

# 단상 SRM 구동을 위한 저가형 PFC 컨버터

## ( Single-Phase SRM Power Factor Corrected Converter for Cost Saving)

이정환, 박성준\*, 박한웅\*\*, 김철우

(J.H Lee, N.S Park, S.J Park, C.U Kim)

부산대학교, 동명대학\*, 한국해군사관학교\*\*

Pusan National University, Tong Myong College\*, Korea Naval Academy\*\*

**Abstract** - A single-phase power factor corrected converter for switched reluctance motor driving is presented to achieve sinusoidal, near unity power factor input currents. Because it combines a power factor corrected converter and a conventional asymmetric SRM driver into one power stage, the configuration has a simple structure resulted in low cost. A prototype to drive 6/6 poles SRM employing a parking magnet is designed to evaluate the proposed topology. The characteristics and operational mode will be discussed in depth, and the validity of proposed driver will be verified through the experimental results.

### 1. 서론

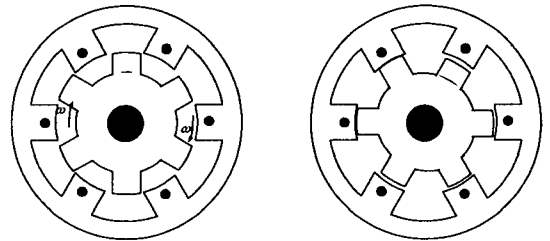
인버터의 관한 연구는 단방향 전류에 의하여 구동되는 SRM의 특성을 이용하여 전력소자수를 최소화할 수 있는 회로구성을 위주로 진행되어 다양한 형태가 개발되어 있으며 아울러 전력소자의 정격산정과 여러 가지 인버터의 특징과 장단점에 대한 비교·분석이 이루어졌다.

또한, 일반적인 특징 중에 하나는 SRM을 구동하기 위해서 사용되는 전원은 DC전원이므로 사용전원은 AC전원이다. 따라서 브릿지 정류 다이오드와 용량이 큰 필터용 커패시터가 입력측에 포함되어 있다. 그러므로 이와 같은 형태는 입력 인덕터와 커패시터의 값에 따라 짧은 도통각으로 인한 피크성의 전류가 흐르게 된다. 따라서 입력 전압과 전류가 동위상이 되지 않아 역률이 0.6정도로 낮으며, 불필요한 무효전력의 발생으로 에너지 효율이 감소된다.

최근 이러한 낮은 역률에 대한 문제점을 해결하기 위해서 SRM 구동회로에 역률 보상회로를 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다.[1-2] 그러나, 이들 역률보상회로는 2단 방식의 구조로 커패시터 앞단에 역률 보상회로를 부가하여 역률을 보상하고 있다. 2단방식을 이용하는 역률 보상회로는 1단 방식에 비하여 구성이 복잡하고, 소자의 수가 증가하여 경제적으로 불리하다. 본 연구에서는 부가적인 능동 회로 없이 단상 SRM 구동회로를 1단 방식으로 구성하여 2단 방식의 역률 보상회로에 비하여 간단하면서도 단위역률이 가능한 단상 SRM 구동회로를 제안한다.

### 2. 본론

#### 2. 1 단상 SRM의 기동



(a) 기동 토크 > 0      (b) 기동 토크 = 0  
그림 1 기동시 Rotor의 위치에 따른 토크

현재까지는 연구결과 SRM의 회전자와 고정자의 극수 조합은 6/4, 8/6, 12/8 극의 조합이 가장 널리 쓰이고 가장 실용성이 큰 것으로 입증되고 있다.[3] 하지만 이 경우 스위칭 소자 수의 증가로 인해 경제적인 면에서 매우 불리하다. 이러한 스위칭 소자수의 감소를 위한 방식이 바로 단상 SRM이다.

그림 1에서 보는 바와 같이 단상 SRM은 특정위치에서 기동토크가 발생되지 않는 영역이 존재하며 또한 기동시 Rotor의 위치에 따라 정/역 방향이 결정된다. 따라서 항상 일정한 회전방향을 가지기 위해 초기 기동시 Rotor의 위치를 인위적으로 일정하게 만들 필요가 있는데 그런 문제점을 해결하기 위해 정지용 자석(parking magnet)이 필요하다.

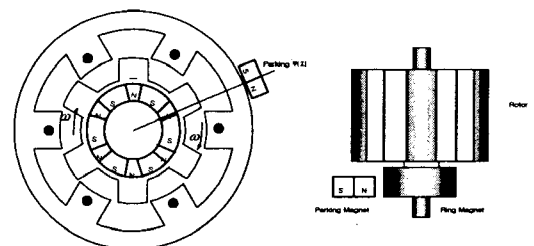


그림 2 Parking Magnet의 위치

그림 2에서 보는 바와같이 N-S극을 가지고 있는 Ring Magnet를 Rotor의 축에 장착하고 외부에 Parking Magnet를 기동시 정토크가 발생할 수 있는 위치에 장착을 하게되면 정지시 항상 일정한 위치에

Rotor는 정지하게 되며 기동시 정토크가 발생하므로 항상 정방향으로 회전하게 된다.[4]

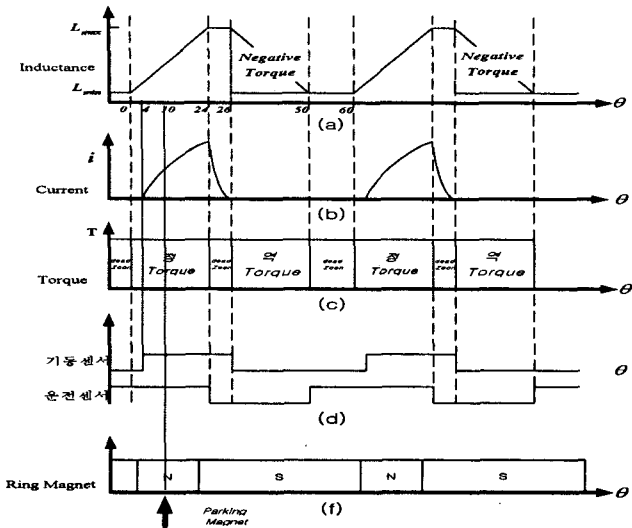


그림 3 피 시험 모터의 특성

본 논문에서는 사용되는 피 시험 모터의 특성은 그림 3의 (f) 같이 인덕턴스가 증가하기 시작한 점으로부터  $10^\circ$  변위에 파킹마그네트가 부착되어있고 그림 3의 (d)와 같이 상여자 구간에서 기동 펄스, 운전 펄스 두 개의 펄스가 출력되는 저가형 증분식 엔코더가 포함되어 있는 형태이다.

## 2.2 제안한 PFC 단상 SRM Asymmetric Bridge Converter

브릿지정류방식의 문제점인 역을 개선과 2단방식의 문제점인 효율 저감의 문제점을 해결하기 위해 최근 부가적인 능동회로 없이 PFC 기능이 첨가된 1단방식의 SRM 드라이브가 연구되어지고 있다.[5]

그림 4는 제안하는 1단방식 PFC 단상 SRM 컨버터이다.

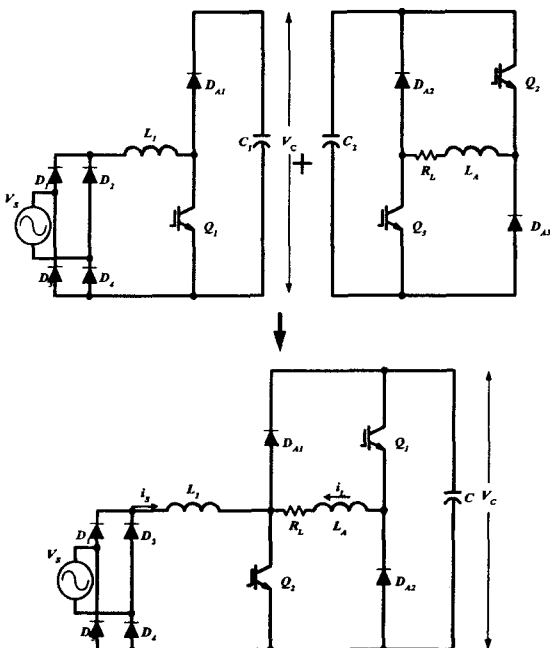


그림 4 제안하는 1단방식 PFC 단상 SRM 드라이브

그림 4는 본 논문에서 제안하는 1단방식 PFC 단상 SRM 드라이브이다. SRM의 속도-토크 특성은 직류 직권전동기와 동일한 특성을 갖고 있다. 따라서 일반적인 직류 전동기의 속도 제어법 중의 하나인 입력전압 속도 제어법과 같은 원리이다. 입력측에 일반적인 Boost Converter 형태와 출력측에 비대칭 SRM 드라이브를 조합한 형태이며 쇼핑스위치  $Q_2$ 에 의해 DC Link 단 전압  $V_C$  를 가변하여 원하는 속도를 제어하는 방식이다. 이것은 다이오드 1개와 스위치 1개를 각각 하나씩 줄였으며 동시에 기존의 2단방식에 비해 회로가 간단하므로 전체 시스템 및 제어 알고리즘도 단순화 시켰다는 장점을 가지고 있다. 그리고 토크리플이 크게 문제되지 않는 송풍기용 또는 중소형 진공 청소기용으로 적용 가능할 것으로 전망한다.

## 2.3 동작원리

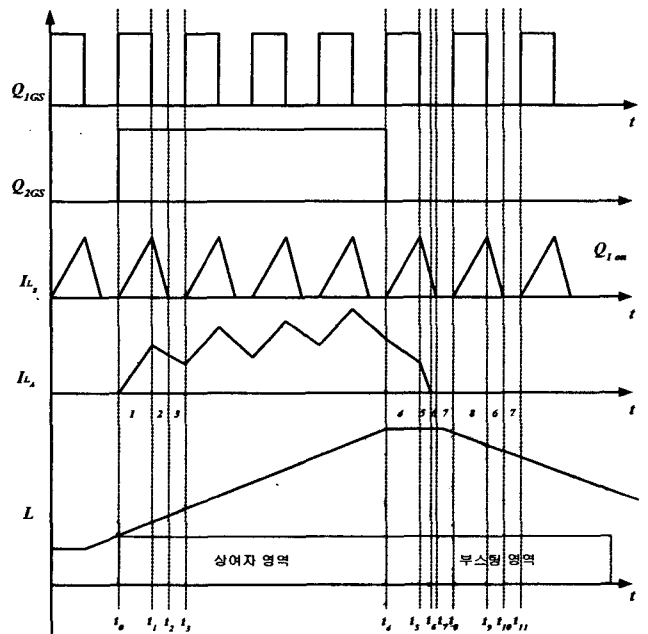


그림 5 각 부의 주요 파형

**Mode 1(t0-t1):** 쇼핑 스위치  $Q_2$ 과 모터의 상스위치  $Q_1$ 를 on 시키는 모드이다.  $Q_1, Q_2$ 가 on 되면 입력측의 전류  $i_S$ 와 모터의 상전류  $i_L$ 이 증가하기 시작하며  $L_S$ 에 축적된 에너지는 다음 Mode 때  $V_C$  전압 유지를 위한 소스가 된다.  $V_C$ 는 상여자를 위한 소스로서 동작한다.

**Mode 2(t1-t2):** 모터의 상스위치  $Q_1$ 은 on 상태를 계속 유지하고 쇼핑 스위치  $Q_2$ 은 off 상태가 되면 입력측의 전류  $i_S$ 가 감소하게 되어 zero 가 될 때까지의 모드이다. 입력측의 전류  $i_S$ 는 감소하게 되고, 모터의 상전류  $i_L$ 은 상스위치  $Q_1$ 와 다이오드  $D_{A1}$ 을 통해 휠링하게 된다. 상의 저항성분에 의해 휠링전류는 서서히 감소하게 된다. 그리고  $L_S$ 에 축적된 에너지는  $C$ 로 충전된다.

**Mode 3(t2-t3):** 모드 2에서 스위치의 변화는 없이 쇼핑 스위치  $Q_2$ 가 on 되기전까지의 모드이다. 이때  $i_S$ 는 zero가 되며, 모터의 상전류  $i_L$ 은 상스위치  $Q_1$ 와 다이오드  $D_{A1}$ 을 통해 휠링하게 된다. 상의 저항성분에 의해 휠링전류는 서서히 감소하게 된다.  $V_C$  전압은 충·방전 없이 유지된다.

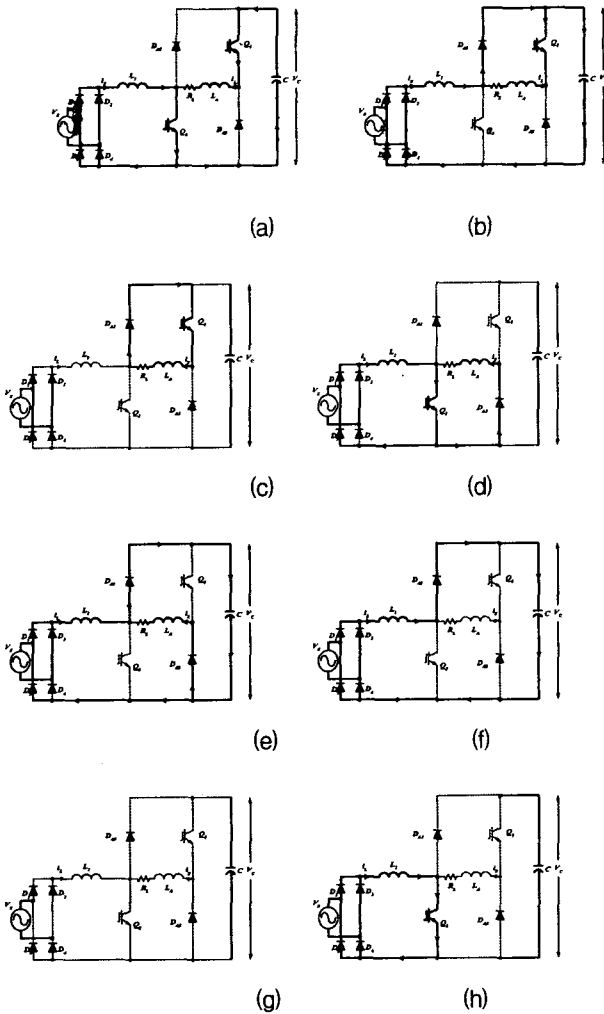


그림 6 동작모드

- (a) Mode 1, (b) Mode 2, (c) Mode 3, (d) Mode 4,  
 (e) Mode 5, (f) Mode 6, (g) Mode 7, (h) Mode 8

**Mode 4(t4-t5):** 초핑 스위치  $Q_2$ 는 on 되면서 모터의 상스위치  $Q_1$ 는 off 되는 모드이다.  $Q_2$ 가 on 되면 입력측의 전류  $i_S$ 는 증가하기 시작하며, 모터의 상전류  $i_L$ 은 초핑스위치  $Q_2$ 와 다이오드  $D_{A2}$ 를 통해 윗방향으로 흐르게 된다. 상저항성분  $R_L$ 에 의해 윗방향 전류는 서서히 감소하게 된다.  $Q_1$ 이 off 상태이기 때문에  $C$ 는 방전이 일어나지 않고  $V_C$  전압은 계속 유지하게 된다.

**Mode 5(t5-t6):** 초핑 스위치  $Q_2$ 와 모터의 상스위치  $Q_1$ 이 off되며 상전류  $i_L$ 이 zero가 될 때까지의 모드이다.  $Q_1, Q_2$ 가 off되면 입력측의 전류  $i_S$ 는 감소하게 되고  $L_S$ 에 축적된 에너지는 다이오드  $D_{A1}$ 을 통해  $C$ 에 충전된다. 반면 모터의 상전류  $i_L$ 은 감소하여 zero까지 떨어지며  $L_A$ 에 축적된 에너지는  $D_{A1}, D_{A2}$ 을 통해  $C$ 에 충전된다.

**Mode 6(t6-t7):** 초핑 스위치  $Q_2$ 와 모터의 상스위치  $Q_1$ 이 계속 off가 유지되며 아직 zero까지 떨어지지 못한 입력전류  $i_S$ 가 zero될 때까지의 모드이다.

**Mode 7(t7-t8):** 초핑 스위치  $Q_2$ 와 모터의 상스위치  $Q_1$ 가 계속 off가 유지되며  $Q_2$ 가 on 될 때까지의 모드이다. 이때 입력전류  $i_S$ , 상전류  $i_L$ 은 zero가 계속 유지되며  $C$ 에 충전된 에너지 또한 충전방전이 일어나지 않는다.

**Mode 8(t8-t9):** 초핑 스위치  $Q_2$ 는 on 되면서 모터의 상스위치  $Q_1$ 이 off 상태를 계속 유지되면서  $Q_2$ 가 off 될 때까지의 모드이

다.  $Q_1$ 이 off 상태이기 때문에  $C$ 는 충전·방전이 일어나지 않고  $V_C$  전압은 계속 유지하게 된다.

### 3. 실험결과

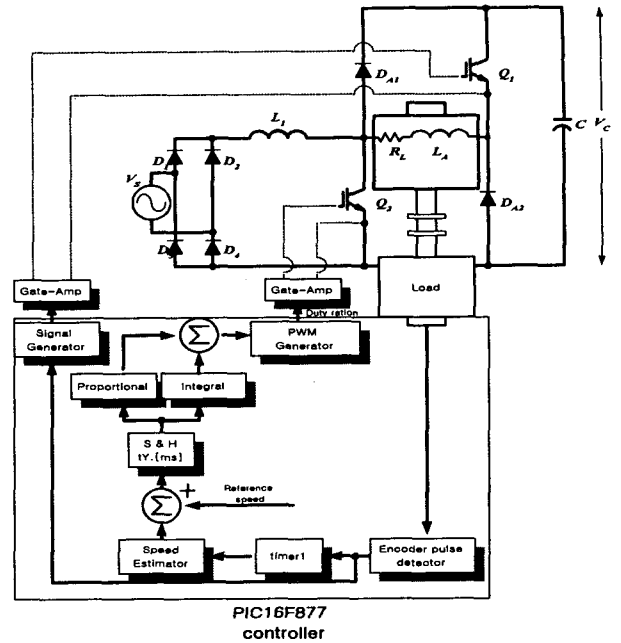


그림 7 전체 시스템 블록도

그림 7는 전체 시스템 블록도를 나타내고 있다. SRM 구동 시스템의 구성은 구동력 발생의 본체인 단상 SRM, 이를 구동시키는 전압형 스위칭 컨버터, Signal Gate Amp 마지막으로 제어부로 구성되어 있다. 제어기로 사용된 프로세서는 PIC16C74이다.

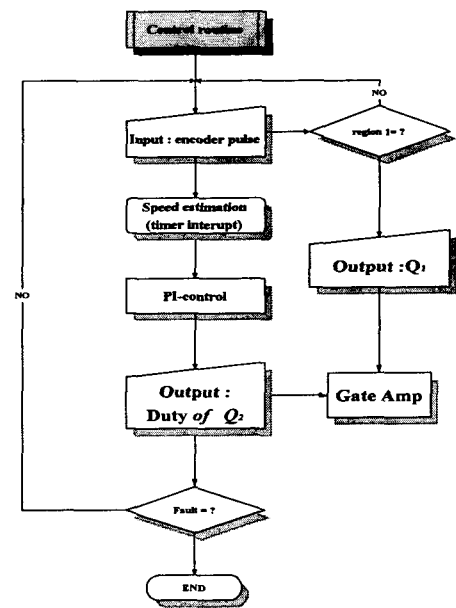


그림 8 제어루틴

그림 8은 샘플링 시간간격마다 발생하는 인터럽트에 의해 실행되는 제어 프로그램의 흐름도를 나타낸 것이다. 제어 루틴에서는 앞서 언급했듯이 피 시험 모터가 기동 펄스, 운전 펄스 두 개의 펄스를 출력하게 되면 이 신호를 Encoder pulse detector가 검출하여 상여자

스위칭을 하게 되고, timer interrupt를 사용하여 12ms 동안 한번씩 모터의 속도를 검출해서 초핑 스위치의 duty ration을 결정하여 모터의 속도를 제어하게 된다.

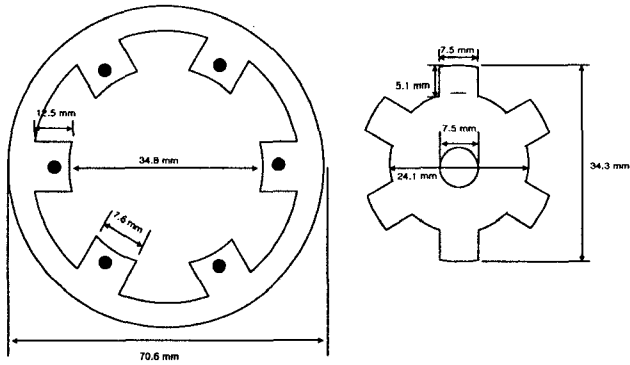


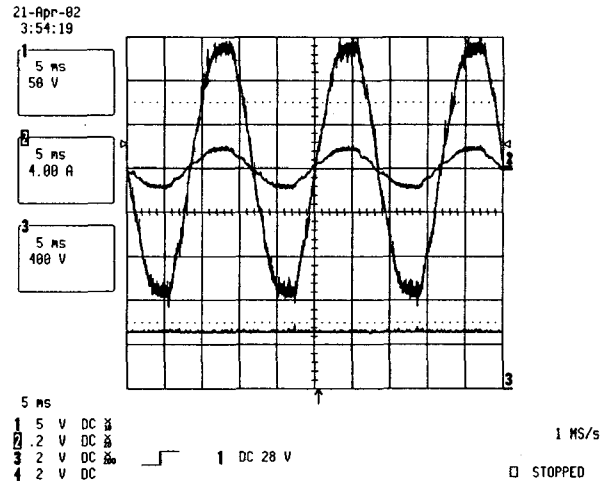
그림 9 피 시험 전동기의 단면도

Parameter	Value	Unit
Input Voltage	100	[V]
Switching Frequency of $Q_2$	10	[kHz]
Filter Inductance of Input	1.6	[mH]
Filter Capacitance of Input	3.6	[ $\mu$ F]
L1 Inductance	1.2	[mH]
DC Link Capacitance	250	[ $\mu$ F]

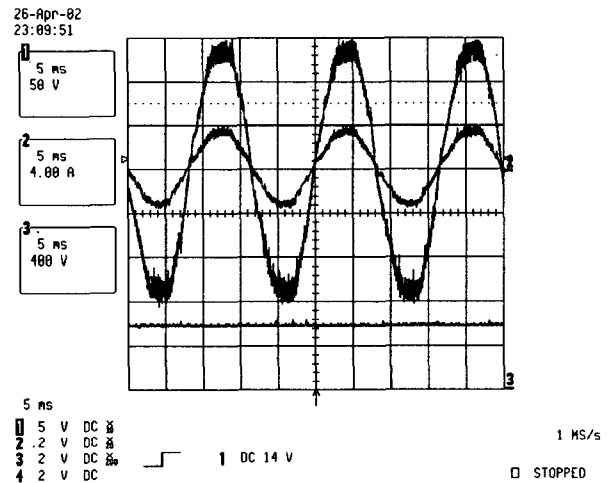
표 1. 시스템의 파라미터

제안하는 시스템에 대한 구동 원리와 이론적 해석을 증명하기 위하여, 1Kw급 단상 6/6 pole SRM을 이용하여 단상 SRM용 PFC 컨버터를 제작하고 실험하였다. 제작한 시스템의 주 스위치는 IGBT(IXSH25N120AU1)로 정격50A, 1200V 정격을 가진다.

을 알 수 있고 입력전압과 전류가 동위상이 되어 양호한 역률이 유지됨을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 10 제안된 1단 방식 저가형 PFC 컨버터

- (a) 12000rpm 경부하 운전시 입력전압, 전류파형, DC Link전압
- (b) 15000rpm 중부하 운전시 입력전압, 전류파형, DC Link전압

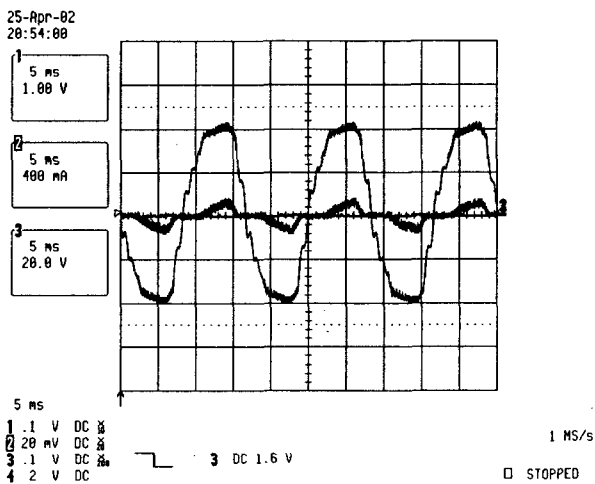


그림 9 기존의 브릿지 정류형

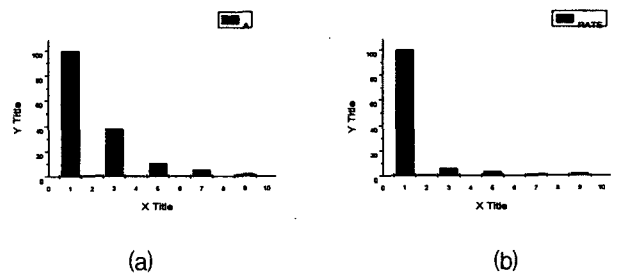


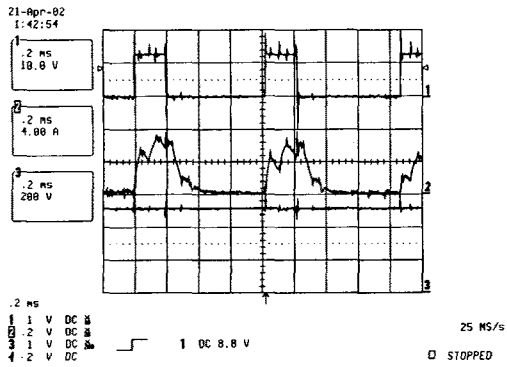
그림 11 FFT 분석

- (a) 브릿지 정류 입력전류 FFT
- (b) 제안한 컨버터 입력전류 FFT

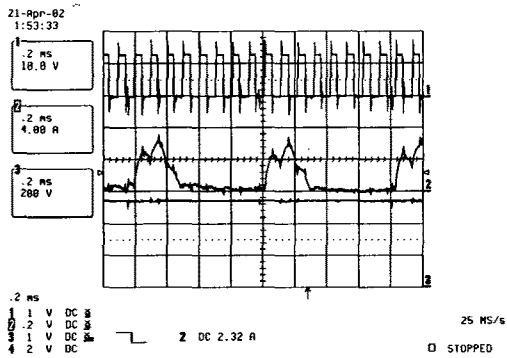
그림 9는 기존의 브릿지 정류방식의 입력전압, 전류 파형이다. 짧은 도통각으로 인한 피크성의 전류가 흐르고 있다. 그림 10은 제안된 1단 방식의 단상 SRM에서의 각속도별 입력전압과 입력전류 파형이다. 속도가 상승함에 따라 입력전류가 상승함

그림 11은 기존의 브릿지 정류방식과 제안된 회로의 입력전류를 FFT분석하여 비교한 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 고조파 성분이 현저히 저감됨을 보여주고 있다.

그림 12과 그림 13은 단상 6/6 SRM에 부하실험에서 각 속도별로 각단의 실험 파형이다. 입력전압을 일정하게 하고 지령속도치를 가변 하였더니 지령치가 올라감에 따라 상여자를 위한 전압원 Vc 전압을 상승시켜주기 위해 Q2 스위치의 Duty ration 이 증가함을 알 수 있었다.



(a)



(b)

그림 12 12000rpm 경부하 시험

- (a) Q1 신호, 상전류파형, DC link단 전압
- (b) Q2 신호, 상전류파형, DC link단 전압

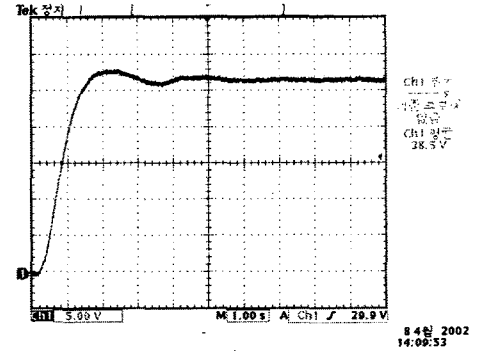


그림 11 속도 응답

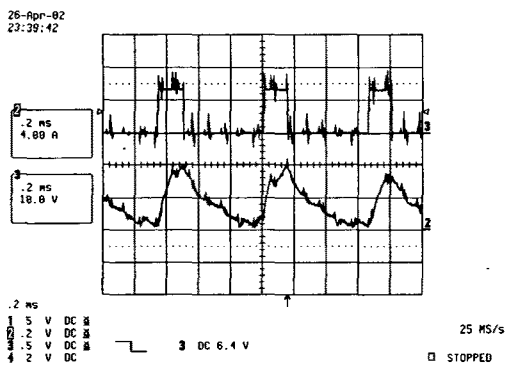
그림 11는 SRM을 지령치를 12000[rpm]한 상태에서 속도 응답을 나타내고 있다. 이상의 실험 결과를 통하여 제안하는 시스템이 이론적으로 해석한 바와 같이 입력 역률을 개선하였으며 지령속도도 양호하게 추종하고 있음을 알 수 있다.

## 4. 고찰 및 결론

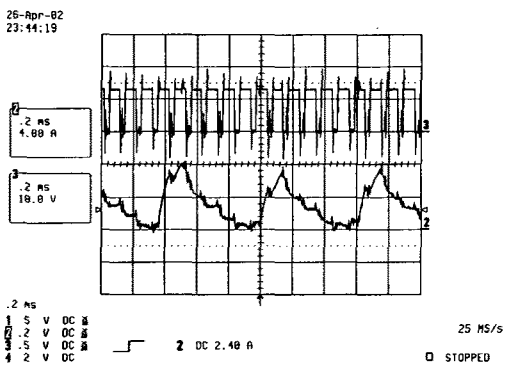
제안된 단상 SRM 컨버터는 추가적인 능동회로 없이 브릿지 정류 방식의 문제점인 역률 개선과 2단방식의 문제점인 효율저감의 문제점을 해결하고 보다 간단한 단상 SRM 컨버터를 제안하였다. 본 논문에서는 1단 방식의 단상 SRM용 컨버터를 사용하여 입력 역률을 개선함과 동시에 경제적으로 저가화를 구현하여 단상 SRM의 실용화 가능성을 실험을 통해 입증하였다.

### 참고 문헌

- (1) R. Krishnam and S.Lee, "Effect of Power Factor Circuit on Switched Reluctance Motor Drives for Appliances", IEEE/APEC, pp.83-89, 1994.
- (2) GHRim et al., "A Chopping Converter for Switched Reluctance Motor with Unity Power Factor and Sinusoidal Input Current". IEEE/PESC, pp.500-507, 1994.
- (3) Lawrenson PJ et al : "Variable-speed switched reluctance motors", Proceeding IEE Vol. 127, Pt.B, pp253-265.
- (4) D. W. J. Puller " New data base for switched reluctance drive simulation." Proc. IEE, Vol. 138, Pt-B, No. 6, pp331-336, 1991
- (5) F. S. Kang et al, "Unity Power Factor Drive of SRM with Single-Stack," IEEE/ISIE, pp.1786-1791, 2001.
- (6) L. Huber, and M.Jovanovic, "Single-stage, Single-Switch, Isolated power supply technique with input-current shaping and fast output-voltage regulation for universal input-voltage-range applications," in Conf. Rec. IEEE



(a)



(b)

그림 12 15000rpm 중부하 시험

- (a) Q1 신호, 상전류파형, DC link단 전압
- (b) Q2 신호, 상전류파형, DC link단 전압

APEC'97, pp.272-280, 1997.

- [7] MH Kheruluwala, R.L. Steingerwald, and R. Gurumoorthy, "Fast response high power factor converter with a single power stage," in Conf. Rec. IEEE FESC'91 pp.769-779, 1991
- [8] G. Hua, E.X. Yang, Y. Jiang, and F.C. Lee, "Novel Zero-current transition PWM converters," in Conf. Rec, IEEE FESC'93, pp.538-544,1993.