

## 단상 SRM의 고역률 구동회로에 관한 연구

홍 정표\*, 이 상훈\*\*, 박 성준\*\*\*, 안 진우\*\*, 권 순재\*\*\*\*, 홍 순일\*\*\*\*, 김 철우\*  
 부산대학교\*, 경성대학교\*\*, 동명대학\*\*\*, 부경대학교\*\*\*\*

### A Study On the Single Phase SRM Driver of High Power Factor Connection

Jeng-Pyo Hong\*, Sang-Hun Lee\*\*, Sung-Jun Park\*\*\*,

Jin-Woo Ahn\*\*, Soon Jae Kwon, Soon-Il Hong, Cheul-U Kim

Pusan National Univ.\*, Kyungseung Univ.\*\*. Dongmyung College\*\*\*. Pukyong National Univ.\*\*\*\*

**ABSTRACT** - In this paper, the development of input power factor and harmonic distortion of line current were showed in the proposed single-stage SRM inverter. It is verified from the experiments that the proposed encoder and logic controller can be a powerful candidate for the practical low cost SRM drive.

#### 1. 서론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)를 구동하기 위한 사용되는 DC전원은 일반적으로 입력단에 비록성 커패시터를 가지게 되는데, 이는 입력 인덕터와 커패시터의 값에 따라 짧은 도통각으로 인한 피크성의 전류가 흐르게 된다. 따라서 입력전압과 입력전류가 동위상이 되지 않아 역률이 0.6정도로 낮을 뿐만 아니라 불필요한 무효전력의 발생으로 에너지 효율이 감소된다.

최근 이러한 낮은 역률에 대한 문제점을 해결하기 위해서 SRM 구동회로에 역률 보상회로를 적용하기 위한 연구가 진행되고 있는 실정이다. 그러나, 이들 역률 보상회로는 2단방식의 구조로 단지 DC전원으로 이용되는 커패시터 앞단에 역률 보상회로를 부가하여 역률을 보상하고 있다. 2단 방식을 이용하는 역률 보상회로는 1단 방식에 비하여 구성이 복잡하고, 소자의 수가 증가하여 경제적으로 불리하다. 본 연구에서는 부가적인 능동 회로가 없이 SRM 구동회로를 1단 방식으로 구성하여 2단 방식의 역률 보상회로와 비교하여 간단하면서도 단위 역률이 가능한 SRM 구동회로를 제안한다.

#### 2. SRM의 동작원리와 제안된 인버터

##### 2.1 SRM의 전동력 발생

SRM은 릴럭턴스 토오크를 동력화한 전동기로, 릴럭턴스 토오크를 극대화를 위해서는 고정자와 회전자 자극이 모두 돌극형의 2중 돌극형(salient-pole type) 구조로 함이 바람직하며, 여자권선은 고정자 자극에만 집중권으로 하는 단순한 전자계구조로서도 효과적인 전동력을 발생시킬 수 있는 특징을 갖고 있다. 동력변환용 SRM의 고정자와 회전자 자극 조합은 현재까지의 연구결과 6/4, 8/6, 12/8 극의 조합이 가장 실용성이 큰 것으로 입증되고 있다[2]. 그러나 이 경우 스위칭 수의 증가로 경제적인 면에서 불리하다. 이러한 스위칭 소자 수의 감소를 위한 한 방식이 단상 SRM이다. 그림 1은 6/6 자극을 갖는 단상 SRM 및 Classic 인버터의 개략도이다.

그림 2에서 보는 바와 같이 단상 SRM은 로터의 위치에 따라 기동토크가 발생하지 않는 영역이 존재한다. 따라서 초기 기동위치에 따라 정역방향이 결정된다.

본 연구에서는 환풍기용으로 한 방향으로 회전방향을 결정하기 위해 파킹마그네트를 채용하였으며 그 위치는

그림 2에서와 같이 인덕턴스가 증가하기 시작한 점으로부터 4° 변위를 갖고 있다.

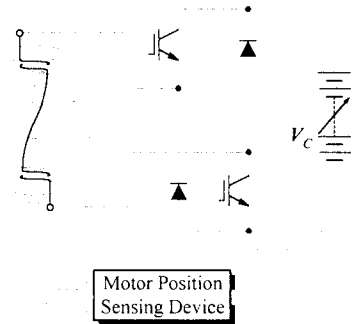


그림 1 단상 SRM의 개략도

Fig. 1 Schematic diagram of Single-Phase SRM

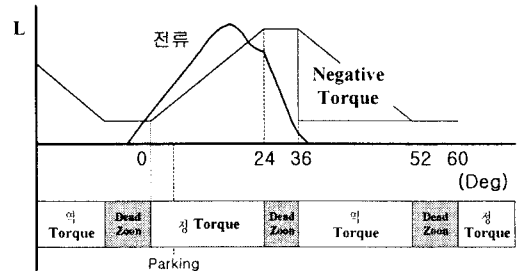


그림 2 단상 SRM의 운전특성

Fig. 2 Operation characteristics of Single-Phase SRM

SRM에서의 전동력 발생은 여자된 자기회로에서 자기 릴럭턴스(magnetic reluctance)가 최소가 되는 방향으로 토오크가 발생하며, 이 때 상당 발생토오크의 크기는 식 (1)에서와 같이 상권선에 흐르는 전류  $i$ 의 제곱과 회전자 위치각  $\theta$ 에 대한 인덕턴스  $L$ 의 변화율에 비례한다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (1)$$

SRM에서 고정자와 회전자 자극수가 결정되면 회전자 위치각에 동기시켜 상전류를 형성하여 구동하게 된다. 이때 전압방정식은 식 (2)와 같다.

$$V = Ri + \frac{dL(\theta, i)i}{dt} \quad (2)$$

식 (2)에서 알 수 있듯이 상권선의 인덕턴스는 회전자 위치에 따라 회전자의 위치각의 함수로 주어지므로 하나의 함수로 표현하기가 어렵다. 따라서 SRM의 인덕턴스 프로파일로 인하여 상전류를 해석하기 위해서는 몇 개의 모드로 나누어 해석하는 것이 편리하다.

먼저 여자 모드는 고정자 극과 회전자 극이 중첩되지 않은 상태인 인덕턴스가 최소가 되는 영역에서 인가전압을 인가하여 평활전류를 필요로 하는 전류정착의 경우로 이 영역에서는 속도 기전력은 없다. 따라서 이때의 상단 전압방정식은 다음과 같이 된다.

$$V = Ri + L_n \frac{di}{dt} \quad (3)$$

단,  $L_n \cong$  minimum inductance

여기서 스위칭 전류는 회로 시정수에 따른 급격한 상승이 이루어지며 그 크기는 권선 저항을 무시하면 최소 인덕턴스의 값과 여자 전압에 따라 정하여 진다. SRM에서 출력비를 높이는 한 방법으로 적은 영역의 최소 인덕턴스 구간을 두는 것이다. 그러나 이로 인하여 일반적인 SRM 드라이버에서는 평활전류 정착을 위한 시간이 부족하게 된다. 이 평활전류 정착을 위한 시간을 최소화하기 위해서는 높은 여자전압이 필수적이다.

구동 모드는 고정자와 회전자의 극이 중첩되어지는 구간으로 자속은 증가하며 속도기전력 또한 크게 작용한다. 이때의 회로방정식은 다음과 같이 된다.

$$V = Ri + L(\theta) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega \quad (4)$$

이 식을 바꾸어 쓰면 다음과 같이 된다.

$$V_i - E_s - Ri = L(\theta) \frac{di}{dt} \quad (5)$$

$$\text{여기서 } E_s = i \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega$$

지금 인가전압,  $V_i$ 와 속도기전력,  $E_s$  및 저항의 전압강하의 합을 동일하게 조정하면 식 (5)의 오른쪽 값은 0이 되며,  $\frac{di}{dt} = 0$ 이 되어 평활전류(flat-topped current)상태가 될 것이다. 그러나 이러한 조건은 그림 2와 같이 어드밴스 스위칭각  $\theta_{ad}$ 을 고정하여도 상전류 확립시 인가전압의 크기에 따라 확립되는 전류값이 달라지게 된다. 그림의  $\theta_{min}$ 과  $\theta_{max}$ 는 각각 고정자와 회전자의 극이 서로 겹쳐지기 시작하여 완전히 일치할 때의 회전자각도를 나타낸다.

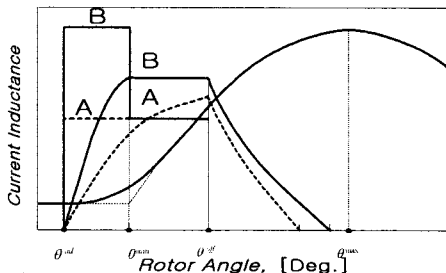


그림 3 스위칭 온 각에 따른 상전류 파형  
Fig. 3 Phase current waveform with on switching angles

그림 3은 스위칭 온, 오프각을 고정시켜 두고 평활전류 정착을 위한 여자전압을 조정했을 경우로써, A의 파형은 인덕턴스 증가영역에서 전류의 크기가 회전각속도에 의한 역기전력이 인가전압보다 적은 경우이다. 이것은 최소인덕턴스영역에서 전류가 부족 확립되었을 때 나타나며 상전류 파형은 토오크 발생구간에서 전류의 변화율이 0이되므로 발생 토오크도 일정하지 않고 토오크 맥동도 심하다. 그러나 전류정착을 위해 큰 여자전압을 인가한 경우로 토오크 발생 구간에서 일정한 전류를 가지는 B의 상전류 파형은 인덕턴스의 변화율이 일정하면 평활한 토오크를 발생하고 토오크 맥동이 적어 전동기를 효율적으로 운전하기 위한 기준전류가 된다.

감자 모드는 상스위치를 오프한 상태이며 자기회로에서의 자기에너지가 전원으로 회수되어 전류가 감쇄하는 상태이다. 이 상태는 고정자와 회전자 각이 중첩되어지는 구간에서 행하면  $dL(\theta)/d\theta$ 는 정(+)이 되고 속도기전력,  $E_s$ 도 정(+)의 값이 되어 회로방정식은 다음과 같다.

$$-V_i - E_s - Ri = L(\theta) \frac{di}{dt} \quad (6)$$

이러한 감자 구간에서는 상권선에서는 역전압의 속도기전력과 역전압으로 작용하는 전원전압의 합이 큰 역전압에 의하여 전류의 값이 급격하게 감쇄한다. 그리하여 상권선에 축적된 자기에너지는 전원으로 회수된다.

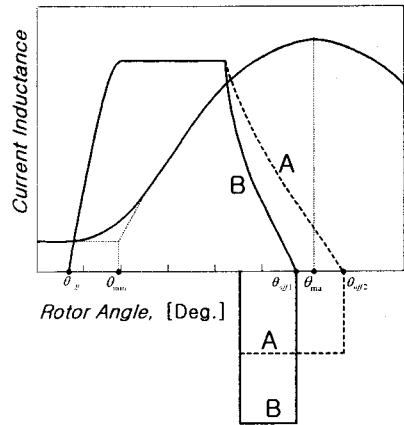


그림 4 스위칭 오프 각에 따른 상전류 파형  
Fig. 4 Phase current waveform with off switching angles

그림 4은 스위칭 온, 오프각을 고정하여 두고 스위칭 감자전압을 가변시켰을 경우로써 A파형인 경우는 낮은 감자전압으로 전류소화가 신속히 이루어지지 않아 부토크가 발생하는 형태가 되나, B파형인 경우는 높은 감자전압을 인가한 경우로 부토크가 발생하지 않는다. SRM을 구동함에 있어 OFF각이 최대 인덕턴스 점에 가까울수록 토오크 발생영역의 활용도가 높아져서 정 토오크의 발생에 유리하나, 너무 크게 하면 역 토오크의 영향을 받을 수 있어 토오크 맥동을 유발하고 기계적 출력이 오히려 감소할 수 있다. 따라서 릴럭턴스 토오크를 효과적으로 이용하기 위해서는 높은 감자전압이 필수적이다.

## 2.2 SRM구동과 입력역률

SRM구동에 있어서 직류전원은 필수적이다. 일반적으로 직류전원은 AC/DC 전력변환기는 위상제어정류기나

출력을 제어할 수 없는 다이오드정류기를 사용해왔다. 그러나 이와같은 AC/DC 변환장치에서는 AC 전원단에서 전류도통각이 협소해져 필스상의 전류가 흐르기 때문에, 변압기 이용률과 역률이 나빠질 뿐만 아니라 선간전류의 고조파 성분이 상대적으로 증가한다. 또한 위상제어 정류기일 경우 점호각을 증가할수록 역률이 낮아지는 단점을 있다. AC/DC 전원장치의 최근 기술은 IGBT 등 고주파 스위칭 기술을 채택하여 컨버터부에서 고조파 억제기능에 의한 입력전류 왜형률을 개선하고, 입력전원측을 단위역률 되도록 하고 있다. 교류측 입력역률을 최대한 개선하고 정현파로 유지한다는 것은 에너지절감이라는 관점에서 도 매우 중요한 의미를 갖는다. 그러나 입력측 전원의 역률을 단위역률로 하기 위해서는 기존의 구동드라이에 단위역률을 위한 컨버터부와 제어회로가 필수적이다. 이러한 2단방식의 구동장치는 직류전원용으로 독립된 컨버터부의 추가로 인한 경제적인 단점을 갖고 있다. 따라서 이를 극복하기 위한 새로운 형태의 구동장치가 필요로 하고 있다. 최근 부가적인 능동회로가 없이 SRM 구동회로를 1단방식으로 구성하는 형태에 대한 요구가 증대되고 있다.

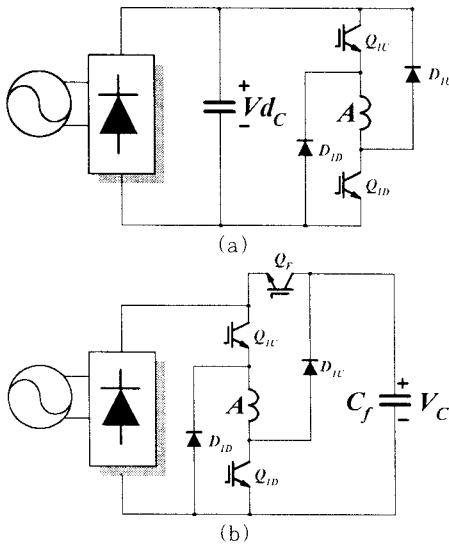


그림 5 기존의 클래식 인버터와 제안된 단위역률 인버터  
 (a) 기존의 클래식 인버터 (b) 단위역률 인버터  
 Fig. 5 General Classic Inverter & Proposed Power Factor Inverter  
 (a) General Classic Inverter  
 (b) Proposed Power Factor Inverter

그림 5는 기존의 클래식 SRM 드라이버와 1단방식의 제안된 전력회로를 나타내고 있다. 그림 5(a)와 같이 기존의 클래식 인버터는 다이오드 정류기 출력단에 벌크성 콘덴서를 내장하고 있으며 이는 정압의 리플을 방지하고 회수에너지를 저장하는 역할을 한다. 이로 인하여 입력전원측에는 필스상의 전류가 흐르게 된다. 그림 5(b)의 제안된 1단방식의 구동회로에서 가장 큰 특징은 다이오드 정류기 출력측에 콘덴서가 없다는 것이다. 이로 인하여 입력측 전원의 전압역에 대하여 전류의 형성 이 가능한 구조가 된다. 상 스위치 오프시 발생하는 회수에너지 저장하기 위해서는 별도의 콘덴서(Cf)가 필요하며 이 콘덴서는 입력측과 독립적으로 작용한다.

그림 5(b)에 제안된 인버터의 동작을 해석하기 위해서는 그림 6과 같이 3개의 모드로 구별하는 것이 편리하다.

방전모드는 상 스위치 온 및 방전 스위치(Qf)를 온함

과 동시에 시작되며, 상 스위치 오프시 회수된 높은 전압으로 신속한 평활전류 정착용으로 사용된다. 이때 상 전류는 Cf, Qf, Q1c, Q1b를 통하여 형성된다.

입력모드는 방전 스위치를 오프 한 시점부터 시작되며, 전원측에서 전동기로의 전력전달이 이루어지는 시점이다. 이때 상전류는 정류용 다이오드, Q1c, Q1b를 통하여 형성된다.

회수모드는 상 스위치가 오프되는 순간부터 시작되며 횡령다이오드 D1b, D1c를 통하여 상권선에 존재하는 무효전력을 회수하게된다.

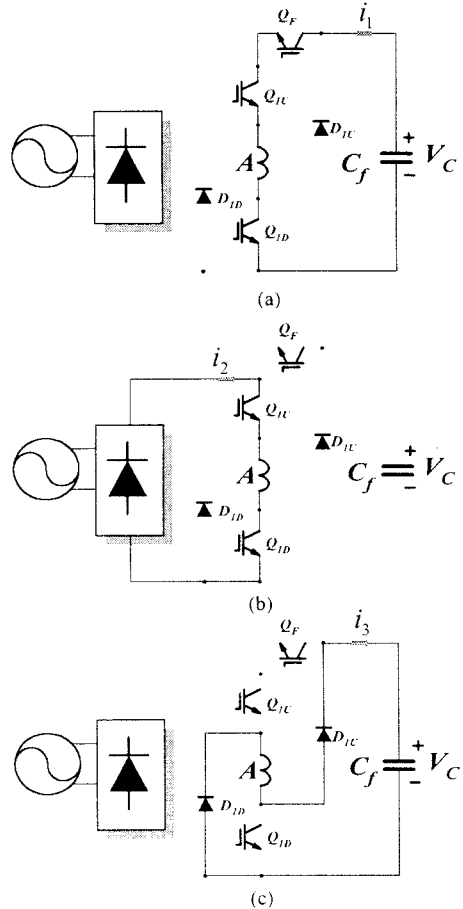


그림 6. 제안된 인버터의 각 모드  
 (a) 방전모드 (b) 입력모드 (c) 회수모드  
 Fig. 6. Mode of proposed inverter  
 (a) Discharge mode (b) Input mode  
 (c) Charge mode

그림 7는 상 스위치를 제어하기 위한 제어기의 블록도이다. 제어 및 상태를 표시하기 위해서 제어기는 80C196KC를 사용하였다. 우선 기동을 위해서는 속도 제어부에서 인코더의 상 신호를 받아 바로 HSO출력으로 한다. 이때 속도제어부의 PWM제어는 소프트웨어스타터 기능을 갖도록 1차 함수로 제한전류의 크기까지 PWM 신호를 발생한다.

속도지령치는 외부의 가변저항으로부터 절대치 회로와 비교기의 출력을 AD와 IO 포트의 조합에 의한 11 Bit 정보로 얻게된다. 실제속도는 HSI에 연결된 인코더의 상 신호의 사건이 기록된 CAM값으로부터 구한다. 속도 제어부는 지령속도와 실제속도의 차에 의해 스위칭 온각 변위를 제어하게된다.

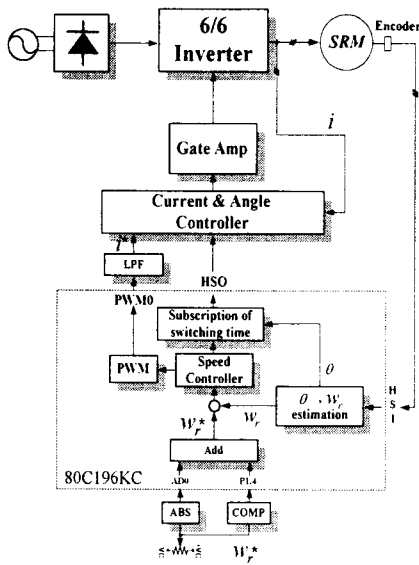
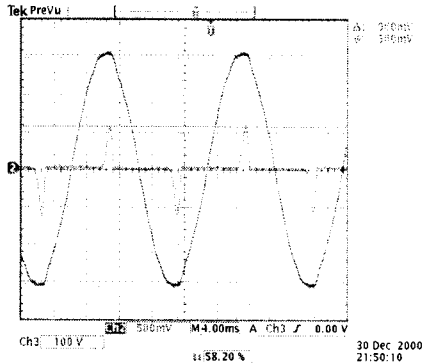
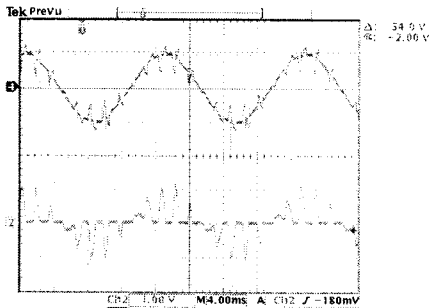


그림 7. 제어기의 블록도  
Fig. 7. Block diagram of the controller

### 3. 실험 및 고찰



(a)



(b)

그림 8 기존의 인버터와 제안된 인버터의 입력전압 및 전류

(a) 기존의 클래식 인버터 (b) 단위역률 인버터  
Fig. 8 Input voltage & current general inverter & proposed power factor inverter

(a) general inverter  
(b) proposed power factor inverter

그림 8은 기존의 클래식인버터와 제안된 1단방식의 단위역률 인버터로 동작할 경우의 입력전압과 전류를 비교한 것이다. 기존의 인버터는 입력단에 벌크성 커패시터로 인해 짧은 도통각으로 인한 피크성의 전류가 흐르고 있으나, 제안된 1단방식의 SRM에는 입력전류와 전압이 동위상이 되역 양호한 역률을 유지함을 알 수 있다.

### 4. 결론

본 연구에서는 부가적인 능동 회로가 없이 SRM 구동 회로를 1단 방식으로 구성하여 2단 방식의 역률 보상회로와 비교하여 간단하면서도 단위역률이 가능한 SRM 구동회로를 제안한다. 나아가 제안된 1단방식의 SRM용 인버터를 사용하여 입력역률을 개선함과 동시에 저가화를 구현함으로써 SRM의 실용화 가능성을 실험을 통해 입증하였다.

### (참고 문헌)

- (1) B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szeszsy and W. H. Bocknell, "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor", *IEEE Trans. on Industrial Application*, vol. 22, no. 4, pp. 708-715, 1986.
- (2) D. W. J. Puller "New data base for switched reluctance drive simulation." *Proc. IEE*, Vol.138, Pt-B, No.6, pp.331-336, 1991.
- (3) Paul P.Acarnley, Rolaud J.Hill and Clive W.Hooper: "Detection of Rotor Position in Stepping and Switched Motors by Monitoring of Current Waveforms", *IEEE Trans. on IE*, Vol.32, No.3, pp.215-222, 1985.
- (4) S. Vukosavic and V. R. Stefanovic, "SRM Inverter Topologies: A Comparative Evaluation", *IEEE Trans. on IA*, Vol.27, No.6, pp. 1034-1047, 1991.
- (5) J. T. Bass, "Robust torque Control of Switched-Reluctance Motors without Shaft-Position Sensor", *IEEE Trans. on IE*, Vol.33, No.3, pp.212-216, 1986.
- (6) P. H. Chappell, W. F. Ray and R. J. Blake, "Microprocessor Control of a Variable Reluctance Motor", *Proc. IEE*, Vol.131, No.2, Part.B, pp.51-60, 1984.
- (7) B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szeszsy and W. H. Bocknell, "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor", *IEEE Trans. on IA*, Vol.22, No.4, pp.708-715, 1986.
- (8) M. Ehsani, I. Husain and A. B. Kulkarni, "Elimination of Discrete Position Sensor and Current Sensor in Switched Reluctance Motor Drives", *IEEE Trans. on IA*, Vol.28, No.1, pp.128-135, 1992.
- (9) I. E. Liang, Y. Liao, and T. A. Lipo, "A New Variable Reluctance Motor Utilizing An Auxiliary Commutation Winding," *IEEE Trans. on IA*, Vol.30, No.2, pp.423-432, 1992.
- (10) I. Husain and M. Ehsani, "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol.11, No.1, pp.91-98, 1996.
- (11) P. C. Kjaer, J. J. Gribble and T. J. E. Miller, "High-Grade Control of Switched Reluctance Machines", *Proc. of MS/IEEE*, San Diego, California, pp.92-100, 1996