

새로운 인덕턴스 연산에 의한 SRM 회전자 위치 검출

나중덕*, 김지훈*, 변문걸*, 최연옥*, 백형래*, 조금배*
*조선대학교

The Rotor Position Detection of SRM with the Novel Inductance Estimation

J.D.Na*, J.H.Kim*, W.J.Bian* Y.O.Choi*, H.L.Baek*, G.B.Cho*
*Chosun University

Abstract - A sensorless control scheme for the switched reluctance motor (SRM) drive at speed control is presented in this paper. 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. SR motor simulation executed with self inductance estimation and result represented.

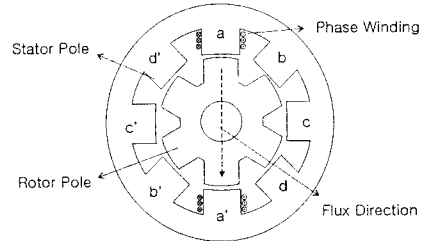


Figure 1 Cross-sectional structure of 8/6

이러한 가정은 각 상의 전기적인 동작을 등가회로에 의한 모델식으로 표현할 수 있다.

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

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

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

첨자로 표시된 $j(1 \leq j \leq 4)$ 는 8/6 스위치드 릴럭턴스 전동기의 고정자의 상을 나타낸다. 자속쇄교, ψ , 는 전류 i 와 회전자 위치 θ 의 함수이다. 자속 쇄교의 측정 결과는 그림 2에서 보여준다.

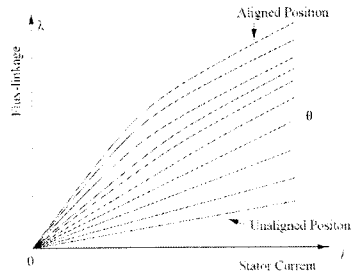


Figure 2 Flux linkage vs. Current Waveform

스위치드 릴럭턴스 전동기의 기계적인 동작은 다음 식과 같다.

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

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

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 식 (6)과

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)는 전자기적 구조가 간단하고 견고하며, 고효율 등의 장점을 가진 전동기로서 근래 여러 산업분야 및 가전 분야에 적용범위를 넓혀가고 있는 추세이다. SRM은 전자에너지 변환기에서 릴럭턴스 토크를 극대화시킨 전동기구조로 전력용 스위칭 전원에 가장 적합한 형태로 알려져 있다.[1][2] 그러나 서보기구조로 이용하기 위해 레졸버, 엔코더, 혹은 Hall 센서와 같은 회전자 위치 센서를 통한 절대 위치정보를 필요로 하게 된다. 그러나 회전자 위치 센서는 비용을 증가시키며, 충격에 약하며, 압축기 등과 같은 고온 및 고압의 환경과 같은 애로상황에서 위치검출에 대한 신뢰성을 저하시키고 오동작을 유발하는 등의 문제가 드러나고 있다.[3][4]

본 논문은 회전자 위치 센서를 이용하지 않고 회전자 위치를 연산하는 방법을 제안한다. 전동기 파라미터를 실시간 검출하여 이를 수치적으로 해석하여 위치정보를 검출하는 방식으로 Matlab simulink를 이용한 시뮬레이션을 통해 제안된 방식을 적용한 회전자 위치 연산을 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 스위치드 릴럭턴스 전동기의 비분형

그림 1에서는 SRM의 기계적인 구조를 보이고 있다. 구조상 회전자와 고정자의 수가 서로 다른 이중 돌극형 구조로 되어있다. 회전자가 회전할 때 각각의 상에 대한 자화 인덕턴스는 변화된다. 또한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 전기적인 특성을 설명하기 위해 각 상의 자속쇄교는 회전자 위치와 전류에 따라 변화한다고 가정한다.

같다.

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

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.

2.1.1 SRM 제어용 비대칭 컨버터

본 실험에서 제어를 위해 비대칭 컨버터를 사용하였다. 비대칭 브리지 컨버터의 주요 특징은 먼저 SRM 구동용 컨버터 중에서 제어의 다양성이 가장 뛰어난 컨버터로 알려져 있으며, 두 번째로 각 상의 전류제어가 독립적이어서 두 상의 전류 중첩이 가능하다는 점이다. 셋째로, 고전압, 대 용량에 적합하며 스위치의 정격전압이 상대적으로 낮다. 그림 3에서는 비대칭 컨버터를 보여준다.

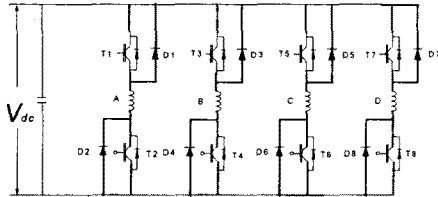
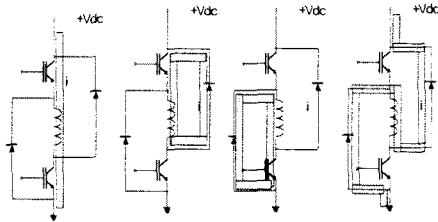


Figure 3 4-Phase Asymmetric Converter

비대칭 브리지 컨버터는 3단계 동작모드를 통해 스위칭 패턴이 결정된다. 그 동작 패턴을 그림 4와 표 1로 나타내었다.



(a)Positive Volts (b)Zero Volts (c)Negative Volts
Figure 4 SRM phase Voltage States

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

2.2 회전자 위치 검출

스위치드 릴럭턴스 전동기는 스텝전동기의 오픈루프제어와 같은 방식으로 순차적으로 여자되어야만 한다. 위의 식 (3)을 이용하여 전류비분형으로 표현되는 다음의 식(7)을 얻을 수 있다.

$$\frac{di}{dt} = \left(\frac{1}{L_s}\right)(V_{ph} - iR - \omega_e i \frac{dL_s}{d\theta_c}) \quad (7)$$

2.2.1 소프트 초평 상태

SRM의 컨버터가 소프트초평으로 동작된다면 스위칭 상태에 따라 전동기의 상전압은 V_{dc} , 0 , $-V_{dc}$ 과 같은 세 가지의 다른 전압레벨을 가질 것이다. 컨버터가 모드 0에서 스위칭 될 때, 영 전압은 권선으로 공급된다. 이때, $V_{ph} = 0$ 을 식(7)에 대입하면 모드0에서 전류 기울기는 다음과 같이 나타난다.

$$\left.\frac{di}{dt}\right|_{mode0} = \left(\frac{1}{L_s}\right)(-iR - \omega_e i \frac{dL_s}{d\theta_c}) \quad (8)$$

다른 한편으로 컨버터가 모드1에서 스위칭 될 때, V_{dc} 전압은 권선으로 공급된다. $V_{ph} = V_{dc}$ 을 식(7)에 대입하면 고정자 전류의 기울기는 다음과 같이 나타난다.

$$\left.\frac{di}{dt}\right|_{mode1} = \left(\frac{1}{L_s}\right)(V_{dc} - iR - \omega_e i \frac{dL_s}{d\theta_c}) \quad (9)$$

식 (8)를 식 (9)로 모드 1에서 자기 인덕턴스를 얻는데 유리해지고 다음과 같이 유도된다.

$$L_s = \frac{V_{dc}}{\left(\left.\frac{di}{dt}\right|_{mode1} - \left.\frac{di}{dt}\right|_{mode0}\right)} \quad (10)$$

식 (8)와 식(9)에서 순시전류 i 과 역기전력은 정확하게 일치하지는 않는다.

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

여기서 인덕턴스는 컨버터의 직류전압과 연관되고 모드1과 모드0사이의 전류비분의 차이이다. 이와 동일한 관점에서 컨버터가 모드 2에서 스위칭 될 때, $-V_{dc}$ 는 권선에 공급된다. $V_{ph} = -V_{dc}$ 을 식(7)에 대입하면 고정자 전류의 기울기는 다음과 같이 표현된다.

$$\left.\frac{di}{dt}\right|_{mode2} = \left(\frac{1}{L_s}\right)(-V_{dc} - iR - \omega_e i \frac{dL_s}{d\theta_c}) \quad (11)$$

식 (8)과 식 (11)로 모드2에서의 자기 인덕턴스를 구할 수 있다.

$$L_s = \frac{-V_{dc}}{\left(\left.\frac{di}{dt}\right|_{mode2} - \left.\frac{di}{dt}\right|_{mode0}\right)} \quad (12)$$

2.2.2 하드 초평 상태의 연산

스위치드 릴럭턴스 전동기가 하드초평으로 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 (9)과 (11)로부터 다음의 식이 유도될 수 있다.

$$L_s = \frac{2V_{dc}}{\left(\left.\frac{di}{dt}\right|_{mode1} - \left.\frac{di}{dt}\right|_{mode2}\right)} = \frac{-2V_{dc}}{\left(\left.\frac{di}{dt}\right|_{mode2} - \left.\frac{di}{dt}\right|_{mode1}\right)} \quad (13)$$

회전자 위치변동과 인덕턴스를 고려하여 정리하면 다음의 식과 같다.

$$L(\theta) = V \frac{\Delta t}{\Delta i} \quad (14)$$

2.3 시뮬레이션 결과

간단한 인덕턴스 연산을 통한 회전자 위치 검출을 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 5는 전체 시스템의 블록 다이어그램을 보여준다.

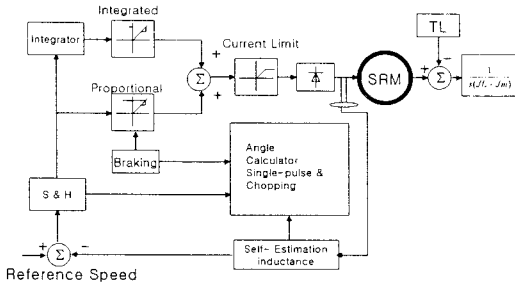


Fig. 5. Block diagram of Proposed System

전동기는 8/6 SRM을 모델로 하였고, 입력전압은 150[V], 정격속도는 2500rpm이다.

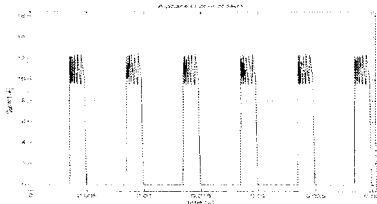


Fig 6. A phase Current Waveform

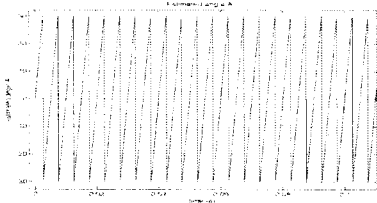


Fig 7. Estimated Warped Angle



Fig 8. Spced of SRM

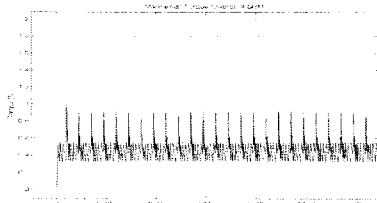


Fig 9. Mechanical Torque Reference of SRM

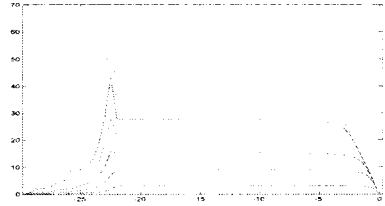


Fig 10. Inductance profile

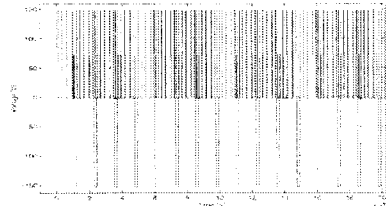


Fig 11. Voltage of all Phase

3. 결 론

본 논문은 인덕턴스 연산을 통한 새로운 회전자 위치 검출법에 대해 소개하였으며 Matlab simulink를 이용한 시뮬레이션을 통해 제안된 방식의 회전자 위치 연산을 검토하였다. 컨버터의 스위칭 상태에 따라 소프트 초핑 방식의 적용하여 실시시스템에 적용가능성을 검토하였다. 향후 실시시스템에 적용하기 위해서 초기 위치선정문제와 SRM 고유의 비선형성에 기인한 토크리플의 문제에 대한 고려가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [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
- [6] B.Fahimi, Raymond B. Sepe Jr., "Development of 4-Quadrant Sensorless Control of SRM Drives Over The Entire Speed Range" *IEEE*, pp.1625-1632, 2002
- [7] J. Wolff, R.Rahner, H.Spath, "Sensorless Speed Control of a Switched Reluctance Motor for Industrial Applications", *Optimization of Electrical and Electronics Equipments Brasov*, pp.457-462, 1998
- [8] Michael T. DirRenzo, "Switched Reluctance Motor Control Basic Operation and Example Using the TMS320F240", *Texas Instruments Application Report*, February 2000.