

인덕턴스 연산에 의한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 회전자 위치검출

나종덕*, 정병호*, 임양수**, 김평호**, 조금배*, 백형래*

*조선대학교 전기공학과, **서강정보대학

A Study of a SR Motor drive with induction estimation

Jong -duk Na*, Byun-Ho Chung*, Yang-Soo Lim**, Pyung-Ho Kim**, Guem-Bae Cho*, Hyung-Lae Baek*

Chosun university Electrical Engineering*, SeoKang college**

ABSTRACT

In this paper proposes a very simple method to estimate the rotor position of a switched reluctance motor. By on-line estimating the self-inductance of the motor, the rotor position of the SR motor is obtained, and a closed-loop drive system can be achieved. Proposed methods can easy implement to application with sensorless SR motor drive system. Speed 2000 rpm SR motor simulation executed with self inductance estimation and result represented. Simulation result verified the rotor position using the proposed self-inductance estimation method.

1. 서 론

엔코더나 리졸버와 같은 위치센서가 상전류의 전류(commutation)를 결정하기 위해서 이용되기도 하지만 비용의 증가와 시스템의 복잡함이 증가하게 된다. 따라서 스위치드 릴럭턴스 전동기의 센서없는 드라이브에 대한 연구는 하나의 추세로 자리 잡고 있다^[1].

센서리스방식에는 4가지의 주요한 방식이 있는데 초퍼 모니터링전류에 의한 위치검출방법과 주파수 변조 엔코딩 방법, 상호 유기된 전압을 이용한 검출방법, 그리고 자속과 전류측정법이 있다. 또한 이전의 연구는 주로 액티브 상 전류파형을 모니터링함으로써 회전자 위치를 검출하는 방법이 주로 적용되었다^[2]. 그러나 이 방식은 회전운동상의 EMF를 연산하지 못하고 EMF의 영향에 대해서 효과적으로 보상하지 못한다. 또한 이전의 연구에서 제안된 컨버터의 시간 간격을 획득하고 회전자 위치를 연산하기 위해서 선형인덕턴스화법을 이용하였다. 비록 이러한 접근방법은 직접적으로 이용할 수 있는 방식

이기는 하나 변조회로라는 부가적인 회로가 요구된다^[3]. 본 논문에서 제안한 방식은 유기된 전압과 회전자 위치 사이의 명확한 관계를 제공하기 때문에 회전자 위치 연산에 효과적인 방식이다. 또한 전도 모드나 프리휠링모드에서 에너지화된 권선을 검출하기 위해서 동기화된 신호를 요구한다. 가변속 범위는 높은 속도범위에서의 동작이 어려운데 최근 많은 연구를 통해서 퍼지논리나 ANN, 유전알고리즘등의 인공지능기법을 이용하여 자화곡선 및 전동기파라미터를 인식하는 방법들이 제시되고 있으나 이들은 많은 룰과 레이어를 포함하고 있어 전동기 제어 시스템을 더욱 복잡한 구조로 만들고 있다.

Matlab simulink와 m-file을 이용한 시뮬레이션 결과를 통해서 제안된 방식의 회전자 위치를 연산하기 위한 간단한 방법을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 스위치드 릴럭턴스 전동기의 미분형 모델

6/4 스위치드 릴럭턴스 전동기의 고정자와 회전자는 각각 돌극형 구조를 가지고 있다. 회전자 회전함에 따라 전동기의 3상 자기 인덕턴스는 변동한다. 본 연구에서 스위치드 릴럭턴스 전동기의 전기적인 특성을 설명하기 위해 각 상의 자속쇄교는 회전자 위치와 전류에 따라 변화한다고 가정한다. 이러한 가정은 각 상의 전기적인 동작을 등가회로에 의한 모델식을 세울 수 있다.

$$V_j = i_j R + \frac{\partial \psi_j}{\partial i_j} \cdot \frac{di_j}{dt} + \omega \frac{\partial \psi_j}{\partial \theta} \quad (1)$$

$$\psi_j = L_j(\theta) \cdot i_j \quad (2)$$

$$V_a = i_a R + L_a \frac{di_a}{dt} + \omega_c i_a \frac{dL_a}{d\theta_c} \quad (3)$$

첨자로 표시된 $j(1 \leq j \leq 3)$ 는 6/4 스위치드 릴럭턴스

전동기의 고정자의 상을 나타낸다. 자속쇄교, ψ , 는 전류 i 와 회전자 위치 θ 의 함수이다. 자속 쇄교의 측정 결과는 그림 3에서 보여준다. 일정전류 이상에서는 포화가 발생하며 자기적인 비선형을 명확하게 볼 수 있다.

그림 3은 자속쇄교와 전류사이의 관계를 보여준다.

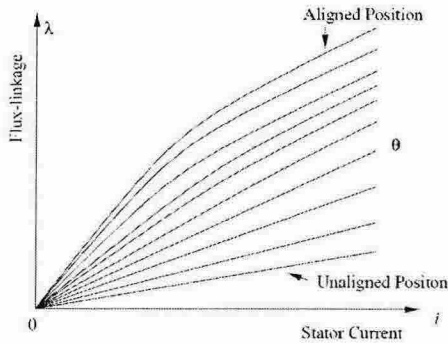


Fig. 3. Flux linkage vs. Current

스위치드 릴럭턴스 전동기의 기계적인 동작은 다음의 식에서 보여준다.

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \sum_{j=1}^m T_j - T_{load} \quad (4)$$

$$T_j = \left[\frac{\partial W'_j}{\partial \theta} \right]_{i=constant}, \text{ with } W'_j = \int_0^{i_j} \psi_j di_j \quad (5)$$

여기서 T_j 는 상 j 의 토크이고, ω 는 회전자속도를 의미한다, 그리고 J 는 관성 모멘트를 나타내고, W'_j 는 자기적인 Co-energy를 그리고 T_{load} 는 부하토크를 의미한다. 하나의 상에 대한 토크방정식을 다시 쓰면 다음의 식과 같다.

$$T_a = \frac{1}{2} \cdot i_a^2 \cdot N_r \cdot \frac{dL_a}{d\theta_e} \quad (6)$$

여기서 T_a 는 a상의 토크이고 N_r 은 회전자 극수를 의미한다. 위의 식에서 보는 바와 같이 토크는 i_a^2 에 비례하므로 전류의 극성과 무관함을 알 수 있다.

또한 양의 토크를 얻기 위해서는 a상의 전류는 L_a 가 선형적으로 증가할 때 에너지화 시켜야만 한다. 다른 한편으로 a상의 인덕턴스가 최대값에 도달하면 한 상의 전류는 부토크의 발생을 억제하기 위해서 순간적으로 전류를 억제시켜야 한다. b상과 c상 전류는 a상과 같은 방식으로 순차적으로 제어된다. 그러므로 3상 고정자전류는 순차적으로 회전자 위치나 인덕턴스의 기울기에 따라서 스위칭된다. 이러한 연속적인 상의 순차적인 에너지화는 매끄러운 토크를 얻을 수 있게 한다. 전동기의 총 토크는 다음과 같이 얻어진다.

$$T_e = T_a + T_b + T_c \quad (7)$$

여기서 T_e 는 전동기의 총 토크이다.

비대칭 컨버터는 용량이 큰 장치의 사용에 적합하고 제어특성이 우수하므로 본 연구에서 적용되었다. 이 컨버터는 그림 4에서 보여준다.

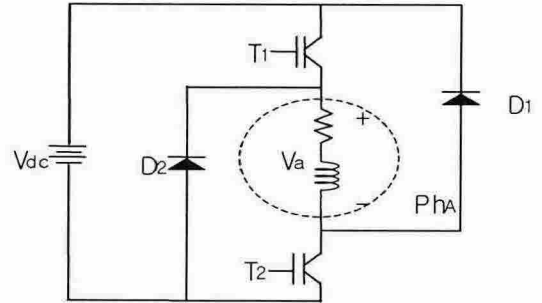


Fig. 4 The a-phase of asymmetric converter

컨버터는 두개의 다른 동작 패턴을 가지게 되는데 본 연구에서는 패턴 A와 패턴 B로 분류하였고 각각의 패턴에 따른 스위칭 상태에 대해 기술한다. 패턴 A는 네 개의 다른 스위칭 상태를 가진다. T_1 과 T_2 가 동시에 턴 온되고 a상 전압은 V_{dc} (mode1)와 같다. T_1 과 T_2 가 모두 턴 오프 될 때, D_1 과 D_2 는 도통된다. 따라서 a상의 전압은 $-V_{dc}$ (mode2)와 같다.

Table 1 Truth table for the states of the switch and diode

State	T1	T2	D1	D2	Vph
Mode1	ON	ON	OFF	OFF	Vdc
Mode0	ON	OFF	ON	OFF	0
Mode0	OFF	ON	OFF	ON	0
Mode2	OFF	OFF	ON	ON	-Vdc

그리고 T_1 이 턴 온 되고 T_2 가 턴오프되거나 그 반대로 될 때, a 상의 전압은 zero(mode0)가 된다. 왜냐하면 권선은 입력전압 전원과 단절되어 있기 때문이다. 다른 한편으로 패턴 B는 모드1과 모드2의 두가지 스위칭모드만 가지므로 a 상의 전압은 V_{dc} 이거나 $-V_{dc}$ 이다. 패턴 A의 연산으로부터 제어기의 스위치는 패턴 B와 함께 부드러운 스위칭이 이루어진다. 결과적으로 스위칭 동작 동안 과도현상에 따른 문제가 현저하게 줄어들게 된다.

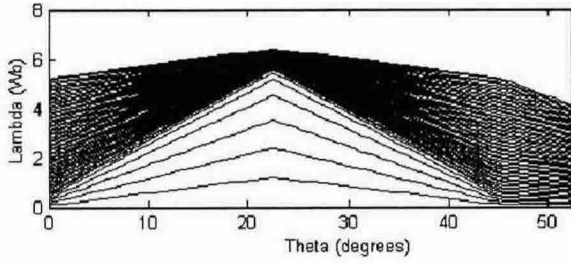


Fig. 5 Inductance vs. rotor position for 6/4 SRM

그림은 정렬상태를 0°로 기준을 설정하였다. 회전자가 연속적으로 이동하면서 정렬상태로 이동하는 과정은 더욱 큰 각도로 변동하게 되고 자기경로가 더욱 적은 릴럭턴스를 가지기 때문에 자기회로에 대해서 더욱 큰 인덕턴스를 가지게 된다. 그림5에서 보는 바와 같이 인덕턴스는 회전자 극이 완전하게 정렬될때까지의 고정자 각도인 $22 \cdot 1/2^\circ$ 까지 증가하게 된다.

2.2 위치 검출방법

스위치드 릴럭턴스 전동기는 스텝전동기의 오픈루프제어와 같은 방식으로 반드시 순차적으로 여자되어야만 한다. 위의 식 (3)을 이용하여 다음의 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\frac{di}{dt} = \left(\frac{1}{L_s}\right)(V_{ph} - iR - \omega_e i \frac{dL_s}{d\theta_e}) \quad (8)$$

2.2.1 패턴 A에 의한 컨버터 상태의 연산

스위치드 릴럭턴스의 컨버터가 패턴 A에서 동작된다면 전동기의 상전압은 V_{dc} , 0, $-V_{dc}$ 과 같은 세 가지의 다른 전압레벨을 가질 것이다. 컨버터가 모드 0에서 스위칭될 때, 영 전압은 권선으로 공급된다. $V_{ph} = 0$ 을 식(3)에 대입하면 모드0에서 전류 기울기는 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{di}{dt}|_{mode0} = \left(\frac{1}{L_s}\right)(-iR - \omega_e i \frac{dL_s}{d\theta_e}) \quad (9)$$

다른 한편으로 컨버터가 모드1에서 스위칭될 때, V_{dc} 전압은 권선으로 공급된다. $V_{ph} = V_{dc}$ 을 식(3)에 대입하면 고정자 전류의 기울기는 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{di}{dt}|_{mode1} = \left(\frac{1}{L_s}\right)(V_{dc} - iR - \omega_e i \frac{dL_s}{d\theta_e}) \quad (10)$$

식 (9)를 식 (11)에 대입하면 모드 1에서 자기 인덕턴스를 얻는데 유리해지고 다음과 같이 유도된다.

$$L_s = \frac{V_{dc}}{\left(\frac{di}{dt}|_{mode1} - \frac{di}{dt}|_{mode0}\right)} \quad (11)$$

식 (9)와 식(11)에서 순시전류 i 과 역기전력은 정확하

게 일치하지는 않는다.

$$\text{back EMF} = \omega_e i \frac{dL_s}{d\theta_e}$$

여기서 인덕턴스는 컨버터의 직류전압과 연관되고 모드1과 모드0사이의 전류미분의 차이이다. 이와 동일한 관점에서 컨버터가 모드 2에서 스위칭될 때, $-V_{dc}$ 는 권선에 공급된다. $V_{ph} = -V_{dc}$ 을 식(8)에 대입하면 고정자 전류의 기울기는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{di}{dt}|_{mode2} = \left(\frac{1}{L_s}\right)(-V_{dc} - iR - \omega_e i \frac{dL_s}{d\theta_e}) \quad (12)$$

식 (9)를 식 (11)에 대입하면 다음의 식과 같은 모드2에서의 자기 인덕턴스를 구할 수 있다.

$$L_s = \frac{-V_{dc}}{\left(\frac{di}{dt}|_{mode2} - \frac{di}{dt}|_{mode0}\right)} \quad (13)$$

2.2.2 패턴 B에 의한 컨버터 상태의 연산

스위치드 릴럭턴스 전동기가 패턴 B에서 동작한다면 전동기의 상 전압은 V_{dc} 과 $-V_{dc}$, 두개의 레벨을 가진다. 결과적으로 회전운동상의 역기전력을 연산하기 위한 영전압이 존재하지 않게 된다. 간략화된 접근법이 본 연구에서는 제안되었다. 각각의 상태사이의 스위칭 간격은 매우 짧다. 고정자 전류의 순시값과 역기전력 값이 다르다 할지라도 그것들의 평균값은 상당히 유사하게 산출된다. 따라서 회전운동상의 역기전력과 모드 1과 모드 2상의 저항의 전압강하는 같다고 가정하면 식 (10)과 (12)로부터 다음의 식이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} L_s &= \frac{2V_{dc}}{\left(\frac{di}{dt}|_{mode1} - \frac{di}{dt}|_{mode2}\right)} \\ &= \frac{-2V_{dc}}{\left(\frac{di}{dt}|_{mode2} - \frac{di}{dt}|_{mode1}\right)} \end{aligned} \quad (14)$$

표 2에서는 각 상에 대한 전압레벨을 정리하여 보여준다.

Table 2. Voltage levels for each phase

Pattern	Voltage Levels
Pattern A	M1= V_{dc} , M2=0, M3= $-V_{dc}$
Pattern B	M1= V_{dc} , m2= $-V_{dc}$

회전자 위치변동과 인덕턴스를 고려하여 정리하면 다음의 식과 같다.

$$L(\theta) = V \frac{\Delta t}{\Delta i} \quad (15)$$

만약 상전압이 짧은 시간동안 공급되었다면 전류는 작

은 값으로 남고 회전자 위치는 크게 변하지는 않는다. 또한 인덕턴스의 포화는 발생하지 않는다.

2.3 PI 제어기

PI 제어기는 회전자 기준속도에 대해 정상상태로 도달하기 위해서 적용되는데 다음의 제어법칙이 적용되었다.

$$I_{n-ref} = K_p(\omega_{ref} - \omega) + K_i \int (\omega_{ref} - \omega) dt \quad (17)$$

여기서 K_p 는 P이득, K_i 는 I이득, 그리고 ω_{ref} 는 기준속도이다.

2.4 시뮬레이션 결과

간단한 인덕턴스 연산법을 이용한 위치 추정제어방식의 실현을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7은 시스템의 블록다이어그램을 보여준다.

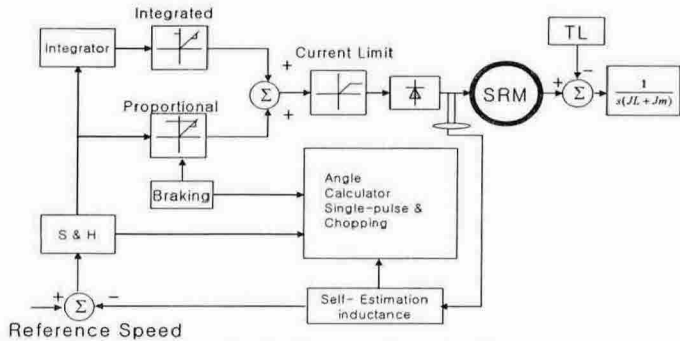


Fig. 6. Block diagram of controller

시뮬레이션의 결과를 그림 6과 그림 7은 제안된 시스템에 적용된 방식의 시뮬레이션 결과를 보여준다.

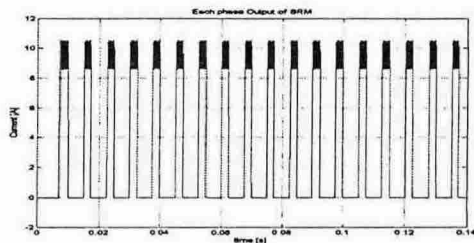


Fig. 7. Each phase Current Waveform

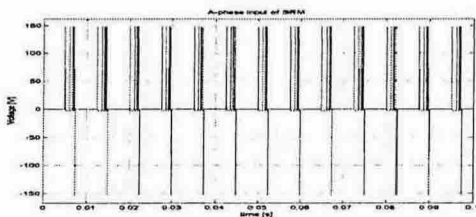


Fig. 8. A phase Voltage Waveform

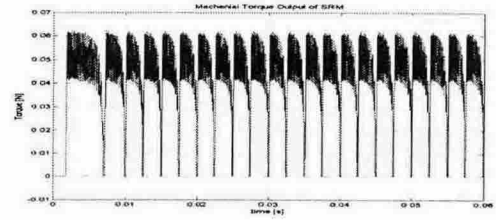


Fig. 9. Mechanical Torque Reference of SRM

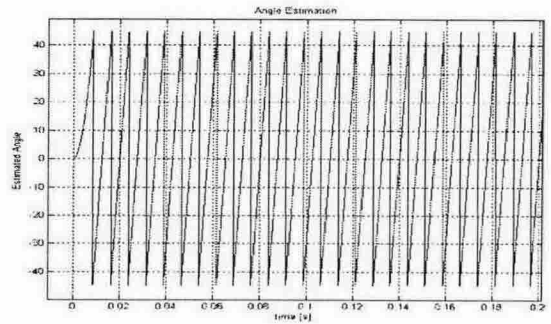


Fig 10. Estimated Warped Angle

3. 결론

본 논문에서는 간단한 회전자 위치 검출법에 대해서 소개하였으며 이 방식을 센서리스 시스템에 적용가능성을 확인하였다. 스위치 릴럭턴스 전동기의 전류기울기는 인덕턴스 정보를 제공한다. 시뮬레이션을 통해서 제안된 시스템의 적용가능성을 검토하였다.

참고 문헌

- [1] Radun, A. V., "Design considerations for the Switched Reluctance Motor," *Transactions on Industry Applications*, September/October, 1995, vol. 31, n. 5, pp. 1049 - 1087
- [2] Tian-Hua Liu and Ching-Guo Chen " Implementation of a Sensorless Switched Reluctance Drive with Self-inductance Estimating Technique" *IEEE trans. Ind. Appl.*, pp. 508-512.
- [3] M. Ehsani, I. Husain, and A. B. Kulkarni " Elimination of discrete position sensor and current sensor in switched reluctance motor drives" *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. Jan/Feb. 1992, pp. 128-135
- [4] Iqbal Husain, Mohammad S. Islam, "Observers for Position and Speed Estimations in Switched Reluctance Motors", *Proceedings of the 40th IEEE conference on Decision and control*, pp. 2217-2222, 2001
- [5] B. Fahimi, M. A. Emadi, M., "Robust Position Sensorless Control of Switched Reluctance Motor Drives over the Entire Speed Range", *IEEE*, pp. 282-288, 2002