클 때 추정자속은 기준자속과 그림8 (a)(b)(c)과 같은 관계를 보이게 된다. 제한된 센서리스 알고리즘의 신뢰성을 위해서 부정확한 고정자 권선의 저항값과 인덕턴스의 영향을 고려하여야한다.

그림8의 (d)는 60rpm에서 제한된 센서리스 제어기의 회전자추정 위치를 나타낸다. 시뮬레이션결과 초기 위치 오차는 0.04%정도이다.

그림9는 정격부하시 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 본 센서리스 알고리즘의 위치 보상은 가변 부하 상에서는 고려하지 않았다. 그림 10 (a)와 (b)는 저속영역 및 고속영역에서 속도리얼을 반전한 경우의 위치 추종특성을 나타낸 것이다. 제한된 센서리스 알고리즘이 정상상태와 속도가 반전한 경우에도 잘 수행됨을 알 수 있다.

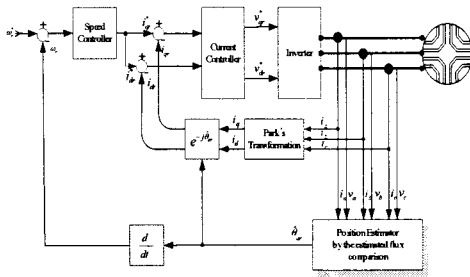
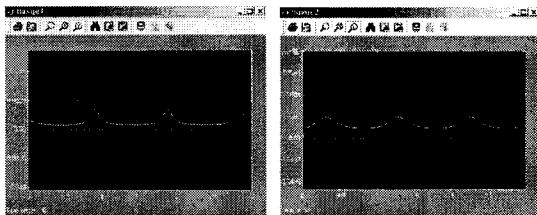
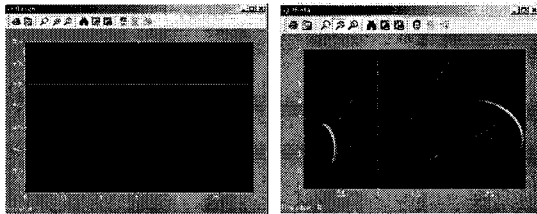


그림 7. 센서리스 제어기의 구성도



(a)rs 가 무시될 경우

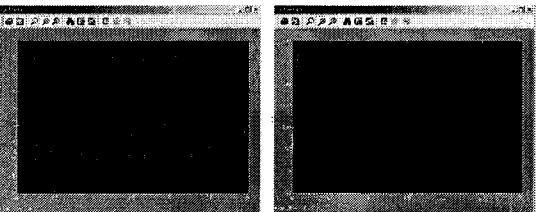
(b)rs 가 200% 높을 경우



(c)rs 가 맞을 경우

(d) 위치 응답

그림 8. 1차측 권선저항에 따른 동기좌표계의 q축 쇄교자속파형과 위치응답(시뮬레이션 결과)



(a) 위치 응답

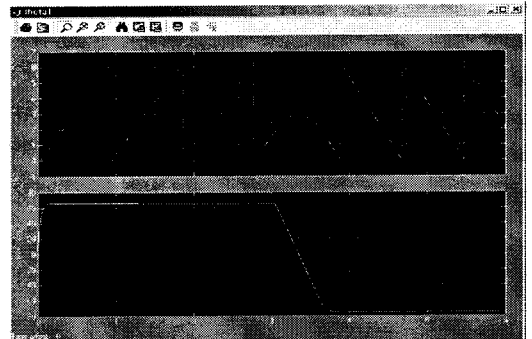
(b) 속도 응답

그림 9. 정격부하시 위치 및 속도응답 (시뮬레이션 결과)

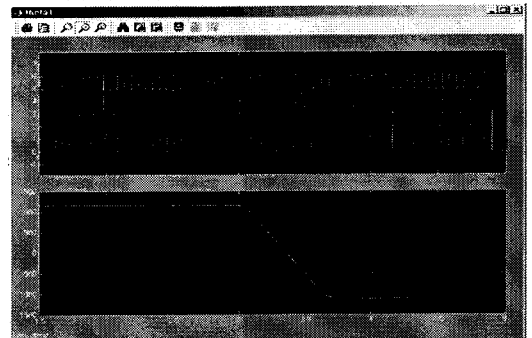
다만 기준속도를 증가시킨다면 초기 기동의 실패의 원인이 될 수 있다. 센서리스 기동문제를 고려하는 것이 과제라 하겠다.

3. 결 론

본 논문은 동기형 릴럭턴스전동기의 단순구조형 센서리스 제어기를 제시하고 타당성을 검증하기 위해 MATLAB을 이용하여 제어기를 구성하였고 시뮬레이션을 수행하였다. 회전자의 위치는 기준자속과 추정자속을 비교함으로써 추정된다. 본 제어기의 센서리스 알고리즘은 시뮬레이션 결과 정상상태에서 위치추종이 잘 수행됨을 알 수 있다.



(a) 추종위치 및 추종속도 (60 → -60 rpm)



(a) 추종위치 및 추종속도 (1100 → -1100 rpm)

그림10. 저속 및 고속 영역에서 속도반전시 운전특성

[참 고 문 헌]

- [1] Ion Boldea, Reluctance Synchronous Machines and Drives. Oxford, London, 1996
- [2] Tomonobu Senjyu, Takeshi Shingaki, and Katsumi Uezato, "Sensorless vector control of synchronous reluctance Motors with Disturbance Torque Observer", IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. 48, No. 2, pp.402-407, 2001.
- [3] Ciufo P., Platt D., "Sensorless rotor position and speed estimation for a synchronous reluctance motor," IEE Proceeding of Electric Power Applications, vol. 150, no. 2, pp. 158-164, March 2003.
- [4] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Rotor position detection scheme for synchronous reluctance motor based on current measurements," IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 31, no. 4, pp.860-868, July 1995
- [5] Jung-Ik Ha, Seog-Joo Kang, Seung-Ki Sul, "Position-controlled synchronous reluctance motor without rotational transducer," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 35, no. 6, pp. 1393 - 1398, Nov. 1999.
- [6] Schroedl M., Weinmeier P., "Sensorless control of reluctance machines at arbitrary operating conditions including standstill," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 9 no. 2, pp.225-231, March 1994.