

전압펄스 주입방식을 이용한 SRM 센서리스 제어

尹溶湖^{*}, 金淵忠^{**}, 元忠淵[†]

Sensorless Driving System of Switched Reluctance Motor Using Impressed Voltage Pulse

Yong-Ho Yoon, Yuen-Chung Kim, and Chung-Yuen Won

요 약

SRM은 각종 산업분야에서 토크 리플과 소음 진동, 낮은 역률로 인하여 실제 적용에는 어려움이 있고 구동을 하기 위해서는 회전자위치 정보를 위한 센서가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 전압펄스 주입방식을 이용한 센서리스 방식을 제안하였다. 기존 전압펄스 주입방식의 문제점인 위상지연 문제와 기존 센서리스 방식의 어려움이라 할 수 있는 초기구동 문제를 제안하였다. 또한 고성능 마이크로프로세서를 사용한 복잡한 연산과정 없이 단순한 범용 아날로그 소자만으로도 간단히 센서리스 방식을 구현하였다.

ABSTRACT

SRM has not been put into practical applications widely because of its large torque ripple, acoustic noise and low power factor. In addition, a traditional position sensor is needed for the drive control. So we propose an improved sensorless drive method of Switched Reluctance Motors using impressed voltage pulses. Conventional impressed voltage pulse method has a problem of phase delay because of low-pass filter. So in this paper we propose an improved sensorless driving method based on the impressed voltage pulse using new phase-shift circuit technique that overcomes the phase delay and start-up problem. Proposed method is implemented in a simple analog circuit instead of using an expensive DSP.

Key Words : Switched Reluctance motor, Sensorless control, Impressed voltage pulses, Phase-shift circuit

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 회전자의 위치에 따라 상권선의 여자시점이 결정되므로 회전자의 정확한 위치정보가 요구된다. 이러한 위치검출을 위해서는 고가의 엔코더 및 레졸버 등이 일반적으로 이용되지만 진동, EMI, 고온, 먼지 등의 열악한 환경에서는

성능이 저하되어 신뢰성이 떨어지는 문제점이 있다. 또한 정확한 위치검출을 위해 고가의 위치센서를 적용할 경우 전동기의 부피를 증가시키고 고가의 위치센서로 인해 단가를 상승시키기 때문에 센서리스 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서 본 논문에서는 전압펄스 주입방식을 이용한 센서리스 방식을 제안하였다. 각 상의 여자되지 않은 구간에 토크를 유발하지 않을 정도의 낮은 듀티를 갖는 고주파 전압펄스를 주입함으로써 각 상의 인덕턴스 프로파일을 추정할 수 있다^[1]. 그 결과로 SRM의 정토크 영역인 인덕턴스 상승 구간에 전류를 흘려줌으로서 센서리스 운전이 가능하도록 하였다. 또한, 기존 전압펄스 주입방식의 문제점인 위상지연 문제와 센서리스

[†] 교신저자 : 정회원, 성균관대 정보통신공학부 교수

E-mail : won@yurim.skku.ac.kr

^{*} 정회원, 성균관대 메카트로닉스공학과 박사과정

^{**} 정회원, (주)팩테크 기술연구소 소장

접수일자 : 2005. 3. 2 1차 심사 : 2005. 4. 21

2차 심사 : 2005. 6. 29 심사완료 : 2005. 7. 12

방식의 어려움이라 할 수 있는 초기구동 문제를 해결하였다.

2. 전압펄스 주입방식을 이용한 센서리스 제어방식

2.1 인덕턴스 프로파일과 피크전류와의 관계

SRM은 전자계 구조상 단속적인 여자 전원이 각 상 권선에 순차적으로 인가되어 구동되므로 항상 토크발생을 위한 상전류가 도통하지 않는 상이 존재하게 된다. 따라서 상전류가 흐르지 않는 상으로부터 인덕턴스를 측정할 수 있다.

상전류가 흐르지 않는 상에 전압을 인가하고 전류를 검출하여 상 인덕턴스를 측정할 수 있으나, SRM이 운전 중에는 역기전력을 무시할 수 없으며, 저항에 의한 전압강하도 무시할 수가 없다. 특히 인덕턴스 검출을 위한 상전류가 토크맥동을 유발해서는 안 되는데 이러한 제한 조건을 만족하기 위해서는 인덕턴스 측정을 위한 전류가 매우 작아야한다. 이를 위해 폭이 매우 좁은 펄스전압을 인가하고 그때의 상전류를 검출하게 되면 매우 작은 전류에 의해 발생하는 전압강하 및 역기전력 성분은 무시될 수 있으며 단순히 인덕턴스로 보아도 무방하다^[2]. 따라서 SRM에서 상전류가 매우 작다면 식 (1)의 전압방정식은 식 (2)와 같이 간단히 표현된다.

식 (2)의 전기적인 등가회로는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 그림 1의 회로에서 인덕턴스를 검출하기 위해서는 상 스위치를 온하고 일정시간 후 이 때 흐르는 전류를 검출하여 계산할 수 있다.

$$V_s = Ri(t) + i(t) \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega + L(\theta) \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

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

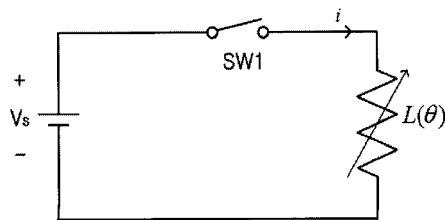


그림 1 작은 전류가 흐를 때 SRM의 상 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of SRM with low current

그림 2는 인덕턴스 계산을 위해 SRM의 전압을 인가할 경우의 상전류 파형이다. 이 때 상 스위치가 오프될 때 전류의 해를 구하면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

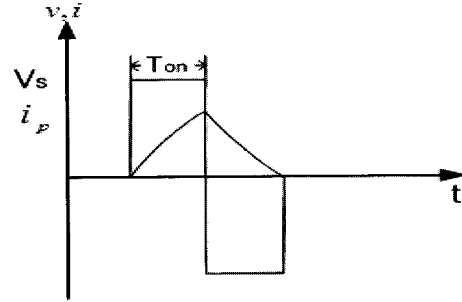


그림 2 펄스전압 인가시 상전압 및 상전류 파형
Fig. 2 Phase voltage and current when pulse voltage impressed

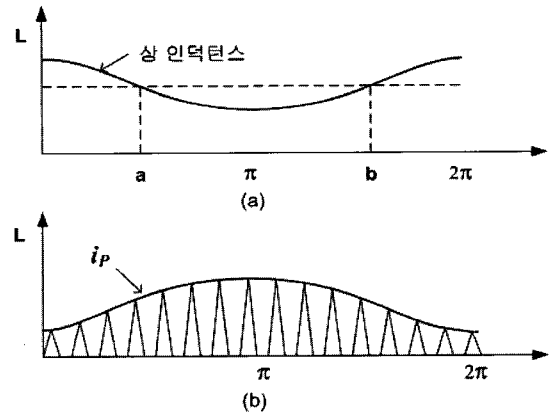


그림 3 인덕턴스 프로파일 및 인덕턴스 검출 전류
Fig. 3 Inductance profile and current

$$di(t) = \frac{V_s}{L(\theta)} dt \quad (3)$$

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

$$L(\theta) = \frac{1}{i_p} V_s T_{on} \quad (5)$$

$$L(\theta) = K_1 \frac{1}{i_p} \quad (6)$$

단, $K_1 = V_s T_{on}$

그리고 식 (3)으로부터 그림 2와 같이 스위치 온 시간이 주어질 때, 스위치가 오프되는 시점인 피크전류를 식 (4)에서 구할 수 있고 이 피크전류로부터 인덕턴스를 식 (5)에 의해서 얻을 수 있다.

식 (5)에서 인가전압과 스위치 온 시간은 정해진 상수 값이기 때문에 최종적으로 식 (6)과 같은 인덕턴스 함수식을 얻을 수 있다. 상전류가 흐르지 않는 상의 인덕턴스 프로파일을 검출하기 위해서 전류값을 정확히 알고 있다면 식 (6)으로부터 간단히 SRM의 상 인덕턴스가 계산되고, 이를 이용하여 회전자의 위치를 추정할 수 있다.

그림 3은 회전자의 전기적 위치각에 따른 인덕턴스 프로파일과 인덕턴스 검출 전류 파형을 나타내고 있다. 이 때 인덕턴스 프로파일과 전류는 서로 반비례관계에 있음을 알 수 있다.

2.2 전압펄스 주입방식을 이용한 SRM 센서리스 구동원리

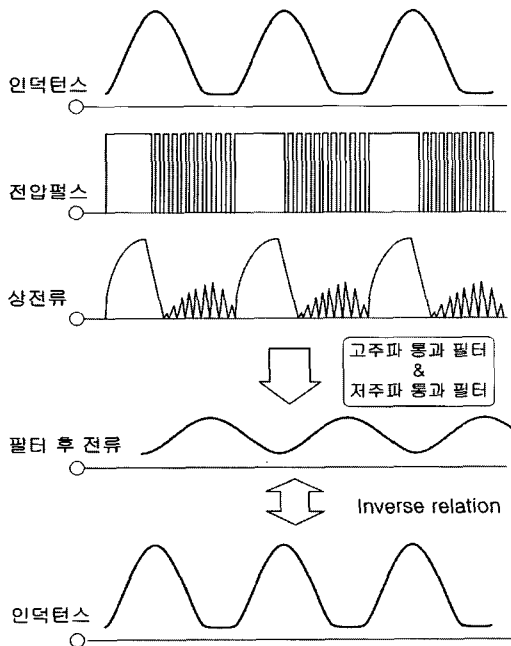


그림 4 전압펄스 주입방식을 이용한 인덕턴스 추정원리
Fig. 4 Principle of estimating inductance using impressed voltage pulse

그림 4는 전압펄스 주입방식을 이용하여 인덕턴스를 추정하는 원리를 보여주고 있다. 여자되지 않는 구간에 토크를 유발하지 않을 정도의 낮은 듀티를 갖는 전압펄스를 게이트 단에 인가함으로써 상전류 파형을 얻

을 수 있다. 그리고 상전류로부터 고주파 통과필터와 저주파 통과필터를 사용하여 필터 후의 파형을 또한 얻을 수 있다. 그림 4에서와 같이 필터 후의 전류파형은 인덕턴스와 서로 반비례 관계에 있음을 알 수 있으므로 전압펄스 주입방식을 이용하여 인덕턴스를 추정할 수 있고 그 결과로 센서리스 운전이 가능하다.

3. 제안한 센서리스 기법

3.1 광센서를 이용한 SRM구동

본 논문에서는 기존 광센서를 사용하여 알 수 있었던 인덕턴스 상승구간을 센서리스 방식을 이용하여 검출한 인덕턴스 상승구간과 비교하였다. 또한 광센서 신호를 센서리스 신호로 대체하여 센서리스 구현이 가능하게 하였다.

그림 5와 6은 인덕턴스에 따른 광센서신호 sa, sb, sc의 출력파형을 보여준다.

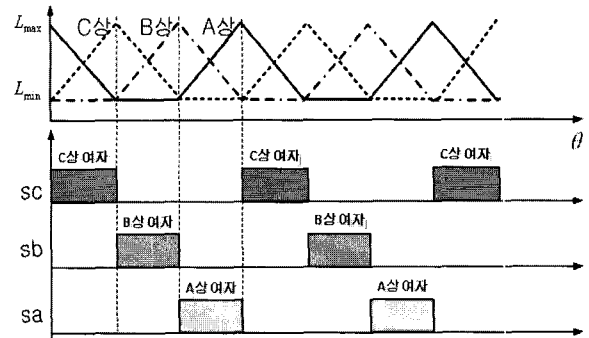


그림 5 인덕턴스에 따른 광센서 출력
Fig. 5 Output of optical sensor according to the Inductance

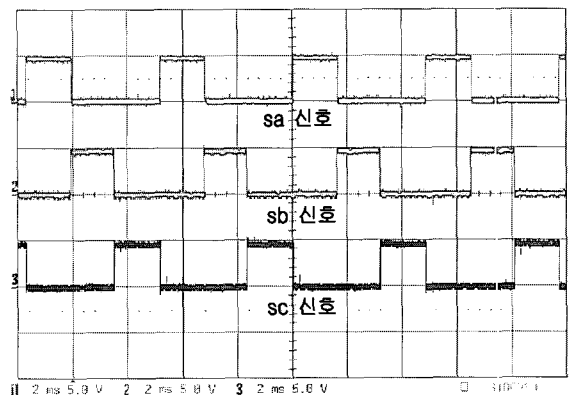


그림 6 광센서 출력신호
Fig. 6 Output signal of optical sensor

3.2 제안한 센서리스 방식의 원리

본 논문에서는 전압펄스 방식의 문제점인 위상지연 문제를 해결하기 위해 Phase shift 회로를 구성하여 초기구동부터 고속영역에 이르기까지 정토크 발생영역인 인덕턴스 상승구간을 정확히 검출할 수 있도록 하였다. 각 상에 전압펄스를 인가하여 그림 7과 같이 인덕턴스와 반비례관계인 이상적 전류파형을 얻을 수 있다.

그러나 이상적 전류파형이 저주파 통과 필터를 거치면 위상이 지연된 전류파형이 발생된다.

또한 지연된 전류파형은 Ref. 전압과 비교되어 ssa, ssa, ssc 신호를 얻을 수 있지만 인덕턴스 상승구간 신호와 많은 차이가 있으므로 이를 동일하게 맞추기 위해 추가적인 Phase shift 회로가 필요하게 된다.

지연된 전류파형은 초기 및 저속영역에서는 거의 이

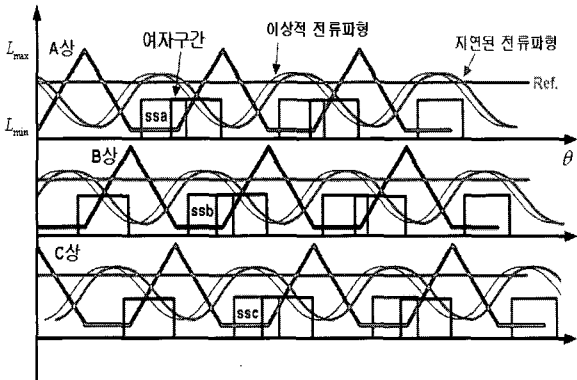


그림 7 제안한 센서리스 방식의 기본원리
Fig. 7 Principle of proposed sensorless operation

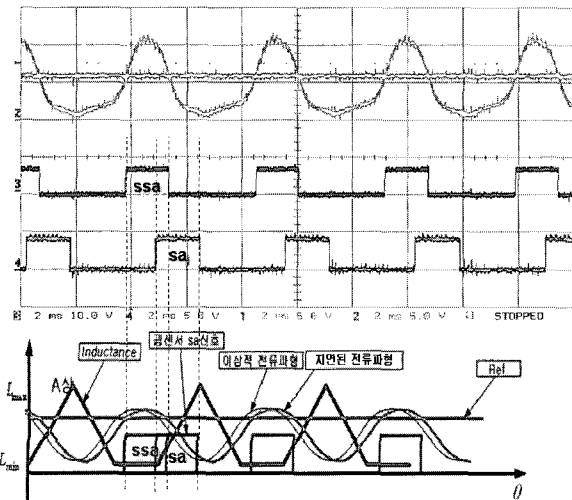


그림 8 ssa 신호와 광센서 sa의 신호 비교
Fig. 8 ssa signal and sa signal of optical sensor

상적 전류파형과 일치하지만 속도가 증가함에 따라 위상지연이 더욱 증가되기 때문에 위상을 앞당겨 주어야만 부토크 발생 없이 SRM을 구동할 수 있다.

그림 8에서 광센서 A상에서 발생하는 sa 신호는 저주파 통과 필터를 거쳐서 만들어진 전류와 Ref. 전압과 비교되어 얻어진 ssa 신호와 동일하지 않음을 알 수 있다. 따라서 기존 전압펄스 방식의 센서리스 문제점을 보완하기 위해 본 논문에서는 Phase shift 회로를 사용하여 ssa 신호를 광센서 신호 sa와의 위상차를 보상하여 인덕턴스 상승부분을 정확하게 검출할 수 있도록 하였다.

3.3 Phase shift 회로

그림 9는 본 논문에서 전압펄스 방식의 문제점인 위상지연 문제를 해결하기 위해서 사용된 Phase shift 회로를 나타내고 있다. 그림 8에서 저주파 통과 필터를 거쳐서 만들어진 전류와 Ref. 전압과 비교되어 얻어진 ssa 신호는 f/V 컨버터의 입력으로 활용되어 속도에 비례한 출력전압을 얻을 수 있다.

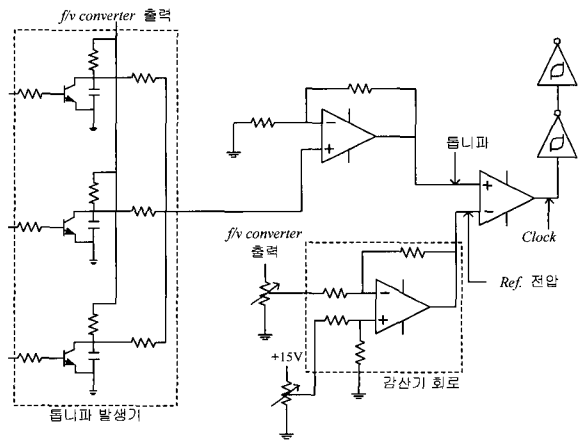


그림 9 Phase shift 회로
Fig. 9 Phase shift circuit

이 전압은 톱니파 발생부의 입력전원으로 활용되어 속도가 변화하여도 거의 일정한 피크치를 갖는 톱니파 전압을 얻을 수 있고 감산회로의 출력전압과 비교되어 Clock 신호를 만든다.

감산회로의 출력전압은 속도가 증가할수록 감소하기 때문에 Clock 신호의 ON시점을 앞당길 수가 있다. 따라서 그림 10의 D-FF 회로의 출력으로부터 속도가 증가하여도 그림 7과 같이 지연된 전류파형을 속도에 비

례하여 앞당길 수가 있으므로 여자가능구간과 동기 시킬 수 있는 A, B, C상의 신호를 얻을 수 있다.

3.4 초기구동회로

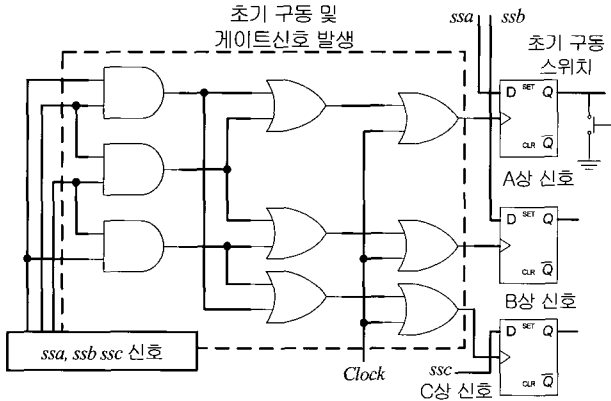


그림 10 제안된 초기구동 및 게이트신호 발생
Fig. 10 Start-up circuit and gate signal

그림 10은 제안된 초기구동 및 A, B, C상 게이트신호 발생부분으로써 초기에는 D-FF의 클럭단자로 들어가는 Clock신호를 만들 수 없기 때문에 별도의 초기구

동 회로가 필요하다. 따라서 초기구동시 저주파 통과 필터를 거쳐서 만들어진 전류와 Ref. 전압과 비교되어 얻어진 ssa, ssb, ssc신호들이 서로 약간 겹치도록 설정하게 되면 겹친 부분에서 각 상의 D-FF의 클럭단자로 들어가는 Clock신호를 얻을 수 있다. 하지만 초기에 각 상이 겹쳐지는 부분이 발생하기 전까지 Clock 신호가 발생하지 않기 때문에 본 논문에서는 초기 구동 스위치에 의해 강제적인 A상을 여자해 줌으로써 Clock 신호를 발생시키는 방법을 제안하였다.

4. 실험 결과

그림 11은 제안한 전압펄스 주입방식을 이용한 센서리스 전체 시스템의 구성도이며, 표 1은 사용된 전동기 사양이다.

그림 12는 그림 4에 나타낸 것처럼 SRM의 A, B, C 각 상에 고주파 전압펄스를 주입하고 회전자를 손으로 천천히 돌렸을 때 각 상에 나타나는 인덕턴스를 검출하기 위한 전류파형을 나타내고 있다.

그림 13은 그림 4에서 설명한 전압펄스 주입방식을 이용하여 각 상의 인덕턴스를 검출하기 위해 상전류와 필터를 사용하여 나타난 전류파형을 보여주고 있다.

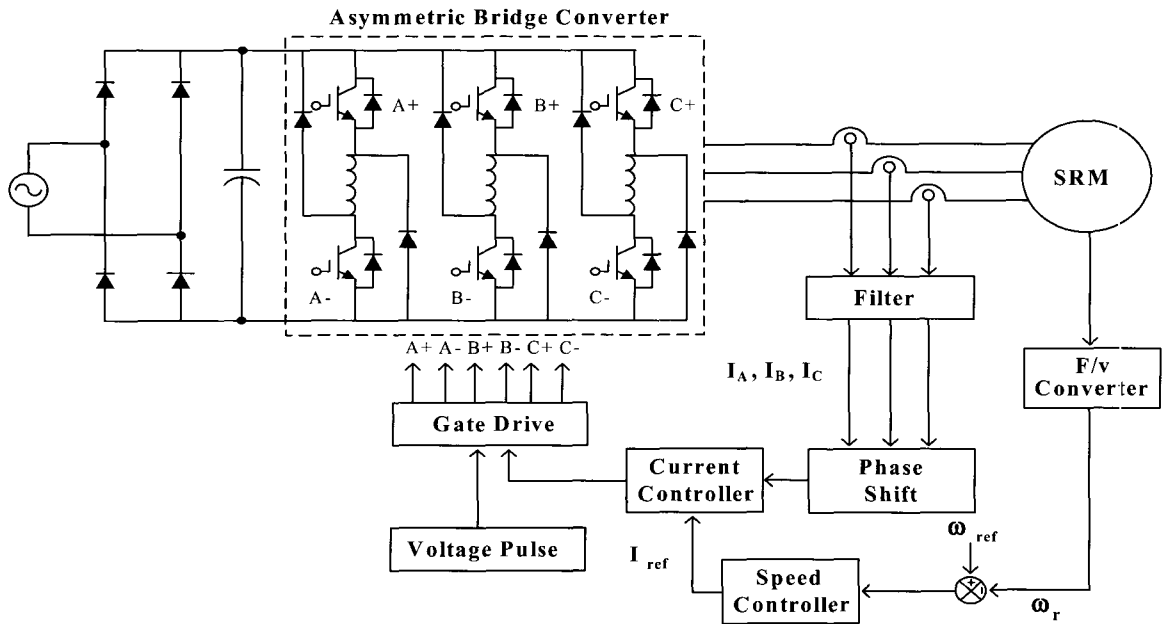


그림 11 센서리스 구동 SRM 전체 구성도
Fig. 11 System block diagram of the sensorless drive system with SRM

표 1 전동기 파라미터
Table 1 Specification of SRM

정격 출력	160[W]	상 권선저항	0.04166[Ω]
정격 전압	12[V]	최대 인덕턴스	2.332[mH]
상 수	3[상]	최소 인덕턴스	0.241[mH]
고정자 극수 및 극호각(β_s)	6[pole] 30°	회전자 극수 및 극호각(β_r)	4[pole] 32°

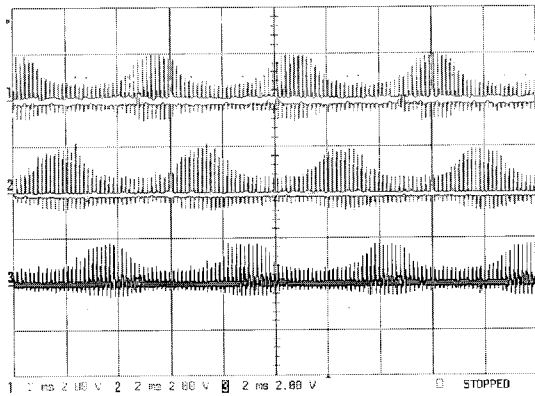


그림 12 주입된 전압펄스에 의한 각상의 펄스전류
Fig. 12 Pulse current according to the Impressed voltage pulse

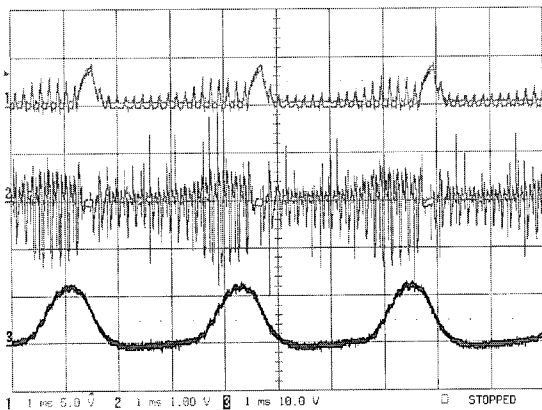


그림 13 상전류와 필터를 사용한 후의 전류
Fig. 13 Phase current and current of filter

그림 14는 전압펄스 주입방식에 의한 문제점으로써 필터를 통과한 전류파형과 Ref. 전압에 의해 비교된 ssa신호는 실제 광센서를 사용하여 얻어진 sa신호와 위상차가 발생됨을 보여주고 있다.

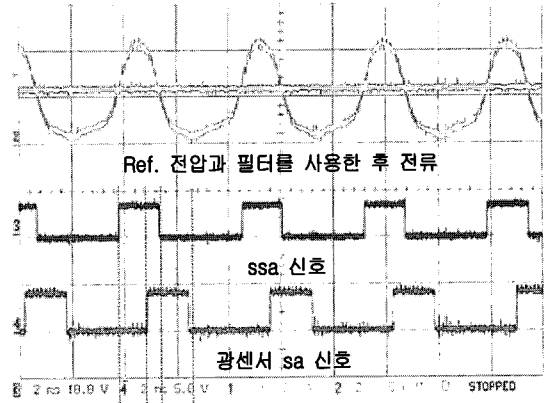


그림 14 ssa신호와 광센서 sa신호
Fig. 14 ssa signal and sa signal of optical sensor

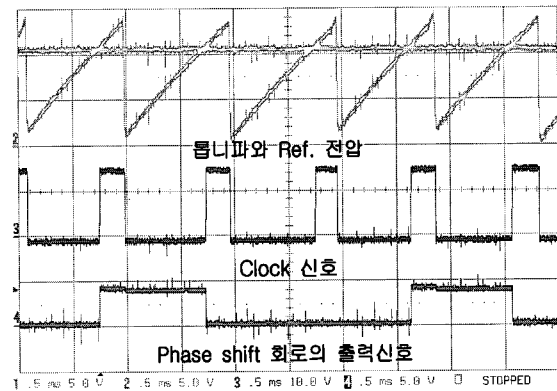


그림 15 Phase shift회로의 출력신호
Fig. 15 Output signal of phase shift circuit

그림 15는 그림 14에서 언급한 위상차를 보상에 주기 위해 제안된 Phase shift 회로를 사용했을 경우의 Ref. 전압과 비교되어 얻어진 Clock신호는 D-FF의 클럭단자의 입력신호로 사용되어 최종적인 Phase shift 회로에 의한 출력신호를 얻을 수 있다.

그림 16과 17은 10[rpm] 정도의 저속에서부터 6000[rpm]의 고속에 이르기까지 위상지연 없이 광센서에서 발생하는 A상 sa신호와 본 논문에서 제안한 Phase shift 회로를 사용하여 발생한 신호가 거의 일치하는 것을 보여주고 있다. 이와 같은 간단한 원리를 이용하여 전압펄스 주입방식의 단점인 위상지연을 보상할 수 있다.

그림 18은 Phase shift회로에서 ssa, ssb, ssc 신호가 서로 약간 겹치도록 Ref. 전압을 조정하면 초기에 걸친 부분에서 각 상의 D-FF의 클럭신호가 만들어지고

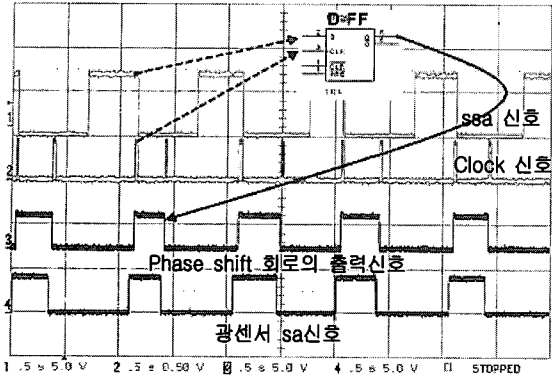


그림 16 Phase shift회로의 출력신호와 광센서 sa신호 (0.5s/div, 10rpm)

Fig. 16 sa signal of optical sensor and output signal of phase shift circuit

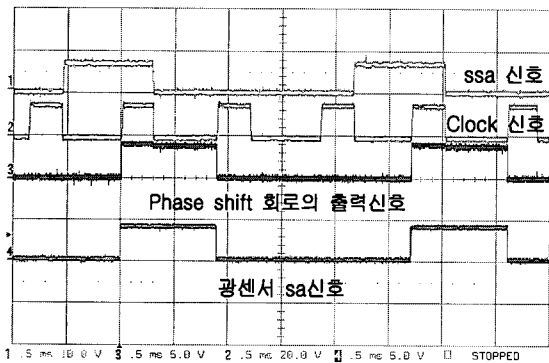


그림 17 Phase shift회로의 출력신호와 광센서 sa신호 (0.5ms/div, 6000rpm)

Fig. 17 sa signal of optical sensor and output signal of phase shift circuit

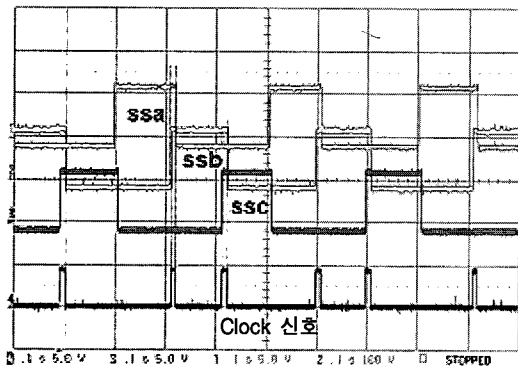


그림 18 초기구동시 Clock신호

Fig. 18 Start-up signal

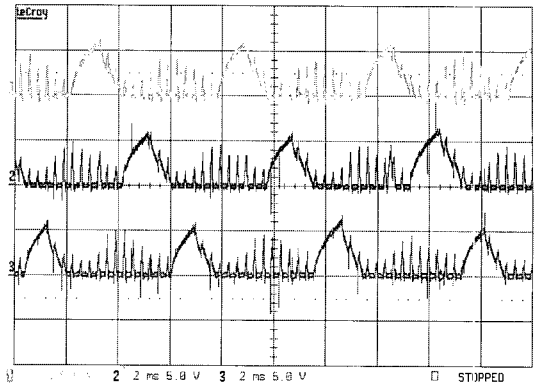


그림 19 센서리스 운전 시 각상의 상전류 파형 (2ms/div, 4A/div, 2500[rpm], 무부하)

Fig. 19 Each phase current of sensorless operation

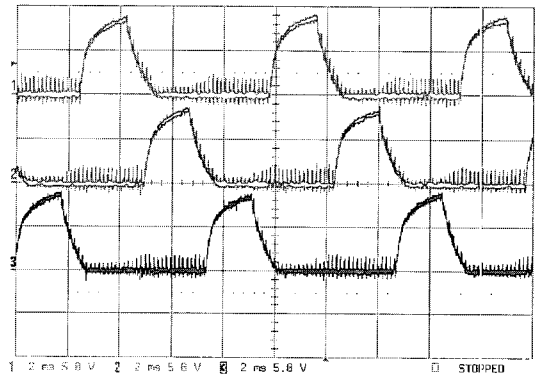


그림 20 센서리스 운전 중 부하(50W) 인가시 상전류 파형(2ms/div, 4A/div, 2000[rpm])

Fig. 20 Each phase current according to load

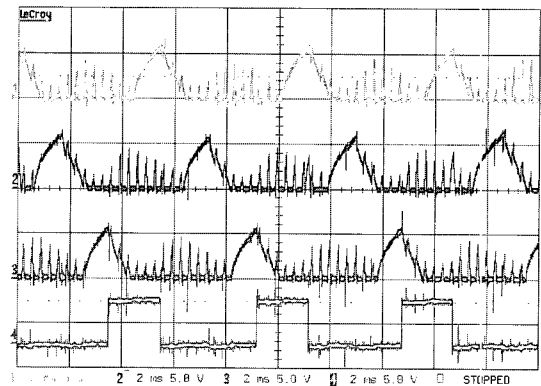


그림 21 센서리스 운전시 상전류와 ssa신호(2500rpm)

Fig. 21 Each phase current and ssa signal of sensorless operation

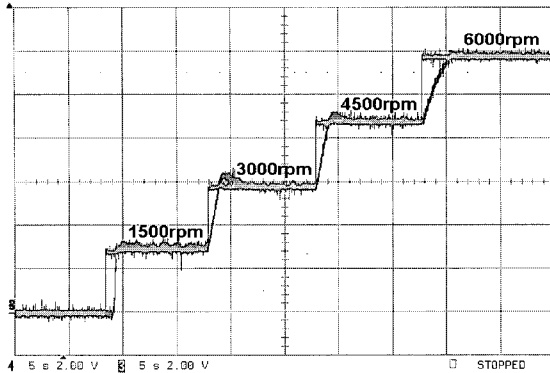


그림 22 기준속도에 따른 속도 추종 (1000rpm/div)
Fig. 22 Speed response of reference speed change

초기 및 저속에서도 광센서의 출력신호와 거의 일치하는 Phase shift 회로의 출력신호를 만들 수 있다. 하지만 초기에 각 상이 겹쳐지는 부분이 발생하기 전까지는 클럭신호가 발생하지 않아 D-FF의 클럭단자에 들어가는 입력신호를 만들 수 없으므로 초기에 회전자를 강제로 움직여 줄 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 A상을 강제로 여자해 줌으로서 클럭신호가 발생될 수 있도록 그림 10에서와 같이 초기구동 스위치를 만들어 주었다.

그림 19는 센서리스 무부하 구동시 속도에 따른 각 상의 상전류 파형을 나타내며 그림 20은 센서리스 운전 중 부하를 인가하였을 때의 각 상의 상전류 파형이다.

그림 21은 상전류와 ssa신호를 나타내고 있다. Clock 신호의 ON시점을 앞당길 수가 있기 때문에 D-FF회로의 출력으로부터 속도가 증가하여도 지연된 전류파형을 속도에 비례하여 앞당길 수가 있으므로 여자가능 구간과 동기 시킬 수 있는 A, B, C상의 신호를 얻을 수 있다.

그림 22는 초기구동 후 기준 속도를 변화시켰을 때의 실제 응답속도를 보여주고 있다.

5. 결 론

SRM은 회전자의 위치에 따라 각 상의 여자시점이 결정되므로 고가의 위치센서를 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 이러한 위치센서는 EMI, 고온, 먼지, 진동 등의 열악한 환경에서는 성능이 저하되어 신뢰성이 떨어지며 전동기의 부피를 증가시키고 고가의 위치센서로 인해 단가를 상승시키는 문제점이 있어 센서리스

방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 전압펄스 주입방식을 이용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 전압펄스 주입방식을 이용한 센서리스 방식의 단점인 속도증가에 따른 위상지연 문제를 Phase shift 회로를 이용하여 SRM의 정토크 영역인 인덕턴스 상승부를 검출하여 위상 지연 문제를 해결하였다.
- 2) 대부분의 SRM 센서리스 방식들은 초기구동의 문제를 갖고 있지만 본 논문에서는 초기에 여자해야 할 상을 검출할 수 있어 초기구동의 문제점을 해결하였다.

이 논문은 에너지관리공단(2003-0809-000)의 에너지절약기술개발 사업 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] H. J. Guo, M. Takahashi, T. Watanabe, and O. Ichinokura, "A New Sensorless Drive Method of Switched Reluctance Motors Based on Motor's Magnetic Characteristics," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 37, No. 4, July 2001.
- [2] H.J. Guo, W.B Lee "An improved sensorless driving method of switched reluctance motors using impressed voltage pulse," *PCC-Osaka 2002*.
- [3] Tsuyoshi Wakasa, Hai-Jao Guo and Osamu Ichinokura, "A Simple Position Sensorless Driving System of SRM Based on New Digital PLL Technique," *IECON'02 Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference*, Nov. 2002, pp. 502-507, Vol.1.
- [4] P. Laurent, M. Gabsi and B. Multon, "Sensorless rotor position analysis using method for switched reluctance motor," *IEEE IAS Annual Meeting*, pp.687-694, 1993.
- [5] Y, J Wang etc. "Rotor position detection of switched reluctance motor using FM technique," *International Conference on control Applications IEEE*, pp.939-944, 1999.
- [6] M. Ehsani and I. Hussain, "Rotor position sensing in switched reluctance motor drives by measuring mutually induced voltages," *IEEE IAS Annual Meeting*, pp.422-429, 1990.
- [7] S.R MacMinn and W.J. Rzesos, "Application of sensor integration techniques to switched reluctance motor drives," *IEEE IAS Annual meeting*, pp.584-588, 1988.

- [8] 김세주, 윤용호, 원충연, 김학성, “반사형 광센서를 이용한 저가형 SRM 위치검출기법” *전력전자학회논문지*, 제 10권 제 2호, pp. 148-154, 2005.
- [9] 김민희, 백원식, 이상석, 박찬규, “신경회로망을 이용한 위치센서 없는 스위치드 릴럭턴스 전동기의 제어시스템,” *전력전자학회 논문지*, 제 9권 제 3호, pp. 246-252, 2004.
- [10] 안진우, 박성준, 김태형, “SRM의 센서리스 제어를 위한 인덕턴스 추론기법,” *전력전자학회논문지*, 제8권 제3호, pp. 427-434, 2003.

저 자 소 개



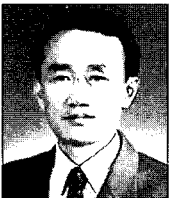
윤용호(尹溶湖)

2002년 성균관대 대학원 메카트로닉스 공학과 졸업(석사). 2002년 LG전자 DDM사업부 연구원. 2003년~현재 성균관대 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정.



김연중(金淵忠)

1995년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 현재 (주)팩테크 기술연구소 소장.



원충연(元忠淵)

1978년 성균관대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시주립대학 전기공학과 방문교수. 1988년~현재 성균관대 정보통신공학부 교수.