

파라미터 보상기를 가지는 비대칭 SRM의 센서리스 속도제어

임근민¹, 안진우², 이동희[†]

A Sensorless Speed Control of 2-Phase Asymmetric SRM with Parameter Compensator

Geun-Min Lim¹, Jin-Woo Ahn², and Dong-Hee Lee[†]

Abstract - This paper presents a sensorless speed control of a 2-phase switch reluctance motor(SRM). The proposed sensorless control scheme is based on the slide mode observer with parameter compensator to improve the estimation performance. In the stand still position, the initial rotor position is determined by pulse current responses of each phase windings and the current difference. In order to determine an accurate initial rotor position, the two initial rotor positions are estimated by the difference of the pulse currents. From the stand still to the operating region, a simple open loop control which determines the commutation sequence by the pulse current of the unexcited phase winding is used. When the motor speed is reached to the sensorless control region, the estimated rotor position and speed by the slide mode observer are used to control the SRM. The flux calculator used in the slide mode observer is designed by phase voltage and the voltage drops in the phase resistance of the winding. The accuracy of the flux calculator is dependent on the phase resistance. For the continuous update of the phase resistance, current gradient at the inductance break point is used in this paper. The error of the estimated rotor position at the current gradient position is used to update the phase resistance to improve the sensorless scheme. The proposed sensorless speed control scheme is verified with a practical compressor used in home appliances. And the results show the effectiveness of the proposed control scheme.

Keywords: SRM, sensorless control, parameter compensator

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 구조가 간단하고, 운전효율이 높으며 견인구동 특성이 우수하여 경제성을 요구하는 응용분야에서 다양한 개발이 활발히 이루어지고 있다^[1]. 이러한 SRM의 산업응용에서 정확한 속도 및 전류 제어를 위해서는 회전자의 위치 정보가 필요하고, 이를 위해 마그네틱 센서, 레졸버 및 엔코더 등의 위치 센서가 사용되고 있다^[1-2]. 이러한 회전자 위치 센서의 사용은 별도의 신호처리가 필요하고 고온, 고

압 등의 환경적인 요인에 민감하여 열악한 환경에 적용되기 어려우며 경제성의 문제로 인하여 여러 가지의 센서리스 제어 기법이 연구되고 있다^[3-4]. SRM의 센서리스에는 자기적인 인덕턴스의 변곡점을 이용하는 방식^[5]과 인덕턴스의 기울기 변화를 추정하는 방식^[6] 및 자속 관측기를 이용하는 방식^[7] 등이 연구되었다. 이중 인덕턴스의 변곡점을 이용하는 방식은 매우 단순하지만, 전기적인 한 주기에서 하나의 위치만을 추정할 수 있고, 연속적인 회전자 위치 추정이 어려운 단점이 있으며, 인덕턴스 기울기 변화를 추정하는 방식에서는 비여자상에 인가된 전압펄스에 의한 부토크 발생과, 매우 낮은 미소 전류에 의한 정밀도 문제 등이 회전자 위치 추정을 어렵게 하는 요소가 된다. 또한, 여자상에서의 전류 기울기에 의한 인덕턴스 추정 방식도, 복잡한 하드웨어 또는 고속의 DSP를 요구하게 되며, 직류 링크 전압의 변동에 따른 오차에 대한 영향이 회전자 추정을 어렵게 한다. 이에 비하여 자속관측기를 이용한 방식은 정지상태에서

Paper number: TKPE-2012-17-3-7 ISSN: 1229-2214

[†] Corresponding author: leedh@ks.ac.kr

Dept. of Mechatronics Eng., Kyungshung Univ.
Tel: +82-51-663-4693 Fax: +82-51-624-5980

¹ Dept. of Mechatronics Engineering, Kyungshung University

² Dept. of Mechatronics Engineering, Kyungshung University
Manuscript received Feb. 6, 2012; accepted Mar. 5, 2012

— 본 논문은 2011년 추계학술대회 우수추천논문임

는 회전자 추정이 불가능하지만, 일정속도 이상에서는 연속적인 회전자 위치 추정이 가능하고, 이를 이용한 연속적인 회전자 속도 제어가 가능한 장점이 있다.

본 논문은 비대칭 인덕턴스 형상을 가진 2상 SRM의 파라미터 보상기를 가지는 슬라이딩 모드 기법의 자속 관측기를 이용한 센서리스 방식에 관한 연구로써, 회전자 위치와 관계없이 상권선에 인가되는 전압 및 전류로 계산되는 자속과 회전자 위치에 의존적인 인덕턴스 모델로부터 계산되는 자속과의 오차로부터 회전자의 위치 및 속도를 추정 방식이다. 자속관측기법을 적용한 센서리스 제어는 일정 속도 이상에서 연속적인 회전자 위치 추정이 가능하며, 중 저속이상에서 매우 효과적인 회전자 위치 추정 방식이다. 하지만, 자속관측기에서 사용하는 전압 및 상저항 등의 파라미터의 정보에는 스위칭 소자 및 휠링 다이오드에서 발생하는 전압오차 성분과 온도 상승에 의한 상저항 변화 등으로 인하여 오차를 가지게 되고, 이러한 오차는 회전자 위치의 추정 오차를 일으키게 된다. 본 논문에서는 파라미터 오차에 의한 회전자 위치 추정오차의 감소를 위하여, 상저항 및 전압 오차와 관계없는 SRM의 자기적인 특성에 의해 발생하는 인덕턴스 변곡점 위치를 실제 위치로 가정하여 연속적으로 추정기의 파라미터를 보상하는 파라미터 보상기를 적용하였다.

또한, 자속관측기법을 적용한 센서리스 제어는 정지 상태에서 회전자 위치 추정이 불가능하고 저속 운전구간에서는 위치 추정 정밀도가 낮으므로 SRM의 속도영역을 초기각 검출 및 초기 기동구간과 자속관측기법을 적용한 센서리스 제어 구간으로 나누어 제어를 수행한다. 먼저, 초기각 검출 및 초기 기동구간에서는 연속적인 전압 펄스 인가를 통해 검출되는 전류 펄스의 차를 이용하여 초기각을 검출하여 초기 기동 여자상을 결정 한 후, 비여자상에 미소 전압 펄스의 인가에 따른 전류 응답으로부터, 여자상의 전류(轉流, commutation)를 결정한다. 이러한 오픈루프 방식의 초기기동으로 전동기의 속도가 일정속도 이상이 되어 안정적인 회전자 위치 추정이 가능한 영역으로 도달하면, 자속관측기법을 적용한 센서리스 제어로 전환되도록 설계하였다. 특히, 자속관측기에서는 전동기의 파라미터 오차 및 전압오차에 의한 회전자 추정위치오차를 개선하기 위하여, 전류 변곡점 검출 지점에서 추정위치의 오차로부터 파라미터 보상기를 적용하여 추정 위치의 정밀도를 개선하였다.

제안된 방식은 비대칭 인덕턴스 형상을 가진 2상 SRM을 이용하여 센서리스 속도 제어 시스템을 구현하였으며 실험을 통해 타당성을 검증하였다.

2. 자속관측기법을 적용한 SRM의 위치 및 속도 추정

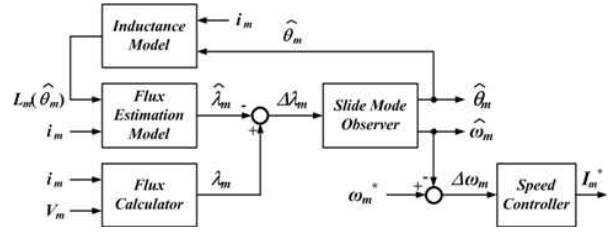


Fig. 1 Block digarm of sensorless control using flux observer

SRM의 자속은 회전자의 위치와 전류에 따라 고유의 값을 가지게 되므로, 실제 전동기의 자속 정보와 상권선에 인가된 전압 및 전류에 의해 계산된 자속과의 오차 정보로부터 회전자의 위치를 추정할 수 있다^[8].

그림 1은 자속관측기법이 적용된 센서리스 제어블록도를 나타내고 있다. 그림 1에서 SRM의 회전자 추정위치 $\hat{\theta}_m$ 과 회전자 위치 정보와 전류를 포함한 인덕턴스 모델을 통해 계산된 추정자속과 상권선에 인가되는 전압과 전류로 계산되는 실제 자속과의 오차 성분은 회전자의 위치오차를 나타내므로, 이로부터 슬라이드 모드 관측기로부터 추정위치 $\hat{\theta}_m$ 및 추정 속도 $\hat{\omega}_m$ 를 추정할 수 있다.

그림 1에서, 전동기의 위치 정보를 포함하고 있는 추정자속과 전압 및 전류에 의해 계산되는 자속은 다음과 같다.

$$\hat{\lambda}_m = L_m(\hat{\theta}_m, i_m) \cdot i_m \tag{1}$$

$$\lambda_m = \int (V_m - R_m \cdot i_m) dt \tag{2}$$

이때, 자속을 추정하기 위한 인덕턴스는 회전자 위치와 전류에 따라 결정되는 모델을 사용하게 되며, 인덕턴스 모델의 정밀도에 따라 추정자속의 정밀도 및 자속관측기에 의해 추정되는 회전자 위치의 정밀도가 결정된다. 회전자 위치와 전류의 크기에 따라 측정된 인덕턴스를 적용하는 것은 정밀도 향상 측면에서 유리하지만, 많은 측정 시간을 필요로 하게 된다. 본 논문에서는 FEM 해석된 인덕턴스를 측정된 인덕턴스로부터 보정하여 연속적인 인덕턴스 모델을 구하고, 이를 룩업(Look-up) 테이블을 만들어서 사용하였다. 본 논문에 적용된 룩업 테이블은 기계각 1도 단위와 전류 0.1[A] 단위로 90×40의 데이터를 사용하였다. 본 논문에서는 기계각 90도와 최대 전류 4[A]로 데이터를 구성하였으나, 실제 인덕턴스가 자속으로 계산되는 여자 구간은 턴-온 각도에서 턴-오프 각도까지의 드웰각(Dwell angle)에 해당하므로, 드웰각 구간으로 한정하여 메모리의 크기를 감소시킬 수 있다.

회전자 위치 추정은 자속 오차 성분에 대한 함수로

구성되어 전동기의 자속 데이터와 계산되는 자속에 의해 회전자의 위치 및 속도를 추정하게 된다. 회전자 위치 추정부의 구성은 다음과 같다. 이 때, k_w 와 k_θ 는 회전자의 속도와 위치를 추정하기 위한 관측기의 이득을 의미한다.

$$\Delta\lambda_m = \hat{\lambda}_m - \lambda_m = e_f \quad (3)$$

$$\hat{\omega}_{m(k)} = k_w \cdot \text{sgn}(e_f) \quad (4)$$

$$\hat{\theta}_{m(k)} = \hat{\omega}_{m(k-1)} + k_\theta \cdot \text{sgn}(e_f) \quad (5)$$

자속관측기법을 적용한 SRM의 센서리스 속도제어는 추정 정밀도가 높고 연속적으로 회전자의 위치와 속도 추정이 가능하지만, 실제 자속을 계산함에 있어 스위칭 소자 및 휠링 다이오드에서 발생하는 전압강하 성분과 전동기의 온도 상승으로 인한 파라미터 변동에 의해 회전자 추정 위치의 오차를 포함할 수 있다.

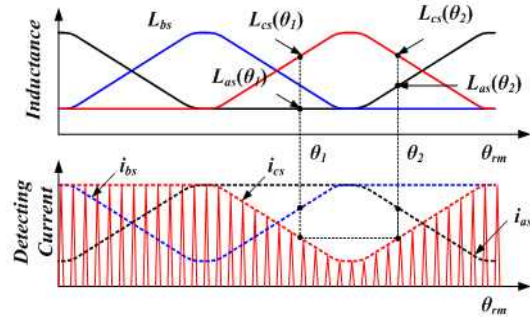
3. 초기각 검출 및 초기 구동 방식

자속관측기법을 적용한 SRM의 센서리스 방식은 위치 추정오차에 따른 자속 오차로부터 연속적으로 관측기를 수렴하는 방식이므로, 정지상태 및 저속운전 상태에서는 자속계산에서의 오차로 인하여 정상적인 위치 및 속도 추정이 매우 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 초기각 검출과 오픈 루프 방식의 초기기동을 통하여 센서리스 모드로 동작하는 2상 비대칭 인덕턴스 형상을 가진 SRM의 속도제어 방식을 제안한다.

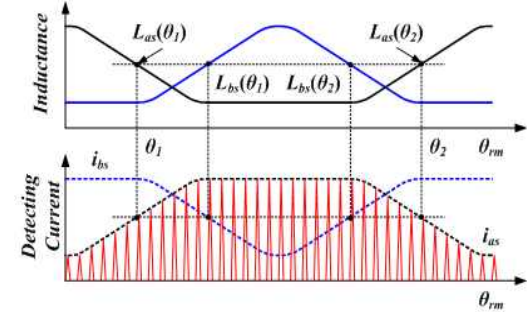
3.1 초기각 검출

SRM의 센서리스 제어는 초기각 위치 검출이 필수적이고, 이를 위해 회전자의 강제 정렬 또는 전압펄스 인가를 통한 초기 여자상의 검출기법이 사용되고 있다[9]. 회전자의 강제 정렬방법은 한 상에 전압을 인가하여 고정자와 회전자를 원하는 위치에 정렬시킴으로써, 초기 위치를 강제화 시키는 방식으로, 실제 응용에 있어 역회전하면 안되는 경우 기기파손의 원인이 된다. 또한, 전압펄스 인가 방식은 대칭 3상 SRM의 경우 초기 여자상의 검출이 비교적 용이하나 대칭 2상 SRM의 경우 전압펄스 인가를 통한 전류응답은 서로 다른 위치에서 같은 값을 가지게 되므로 초기각 검출이 어렵다.

그림 2는 대칭 3상 및 2상 SRM의 초기 위치 검출을 위한 펄스 전류의 응답 특성을 보이고 있다. 그림 2(a)의 대칭 3상 SRM에서 펄스 전류는 각 위치에서 세 상의 펄스 전류 응답이 회전자 초기 위치에 따라 모두 다르게 나타나므로, 초기 위치 및 여자상을 쉽게 검출할 수 있다.



(a) Pulse current response of the symmetric 3-phase SRM



(b) Pulse current response of the symmetric 2-phase SRM

Fig. 2 Current pulse response for the initial rotor position detecting of the 2- and 3-phase SRM

하지만, 그림 2(b)에서 보이는 대칭 2상 SRM에서 두 상의 펄스 전류 응답은 같은 크기가 서로 다른 두 회전자 위치에서 나타나게 되고, 동일한 크기의 전류 펄스 응답에서 두 회전자 위치를 구분할 수 없으므로 초기 위치 검출이 매우 어렵다.

즉, 그림 2(a)의 대칭 3상 SRM에서 동일한 검출 전류 i_{cs} 는 검출 위치 θ_1 과 θ_2 에서 동일하게 나타나지만, 같은 위치에서 i_{as} 와 i_{bs} 의 크기가 서로 다르게 나타나므로, 검출 위치 θ_1 과 θ_2 를 쉽게 구분할 수 있다. 하지만, 그림 2(b)에서 검출 전류 i_{as} 는 검출 위치 θ_1 과 θ_2 에서 동일하게 나타나며, 같은 위치에서 검출 전류 i_{bs} 도 동일하므로, 초기 위치를 검출하기 매우 어렵다. 하지만, 일반적인 2상 SRM의 응용에서의 팬, 블로워 및 컴프레서는 단방향 회전이 많이 적용되고 있고, 이러한 단방향 회전에는 정토크 영역을 넓게 사용할 수 있고 토크 리플을 설계적으로 억제할 수 있는 비대칭 인덕턴스 형상을 가진 2상 SRM이 많이 사용되고 있다. 그림 3은 비대칭 인덕턴스 형상을 가진 2상 SRM의 펄스 전류 응답 특성을 나타내고 있다. 그림 3에서 보이는 응답특성은 대칭 2상 SRM과 달리 B-상의 전류 i_{bs} 응답에 대한 초기 위치각은 θ_1 과 θ_2 에서 동일한 특성을 나타내고 있지만, 각 위치에서 i_{as} 의 응답은 Δi 만큼의 차이를 가지는 형태로 나타나게 되므로, 대칭 2상 SRM에 비하여 초기 위치 검출이 비교적 용이하게 된다. 하지만, 그 차이가 매우 작고, 특정 위치 구간에서는 다른 상의 전류

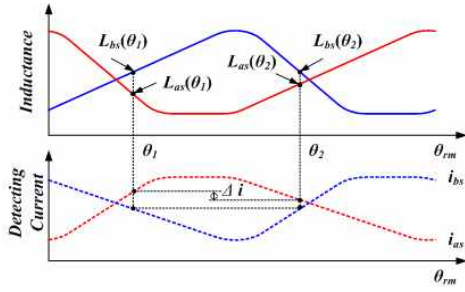


Fig. 3 Current pulse response of the 2-phase SRM with asymmetric inductance profile

응답 차이도 매우 작기 때문에 정밀한 초기 위치 검출에는 어려움이 있다.

본 논문에서 제안하는 2상 비대칭 SRM의 초기 위치 검출 방식은 전압펄스를 연속적으로 인가하여 검출되는 두 상전류의 펄스 차이를 이용하는 방식이다. 그림 4는 제안된 비대칭 2상 SRM의 초기 위치 검출방식을 나타내었다.

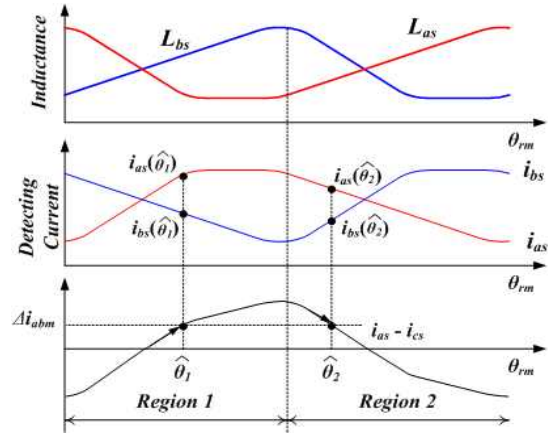
펄스형 전압을 인가하여 측정된 전류 i_{am} 과 i_{bm} 에서 두 전류의 차이는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta i_{abm} = i_{am} - i_{bm} \quad (6)$$

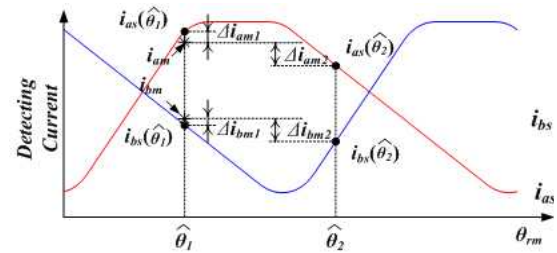
이때, 두 펄스형 전류차 Δi_{abm} 은 회전자 위치에 따라 그 크기가 다르게 나타나게 되며, 회전자 위치에 따른 전류 응답의 차이를 룩업 테이블로 구성하여, 초기의 회전자 위치를 추정할 수 있다. 두 펄스 전류의 차이를 이용하는 것은 초기 위치에서 인가되는 전압 펄스의 크기는 무부하 상태에서 회전자가 이동하지 않을 정도의 낮은 전류를 가지는 크기로 인가되므로, 제어기에서의 전류 피이드백 신호에는 많은 노이즈 성분이 포함된다. 이때, 두 상전류에서 발생하는 노이즈의 크기는 비슷하게 나타나므로, 두 검출전류의 차이로부터 노이즈에 대한 오차를 다소 감소시킬 수 있다.

그림 4(a)에서 회전자 위치에 따른 전류 펄스의 차이와 룩업테이블에 저장된 회전자 위치에 따른 전류펄스 응답과의 비교를 통하여, 단조 증가하는 구간 Region 1과 단조 감소하는 Region 2에서 각각 가장 작은 오차를 가지는 데이터의 추정위치 $\hat{\theta}_1$ 과 추정위치 $\hat{\theta}_2$ 를 결정할 수 있다. 이때, 실제 회전자의 초기 위치는 두 추정위치 중 한 위치에 해당 된다.

대칭형의 인덕턴스 파형을 가진 2상 SRM에서는 두 위치 모두에서 각 전류 응답이 비슷하게 나타나므로, 실제 위치를 결정하기가 매우 어렵다. 하지만, 비대칭 인덕턴스 형상의 가진 2상 SRM의 경우에는 그림 4(b)에서와 같이 두 위치에서 각 추정위치에 해당하는 전류 데이터를 비교하면, 실제 초기위치에 해당하는 곳에 대한 전류오차가 거의 0에 해당하게 되며, 실제 초기 위치



(a) Pulse current difference according to the position



(b) Pulse current error according to the rotor position

Fig. 4 Proposed initial position estimation method of 2-phase SRM with asymmetric inductance profile

가 아닌 곳의 전류 오차는 매우 커지게 된다. 즉, 그림 4(b)에서 두 추정 초기 위치에서, 실제 검출된 각 상의 전류와 각 추정위치에서의 전류 응답 예측값과의 오차는 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\Delta i_m(\hat{\theta}_1) = |i_{am} - i_{as}(\hat{\theta}_1)| + |i_{bm} - i_{bs}(\hat{\theta}_1)| \quad (7)$$

$$\Delta i_m(\hat{\theta}_2) = |i_{am} - i_{as}(\hat{\theta}_2)| + |i_{bm} - i_{bs}(\hat{\theta}_2)| \quad (8)$$

이때, i_{am} 및 i_{bm} 는 각 상의 실제 검출된 펄스 전류값을 나타내며, $i_{as}(\hat{\theta}_1)$ 및 $i_{bs}(\hat{\theta}_1)$ 는 위치 $\hat{\theta}_1$ 에서 기 실험된 전류 응답의 데이터를 나타낸다. 추정 초기위치 $\hat{\theta}_1$ 에서의 측정전류와 데이터 전류와의 오차 $\Delta i_m(\hat{\theta}_1)$ 과 추정 초기위치 $\hat{\theta}_2$ 에서의 측정전류와 데이터 전류와의 오차 $\Delta i_m(\hat{\theta}_2)$ 에서 오차가 작은 쪽이 초기 추정위치로 결정된다. 두 추정위치에서 비대칭 인덕턴스 특성에 따라, 추정된 오차가 작은 쪽이 초기 추정위치로 판단 될 수 있다.

그림 5는 실험 전동기의 회전자 위치에 따른 펄스 전류 응답과 두 상전류 차이를 나타내고 있다. 그림 5에서 각 상전류 응답의 크기는 인덕턴스 형상에 따라 다르게 나타나며, 이 형상의 차이는 두 상전류의 차이로부터 명확하게 나타난다. 그림 5에서 두 상전류의 차이는 단조

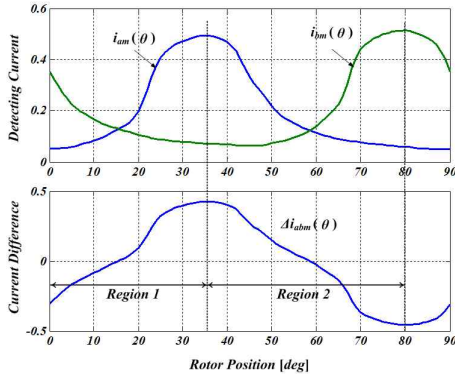


Fig. 5 Pulse current and current difference according to the rotor position

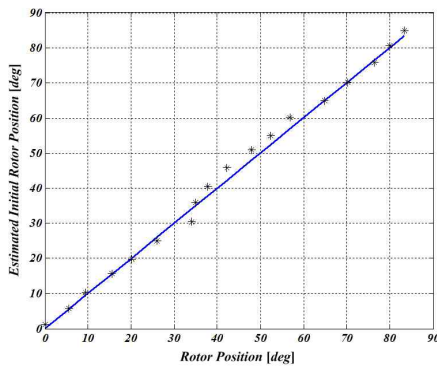


Fig. 6 Experimental result of the actual position and estimated position

증가하는 구간 Region 1과 단조 감소하는 구간 Region 2로 명확하게 구분되며, 두 펄스 전류의 차가 증가하는 Region1과 감소하는 Region2에서 각각 가장 작은 오차를 가지는 데이터의 추정위치를 각각 결정하여 같은 각도에서 측정된 높은 펄스 전류와 오차의 합을 비교하여 초기 위치를 결정할 수 있다.

그림 6은 본 논문에서 제안된 SRM의 초기 위치 검출 방식을 적용하여 실제 정지 상태의 회전자 위치와 추정된 회전자 위치와의 오차관계를 나타내었다. 추정된 최대 초기 위치 오차는 40[deg] 부근에서 약 3.6[deg]의 오차를 나타내고 있다. 이는 인덕턴스가 가장 낮은 부분에서의 초기 위치 추정에 검출 전류의 오차로 인하여 발생하고 있으나, 초기 기동에는 크게 문제가 되지 않는다

3.2 초기 기동 방식

본 논문에서 적용된 초기 기동 방식은 추정된 초기 위치로부터 여자상을 결정하고, 여자상에는 여자전류를 인가하고, 여자되지 않는 다른 상에는 펄스형 전압을 인가하여 펄스 전류 응답을 피드백하여, 다음 여자 위치를 결정하는 방식이다. 이 방식은 비교적 간단하면서 정지 상태에서 일정속도까지 간단하게 오픈루프 제어방식으로 여자상의 전류(轉流)만을 결정하여 구동하게 된다.

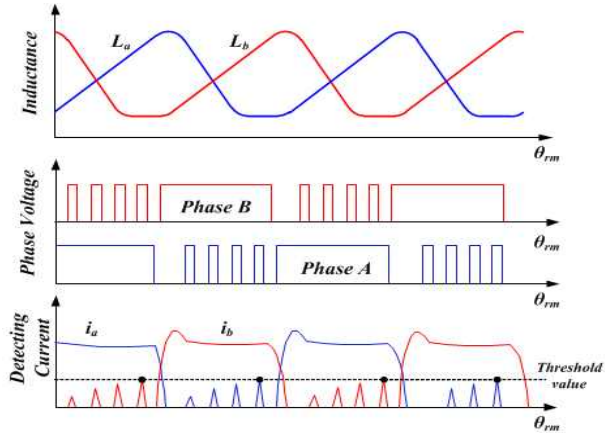


Fig. 7 Determination of the excitation phase using injected voltage pulse

이는 본 논문에서 적용된 자속관측기를 이용한 센서리스 회전자 위치 추정이 저속구간에서 비교적 낮은 검출 정밀도를 가지게 되므로, 일정속도까지 오픈루프로 여자 전류를 인가한 후 일정속도에 도달하면, 센서리스 모드로 동작하도록 설계하였다.

그림 7은 본 논문에서 적용된 초기 기동 방식을 나타내고 있다. 초기 위치에서, 여자상에는 토크 전류를 인가하도록 제어하고, 비 여자상에는 짧은 폭의 전압 펄스를 인가하여 검출되는 펄스형 전류의 값이 임계치에 도달하면, 여자상의 순서를 바꾸는 간단한 방식으로 안정적인 초기 기동이 가능해진다.

4. 파라미터 보상기

자속관측기법을 적용한 센서리스 회전자 위치 추정에서 계산되는 전동기의 자속은 상권선에 인가되는 전압과 전류 및 전동기의 상저항에 의해 계산되므로 이들 정보의 정확성은 매우 중요하다. 하지만, 실제 상권선에 인가되는 전압 및 전류에는 오차가 있고, 상권선의 저항 값도 전동기의 온도 상승에 따라 변화가 발생한다. 따라서, 이러한 오차들은 계산 자속의 오차를 가지게 되므로, 추정위치의 오차를 증가시키는 원인이 된다.

본 논문에서는 이러한 자속 계산의 오차로부터 발생하는 회전자 추정위치의 오차를 보정하기 위하여 계산되는 자속과 무관한 인덕턴스의 변곡점 위치와 이 지점에서의 회전자 추정위치와의 오차로부터 자속관측기의 파라미터를 보상하는 보상기를 설계하였다. 그림 8은 SRM의 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 변곡점과 이를 검출하기 위한 상전류의 형상을 나타내고 있다. 그림 8에서 선행각에서부터 인가된 전압 V_{mD}^* 로부터 상전류는 인덕턴스 변곡점까지는 상승하게 되고, 인덕턴스 변곡점에서 전류의 형상은 감소하는 지점이 나타나게 된다. 이 전류의 변곡점으로부터 회전자의 인덕턴스가 변하는 일정한 위치를 검출할 수 있다. 검출된 회전자 위

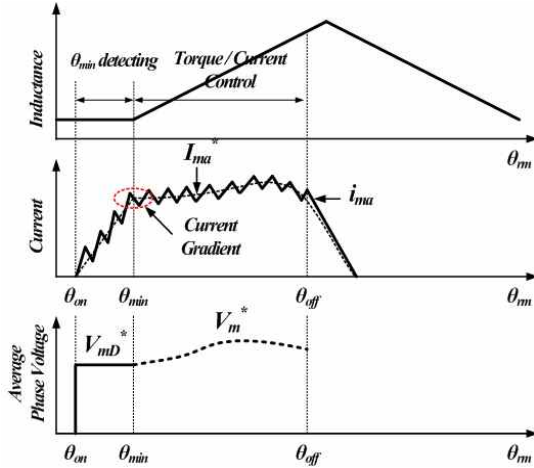


Fig. 8 Detection of the inductance break point

치는 불연속적이지만, 전압 및 저항 등의 파라미터와 무관하고, 회전자의 형상에 의해서만 결정되는 위치이다.

만약 자속관측기의 모든 정보가 매우 정확하다면, 인덕턴스 변곡점의 위치에서 센서리스로 추정된 위치는 항상 일치하여야 한다. 하지만, 자속관측기의 정보에 오차가 발생하는 경우 인덕턴스 변곡점 위치와 추정된 위치사이에는 오차가 발생하게 된다.

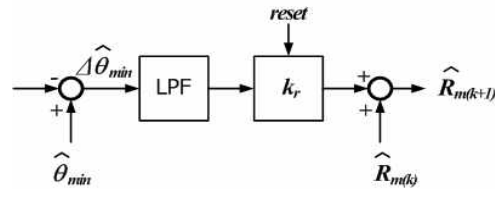
본 논문에서는 불연속적으로 검출 가능한 인덕턴스 변곡점 위치와 추정위치 사이의 오차로부터, 자속관측기에서 사용하는 상권선 저항의 값을 보상하여 자속오차의 크기를 감소시키는 파라미터 보상기를 설계하였다. 그림 9는 본 논문에서 설계된 파라미터 보상기와 이를 적용한 센서리스 추정 방식의 전체 블록도를 나타내고 있다. 그림 9(a)에서 검출된 인덕턴스 변곡점에서 추정 위치 $\hat{\theta}_{min}$ 과 실제 위치 θ_{min} 과의 오차를 저역통과 필터를 적용하여 필터링하고, 이 값에 보상기 이득 k_r 을 곱하여 자속관측기의 상권선 저항을 보상한다. 이때, 한번 보상된 값은 다시 리셋하여 다음 인덕턴스의 변곡점이 검출될때까지 보상값을 0으로 유지하여, 누적 오차에 대한 오동작을 방지한다.

$$\hat{R}_m(k+1) = \hat{R}_m(k) + LPF(k_r \cdot \Delta\hat{\theta}_{min}) \quad (9)$$

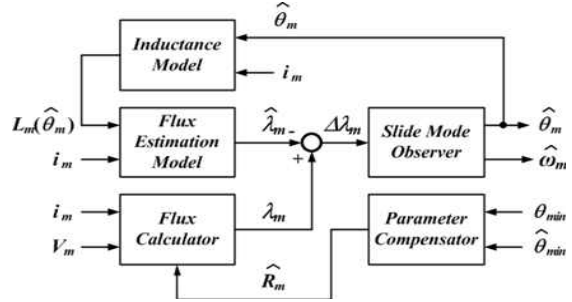
이때, 추정 상권선 저항 $\hat{R}_m(k)$ 는 추정위치 오차를 감소하기 위하여 전압의 오차 및 상권선 저항의 변동을 모두 포함한 값으로 수립된다.

5. 실험결과

제안된 비대칭 2상 SRM의 센서리스 방식을 검증하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험에 적용된 전동기는 2상 8/4 SRM으로 그 특성은 표1과 같다.



(a) Proposed parameter compensator



(b) Sensorless block diagram with parameter compensator

Fig. 9 Block diagram of the proposed sensorless method

Table 1 Specification of prototype SRM

Stator Poles	8	Rotor Poles	4
Bore Diameter	35[mm]	Stator Outer Dia.	124[mm]
Stack Length	45.5[mm]	Air-gap1	0.25[mm]
Stator Pole Arc	22°	Air-gap2	0.45[mm]
Rotor Pole Arc	45°	Coil turn Number	100

그림 10은 실험에 적용된 실험환경을 나타내고 있다. 센서리스 구현을 위한 구동회로는 TMS320F28035로 구성된 디지털 제어기를 사용하였으며, 상전류는 각 상 하단 FET에 연결된 저항으로부터 검출되고, 검출된 전류는 증폭회로와 필터를 통하여 DSP(Digital Signal Process)의 12비트 ADC로 입력된다. ADC는 TMS320F28035에서 지원하는 내부 ADC를 사용하였으며, 직류 링크단 전압과 두 상전류를 검출하여 자속계산을 수행하였다. 센서리스 알고리즘을 구현하기 위한 샘플링 시간은 50[us]로 설계되었고, 20[kHz]의 스위칭 주파수를 사용하였다. 실험에서 추정위치의 정밀도를 비교하기 위하여 2000[ppr]의 엔코더를 적용하여 실제 위치를 모니터링 하였다.

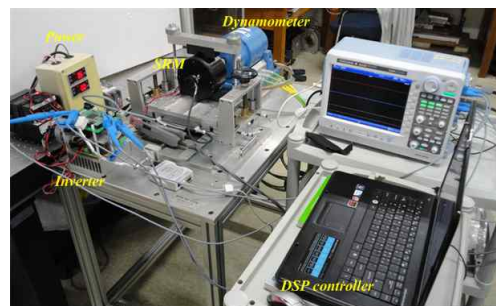


Fig. 10 Experimental configurations

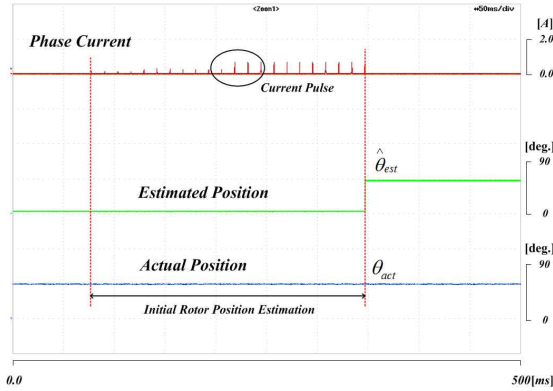


Fig. 11 Experimental result of initial rotor position estimation

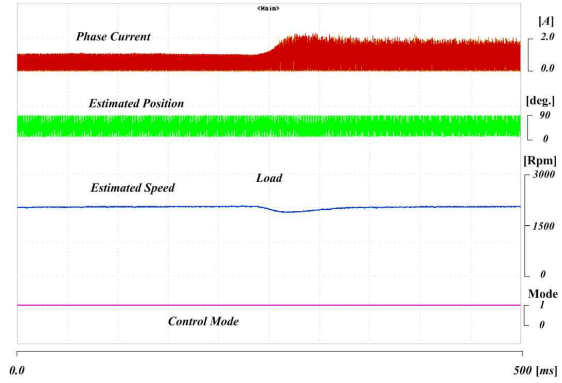


Fig. 13 Experimental result of load variation (2000[rpm])

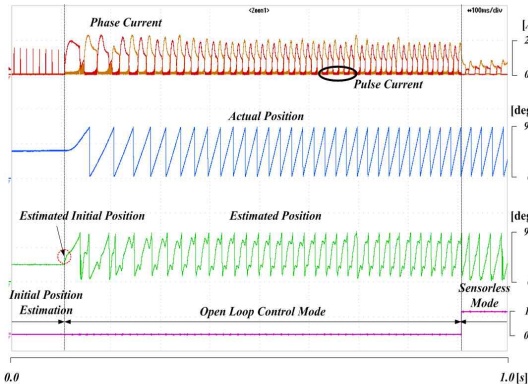
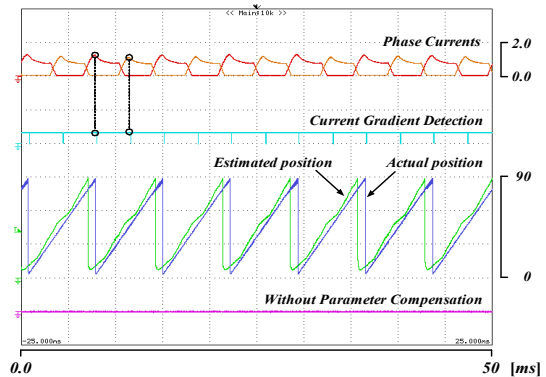


Fig. 12 Experimental result of initial position estimation and self starting (2000[rpm])

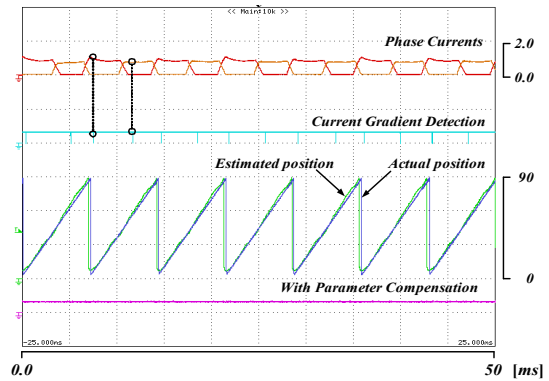
그림 11은 본 논문에서 제안하는 초기각 검출 방식에 대한 실험결과를 나타내었다. 그림 11에서 전압 펄스의 인가에 따른 전류 펄스의 응답이 발생하고 있으며, 이에 따라 제안된 초기 위치 추정 알고리즘에 의해 추정위치가 실제 위치를 추정하는 것을 보이고 있다. 실험에서 실제 회전자 위치는 58[deg]에 위치하고 있으며, 초기 추정위치는 58.2[deg]로 매우 근사하게 초기각을 추정하였다.

그림 12는 본 논문에서 제안하는 초기각 검출 및 초기 기동 실험 결과를 나타내었다. 그림 12에서 지령속도는 2000[rpm]이며, 초기 전압펄스 인가 방식을 이용하여 초기각을 검출 후 비여자상이 여자상이 되는 회전자의 위치를 추정하여 상여자를 교체하는 초기 기동 방식으로 자속관측기법을 적용한 센서리스 속도제어 구간까지 안정적으로 기동되었다. 센서리스 모드에 돌입하는 속도는 800[rpm]으로, 약 0.8초의 오픈루프 기동 후 센서리스 모드로 안정적으로 동작하고 있음을 보인다.

그림 13은 2000[rpm]에서 정격부하 0.1[Nm]를 인가하였을 경우의 센서리스 실험 결과를 나타내고 있다. 그림 13에서 제안된 센서리스 방식은 부하 변동에 대해서도 안정적인 속도 제어가 되고 있음을 보이고 있다.



(a) Without parameter compensation



(b) Proposed scheme

Fig. 14 Experimental result of parameter variation (2000[rpm])

6. 결 론

본 논문에서는 비대칭 인덕턴스 형상을 가진 2상 SRM의 초기각 검출 및 초기 기동방식을 제안하고 전동기의 온도 상승으로 인한 상저항 등의 파라미터 변동에 대해 회전자의 추정위치를 보상하는 파라미터 보상을 가지는 자속관측기법을 적용한 센서리스 제어 방식을 제안하였다.

제안된 초기각 검출 및 초기 기동 방식은 정지 상태에서 전압펄스를 인가하여, 회전자 위치에 따른 인덕턴스

스의 차이로 인한 두 상전류 펄스의 응답으로부터 근사적인 2곳의 회전자 위치를 추정하여 각 위치에서 전류 펄스 응답의 오차로부터 회전자 초기 위치를 검출하는 방식이며, 검출된 초기각 위치 정보를 이용하여 전압펄스 인가 방식을 통해 비여자상이 여자상이 되는 회전자 위치를 검출하여 상여자를 교체함과 동시에 센서리스에 의한 추정각도를 수정함으로써 자속관측기법을 적용한 센서리스 제어구간에 안정적으로 진입하도록 하였다. 또한, 자속관측기법을 적용한 센서리스 제어구간에서는 전압오차 성분을 고려하고, 전동기의 온도 상승으로 인한 상저항 변화등의 파라미터 변동에 대한 자속오차를 보상함으로써, 정지 상태에서 센서리스 제어구간까지 연속적인 회전자 위치와 속도를 추정하였다. 제안된 방식은 실험에서 부하 및 파라미터 변동에 대하여 안정적인 제어가 가능함을 검증하였다.

이 연구는 지식경제부/한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 2009T100100654)과 과학기술부/한국연구재단의 지원(No. 2010-0014172)을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참 고 문 헌

[1] T. H. Kim, J. W. Ahn, S. J. Park, "Inductance Reasoning Method for Sensorless Control of an SRM", *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 8, No. 5, pp. 427-434, 2003

[2] J. H. Oh, J. W. Lee, B. I. Kwon, "A Study of Adaptive Sliding Mode Observer for a Sensorless Drive System of SRM", *Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers B*, Vol. 53B, No. 12, pp. 691-699, 2004.

[3] Y. S. Kim, J. H. Shin, L. Y. Yang, "Adaptive Sliding Mode Observer for the Control of Switched Reluctance Motors without Speed and Position Sensors", *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers B*, Vol. 49B, No. 11, pp. 763-770, 2000.

[4] H. J. Lee, K. D. Kim, J. H. Ahn, J. D. Choi, S. J. Seong, "Error Analysis of a Sensorless Position Estimation Considering Noise for Switched Reluctance Motor", *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 6, No. 1, pp. 74-81, 2001.

[5] Kai Xin, Qionghua Zhan, Zhiyuan Ma, Shuanghong Wang, Jianbo Sun, "Sensorless Position Estimation of Switched Reluctance Motors Based on Gradient of Phase Current," *IEEE International conference on Industrial Technology 2006*, pp. 2509-2513, 2006.

[6] Y. C. Kim, C. Y. Won, Y. H. Yoon, "Sensorless Driving System of Switched Reluctance Motor using Impressed Voltage Pulse", *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 10, No. 4, pp. 388-396, 2005.

[7] Mohammad S. Islam, Iqbal Husain, Robert J. Veillette, Celal Batur, "Design and Performance analysis of Sliding-Mode Observers for Sensorless Operation of Switched Reluctance Motors," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 11, No. 3, pp. 383-389, May 2003.

[8] Ahmed Khalil, Iqbal Husain, Syed A. Hossain, Suresh Gopalakrishnan, Avoki M. Omekanda, Bruno Lequesne, Harald Klode, "A Hybrid Sensorless SRM Drive With Eight-and Six-Switch Converter Topologies," *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. 31, No. 6, pp. 1647-1655, 2005.

[9] Y. C. Lim, H. Y. Yang, D. S. Shin, "The Rotor Position Estimation Techniques of an SRM with Built-in Search Coils at Standstill", *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 10, No. 1, pp. 45-51, 2005.

[10] C. H. Yu, T. C. Chen, "Novel sensorless driving method of SRM with external rotor using impressed voltage pulse," *IEEE Proc.-Electr. Power Applications*, Vol. 153, No. 5, pp. 632-641, 2006.

임근민(林根顯)



1985년 9월 28일생. 2010년 경성대 메카트로닉스공학과 졸업. 2012년 동 대학원 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 2012년~현재 (주)윌로펌프 연구원

안진우(安珍雨)



1958년 5월 26일생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1992년~현재 경성대 메카트로닉스공학과 교수. 2008년 7월~현재 지식경제부지정 고령친화이자리이프RIS사업단장. 한국지역특화산업협회장, Editor-in-Chief, JICEMS.

이동희(李東熙)



1970년 11월 11일생. 1996년 부산대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2002년~2005년 OTIS-LG 선임연구원. 2005년~현재 경성대 메카트로닉스공학과 부교수. 2012년~현재 University of Wisconsin 방문교수. 당 학회 편집위원. JPE Associate Editor.