



# Buck Converter를 사용한 SRM 피드백 시스템(하)

---

김 상 구 충남대학교 시설과



## 2. SRM의 구동조건

### 다. SRM 제어 이론 및 적용

SRM의 제어이론으로는 Angle Control 방식과 Current Control 방식이 있다. 종래 SRM 일정토크 운전영역에서는 Current 제어 방식이 이용되고, 일정 출력 운전영역에서는 Angle 제어방식이 이용되었다.

이를 다음의 표 2.1에서와 같이 정리해서 살펴볼 수 있다.

본고는 Buck-Converter를 이용하여 단일 펄스 모드로서 전 속도 영역을 제어하기 위해 여자전압을 제어하며 적정 온/오프각을 제어함으로써 토크 사용의 극대화를 도모하였다.

#### (1) 가변 스위칭각 조성방식

전동기의 구동효율을 높이기 위해서는

〈표 2.1〉 SRM 제어방식

구분 제어	Current Control(저속제어)	Angle Control(고속제어)
원리	<ul style="list-style-type: none"> <li>역기전력 &lt; 인가전압</li> <li>인덕턴스 상승률이 느림</li> <li>전류 상승률이 큼</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>역기전력 &gt; 인가전압</li> <li>인덕턴스 상승률이 빠름</li> <li>전류 상승률이 작음</li> </ul>
내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>전류제한(Chopping) → 스위칭에 의한 손실발생</li> <li>도전각을 줄임 → 토크리플이 커지고, 소음이 발생</li> <li>고성능 응용기기(허용토크리플이 작음)에 전류 증첩 방식 채택</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>충분한 전류확보를 위해 점호 각을 앞당김</li> <li>도전각을 늦춤 → 토크리플 발생, 평균토크 감소</li> <li>도전각을 일정하게 함 → 토크리플 경감, 저소음화</li> </ul>

가변부하에서도 토크 발생구간 내에서의 전류 형상이 항상 Flat-top이 되도록 스위칭각을 조정하면 고효율 구동을 할 수 있게 된다. Flat-top전류는 부하가 변함에 따라 Advance 각도,  $\theta_{AD}$ 의 크기와 회전극 위치각인 스위치-오프각,  $\theta_{off}$ 를 동시에 조정해 주어 실현할 수 있다. 토크발생구간 동안 가변부하에 따라서 요구되는 Flat-top전류,  $I_b$ 와 확립하기 위한 Advance각도와와의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\theta_{AD} = \frac{\omega L_{min}}{E} I_b \quad (2.24)$$

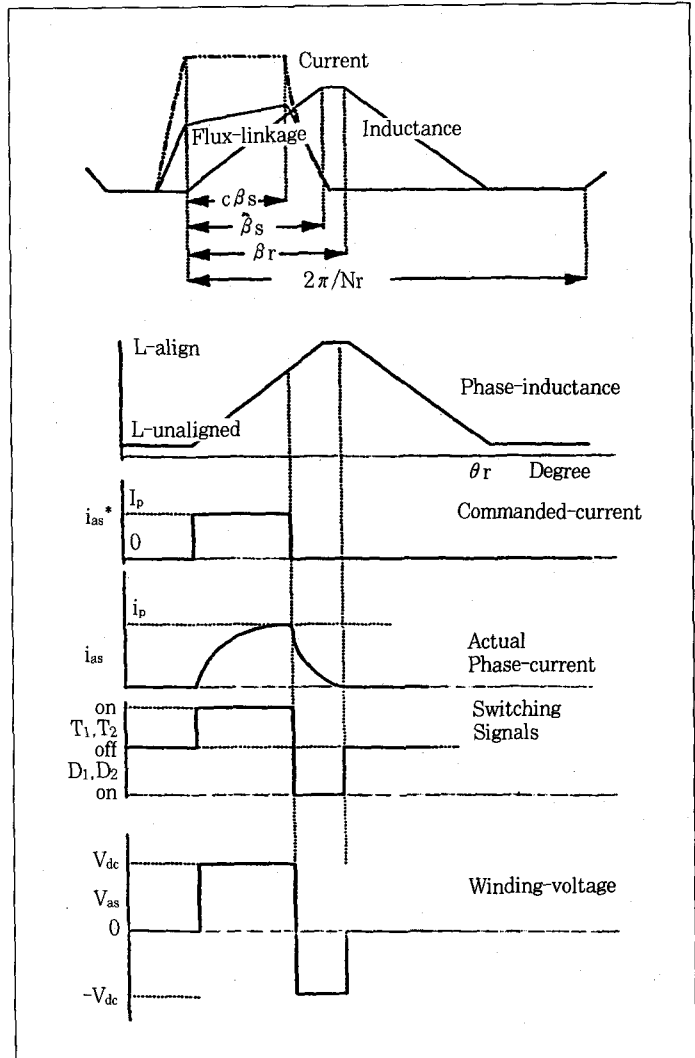
여기서  $\begin{cases} W: \text{회전각속도} \\ E: \text{전압} \\ L_{min}: \text{최소인덕턴스} \end{cases}$

가변 부하에 따라서 Advance각도를 제어하기 위해서는 부하전류를 검출하여 간단한 피드백회로를 구성함과 동시에 효율 향상을 위한 스위치-오프각의 적정제어가 필요하다. 그림 2.8은 스위치-오프각의 적정 제어를 위해 스위치가 도통되어 있는 동안의 각도의 크기인 Dwell각도,  $\theta_{dw} (= \theta_{off} - \theta_{on})$ 를 일정하게 하는 제어이다.

즉, 부하 전류에 따른 Advance각의 증가폭과 스위치-오프각의 감소폭을 일정하게 하여 그 합인  $\theta_{dw}$ 를 일정제어하는 방식이다.

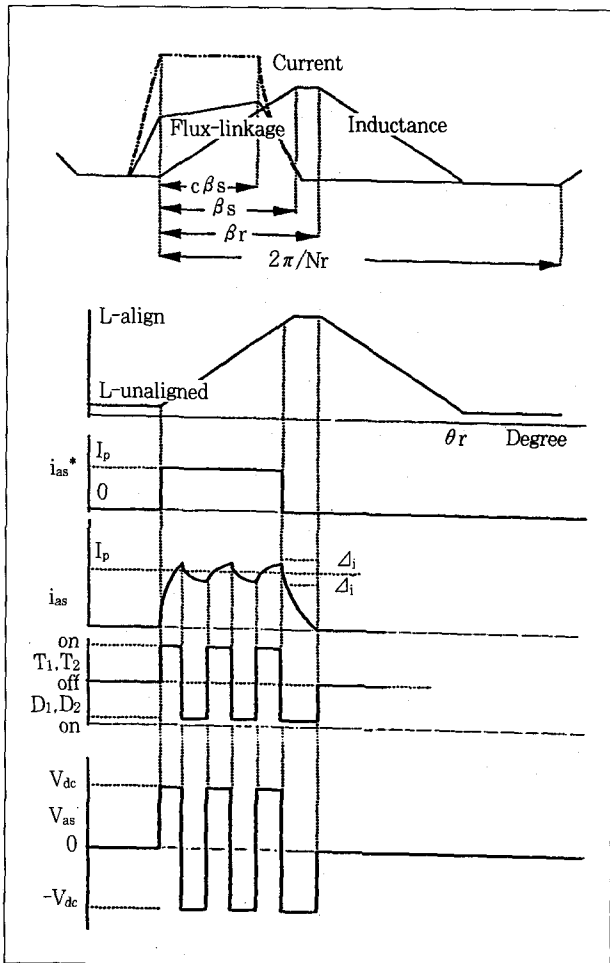
(2) 전류 제어방식

SRM의 토크 방정식에서 살펴볼 수 있었던 것과 같이 토크는 전류의 제곱에 비례하여 커짐을 알 수 있다.



〈그림 2.8〉 Angle Control

따라서 일정 토크를 가지며 고효율의 구동을 위해서는 SRM의 인덕턴스 프로필이 증가하는 구간에서의 전류의 확립 파형이 Flat-top되는 것을 요구하게 되며, 이는 전동기의 고효율 차원에서 뿐만 아니라 전동기의 토크 불연속으로 인한 토크리플 및 진동, 소음의 최소화에도 중요한 요인이 된다. 따라서 SRM의 제어방식 중 전류제어는 저속운전시 전류파형을 PWM (펄스 폭 변조방식)함으로써 전류가 평활하도록 한다. 한편 전동기 각상에 전류를 충분히 확립하기 위해서는 인덕턴스 프

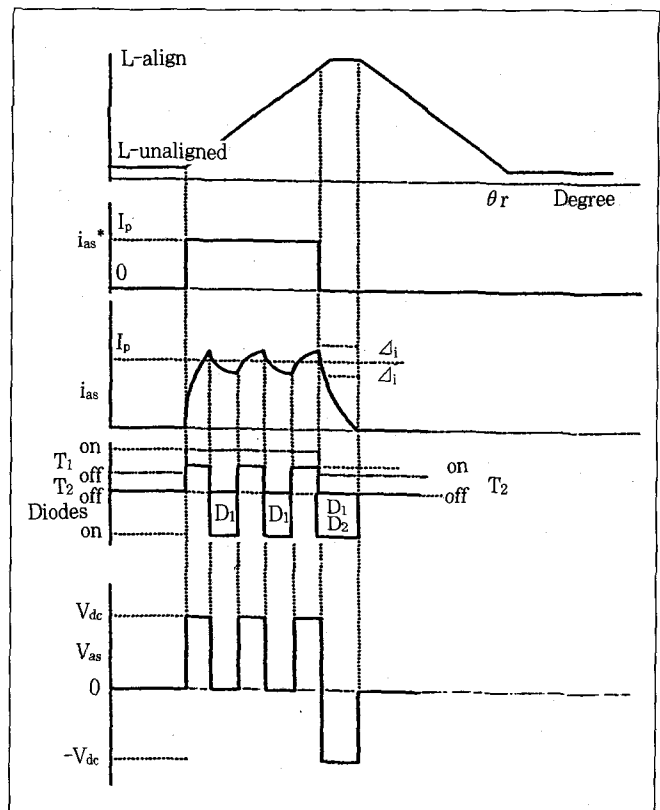


〈그림 2.9〉 전류제어(I)

로필이 증가하기 시작하는 각보다 앞선 Advance각,  $\theta_{AD}$ 에서 스위칭한다.

전류제어방식은 저속운전시에 사용하며 그림 2.9는 스위치  $T_1, T_2$ 가 ON한 후 동시에  $T_1, T_2$ 가 OFF를 행하므로 스위칭이 이루어지며 필요 이상의 전류가 상승할 때 전류 크기를 초평하게 된다. 한편 이 방식은 DC 전원측의 커패시터에 많은 리플전류가 흐르게 되며 스위칭 소자의 빈번한 ON, OFF동작으로 인해 스위칭 손실이 발생하게 된다.

또다른 전류제어방식으로 그림 2.10은 스위칭은 그림 2.9와 같으나 전류감쇄가 느리며 스위칭 주파수를 줄임으로써 스위칭 손실과 커패시터의 리플전류를 감

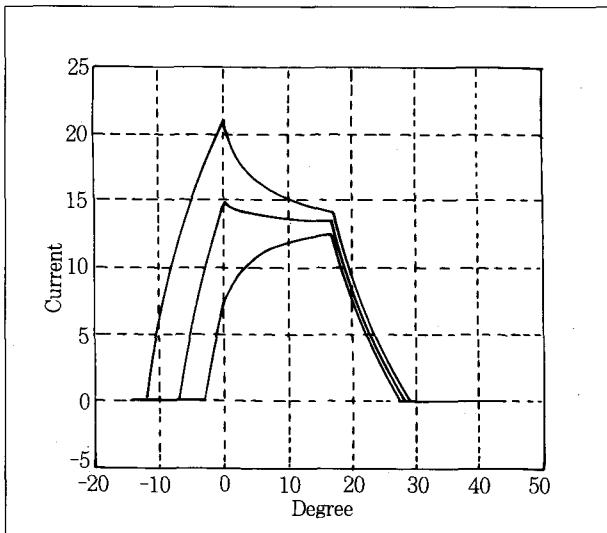


〈그림 2.10〉 전류제어(II)

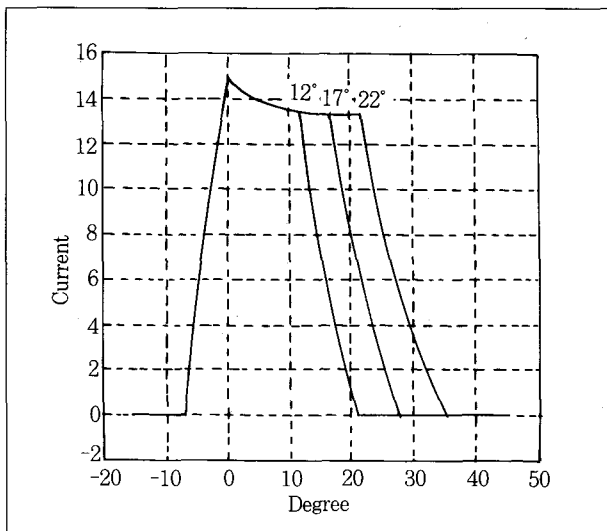
소시킬 수 있다.

## 라. Angle Control 시뮬레이션 전류 파형

스위칭 ON, OFF에 따른 전류파형 그림 2.11은 스



〈그림 2.11〉 스위칭 ON각에 따른 전류 파형



〈그림 2.12〉 스위칭 OFF각에 따른 전류 파형

위치 OFF각을 고정하고, ON각을 변화시켰을 때의 시뮬레이션 파형이다. OFF각을  $17^\circ$  로 고정하고, ON각을 각각  $-12^\circ$ ,  $-7^\circ$ ,  $-3^\circ$  로 하였을 때의 전류파형이다. 이 파형에서 알 수 있듯이  $0^\circ$  이전에 확립되는 전류는 기울기가 같으나  $0^\circ$  이후에는 각각 인덕턴스 상승과 속도 역기전력으로 인하여 기울기가 다르다.

그림 2.12는 스위치 ON각을 고정시키고, 스위치 OFF각을 각각  $12^\circ$ ,  $17^\circ$ ,  $22^\circ$  로 했을 때의 전류 파형이다. 그림과 같이 스위치 ON시점이 같아 전류 상승기울기는 서로 비슷하고 스위치 OFF각이 커질수록 전류는 커지나 인덕턴스가 커짐에 따라 전류의 상승 기울기가 완만해진다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

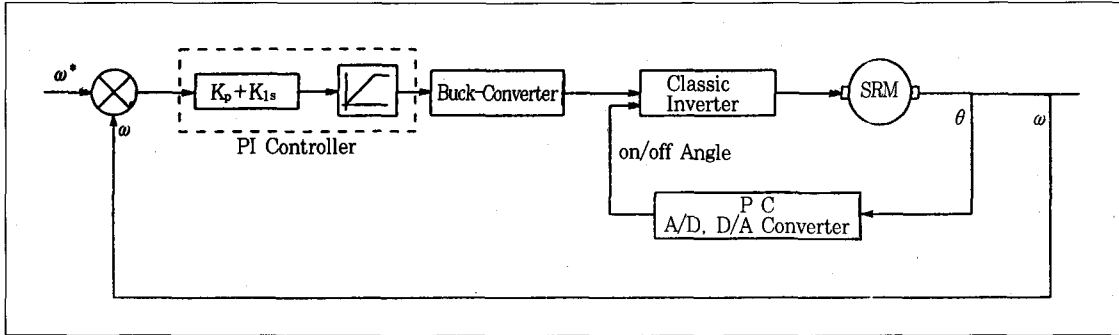
### 가. SRM 구동 시스템

#### (1) 전체 시스템 구성도

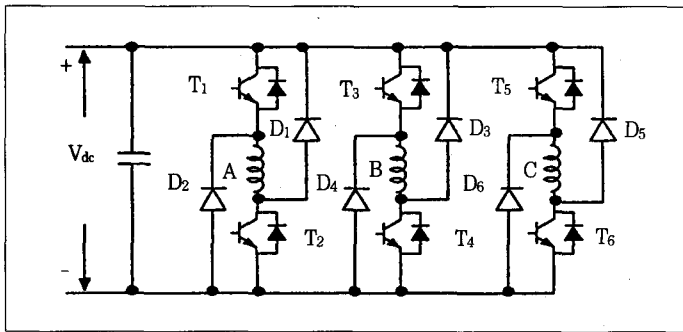
SRM속도제어시스템의 전체블록도는 그림 3.1과 같다. DC링크 전압은 초퍼로 제어되는 평균 상전류값으로 제어되며 그 크기는 식(2.6)에 의해 얻어지고, 스위칭은, 오프각은 식(2.4)와 식(2.5)와 같은 일정한 값으로 구동된다. 전체 제어시스템은 마이크로 프로세서 및 PCL 818 A/D Converter로 구성하였다.

#### (2) 구동용 인버터

SRM의 구동 특성은 SRM의 설계 방식과 구동을 위한 Inverter의 Topology에 의해 가장 크게 좌우된다. SRM을 구동하기 위한 Inverter 회로는 그림 3.2와 같이 고정자 한 상당마다 각각 2개의 스위칭 소자가 연결되어 있어 각 상이 다른 상에 의해 영향을 받지 않으



〈그림 3.1〉 SRM 속도제어시스템의 블록도



〈그림 3.2〉 Asymmetric Bridge Converter(클래식 인버터)

며 독립적으로 제어가 된다. 또한, 다른 Inverter Topology에 비하여 제어방식이 다양하며 제어하기가 간편하고 소자가 소손될 경우 그 영향을 극소화할 수 있다는 장점이 있다.

예를 들어, A상이 여자된다고 할 경우 Inverter의 동작은 다음의 3가지 상태로 나누어진다.

- 상태 1 : Q<sub>1</sub> 과 Q<sub>2</sub>가 ON되는 경우, 여자 상태
- 상태 1 : Q<sub>1</sub> 또는 Q<sub>2</sub>가 OFF되는 경우, Freeling 상태로서 고정자 권선은 단락 상태가 되며 感磁率은 극히 낮음.
- 상태 3 : Q<sub>1</sub>과 Q<sub>2</sub>가 OFF. 강제 감자 상태. 전류가 Capacitor를 통해 충전

#### 나. Buck Converter 구동용 IGBT Driver

IGBT는 절연 게이트형 바이폴러 트랜지스터 (Insulated Gate Bipolar Transistor)로, MOSFET의 고속 스위칭, 전압 구동 특성과 바이폴러 트랜지스터의 저 ON 전압 특성을 원칩으로 구성한 파워 소자이다.

IGBT는 최근의 파워 일렉트로닉스 분야에 있어서 가장 주목되고 있는 소자의 하나이다.

칩 구조 설계의 최적화나 대용량 메모리의 프로세스 기술의 응용으로 최근 대폭적인 특성의 개선이 진행되어 왔다. IGBT는 범용 인버터, AC서보나 무정전 전원(UPS), 스위칭 전원 등의 산업 분야를 비롯하여 전자 레인지, 취사기, 스트로브 등의 민수 기기 분야로 응용이 확대되어 종래의 파워 트랜지스터를 능가하고 있다. IGBT는 또는 차세대로 개발이 진행되고 있으며, 새로운 칩 구조를 사용한 보다 저 ON전압의 것이 개발되어 응용 장치의 저손실화나 고효율화가 도모되어 갈 것으로 생각된다.

##### (1) IGBT 구동 회로

메인 스위칭 소자인 IGBT를 구동하는데 있어서 가

장기본적인 항목이 게이트드라이브의 설계이다. IGBT는 MOSFET와 같이 전압 구동형 소자이며, 게이트의 입력 임피던스가 아주 높고 용량성이다. IGBT의 게이트 드라이브 회로 설계시의 키포인트는 게이트 전압의 결정법, 게이트 저항의 결정법 및 배선방법이다.

설계의 키포인트로는

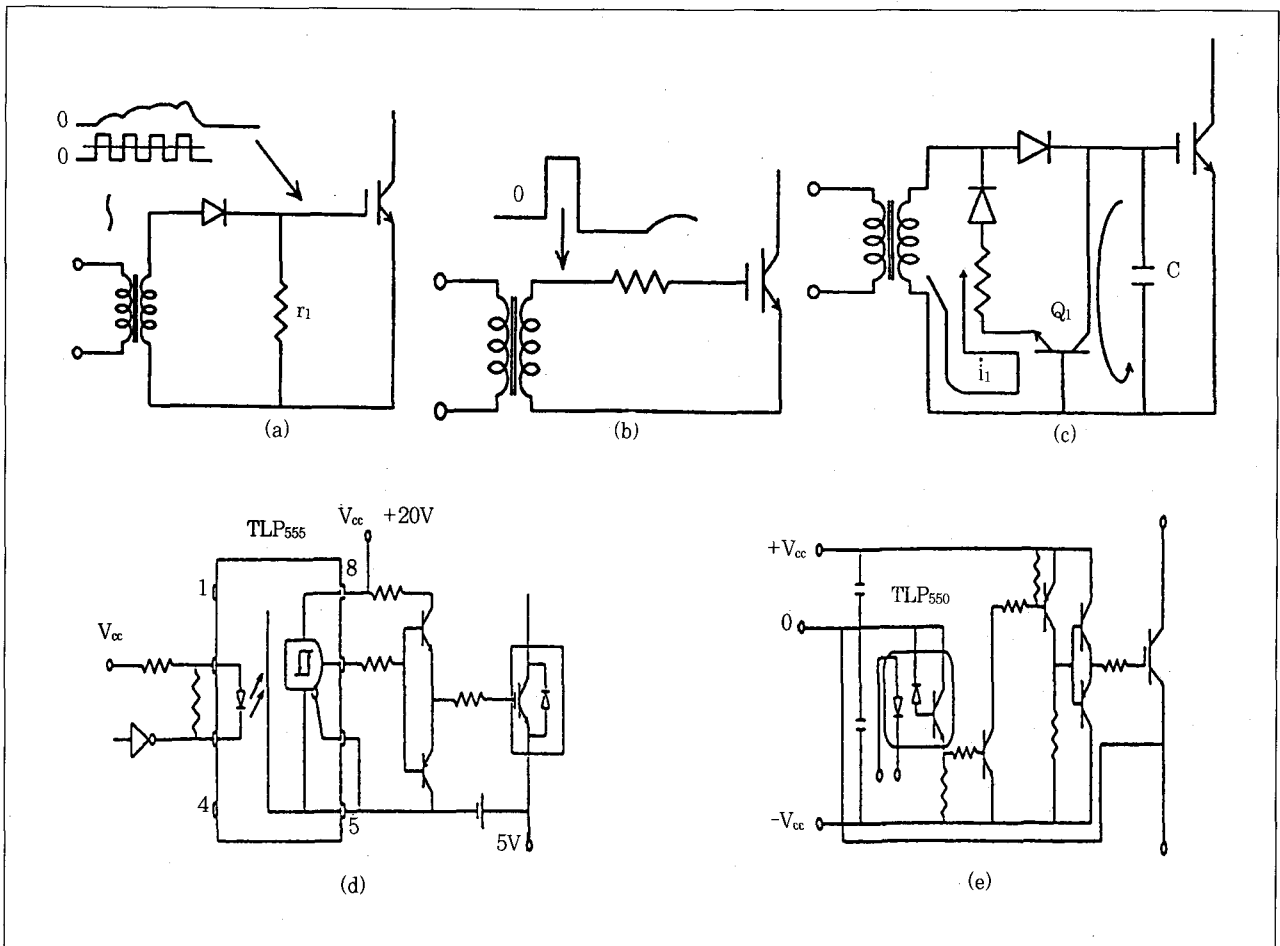
첫째, IGBT의 단락내량과 전력손실의 트레이드 오프에 의해 게이트 전압은 그림 3.3(e)를 예로 들면

$+V_{CC} = 15V \pm 10\%$ ,  $-V_{CC} = 5 \sim 10V$ 로 선택한다.

둘째, 입력 게이트 용량은 IGBT의 전류 정격에 비례하기 때문에, 대용량 IGBT에서 충방전 전류의 피크값은 수A 필요하게 된다.

셋째, 게이트 저항은 서지 전압 [ $\infty di/dt$ (전류변화율)]과 스위칭 손실이 트레이드 오프로 최대값을 선택한다.

넷째, 포토 커플러는 고CMRR(코먼 모드 제거비), 고  $dv/dt$ (전압 변화율)내량의 것을 사용한다. 또 1차, 2차간의 패턴 배선에 의한 부유용량을 없앤다.



<그림 3.3> IGBT 게이트 드라이브 회로방식

다섯째, 게이트 회로의 폐회로 면적은 유도 노이즈를 받지 않도록 가능한 작게 한다.

(가) 구동회로방식

IGBT의 게이트 구동 회로 방식은 크게 펄스트랜스를 이용하는 방법과 포토커플러를 이용한 방식으로 분류할 수 있다. 펄스트랜스를 이용하는 방식은 구동신호의 절연과 구동 전력을 겸하고 있는 면에서 유리하지만 사용주파수의 제한이 따르는 단점이 있다. 그림 3.3은 여러가지 IGBT 게이트 드라이브 회로방식을 보여준다.

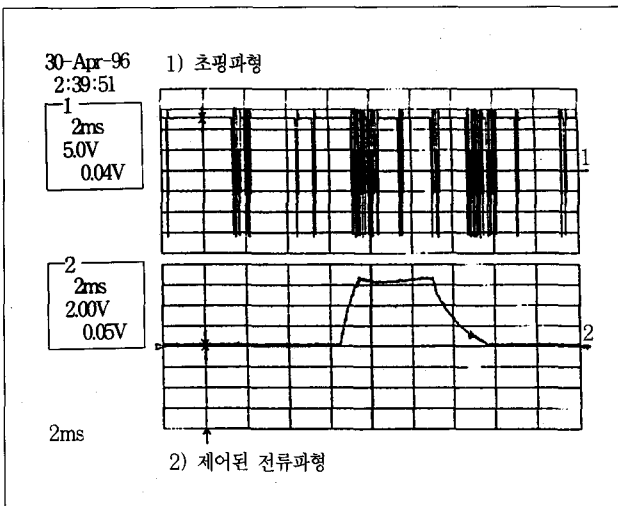
- (a) 회로는 IGBT 게이트 입력 콘덴서가 필터효과를 지니므로 방전시정수가 길어 고주파 스위칭에 부적합하다.
- (b) 회로는 펄스 구동방식으로 고주파 스위칭에 적합하나 ON/OFF 펄스폭에 제한이 따르게 된다.
- (c) 회로는  $i_2$  전류를 홀림으로써 콘덴서로부터  $i_2$  전류를 흘려 비교적 고속 스위칭이 가능한 방식이다. 이에 반해 포토커플러 방식은 절연된 직류전

류와 포토커플러로 구동신호를 전달하고 이를 증폭하여 사용하는 방식으로 회로가 약간 복잡한 단점이 있지만, ON/OFF 펄스폭에 제한이 없으며, 동작 속도도 매우 빠르므로, 고주파 스위칭에 유리하다.

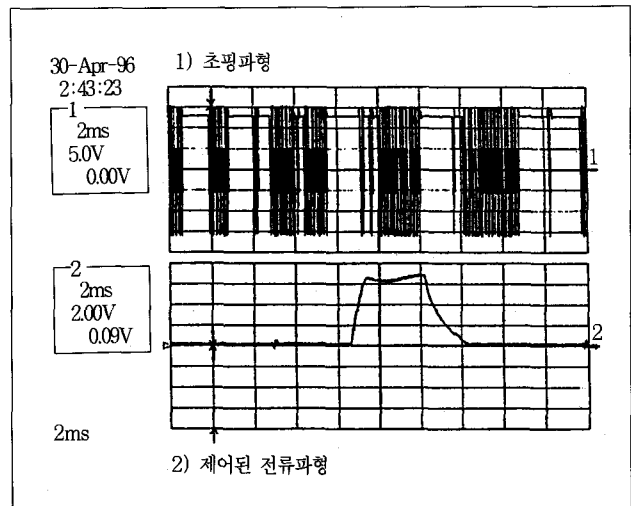
- (d) 회로는 음바이어스를 제너 다이오드로 만들며 소용량 소자에 적합하다.
- (e) 회로는 2전원 방식으로 대용량 소자에 신뢰성 있는 회로 방식이다. 컨버터에 이용한 IGBT 구동회로는 고속 포토커플러를 이용한 회로로, 포토커플러는 커먼모드 노이즈에 대하여 강하고, 절연내압이 회로의 전압에 적합한 Toshiba사의 TLP250을 이용하여 드라이브 회로를 설계하였다.

다. 실험 결과 및 고찰

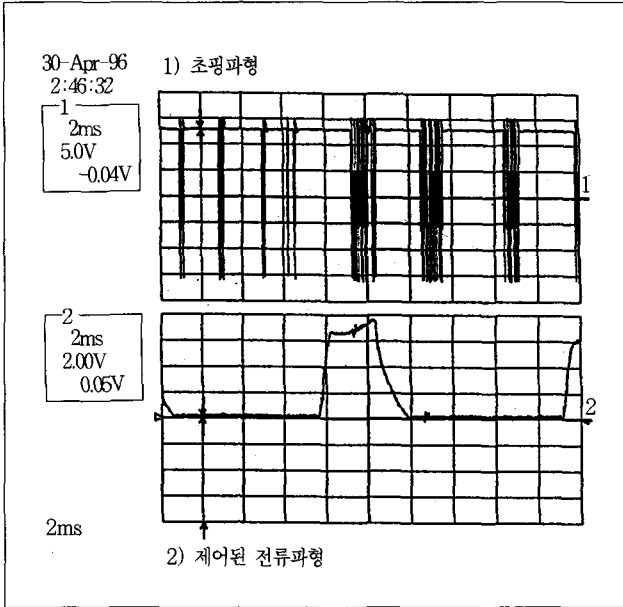
- (1) 속도 가변과 Buck-converter Duty Ratio 제어에 따른 전류제어파형(그림 3.4~3.9 참조)



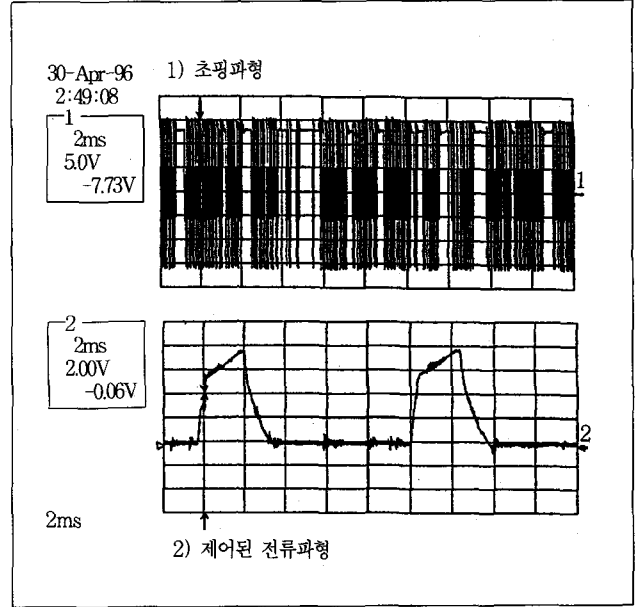
〈그림 3.4〉 SRM 750rpm 구동시



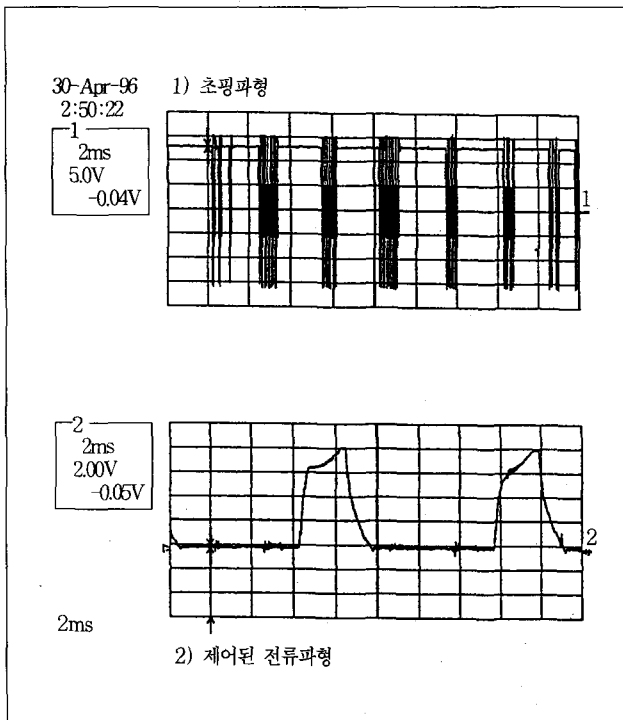
〈그림 3.5〉 SRM 1000rpm 구동시



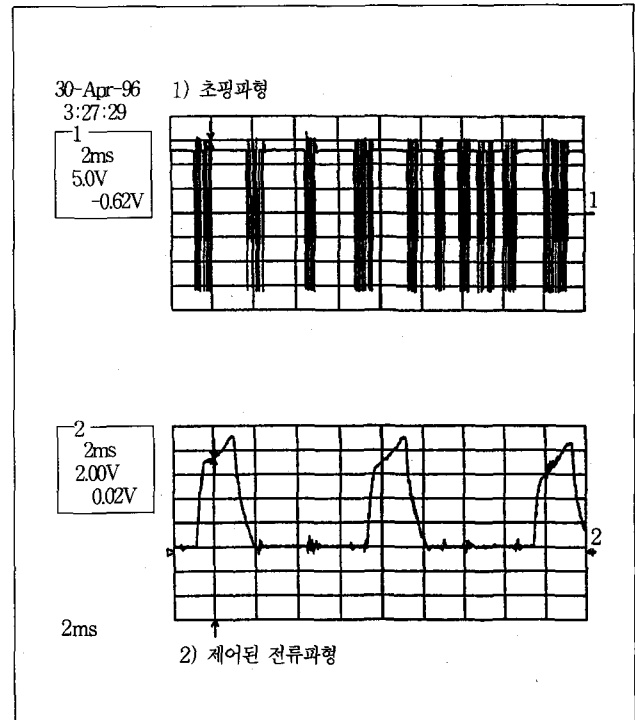
<그림 3.6> SRM 1300rpm 구동시



<그림 3.7> SRM 1450rpm 구동시



<그림 3.8> SRM 1600rpm 구동시



<그림 3.9> SRM 1850rpm 구동시



## 4. 결 론

본고에서는 이중 돌극형의 자기적 구조를 가진 SRM에 적합한 여자방식을 이용하여 SRM의 고출력화와 속도제어가 가능한 디지털 가변속 구동시스템을 구현하는 것으로, 구성 제안한 제어방식의 타당성을 증명하였다.

Buck-Converter를 설계 제작하였으며 고주파스위칭을 통하여 인덕터의 용량을 줄일 수 있었고 고속 및 저속의 넓은 영역에서 속도나 토크명령이 증가하면 Buck

Switch의 Duty Ratio를 제어하여 필요한 전압을 얻어 모터의 여자에 의한 속도제어가 가능하였다. 저속 운전시는 충분한 전류 상승이 가능하였고 고속운전시에는 전류인가 시점을 앞당기는 Advance Angle의 확보로 전류확보를 고속에서도 충분히 하도록 도모하였다.

SRM의 향후 연구분야로 CAD, 유한요소법 등을 이용한 전동기 설계 프로그램 개발이나, Sensorless 구동 실현으로 저가의 시스템으로 구동가능하게 하며 고출력 Converter의 개발 및 제어회로의 디지털화로 다기능 및 간편성을 도모하여야 하겠다. ■

### 참 고 문 헌

- 1) MUHAMMAD H.RASHD, et al., "Power Electronics Circuits, Devices, And Applications" pp317~320, 1993.
- 2) P.J.Lawrenson, et al., "Discussion on Variable-speed switched-reluctance motor systems," Proc. IEE, Vol.128, Pt.B, No.5, pp260~268, 1981.
- 3) A.E. Fitzgerald, et al., "Electric Machinery", McGraw-Hill Pub. pp446~484, 1991
- 4) S.Vukosavicand, and V.R. Stefanovic, "SRM Inverter Topologies : "A Comparative Evaluation, IEEE Trans Ind. Appl., Vol 27, No. 6, pp1034~1047, Nov/Dec. 1991.
- 5) P.J. Lawrenson, et al., "Variable-Speed Switched Reluctance Motors", IEE Proc., Vol. 127, Ptb, No. 4, pp253~265, July 1980.
- 6) Slobodan Vukosavic and Vitor R.Stefanovic : "SRM Inverter Topologies : A Comparative Evaluation," IEEE Trans. on IAm Vol. 27, No.6, pp1034~1047, 1991.
- 7) Graham E.Dawson, Anthony R. Eastham and Jerzy Mizia : "Switched-Reluctance Motor Torque Characteristics : Finite-Element Analysis and Test Results," IEEE Trans. on IA, Vol 23, No.3, pp532~537, 1987.
- 8) 황영문, 김정홍, 공관식, 안진우, "SRM의 고효율구동을 위한 가변 스위칭각 조정방식", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, 94. 7.
- 9) 김철우, 박성준, 변영복, 권순재, "토오크 사용영역의 극대화를 위한 Single-Salient Type SRM의 구동 회로 및 제어방식에 관한 연구" 대한전기학회 하계학술대회 논문지. 94. 7
- 10) 성세진, 오성업, 정승주, 오인석, "SRM 구동용 인버터 토폴로지의 특성비교에 관한 연구". 대한전기학회 하계학술대회 논문지 A권, pp328~330, 1995. 7