

인덕턴스 추론기법에 의한 SRM의 센서리스 제어

문 재원, 박 성준, 안 진우, 김 철우, 황영문  
 대양전기연구소, \* 동명대, \*\*경성대, \*\*\*부산대

Sensorless Control of SRM using Inductance Estimation Thechnique

J.W Moon, S.J. Park, J.W. Ahn, C.U. Kim, Y.M. Hwang  
 Daeyang Electric Co., \*Tongmyong C., \*\*Kyungung U., \*\*\*P.N.U

**Abstract** - This paper describes a new methods of detecting rotor position in SRM(switched reluctance motor). The Conventional method of position sensorless control for SRM is measuring phase current and pulse voltage applied in unexcited phase. The estimation of rotor position based on the detection of inductance by pulse current. Implementation is via low-cost electronic circuits with DSP320F241. Test results show that this technique is a possible approach to detect the rotor position of an SRM.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 구조가 간단하고 저렴하며, 직류 직권 전동기의 속도-토크 특성을 가지고 있어, 선진국을 중심으로 가전기기, 전기자동차, 항공기 및 산업전반에 걸쳐 그 응용영역을 확대해가고 있다.<sup>[1][2]</sup>

SRM은 릴럭턴스 토오크를 극대화하기 위해 회전자와 고정자가 모두 돌극형의 구조를 가지며 권선은 고정자에 만 집중권으로 감겨 있어 전자계 구조상 단속적인 여자 전원이 각 상 권선에 순차적으로 인가되어 구동되므로 낮은 스위칭 주파수로 운전이 가능하여 고속 운전이 가능한 장점을 갖고있다. 회전자 위치각의 검출은 일반적으로 엔코더나 레졸버를 사용하나, 이러한 기계적인 외부 위치센서는 분해능이 높을수록 단가가 상승하게 된다. 따라서 설치비용에 대한 부담을 줄이기 위해서 저가형 엔코더를 사용하거나 이를 완전히 제거하기 위한 센서리스 구동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[3][4]</sup>

따라서 본 연구에서는 토크를 발생하지 않고 있는 상에 펄스 전압을 인가하고 이 때 발생하는 전류로부터 SRM의 상 인덕턴스를 측정하여 회전자의 위치를 검출하는 방법을 제안하였다. 제안된 회전자 위치 검출방식은 정지 및 기동시에도 회전자의 위치를 검출할 수 있어 기존의 기동에 대한 문제를 해결하였다. 따라서 온오프 각 제어에 의한 광범위한 속도영역에서 안정된 속도제어가 가능할 뿐만 아니라, 기존의 엔코더를 제거함으로써 SRM의 실용화 가능성을 높였으며, 실험을 통해 입증되었다.

2. 인덕턴스에 의한 회전자 위치검출

SRM은 전자계 구조상 단속적인 여자 전원이 각 상

권선에 순차적으로 인가되어 구동되므로 항상 토크발생을 위한 상전류가 도통하지 않는 상이 존재하게 된다. 따라서 SRM에서 상전류 도통이 하지 않는 상으로부터 인덕턴스를 측정할 수 가 있다. 상전류 도통이 하지 않는 상에 전압을 인가하고 전류를 검출하여 상 인덕턴스를 측정할 수 가 있어나, SRM이 운전 중에는 역기전력을 무시할 수 가 없으며, 저항에 의한 전압강하도 무시할 수가 없다. 특히 인덕턴스 검출을 위한 상전류가 토크 맥동을 유발해서는 안된다. 이러한 제한 조건을 만족하기 위해서는 인덕턴스 측정을 위한 전류가 매우 적어야한다. 이를 위해 폭이 매우 좁은 펄스전압을 인가하고 그때의 상전류를 검출하게 되면 매우 적은 전류에 의해 저항의 전압강하 및 역기전력 성분은 무시될 수 있으며 단순히 인덕턴스로 보아도 무방하다. 따라서 SRM에서 상전류가 매우 적다면 전압방정식은 식(1)과 같이 간단히 표현된다.

$$V_s = L(\theta) \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

식(1)을 전기적인 등가회로로 표현하면 그림 1과 같이 된다.

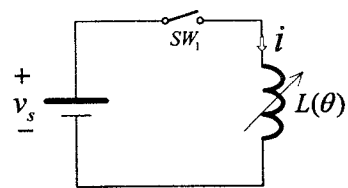


그림 1 전류레벨이 낮은 경우의 SRM 등가회로

그림 1에서 보는 바와 같이 SRM의 상 인덕턴스는 위치의 함수만으로 간단히 표현되어진다.

그림 1과 같은 회로에서 인덕턴스를 검출하기 위해서는 \$SW\_1\$을 온하고 일정시간 후 이때 흐르는 전류를 검출하여 계산하면 된다. 이때 인덕턴스 검출용 전류는 전동기 구동에 영향을 미치지 않을 적은 전류로 되는 시간으로 설정하여야 한다. 그림 2는 인덕턴스 계산을 위해 SRM의 상 전압을 인가할 경우의 상전류 파형이다. 이때 상 스위치가 오프될시 전류해를 구하면 식(1)으로부터 아래와 같이 주어진다.

$$di(t) = \frac{V_s}{L(\theta)} dt \quad (2)$$

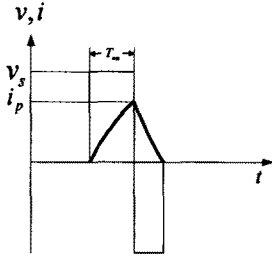


그림 2 펄스전압 인가시 상전압 및 상전류 파형

식(2)식으로부터 그림 2와 같이 스위치 온 시간이 주어질 때 스위치가 오프되는 시점인 피크전류를 구하면 다음과 같다.

$$i_p = \frac{V_s}{L(\theta)} T_{on} \quad (3)$$

식(3)에서 구한 피크전류로부터 인덕턴스를 구하면 아래와 같다.

$$L(\theta) = \frac{1}{i_p} V_s T_{on} \quad (4)$$

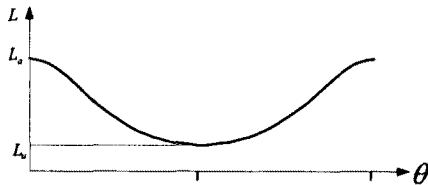
식(4)에서 인가전압과 스위치 온 시간은 설정치로 정해지면 상수로 취급할 수 있다. 따라서 식(4)는 아래 식과 같이 간단히 표현된다.

$$L(\theta) = K_1 \frac{1}{i_p} \quad (5)$$

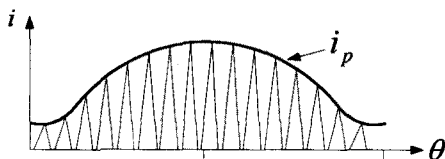
단,  $K_1 = V_s T_{on}$

상전류 도통이 하지 않는 상에 인덕턴스 검출용 전류만 검출된다면 식(5)로부터 간단히 회전자 위치를 추정할 수 있다.

그림 3은 회전자의 전기적 위치각에 따른 비포화 인덕턴스 프로파일과 인덕턴스 검출용 전류 파형을 나타내고 있다.



(a) Inductance profile of one phase according to electric rotor angle



(b) Pick currents according to electric rotor angle

그림 3 인덕턴스 프로파일 및 인덕턴스 검출용 전류

그림 3(a)에서 보는바와 같이 회전자 위치각에 대한 인덕턴스가 전단사함수가 되지 않으므로 인덕턴스를 계측한다 하더라도 이를 만족하는 회전자 위치각은 2개가 존재하게 된다. 이 2개의 회전자 위치각에서 현재 회전자 위치각과 일치하는 유일 해를 구하는 방법에는 크게 두 가지 방법으로 접근 할 수 있다. 그 첫째는 다른 상의 인덕턴스를 계측하여 그 해와 같은 한 해를 구하는 방법이다. 이 방법은 회전자의 위치각을 추정하는 확실한 방법으로 초기 기동시 회전자의 위치각 판별에 상용하면 그 효과를 극대화 할 수 있다. 그러나 이 방법을 사용하기 위해서는 상전류 도통이 하지 않는 상이 최소한 2개가 존재하여야 하는 조건으로 인하여 상이 많은 4상 이상에서 문제가 되지 않으나 3상 이하에서는 SRM이 운전중에 상전류 도통이 하지 않는 2개의 상이 항상 존재하는 것은 아니다. 이 경우에는 한 상의 인덕턴스 값으로만 회전자 위치각을 구하기는 어려운 실정이다.

회전자 위치각을 추정하는 2번째 방법으로는 이전의 상스위치 정보와 인덕턴스프로 파일을 갖고 유일 해를 찾는 것이다. 이는 SRM의 전자계 구조상 단속적인 여자 전원이 각 상 권선에 순차적으로 인가되어 구동하는 방식이므로 이전의 상스위치 상태를 참고하면 원하는 회전자 위치각을 선택할 수 있다.

본 논문에서는 최기회전자 위치각은 3상의 인덕턴스에 의해서 결정하고, 운전시는 상스위치 정보와 한 상의 인덕턴스 프로파일에 의해서 회전자의 위치 검출방식으로 행하였다.

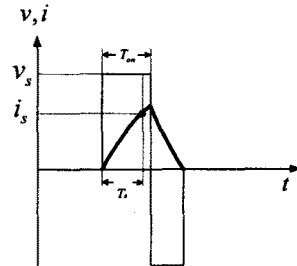


그림 4 정확한 전류검출을 위한 전류검출 시점

인덕턴스를 계측하기 위해 상 스위치 오프와 동시에 상전류를 검출하면 스위칭 노이즈에 의해 정확한 전류를 검출하기는 어렵다. 따라서 이러한 노이즈를 방지하기 위해서는 상 스위치를 오프하기 이전에 인덕턴스 전류값을 샘플링하고 상 스위치를 오프하는 방식으로 전류를 검출한다. 따라서 L을 계산하기 위한 식(5)에서 Ton은 상스위치를 온한 순간에서부터 샘플링 홀더가 동작한 시간으로 대치하면 간단히 해결된다. 이와 같은 과정을 그림 4에 도식적으로 표현하였다.

### 3. 실험 결과

SRM의 설계를 위한 치수의 선정을 위해서는 몇 가지 설계방식 및 과정을 채택할 수 있으나 본 논문에서는 대략적 치수설계는 전통적인 전동기 설계과정을 준용함으로써 기존의 직류, 교류전동기 등의 설계방식을 이해하는 설계자에게 쉽게 접근되도록 하였다. 다만 설계변

수의 조정에 따른 전동기 특성상정이나 치수조정에 따른 영향 등을 검토하기 위해 SRM의 설계보조를 위한 소프트웨어인 PC-SRD를 이용하여 설계의 정확성을 높이고 오차를 줄이는 방식으로 진행한다. 그림 5는 전체 제어기의 구성을 보여주고 있다.

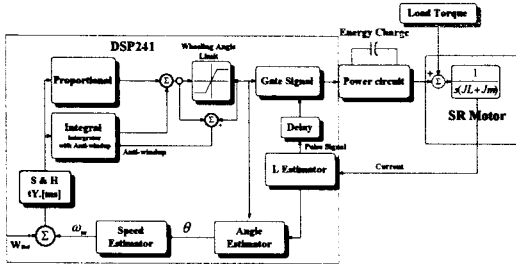


그림 5 전체 제어기의 구성

그림 6은 인덕턴스를 계산하기 위한 펄스 전압과 전류 값을 고찰하기 위한 실험 파형이다. 인덕턴스 검출을 위한 상에 인가되는 펄스 전압의 폭은  $100[\mu\text{s}]$ 이며, 그림 (a)는 최대 인덕턴스 시점에서 펄스형 상 전압과 전류를 나타내고 있으며, 그림 (b)는 최소 인덕턴스 시점에서 펄스형 상 전압과 전류를 나타내고 있다. 회전자가 회전함에 따라 전류의 피크치는 그림 (a)에서 그림 (b) 사이의 값으로 변하게 되며 이 전류값을 검출하면 인덕턴스를 구할 수 있다.

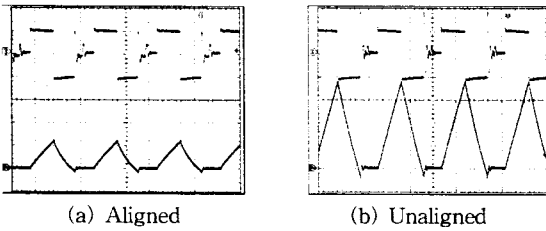


그림 6 펄스 전압 및 응답 전류

그림 7는 SRM에서 연속적인 펄스 전압을 인가 한 상태에서 인덕턴스 측정용 A상 전류와 이를 근거로 계산된 A상 및 B상 인덕턴스를 표시하고 있다. 파형에서 알 수 있는 바와 같이 전기각 360도에 대한 인덕턴스는 양호하게 나타남을 알 수 있다.

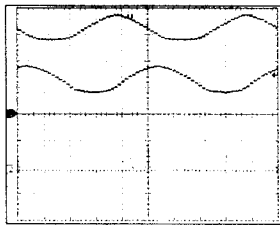
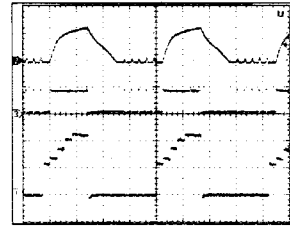
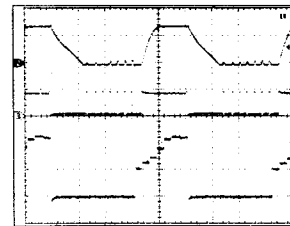


그림 7 회전자 위치에 따른 펄스 전류 계산된 A, B 상 인덕턴스

그림 8은 SRM을 센스리스 모드로 구동한 상태에서 인덕턴스 측정용 C상 전류, A상 스위칭 신호 및 A상 전류를 나타내고 있다. A상 신호는 C상의 인덕턴스 계산을 위한 전류값에 의해 결정되므로 C상의 인덕턴스 계산을 위한 전류값이 일정값 이상이 되면 A상 상스위치를 온하게 된다.



(a) narrow dwell angle



(b) wide dwell angle

그림 8 인덕턴스 측정을 위한 C상 전류, A상 신호 및 A상 전류

#### 4. 결론

본 연구에서는 토크를 발생하지 않고 있는 상에 펄스 전압을 인가하고 이 때 발생하는 전류로부터 SRM의 상 인덕턴스를 측정하여 회전자의 위치를 검출하는 방법을 제안하였다. 제안한 인덕턴스 프로파일을 기초로 한 회전자 위치 센스리스제어를 행한 결과 정지시의 회전자 위치의 추정 가능성이 뿐만 아니라 운전시에도 회전자 위치를 양호하게 추정함을 알 수 있었다.

#### (참고문헌)

- [1] P.J.Lawrenson, J.M.Stephenson, P.T.Blenkinsop, J.Corda and N.N.Fulton, "Variable-speed switched reluctance motors," Proc. IEE, Vol.127, Pt-B, No.4, pp.253-265, 1980.
- [2] Hassan Moghbelli, Gayle E.Adams and Richard G.Hoft, "Performance of 10-Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors," IEEE Trans. on IA, Vol.27, No.3, pp.531-538, 1991.
- [3] M.Ehsani, I.Husain, S.Mahajan, and K.R.Ramani, "New Modulation Encoding Techniques for Indirect Rotor Position Sensing in Switched Reluctance", IEEE Trans. on IA, Vol.30, No.1, pp.85-91, 1994.
- [4] M.Ehsani, and K.R.Ramani, "Direct Control Strategies Based on Sensing Inductance in Switched Reluctance Motors", IEEE Trans. on PE, Vol.11, No.1, pp.74-82, 1996.