

간단한 상전류 검출기법에 의한 센서리스 SRM 운전

김태형, 이동희, 안영주\*, 안진우  
경성대, \*부경대

Sensorless SRM Drive using a Simple Phase Current Detection

Tae-Hyoung Kim, Dong-Hee Lee, Young-Ju An\*  
Kyungsoong Univ. \*Pukyong National Univ.

**Abstract** - This paper describes a novel sensorless excitation position detecting method of Switched Reluctance Motor(SRM) drive. A suitable excitation pattern of each phases is determined by comparison of detecting current without an inductance estimation. The principle of the rotor position estimation is based on the detection of phase current according to rotor position. This sensorless method is very simple and gives efficient control of drive system. The suggested method is verified by experiments.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)은 이중 돌극형 구조의 전동기구조, 회전자의 위치에 따라 각 상을 여자하여 발생하는 릴럭턴스 토크를 이용한다. 따라서 회전자의 위치검출은 운전에 필수적인 요소이나 검출을 위한 엔코더, 레졸버등의 위치센서는 구동시스템의 단가를 상승시키는 요인으로 작용한다. 이에 최근 위치센서를 제거하여 경제성과 신뢰성을 향상시키기 위한 센서리스 구동기법에 대해 다양한 연구가 이루어지고 있다.[1][2][3]

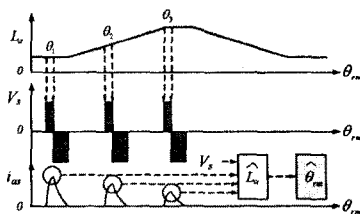
본 논문에서는 이웃하지 않는 상에 극히 짧은 시간의 펄스 전압을 인가하고 그에 따른 상전류의 변화를 검출하여 여자시기를 검출하는 방법을 제안하였다. 제안된 상의 여자시기 검출방식은 정지 및 기동시 별도의 회전자 위치 검출의 연산 없이도 상여자 위치를 결정할 수 있으므로 기존의 기동에 대한 문제를 해결하였다. 제안된 기법 대한 실험을 통하여 가능성을 살펴 보았다.

2. 검출전류에 따른 회전자 위치의 검출

본 논문에서는 SRM의 구동시 여자 할 상과 여자 위치의 결정을 위하여 비교적 간단한 센서리스기법을 제안한다. 제안되어진 기법은 회전자 위치에 따른 인덕턴스 특성을 기초로 한다. 여자 되지 않은 상권선 저항에 인가되어진 펄스형 시험전압을 인가하였을 경우, 회전자의 위치에 따른 인덕턴스에 따라 그 최대치가 다르게 발생된다. 이러한 이유로 SRM의 회전자 위치는 기타 위치 센서를 사용하지 않고 각상에서 검출전류의 최대치를 통해 추정할 수 있다.

2.1 전류를 이용한 일반적인 위치검출기법

상 인덕턴스의 추정에 대한 전압방정식은 역기전력과 상권선의 저항에 의한 전압강하를 무시함으로써 아래와 식(1)와 같이 표현될 수 있다. 식(1)에서 위치에 따른 인덕턴스의 크기를 구하면 식(2)과 같이 표현될 수 있다. 따라서 그림 1과 같이 인덕턴스의 추정에 의한 위치 연산은 인덕턴스의 비선형적인 특성과 상저항의 전압강하에 의한 오차를 포함하고 있다.



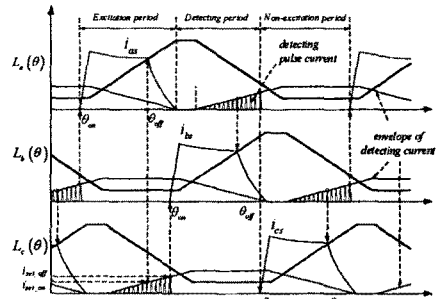
<그림 1> 검출전압의 파형과 상전류에 대한 인덕턴스의 추정

$$V_s = L(\theta_m) \cdot \frac{di}{dt} \tag{1}$$

$$\hat{L}(\theta_m) = V_s \cdot \frac{dt}{di} \tag{2}$$

2.2 제안된 여자위치 검출기법

그림 2는 본 논문에서 제안된 기법을 3상 SRM에 적용하여 여자 위치의 결정 알고리즘을 나타내고 있으며 제안된 기법은 각상마다 여자, 검출, 비여자 구간으로 구성된다.



<그림 2> 제안된 센서리스 여자방식

검출 구간에서는 펄스형 시험전압에 의해 발생되어 전류센서에 의해 상전류를 검출한다. 검출된 상전류는 증폭기에 의해 증폭되며 포락선 검출기를 통해 최대치를 검출함으로써 비교를 통해 여자위치를 선정한다. 검출구간에서 검출전류의 최대치 추이는 상 인덕턴스의 비포화 영역에서 이루어 지므로 거의 선형적인 기울기를 가진다. 그리고 각 상들의 턴-온, 턴-오프 위치는 그림 3과 같이 검출전류의 변화 추이와 비교하여 결정되어진다.

검출에 이용되는 펄스형태의 시험전압은 인가되는 폭이 매우 짧으므로 이에 대한 검출전류는 매우 작다. 따라서 각 상에서 인덕턴스의 포화는 무시될 수 있으며, 검출전류의 기울기는 각상에서 회전자 위치에 따라 선형적으로 변화하게 된다.

각 상의  $\theta_{on}$ ,  $\theta_{off}$ 와  $i_{ps,max}$ ,  $i_{ps,off}$ 는 펄스형 시험 전압  $V_s$ 와 각 위치에서 상 인덕턴스에 의해 결정된다. 설정된 턴-온과 턴오프 위치는 펄스형 시험 전압에 따른 전류정보  $i_{ps,max}$ ,  $i_{ps,off}$ 의 형태로 저장된다.

그러나 여자 되지 않은 상에서 존재하는 검출구간은 그림 3과 같이 부토크 구간에서 존재한다. 따라서 검출 전류에 의해 부토크는 안정된 운전을 위해 제한되어야 한다.

검출전류로부터 발생되어진 부토크의 제한을 위하여, 본 논문에서는 펄스형 검출 전압의 주기를 조절하였다. 식(1)로부터, 검출전류의 최대치  $i_{ps,max}$ 는 최소 인덕턴스 구간에서 생성되어지며 아래의 식으로 구해질 수 있다.

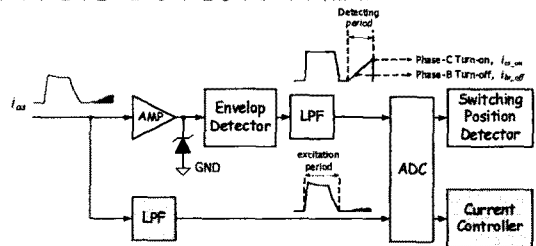
$$i_{ps,max} = \frac{V_s}{L_{min}} \times \Delta t \tag{3}$$

SRM의 토크 방정식에서  $i = i_{ps,max}$ 로 치환하면, 펄스형 시험전압의 최대 샘플링 주기는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\Delta t_{max} = \frac{L_{min}}{V_s} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot T_{NEMT} \cdot (\theta_{max} - \theta_{min})}{L_{max} - L_{min}}} \tag{4}$$

여기서,  $\theta_{max}$ 와  $\theta_{min}$ 는 최대인덕턴스  $L_{max}$ 와 최소 인덕턴스  $L_{min}$ 의 회전자 위치이다.

본 논문에서 부토크 제한치  $T_{NEMT}$ 은 SRM의 정격토크의 2%로 제한하였으며, 이에 따라 펄스형 시험전압의 최대 주기는 20[us]와 같이 제한되었다. 제한된 주기동안 토크는 단자전압  $V_s$ 와 검출샘플링 주기의 증가는 검출 샘플링 주기의 진폭변조를 통해 일정하게 제어하였다.

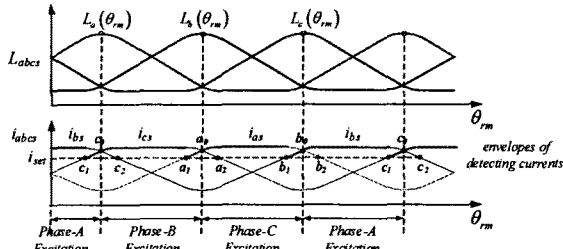


<그림 3> 스위칭 위치 결정과 전류제어를 위한 전류정보

펄스형 시험전압에 의해 발생된 검출전류는 그 크기가 매우 작기 때문

에 이를 이용한 스위칭 턴-온, 턴-오프각의 결정에서 해상도는 감소하게 된다. 따라서 높은 정밀도의 스위칭정보를 얻어내기 검출된 상전류는 그림4와 같이 증폭기에 의해 증폭된다. 증폭된 상전류는 최대치 검출기를 통해 각 검출전류의 최대치에 대한 포락선을 검출하여 저역통과필터를 통과시킨 전류정보로 변환되어 사용한다. 그림 3과 같이 스위칭 위치 결정은 상전류를 증폭하여 검출한 포락과 다음상의 턴-온, 턴-오프위치에 관한 기준전압을 비교한다. 증폭기 후단의 제너나이오드는 ADC 범위내로 전류정보를 제한한다.

### 2.3 스위칭 패턴의 결정



〈그림 4〉 정지된 회전자 위치에 따른 검출전류

정지 상태에서 SRM의 초기 스위칭의 대상은 그림4에서 표기된 구간에 따라 표1과 같이 결정되어진다. 그림 4는 정지 상태에서 각 상전류와 각 가능한 영역의 관계를 보여준다. SRM의 초기지점은 회전방향에 따른 iset의 설정지점으로 선택되어진다. 표 1은 회전방향에 따른 SRM의 초기 여자상을 나타낸다.

〈표 1〉 검출전류 크기에 따른 기동시 여자상

| No | Rotating direction | Boundary conditions                                  | Excitation phase |
|----|--------------------|--|------------------|
| 1  | CCW                | $b_1 (i_{bs} > i_{set}) \sim c_1 (i_{cs} > i_{set})$ | Ph. A            |
| 2  |                    | $c_1 (i_{cs} > i_{set}) \sim a_1 (i_{as} > i_{set})$ | Ph. B            |
| 3  |                    | $a_1 (i_{as} > i_{set}) \sim b_1 (i_{bs} > i_{set})$ | Ph. C            |
| 4  | CW                 | $c_2 (i_{cs} > i_{set}) \sim b_2 (i_{bs} > i_{set})$ | Ph. A            |
| 5  |                    | $b_2 (i_{bs} > i_{set}) \sim a_2 (i_{as} > i_{set})$ | Ph. B            |
| 6  |                    | $a_2 (i_{as} > i_{set}) \sim c_2 (i_{cs} > i_{set})$ | Ph. C            |

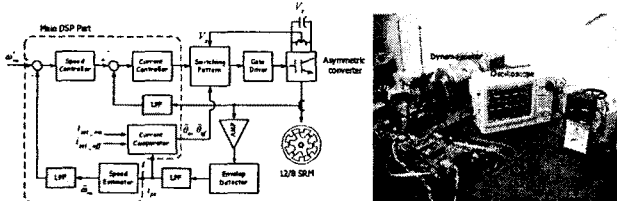
### 3. 실험 및 결과

제안되어진 센서리스 기법의 증명을 위해 송풍기용 12/8 SRM을 대상으로 실험을 수행하였다. 표 2는 시험에 이용된 12/8전동기의 규격을 나타내고 있다.

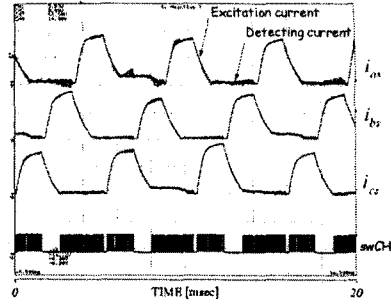
그림 5는 제안된 센서리스 기법의 실험을 위하여 제작된 제어기의 블록 다이어그램과 시험장비의 구성을 나타내고 있다. 제어기는 TI사의 TMS320LF2812로 구성하였으며, 전력변환기는 SEMIKRON사의 비대칭 컨버터 SK25GAD063T를 이용하여 비대칭 컨버터를 구성하였다. 속도제어기는 일반적인 PI제어기를 이용하였다.

〈표 2〉 시험된 12/8 SRM의 규격

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| Diameter of stator outer     | 132 [mm]   |
| Diameter of rotor inner      | 74 [mm]    |
| Length of core               | 28.7 [mm]  |
| Length of air gap            | 0.250 [mm] |
| Stator pole arc              | 18 [deg.]  |
| Rotor pole arc               | 14 [deg.]  |
| Winding resistance per phase | 0.536 [Ω]  |
| Number of turns per phase    | 160 [Turn] |



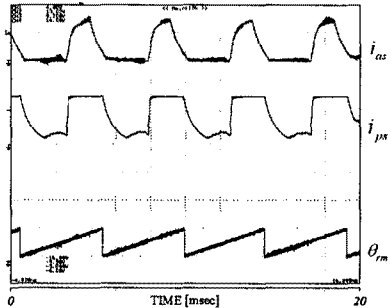
〈그림 5〉 제안된 센서리스 속도제어 블록과 실험장치



〈그림 6〉 각상의 상전류와 C상의 게이트 신호

그림 6은 상전류와 C의 게이트 신호를 나타낸다. 상전류는 여자 전류와 검출전류로 구분된다. 여자전류는 SRM의 지령토크를 생성시키고 검출전류의 펄스 형상은 회전자 위치추정과 다른 상의 상여자 순서를 결정하는데 사용되어진다. 스위칭 패턴 발생기에 의한 신호는 여자구간에서 전류제어 신호를 생성하고 검출구간에서 펄스형 시험전압을 생성한다. 또한 비여자구간에서 입력되지 않는다.

그림 8은 상전류와 증폭되어진 회전자위치에 따른 상전류의 최대 포락선을 나타낸다. 이 상태에서 상전류는 12bit ADC를 통해 전류제어기에 이용되어진다.



〈그림 7〉 회전자위치에 따른 상전류와 포락선

### 4. 결 론

본 논문에서는 SRM의 저가격화 및 제어기 구조의 단순화를 위하여 상전류의 발생패턴을 고려하고, 이를 통하여 이웃하지 않는 상에 검출전류를 극부적으로 인가하여 단순한 비교를 통한 센서리스 제어기법을 제안하였다. 제안된 기법의 효율성을 검증하기 위하여 수치해석모형을 통해 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 제안된 상전류 발생패턴에 따른 단순한 상전류 비교를 통하여 상전압의 인가시기를 결정할 수 있었으며 이에 따라 시스템의 적용이 가능함을 검증할 수 있었다.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력연구원 (과제번호 : R2005-B-109) 주관으로 수행된 과제임.

### 〈참 고 문 헌〉

- [1] 안진우, "스위치드 릴럭턴스 전동기", 오성미디어, pp. 364~418, 2004
- [2] P. J. Lawrenson. "A Brief Status Review of Switched Reluctance Drives", EPE Vol. 2, No. 3, pp. 133-144, 1992.
- [3] M. Ehsani, I. Husain, A. B. Kulkarni, "Elimination of Discrete Position Sensor and Current Sensor in Switched Reluctance Motor Drives", IEEE Trans on IA, Vol.28, pp.128-135, 1992
- [4] 안진우, 박성준, 김태형, "SRM의 센서리스 제어를 위한 인덕턴스 추론 기법", 전력전자학회 논문집 제 8권 5호, pp.427~434, 2003.10
- [5] Ji Lili, Chen Hao, "Nonlinear Modeling and Simulation of Switch Reluctance Motor Drive System based on Matlab" Journal of Southeast University, Nov. 2004 pp.149-154 Vol.34 Sup.