

동기형 리럭턴스 전동기의 자속 추정형 센서리스 제어

안준선*, 김 솔**, 임진재*, 고성철*, 이 주*
 *한양대학교 전기공학과, **한양대학교 전기기기산업 인력양성센터

Stator Flux Vector Control of Synchronous Reluctance Motor

JOONSEON AHN*, SOL KIM**, JINJAE LIM*, SUNGCHUL GO*, JU LEE*
 *HANYANG UNIVERSITY, **HCEM

Abstract - In the evaluation of performance for the algorithm of sensorless speed control, the ability of speed control in low speed range and starting is important points. First of all, stability of low speed control is highly required in the application which needs high performance in speed control. For this requirement, this paper represents simple method to estimate the rotor position by comparing reference linkage flux with it's estimation. In the estimation of linkage flux, this paper uses voltage-current model for increasing the performance of speed control in low speed range.

1. 서 론

동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)는 유도전동기와 동일한 고정자 구조를 가지고 있기 때문에 기존의 생산 설비를 활용할 수 있는 장점이 있고, 회전자에 2차 회로가 없기 때문에 유도기에 비해서 상대적으로 저렴하게 제작할 수 있을 뿐 아니라, 2차 회로가 없기 때문에 열적으로 유리하며 제어적인 측면을 보더라도 2차 회로에 의해서 발생하는 문제들-2차 시정수의 변동에 의한 제어 특성의 변화 및 동작온도의 변화에 따르는 제어 특성의 변화-이 없으며, 2차 회로에 의해서 발생하는 역기전력이 없기 때문에 유도전동기에 비해서 장시간 고속으로 운전할 수 있는 장점이 있다[1].

이러한 유도 전동기에 대해서 가지는 장점으로 인해서 SynRM에 대한 관심이 높아지고 있기는 하지만, 유도전동기 대비 상대적으로 장점을 가지는 운전 영역에서의 SynRM의 이용을 확대하는 데에는 위치 검출기 없이 운전하는 센서리스 운전이 필수적으로 요구되고 있다. 기존의 SynRM에 대해서 이루어진 센서리스 운전 에 대한 내용 중 대표적인 것으로는, Matsuo가 연구한 전류 기울기에 의한 회전자의 위치 검출 방법과, Lorentz가 연구한 고주파 신호 주입에 의한 회전자 위치 검출 방법이 대표적이라 할 수 있다[2][3]. 전자의 경우 저속 및 정지 시에도 위치 추정이 가능하다는 장점이 있지만, 모터 파라미터에 민감하며 전류 기울기를 구하는 과정에서 미분을 사용하기 때문에 잡음에 취약하다는 단점이 있다. 후자의 경우 고주파의 전압 신호를 주입하여 인덕턴스 차에 의한 회전자의 위치를 검출하는 방법으로서 추정된 위치가 비교적 정확하다는 장점이 있기는 하지만 신호 처리를 위해서 고속의 CPU를 요구하며, 전류제어기의 대역폭을 높이는 데에 한계가 있기 때문에 동특성이 상대적으로 저하되는 단점이 있고 이로 인해서 고속 운전에는 적합하지 않다는 단점이 있다.

앞서 살펴본 바와 같이 기존의 연구들은 그 알고리즘의 복잡성으로 인해 고속의 연산을 요구하며, 이는 곧

가격의 상승으로 이어지게 되므로 응용 분야를 확대하는 데에는 불리하다. 따라서 SynRM의 응용을 확대하기 위해서는 센서리스 운전 알고리즘을 단순화하여 저가격, 저속의 CPU를 이용해서도 구현 가능하도록 하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 회전자의 위치와 쇄교 자속이 서로 상관관계에 있다는 사실에 착안하여 회전자각을 추정하는 알고리즘을 제시하였다. 기존 쇄교 자속과 추정 쇄교 자속간의 차이를 보상하는 방법으로 위치를 추정하였으며, 특히 자속을 전압 적분에 의해서 계산하는 과정에서 필연적으로 발생하는 저속 영역에서의 제어 특성 저하를 보상하기 위해서 저속 영역에서는 전류 모델을 이용하여 부족한 전압을 보상하는 방법으로 저속 영역에서의 속도 제어 특성을 개선하는 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 이용하여 검증하였다.

2. 본 론

2.1 자속 추정기

그림 1에 2극 3상 SynRM의 등가 모델과 추정 좌표계($\alpha\beta$)를 이용한 회전자 위치 추정 원리를 나타내었다. 정지좌표계($d^s q^s$)를 ω_r 의 속도로 회전하는 회전좌표계($d^r q^r$)와 ω_r 의 속도로 회전하는 추정좌표계($\alpha\beta$)로 변환하면, 회전 좌표계와 추정 좌표계가 동일한 속도로 회전할 경우 두 좌표계간의 위상차이 $\Delta\theta$ 를 0이 되도록 추정 좌표계의 회전 속도 ω_r 을 제어하면 회전자의 위치를 추정해낼 수 있다. 즉 별도의 위치 검출용 센서 없이도 회전자의 위치 추정이 가능해진다.

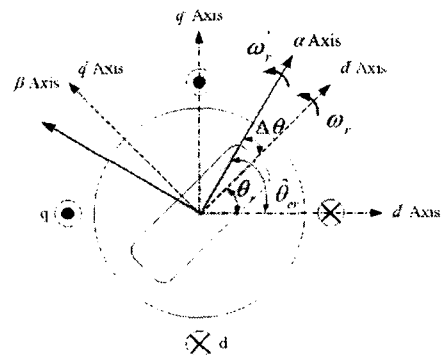


그림 1 위상의 축에서의 SvnRM 등가모델

또한 SynRM은 모터의 특성상 회전자의 위치에 따라서 모터의 상 인덕턴스가 바뀌기 때문에 이 점을 이용

하면 전술한 내용과 더불어서 회전자의 위치를 유추해낼 수 있다. SynRM의 전압 방정식은,

$$V_{dq}^s = \begin{bmatrix} v_d^s \\ v_q^s \end{bmatrix} = r_s \begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{bmatrix} + p[L] \begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{bmatrix} \quad (1)$$

로 나타낼 수 있으며, 여기서

$$[L] = \begin{bmatrix} L^s + L_0^s \cos 2\theta_r & L^s \sin 2\theta_r \\ L^s \sin 2\theta_r & L^s - L_0^s \cos 2\theta_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

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

$$L_d = L_{ls} + L_{md}, \quad L_q = L_{ls} + L_{mq}$$

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

이며,

L_d : d축 인덕턴스, L_q : q축 인덕턴스

L_{ls} : 고정자 누설 인덕턴스

L_{md} : d축 자화 인덕턴스, L_{mq} : q축 자화 인덕턴스

로 나타낼 수 있다.

따라서 식 (1)로부터 고정자 자속은,

$$\lambda_{dq}^s = \int (v_{dq}^s - r_s i_{dq}^s) dt \quad (3)$$

의 전압 적분 형태로 나타낼 수 있다.

식 (3)으로부터 구한 채교 자속을 앞서 언급한 회전좌표계와 추정좌표계로 변환하여 표현하면 우선 회전좌표계로 변환한 기준 자속은 식 (4)와 같이 전류 지령치와 동기 인덕턴스의 곱으로 나타낼 수 있으며,

$$\lambda_{dq}^{rs} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \lambda_{dq}^s = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} L_{d,q} i_{dq}^s \quad (4)$$

추정좌표계로 변환한 자속 및 전류는,

$$\lambda_{dq}^e = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r + \Delta\theta) & -\sin(\theta_r + \Delta\theta) \\ \sin(\theta_r + \Delta\theta) & \cos(\theta_r + \Delta\theta) \end{bmatrix} \lambda_{dq}^s \quad (5)$$

로 표현할 수 있고 자속은 식(4)에 의해서 전압 적분

형태로 구할 수 있다. 식(4)와 (5)에서 알 수 있듯이 실 회전자의 위치와 추정 위치가 서로 같지 않을 경우 자속 추정치가 기준자속과 다르게 나타나게 된다. 따라서 자속의 오차를 0이 되도록 $\Delta\theta$ 를 조정함으로써 추정 자속과 기준자속을 일치시킬 수 있고 이 때 회전자의 위치는 기준자속의 위치와 동일하게 된다. 그림 2에 위치 보상에 의한 회전자의 위치 추정 원리를 나타내었다.[4]

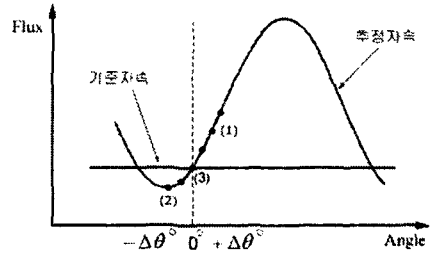


그림 2 자속 비교에 의한 위치 추정

2.2 전류모델을 이용한 자속 보상

2.1에서 제시된 방법에 의한 회전자의 위치 추정 은 고속 동작 영역에서는 효과적이지만, 전동기의 운전 주파수가 낮아질수록 추정기의 추정 성능이 떨어지게 되어 결과적으로 속도 제어가 어려워진다. 그 이유는 저속 영역으로 갈수록 전동기의 단자 전압이 낮아지게 되어 자속값 자체가 그 정확성을 잃기 때문이다. 따라서 저속 영역에서도 효과적으로 동작할 수 있도록 전동기의 입력 전류를 이용하여 전동기 단자 전압을 보상하는 방법을 생각할 수 있다.[5]

식 (3)은 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$\lambda_{dq}^s = \int (v_{dq}^s - r_s i_{dq}^s + V_{comp}) dt \quad (6)$$

여기서 V_{comp} 는,

$$V_{comp} = (K_p + \frac{K_i}{s})(\hat{i}_s^s - i_s^s) \quad (7)$$

로 정의할 수 있다. 제어기 이득 K_p 와 K_i 는 저속 영역에서는 전류 모델만 동작하고 속도가 증가하면서 전압 모델이 나타나도록 정하면 원하는 성능을 얻을 수가 있으며, 이는 다음과 같이 표현함으로써 구현 할 수 있다.

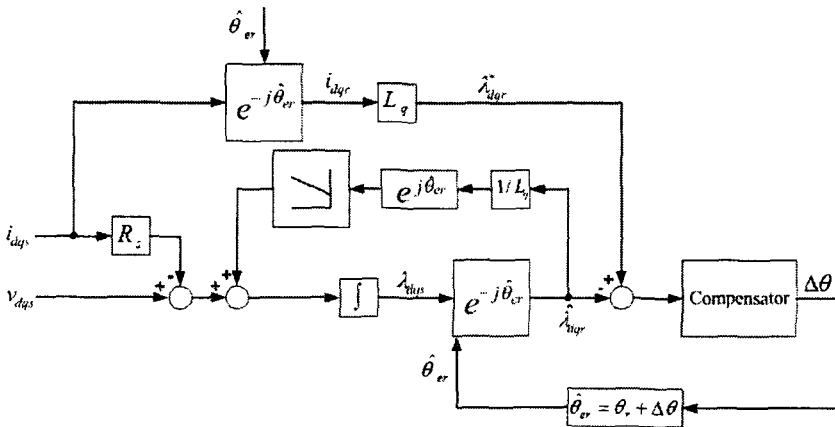


그림 3 자속 추정기의 제어 한력도

$$K_p = \omega_1 + \omega_2, \quad K_i = \omega_1 \times \omega_2 \quad (8)$$

그림 3에 자속 추정기의 제어 블럭도를 나타내었다.

2.3 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용된 SynRM의 사양을 표 1에 보였다. 그림 4는 전류 모델에 의한 전압보상이 없는 경우의 결과이며 그림 5는 동일한 조건에서 전류모델에 의한 전압보상이 있는 경우의 결과를 보였다. 저속 영역에서의 모터 단자전압 부족에 의한 추정 특성 저하를 전류 모델에 의한 전압 보상을 통하여 개선할 수 있음을 알 수 있다.

그림 6은 30 rpm으로 구동 시 회전자각 추정 특성을 나타내며, 그림 7은 30 → -30 rpm으로 속도 반전 시 자속 추정기의 추정 특성을 나타낸 것이다. 두 경우 모두 양호한 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 그림 4에서 그림 7까지 (a)는 실제 속도 ω_r [r/min], (b)는 추정 속도 $\hat{\omega}_r$ [r/min], (c)는 실제 회전자각 θ_r [rad], (d)는 추정 회전자각 $\hat{\theta}_r$ [rad]을 각각 나타낸다.

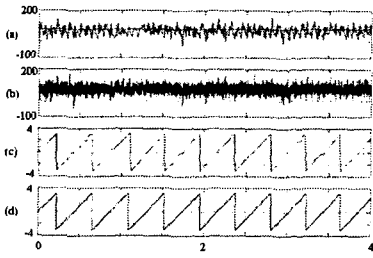


그림 4 자속 추정에 의한 회전자각 추정 특성
(전류 모델에 의한 전압 보상을 하지 않은 경우:
80r/min, 0.2 p.u. load)

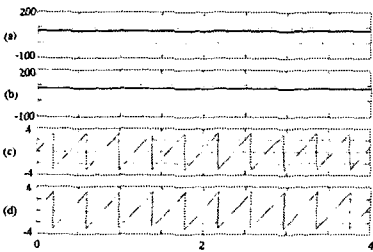


그림 5 자속 추정에 의한 회전자각 추정 특성
(전류 모델에 의한 전압 보상을 한 경우:
80r/min, 0.2 p.u. load)

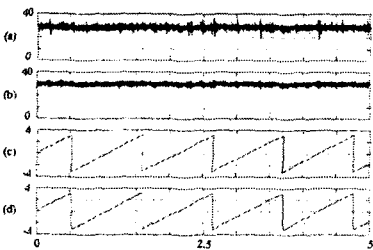


그림 6 자속추정에 의한 회전자각 추정 특성
(30r/min, 0.2 p.u. load)

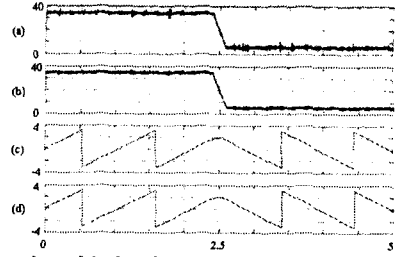


그림 7 저속영역에서의 속도반전시 운전 특성
(30→-30 r/min, 0.2 p.u. load)

표 1. 시뮬레이션에 사용된 SynRM의 사양

항 목	값
정격 토크	0.4 Nm
정격 속도	1800 RPM
입력 전압	220 V
극 수	4
공극 길이	0.3 mm
적층 높이	50 mm
돌극비	4.7

3. 결 론

동기형 릴럭턴스 전동기의 전 속도 영역에서 안정적으로 동작하는 단순한 구조의 센서리스 제어 알고리즘을 제시하였고 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증하였다. 기준자속과 추정자속간의 차이를 이용하여 센서리스 운전을 수행 하였으며, 저속 영역에서의 낮은 전동기 단자전압으로 인한 제어 성능의 저하를 보상하기 위해서 전류모델을 이용하는 방법을 제시하였고 그 타당성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ion Boldea, "Reluctance Synchronous Machines and Drives," Oxford, London, 1996
- [2] 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
- [3] P. L. Jansen and R. D. Lorenz, "Transducerless Position and Velocity Estimation in Induction and Salient AC Machines," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, no. 2, March/April, pp. 240-247, 1995.
- [4] Sol Kim, et. al., "A Simplified Sensorless Control of Synchronous Reluctance Motor," 9th International Conference of Optimization of Electrical and Electronic Equipments, vol III, pp. 50-54, 2004
- [5] Ion Boldea, et. al., "A modified Direct Torque Control (DTC) of Reluctance Synchronous Motor Sensorless Drive," Electric Machines and Power Systems 28, pp. 115-128, 2000

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 중점추진 과제인 신·재생에너지 발전의 계통연계 기초기술개발 연구 (과제번호 : R-2004-B-125)의 지원으로 수행되었음.