전력전자학술대회 논문집 2003. 7. 14 ~ 7. 17

한 상의 전류검출에 의한 6/4극 SRM의 3상 Delta modulation 전류제어

김도군*, 윤용호*, 송상훈**, 원충연*, 김영렬***
성균관대학교*, 산업기술시험원**, 안양대학교***

Current control of 6/4 pole SRM with Delta modulation using Single current sensor

D.K. Kim*, Y.H. Yoon*, S.H. Song**, and C.Y. Won*, and Y.R. Kim***
Sungkyunkwan University*, Korea Testing Laboratory**,Anyang Universirty***

ABSTRACT

This paper presents 3-phase current regulation of SR motor by only single current sensor.
The conventional drive system of SR motor has a current sensor per each phase.

In this paper, The asymmetric bridge conve-rter which is able to control independently phases and be excited simultaneously is used as the driver system for 6/4 poles SR motor. And the sensor is replaced 3 sensors of each phase with only one on bus line of converter so as to detect current of every phase.

A drive logic circuit is designed on EPLD with Delta modulation using a fixed frequency.

This technique is verified through simulation and experiment.

1. 서 론

SRM은 적은 단가로 제조가능하고, 고성능의 제어가 가능하지만 모터 제어를 위한 전자 소자의 비용은 다른 모터들에 비해 상대적으로 많이 요구된다.

SRM은 모터의 특성상 고출력과 토오크 맥동을 줄이기 위해 정밀한 전류제어가 매우 중요하며, 고가(高價)의 전류제어용 센서가 각 상마다 개별적으로 필요하게 된다.

비용절감과 성능 두 가지를 최상으로 만족하는 주된 연구 관심대상인 센서리스 제어가 있으나, 이는 복잡한 프로세서가 요구되는 단점이 있다. 좀더 쉽게 구현이 가능하면서, 원가 절감의 효과를 얻는 방법은 기존 시스템의 각 상에 개별적으로 필요한 전류 센서의 수를 최소화 하는 것이다.

본 논문의 목적은 SRM구동에 있어서, 하나의 전류 센서만으로 3상의 전류제어가 가능함을 연구하여 비용절감의 효과를 얻는데 있다.[1]

2. 구동과 여자제어

2.1 SRM 구동과 전류제어

6/4극 SRM의 경우 각 상의 인덕턴스 곡선은 3상이 30°씩 위상차를 가지고 변화하므로, 전동기를 지속적으로 회전시키기 위해서는 순차적으로 스위칭 하여 각 상의 인덕턴스가 증가하는 구간에서만 전류를 흘려, 일정 방향으로 토오크를 발생하도록 만들어 주어야 한다.

SRM의 발생 토오크는 상전류의 제곱에 비례하고 위치각에 대한 인덕턴스의 기울기에 비례한다. 토오크가 전류의 제곱에 비례함으로써, 상전류의 방향과 무관하게 토오크를 발생시킬 수 있으며, 인덕턴스의 변화율에 따라서 토오크는 정토오크(Positive Torque) 또는 부토오크(Negative Torque)가 발생할 수 있다.

출력토오크는 각 상의 여자전류에 의하여 발생되는 토오크의 합으로 생성되고, 그때의 3상 출력토오크는 식 (2-1)과 같다.

$$T_{total} = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL(\theta-30^o)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL(\theta-60^o)}{d\theta} \qquad (2-1)$$

또한, 그림 1과 같이 각 상의 최대전류를 일정전류로 유지시키고, 두 상을 여자 중첩하여 제어함으로써, SRM의 출력을 증가시키고 토오크 맥동을 줄일 수 있다.[3][5]

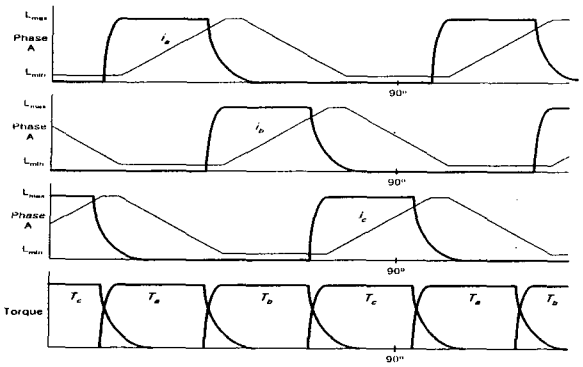


그림 1 6/4극 SRM 회전 토오크 발생과정
Fig. 1 Torque Waveform in three-phase 6/4 SRM

2.2 비대칭 컨버터

그림 2는 일반적으로 사용되는 비대칭 브리지 컨버터이다.

상당 2개의 스위치와 2개의 환류 다이오드를 가지는 구조로 효율이 높고 다양한 제어가 가능하며, 각 상의 전류제어가 독립적이어서 두 상의 전류 중첩이 가능하고, 상의 수에 관계없이 사용할 수 있는 컨버터이다. 상 전류 제어를 위해 그림2와 같이 각 상마다 전류센서를 사용한다.[3][4][5]

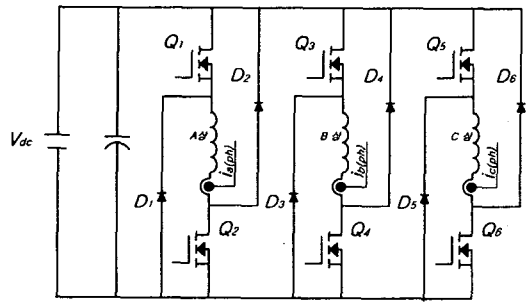


그림 2 비대칭 브리지 컨버터
Fig. 2 Asymmetric bridge converter

2.3 단일 센서를 이용한 비대칭 컨버터

그림 3은 본 논문에서 제안하는 비대칭 브리지 컨버터의 단일 센서 위치를 보여주고 있다.
기존의 각 상에 장착되었던 3개의 전류센서를 1개의 전류센서로 대치하였고,환류모드(freewheeling mode)시 역전류가 센서에 영향을 주는 것을 고려, bus 라인의 하단을 스위치라인과 환류 다이오드라인을 별도로 구성하여, 환류모드시 전류제어에 무관한 역전류가 센서에 검출되는 것을 방지하였다.[1]

2.4 전류제어

본 논문의 전류제어 방법으로 델타변조 방식을 채택하였다.

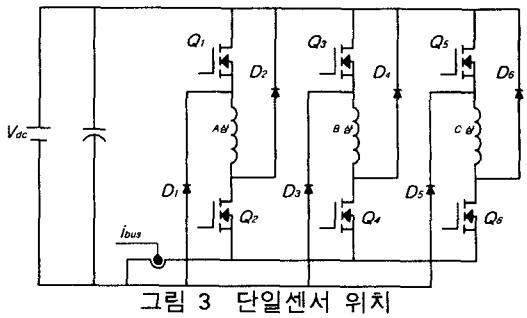


그림 3 단일센서 위치
Fig. 3 The position of single sensor on converter

그림 4는 델타 변조기에 의한 전류제어를 나타내고 있다. 센서를 통해 검출된 상전류는 기준전류와 지속적으로 비교되어, high와 low 상태로 출력은 래치된다.

래치된 비교기 출력은 설정된 클럭주파수에 따라 스위치를 on, off 시킨다.

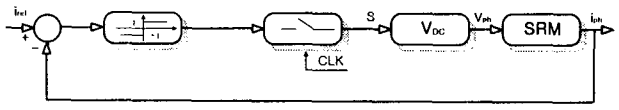


그림 4 델타 변조기에 의한 전류제어
Fig. 4 Delta modulation current control

델타 변조 방식에 의한 스위치 동작을 파형과 함께 좀더 구체적으로 나타내면 그림 5와 같다.

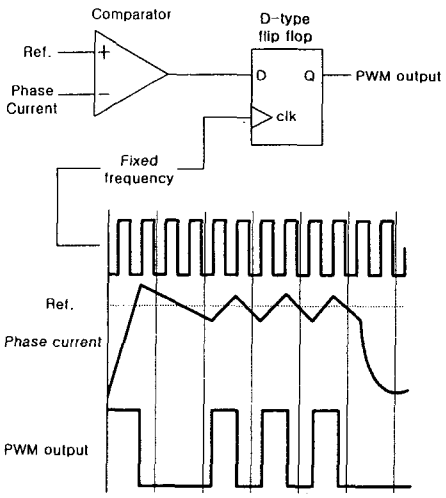


그림 5 델타 변조
Fig. 5 Delta modulation

전류의 비교는 클럭주파수의 상승 에지 순간에 이루어 지며, 이에 따른 스위치의 동작은 PWM out put 파형으로 나타난다.

전류제어는 스위칭 방식에 따라 하드쵸핑과 소프트 쵸핑으로 구분된다. 하드 쵸핑은 상,하단 스위치

들은 상전압 변조에 이용되어지는 반면, 소프트 쵸핑은 단지 하나의 스위치를 변조시키고, 다른 하나는 여자구간 동안 on상태를 유지한다. Zero-voltage loop를 가지는 소프트 쵸핑은 하드 쵸핑에 비해 효율, 토오크, 리플, 역율, 노이즈에 우수한 것으로 알려져 있다.[1][3][4]

2.5 단일 센서 전류제어 방법

한 개의 전류 센서를 갖는 델타 변조 상전류 제어는 각 상마다 센서를 갖는 동작과 유사하다. n상과 동일한 수의 센서와 비교기를 가지면, 각각의 스위치로 연결되어 상 전압과 관련해서 스위치를 동작시킨다.

그러나, 한 개의 센서를 가지면, 한 개의 비교기 출력이 n개의 상 전압 모두를 동작시켜야 하므로 그림 6의 블록도와 같이 D-flipflop, Mux, Demux와 고정주파수를 이용하여, 일정 시간간격을 두고 주파수를 분주 처리함으로써, 디코딩에 의해 6개의 스위치를 동작을 가능하도록 구현하였다.[1][3]

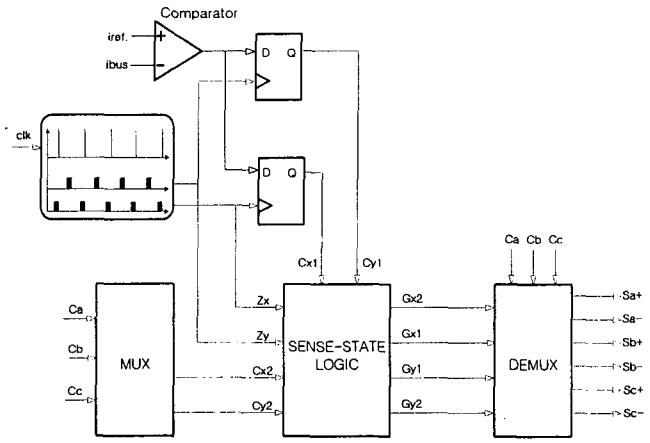


그림 6 단일센서를 이용한 전류제어 블록도
Fig. 6 Block diagram for current control using single sensor

각각의 제어 블록도에 해당하는 논리값들을 표현하면 아래와 같다.

$$Cx2=(Ca\cdot \overline{Cb})+(Cb\cdot \overline{Cc})+(Cc\cdot \overline{Ca})$$
$$Cy2=(Ca\cdot Cb\cdot \overline{Cc})+(Cb\cdot Cc\cdot \overline{Ca})+(Cc\cdot Ca\cdot \overline{Cb})$$

$$Gx2=Cx2\cdot(\overline{Cy2}+\overline{Zy})$$
$$Gx1=Cx2\cdot(Cx1+(Cy2\cdot Zy))$$
$$Gy2=Cx2\cdot Cy2\cdot \overline{Zx}$$
$$Gy1=Cx2\cdot Cy2\cdot(Zx+Cy1)$$

$$Sa+=Gy1\cdot Ca\cdot Cb\cdot \overline{Cc}+Gx1\cdot Ca\cdot \overline{Cb}$$
$$Sa-=Gy2\cdot Ca\cdot Cb\cdot \overline{Cc}+Gx2\cdot Ca\cdot \overline{Cb}$$
$$Sb+=Gy1\cdot Cb\cdot Cc\cdot \overline{Ca}+Gx1\cdot Cb\cdot \overline{Cc}$$
$$Sb-=Gy2\cdot Cb\cdot Cc\cdot \overline{Ca}+Gx2\cdot Cb\cdot \overline{Cc}$$
$$Sc+=Gy1\cdot Cc\cdot Ca\cdot \overline{Cb}+Gx1\cdot Cc\cdot \overline{Ca}$$
$$Sc-=Gy2\cdot Cc\cdot Ca\cdot \overline{Cb}+Gx2\cdot Cc\cdot \overline{Ca}$$

Ca,Cb,Cc는 commutating 신호를 나타내고, Cx2와 Cy2는 상전류의 중첩여부를 결정하는 논리값을 나타낸다. 중첩시 Cy2는 1의 값을 갖게 된다.

Zx와 Zy는 임의의 상의 전류 검출 상태를 나타낸다. Cy1과 Cy2는 Zx과 Zy에 따른 기준전류와의 비교 출력이 된다. 중첩시에는 중첩된 임의의 두 상을 나타내고, 비 중첩시는 여자된 한 상 전류를 Zx와 Zy에 따른 시간 간격으로 한상의 비교출력이 된다.

Cx2와 Gy2 두 상의 쵸핑 스위치 구동 게이트 신호를 나타내고, Cx1과 Cy2는 하단스위치의 게이트 신호를 나타낸다. 이들 신호들의 각각의 조합에 의해 최종적으로 6개의 스위치 구동 게이트 신호를 만든다.

2.6 단일 센서 동작

단일 센서에 의해 소프트 쵸핑을 하는 컨버터의 동작과 상, 하단 스위치 상태를 표1에서 나타내고 있다.

표 1. 소프트 쵸핑시 각 상의 전압과 스위치상태
Table 1 the status of switches per each phase during soft chopping

ia	ib	ic	Va	Vb	Vc	ibus	(Sa+,Sa-) (Sb+,Sb-)	V.P.
			1=Vpc × =don't care				0=off, 1=on	
+	0	0	0	×	×	ia	(0,1) (0,0)	0
+	0	0	1	×	×	ia	(1,1) (0,0)	0
+	+	0	0	-1	×	ia	(0,1) (0,0)	0
+	+	0		-1	×	ia	(1,1) (0,0)	0
+	+	0	0	0	×	ia	(0,1) (1,0)	0
						ib	(1,0) (0,1)	0
+	+	0	1	0	×	ia	(1,1) (1,0)	0
						ib	(1,0) (0,1)	1
+	+	0	1	1	×	ia	(1,1) (1,0)	1
						ib	(1,0) (1,1)	1

단지 한 상이 여자 되는 상태라면, ibus는 여자 동안의 상 전류와 같다.

또한, 한 상이 여자상태이고 다른 상이 전도 상태에 있을 때도, ibus는 단지 여자된 상전류만을 나타낸다.

그러나, 여자 중첩시 ibus는 두 배의 전류가 검출되고, 이는 기준전류와 비교될 때, 델타 변조의

고정된 주파수에 의해 극히 짧은 시간동안 한 상은 전원전압이 인가되지 않는 Voltage penalty상태로 된다.

즉, 중첩된 두 상을 짧은 시간간격을 두고 교번으로 전류 검출을 하게 되므로, 각 상의 전류를 개별적으로 검출하게 만든다. [1]

3. 시뮬레이션 및 실험

3.1 시뮬레이션

본 실험의 시뮬레이션은 제안된 컨버터의 구동 토폴로지와 한 개의 센서로 3상의 상 전류 제어가능성을 검증하기위해 Psim을 이용하였다. 그림 7은 시뮬레이션 전체도를 나타내고 있다.

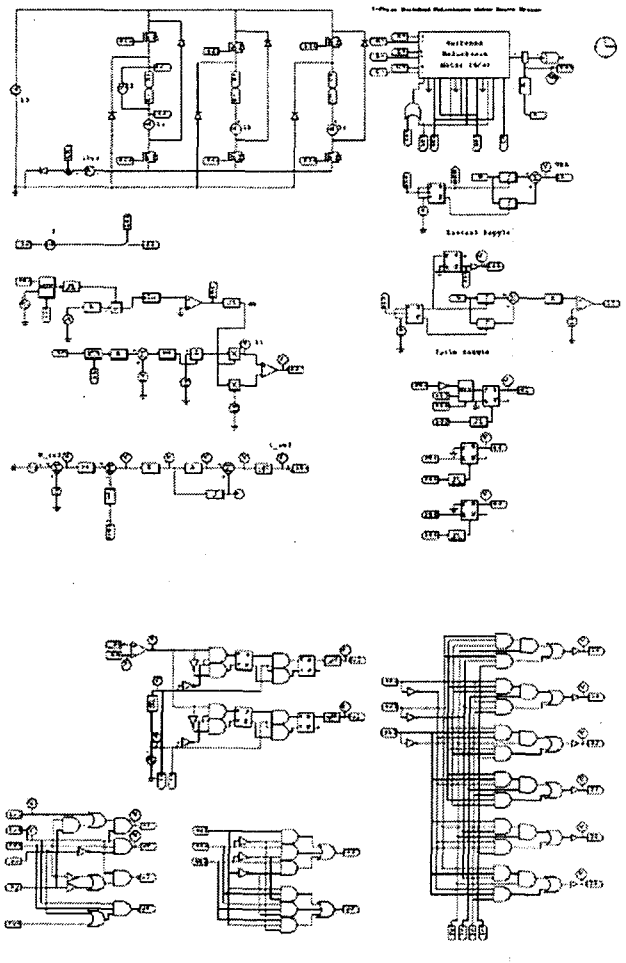
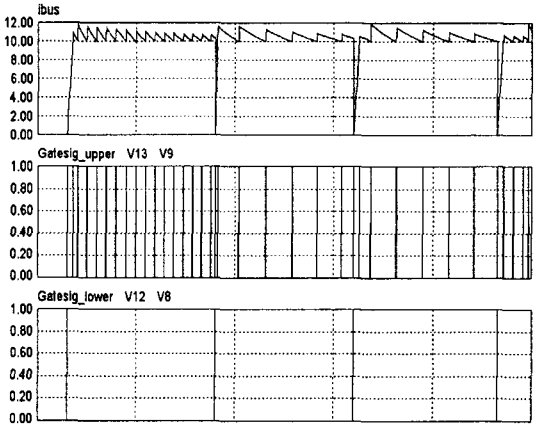


그림 7 시뮬레이션 전체도

Fig. 7 The circuit for simulation

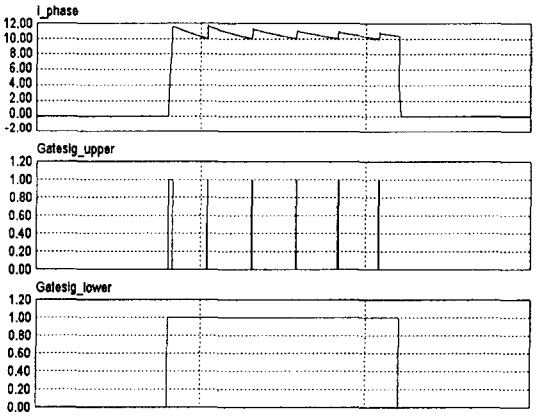
단일 센서를 컨버터의 bus line에 위치시키고, 상전류를 검출하였다. 이때 측정되는 상전류는 3상의 전류가 지속적으로 검출되고, PI 제어기를 통해 계산된 전류기준값과 비교된다. 고정된 주파수(20kHz)를 갖는 델타 변조에 의해 소프트 쵸핑을 하도록 구현하였다.

그림 8의 (a)는 시뮬레이션 결과로, 델타 변조에 의한 상전류의 파형을 나타내고 있다. bus line에 설치된 단일 센서에서 얻은 상전류 파형으로 3상이 정상적으로 스위칭과 쵸핑을 하고 있음을 알 수 있다. 그림(b)는 상의 동작을 좀더 세밀히 관찰하기 위해 시뮬레이션상에서 별도로 한상을 검출하여 확대한 파형이다.



(a)상 전류파형과 상,하단 스위치 신호

(a)The phase current on ibus and the gate signal for switch



(b)상 전류파형과 상,하단 스위치 신호

(b)A phase current and the gate signal for switch

그림 8 델타변조에 의한 소프트 쵸핑

Fig. 8 Soft chopping by delta modulation

(Y축 : A, V, X축 : 시간)

3.2 EPLD 구현과 시뮬레이션

델타 변조 제어부의 로직 구성 및 회로구현은 EPLD를 사용하였다. 그림 9는 본 논문에서 구현한 단일센서의 델타 변조 전류제어부의 EPLD 내부 회로도이다.

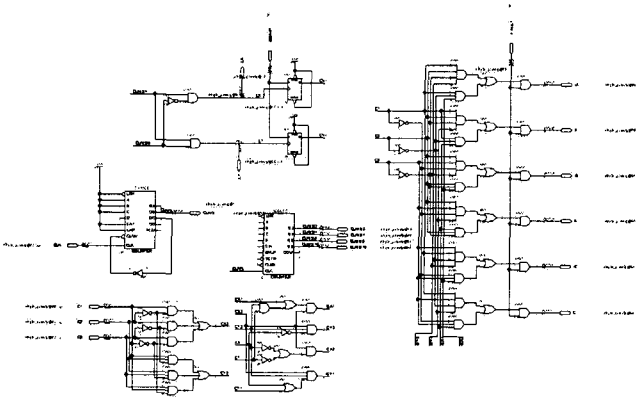


그림9 EPLD 내부 회로도
Fig. 9 The logic circuit on EPLD

그림 10은 EPLD로 구현된 로직회로의 적합성을 알아보기위해 Maxplus상에서 EPLD의 로직 테스트를 시뮬레이션한 결과 파형이다.

Y1,Y2는 각각 Commutation Ca,Cb신호이며, COMP는 비교기 출력신호를 나타낸다. Y1,Y2, COMP, 클럭주파수에 따라 최종 출력되는 A상과 B상의 상,하단 스위치의 게이트 신호를 보여주고 있다.

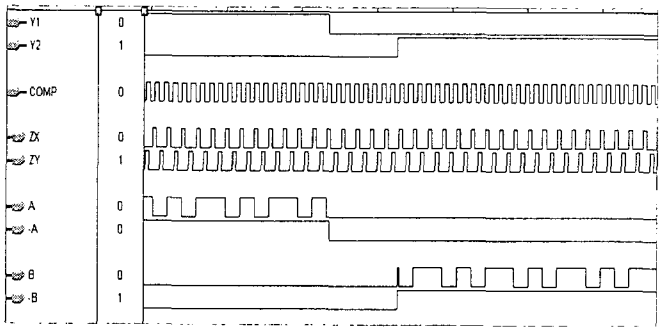


그림 10 EPLD 시뮬레이션
Fig. 10 Simulation for EPLD

3.3 실험결과

본 논문에서는 250W, 6/4pole SRM과 비대칭 브리지 컨버터를 적용하여 실험하였다.

80C196KC를 이용하여 증분형 엔코더에서 나온 펄스로 속도를 계산하고, 엔코더 신호와 EPROM에 저장된 데이터를 이용해 회전자 위치를 판별하였다. 한 개의 센서로부터 검출한 실제전류와 기준전류를 비교하여, 델타 변조 방식으로 전류제어를 하였다.

EPLD상에 논리회로를 구현하여, Commutation신호, 기준전류, 실제전류를 입력받아 6개의 스위치 게이트 신호를 출력 하여 각 상의 여자 제어가 가능하도록 하였다.

그림 11은 실험을 위해 구성한 시스템의 전체 블럭도를 보여주고 있다.

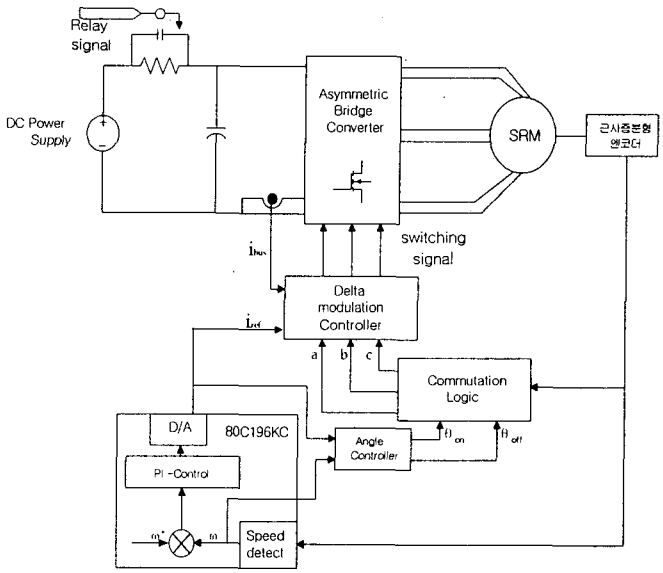


그림 11 실험 시스템
Fig. 11 Experiment system

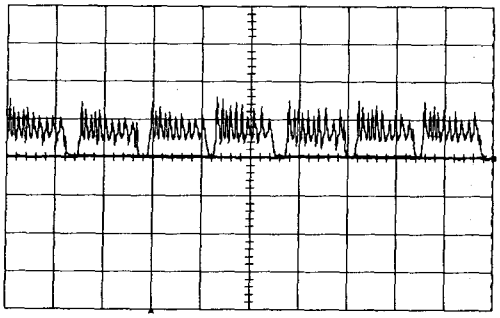
표 2는 실험에 사용된 6/4극 SRM의 파라미터를 나타내고 있다.

표 2 실험에 사용된 전동기 파라미터
Table 2 Motor parameters for experiments

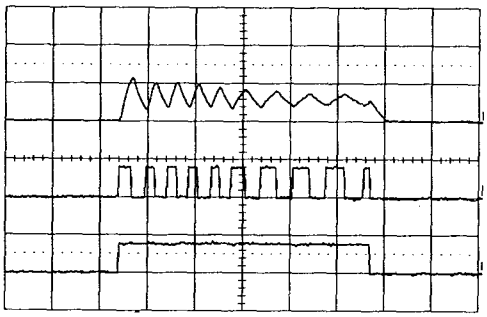
상 수	3 [상]
출 력	250 [W]
최 대 속 도	3000 [rpm]
고정자 극수	6 [극]
회전자 극수	4 [극]
권 선 저 항	0.02166 [Ω]
최대 인덕턴스	1.332 [mH]
최소 인덕턴스	0.241 [mH]
고정자 극호(β_s)	30°
회전자 극호(β_r)	32°

그림 12는 실험을 통해서 얻은 파형으로 시뮬레이션 파형과 일치함을 알 수 있다.

(a)는 단일 센서에 검출된 ibus에 흐르는 상전류 파형이며, (b)는 이 때 한 상의 전류 파형과 상,하단 스위치의 게이트 신호를 보여주고 있다. 시뮬레이션에서와 마찬가지로 델타 변조에 의한 소프트 쵸핑이 정상 동작 하고 있음을 확인 할 수 있다.



(a)ibus의 상 전류파형
(a)The phase current on ibus
(Y축 : A(20A/div), X축 : 시간(10ms/div))



(b)상 전류파형과 상,하단 스위치 신호
(b)A phase current and the gate signal for switch
(Y축 : A(20A/div), V(2V/div), X축 : 시간(2ms/div))

그림 12 ibus에서 측정된 상전류 파형과 게이트 신호 (500rpm)
Fig. 12 Phase current on ibus and gate signal(500rpm)

4. 결 론

본 논문에서는 비대칭 컨버터에 한 개의 전류 센서만을 이용하여, 250W 3상 6/4극 SRM의 전류제어가 가능함을 제안하였다.

단일 센서로 검출된 전류와 기준전류의 비교를 래치시키고, 논리회로를 통해 3상의 전류제어가 가능하도록 델타 변조 방식을 사용하였다.

델타 변조 전류제어부의 논리회로를 EPLD를 활용하여 구현하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

그러나, 단일 센서에 의한 3상의 전류제어 기술은 델타 변조의 고정 주파수로 인하여 고속에서 제한적 동작이 되므로, 속도에 따른 변동주파수 적용과 비대칭 브리지 컨버터이외의 SRM용 컨버터의 적용확대에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

이 논문은 과학재단(R01-2001-000-00306-0)의 연구비 지원에 의하여 연구되었슴

참 고 문 헌

[1] Philip C. Kjaer, "Single-sensor Current Regulation in Switched Reluctance Motor Drives : IEEE Transactions on Industry Application Vol 34, No .3, pp. 444-451, May/June 1998.

[2] F.Blaabjerg , "Single current sensor technique in the DC-link of three-phase PWM-VS Inverters: A review and the ultimate solution," in Conf. Rec. IEEE-IAS Ann. Meeting, pp. 1192-1202, 1996,

[3] T.J.E. Miller, "Electronic Control of Switched Reluctance Machines" : Newnes, 2001,

[4] S.Vukosavic, "SRM Inverter topologies : A comparative Evaluation: IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 27, pp. 1034-1047, Nov/Dec. 199.

[5] 김건우, "가변 히스테리시스 제어에 의한 SRM 토오크 리플저감에 관한 연구", 성균관대 석사학위논문 1999.