

수학적 모델을 기반으로 한 단상 SRM의 고역률 저토크리플 구동방식

양가녕, 김태형, 이동희, 안진우  
경성대학교

High Power Factor Low Torque Ripple Drive Scheme of Single-Phase SRM based on Mathematical Model

Jianing Liang, Tae-Hyoung Kim, Dong Hee Lee, Jin-Woo Ahn  
Kyungsoong Univ.

**Abstract** - This paper presents single-phase SRM drive system with single-stage high power factor and low torque ripple. Single-phase SRM has simple mechanical and electrical structure, robust and high speed operation characteristic. But conventional SRM drive with diode bridge rectifier and filter capacitor has a low power factor because of short charge time of capacitor. Therefore, this paper presents a novel single-phase SRM drive with single-stage structure circuit, which can improve the power factor and reduce peak torque ripple. A novel switching topology is presented base on mathematical analysis. The novel drive method is verified by simulations and experiments.

1. 서 론

단상 SRM은 구동을 위한 직류전원을 위해 일반적으로 다이오드 브릿지 정류기와 대용량의 직류단 커패시터를 사용한다. 이를 통한 직류전압으로 단상 SRM을 구동시키는 경우 토크리플의 피크에 대한 억제는 가능하지만 직류단 커패시터의 충전구간이 짧기 때문에 전원측에서 피크성 교류 전류가 흐르게 된다. 이로 인해 역률이 크게 저하되며 불필요한 무효전력의 발생으로 에너지효율이 감소되는 문제점을 갖고 있다[1].

최근 이러한 낮은 역률에 대한 문제점을 해결하기 위하여 역률개선(Power Factor Correction, PFC)회로를 적용한 SRM 구동회로의 설계 및 스위칭 토폴로지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존의 SRM 구동회로에서 역률개선방법을 살펴보면, 다이오드 정류기와 대용량 필터용 커패시터 간에 역률보상회로를 추가하는 방법, AC/DC 정류기 회로를 수정하여 역률을 개선하는 방법, SRM측 컨버터의 내부구성을 수정하여 역률을 개선하는 방법 등이 있다[1-8].

본 논문에서는 하나의 스위칭 소자와 다이오드의 추가시켜 AC/DC 정류기의 출력단과 대용량 커패시터를 분리시킨다. 이와 함께 토크리플 억제와 역률개선을 위한 스위칭 소자의 적절한 온오프를 통해 두 개의 전압원이 교번적으로 비대칭 브릿지 컨버터를 거쳐 단상 SRM에 인가되도록 하는 구동회로와 스위칭 토폴로지를 제안한다. 제안된 단상 SRM의 구동드라이브는 부가적인 능동회로가 없는 1단구조로서 회로구성이 간단하고, 경제적이며, 제어가 용이하면서도 토크리플 억제와 역률개선을 동시에 실현할 수 있다는 장점을 갖고 있다.

본 논문에서 제안된 단상 SRM의 역률개선 및 토크리플 억제를 위한 구동시스템은 수학적 모델을 제시하고 이를 통한 수치시뮬레이션과 실험을 통해 타당성을 증명하였다.

2. 역률개선을 위한 구동시스템 해석

2.1. 일반적인 단상 SRM의 수학적 모델

일반적으로 단상 SRM 구동드라이브는 그림 1과 같이 다이오드 브릿지 정류기와 대용량의 필터용 커패시터에 의해 직류전압을 얻고 있다. 이러한 구동드라이브는 비록 전력회로가 간단하고 피크 토크리플이 작지만 입력 전압과 동위상을 갖는 전류가 흐르지 않으므로 역률이 매우 낮으며, 불필요한 무효전력이 생겨 에너지 효율이 감소되는 문제점이 있다.

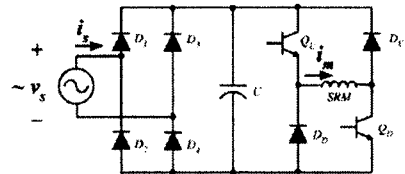


그림 1 일반적인 단상 SRM의 구동회로  
Fig. 1 Generally single-phase SRM drive

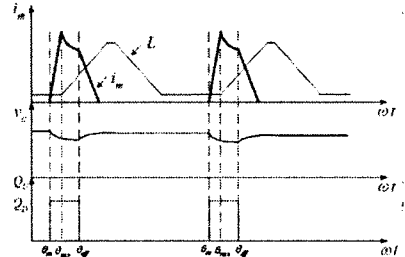


그림 2 일반적인 단상 SRM의 구동회로에서 게이트 신호와 전압 및 전류  
Fig. 2 Gate signal, voltage and current of conventional single-phase SRM drive

비대칭 컨버터 회로에서 스위칭 소자의 게이트 신호와 커패시터 전압 및 상전류 파형을 그림 2에 나타내었다.

회전자의 위치가 스위칭 온각  $\theta_{on}$ 에 도달할 시점에 상 스위치  $Q_U$ ,  $Q_D$ 를 모두 온 함으로써, 필요한 토크를 출력할 수 있게 하는 상전류를 신속하게 확립하게 한다. 상 스위치가 모두 온일 경우, 구동회로의 수학적 모델은 다음의 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 |i_s| &= \frac{|v_s| - v_c}{R_o} && \text{when } |v_s| \geq v_c \\
 &= 0 && \text{when } |v_s| < v_c \\
 i_c &= |i_s| - i_m \\
 v_c &= \frac{1}{C} \int i_c dt + v_{c0} \\
 v_m &= v_c
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서,  $v_s$ 와  $i_s$ 는 상용 전원전압과 전원전류,  $v_c$ 와  $i_c$ 는 필터용 대용량 커패시터의 전압과 전류,  $v_{c0}$ 는 커패시터의 초기전압을 각각 나타낸다. 그리고,  $R_0$ 은 전원에서 커패시터에로의 충전회로의 내부저항을 나타내며, 그 값은 SRM의 권선저항에 비해 매우 작다.

회전자의 위치가 스위치 오프각  $\theta_{off}$ 에 도달할 시점에 상 스위치  $Q_U$ ,  $Q_D$ 를 모두 오프 함으로써, 신속하게 상전류를 소호하게 한다. 상 스위치가 모두 오프일 경우, 구동회로의 수학적 모델은 다음의 식 (2)과 같다.

$$\begin{aligned} |i_s| &= \frac{|v_s| - v_c}{R_0} && \text{when } |v_s| \geq v_c \\ &= 0 && \text{when } |v_s| < v_c \\ i_c &= |i_s| + i_m \\ v_c &= \frac{1}{C} \int i_c dt + v_{c0} \\ v_m &= -v_c && \text{when } i_m > 0 \\ &= 0 && \text{when } i_m = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

## 2.2. 제안된 1단구조의 단상 SRM의 수학적 모델

그림 3은 제안된 1단구조의 단상 SRM구동용 PFC회로와 전원전압과 전류파형을 나타내고 있다. 제안된 드라이브는 단 하나의 능동소자  $Q_F$ 의 추가로 전원측과 대용량의 커패시터를 분리시킴으로써, 전원전압과 충전된 대용량의 커패시터의 전압을 교번적으로 SRM에 인가하는 1단방식의 역률개선방법이다.

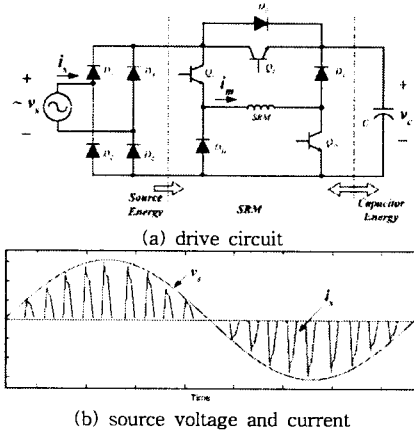


그림 3 제안한 단상 SRM 구동드라이브  
Fig. 3 Proposed single-phase SRM drive

제안된 PFC회로는 상 스위치  $Q_U$ ,  $Q_D$ 와 방전 스위치  $Q_F$ 의 동작에 따라, 그림 4와 같이 방전전류 여자모드, 입력전류 여자모드, 에너지 회수모드 등 3개의 모드로 분류하여 해석할 수 있다.

그림 4(a)의 방전전류 여자모드는 상 스위치가 온일 경우 수학적 모델은 다음의 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} |i_s| &= 0 \\ i_c &= -i_m \\ v_c &= \frac{1}{C} \int i_c dt + v_{c0} \\ v_m &= v_c \end{aligned} \quad (3)$$

그림 4(b)의 입력전류 여자모드의 수학적 모델은 다음의 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} i_c &= \frac{|v_s| - v_c}{R_0} && \text{when } |v_s| \geq v_c \\ &= 0 && \text{when } |v_s| < v_c \\ |i_s| &= i_c + i_m \\ v_c &= \frac{1}{C} \int i_c dt + v_{c0} \\ v_m &= |v_s| \end{aligned} \quad (4)$$

그림 4(c)의 에너지 회수모드는 앞서 소개한 일반적인 구동회로의 상 스위치가 오프될 때와 같으므로 그 수학적 모델도 식 (2)과 같다.

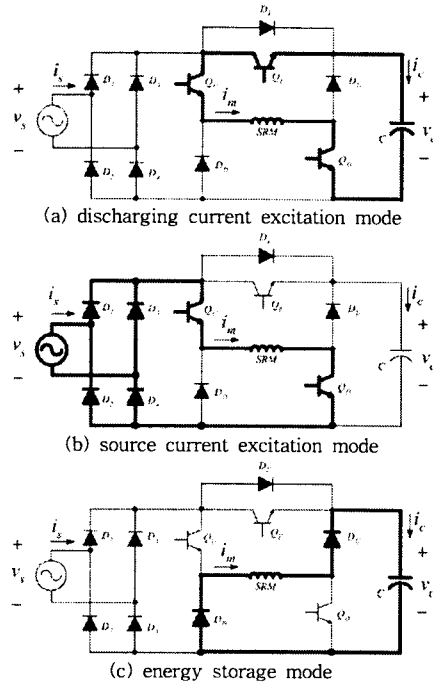


그림 4 1단구조방식의 PFC회로의 동작모드  
Fig. 4 Operational mode of the single-phase stage PFC circuit

## 2.3. 역률개선 및 토크리플 저감을 위한 스위칭기법

본 논문에서는 역률이 개선되면서도 토크리플의 억제가 가능한 PFC회로의 스위칭기법을 제안하고자 한다.

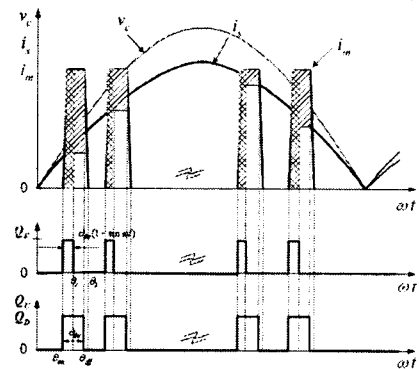


그림 5 토크리플 억제와 역률개선을 위한 스위칭 기법  
Fig. 5 Switching topology for torque ripple reduction and power factor correction

그림 5에 토크리플 억제를 위한 PFC회로의 스위칭 토폴로지를 보여주고 있다. SRM의 토크발생구간에서

토크리플이 적은 출력토크를 발생하려면 SRM의 상전류가 그림 5의  $i_m$ 과 같이 일정하여야 한다. 또한 고역률 구동을 위해서는 전원전류가 그림 5의  $i_s$ 와 같이 입력 전원전압  $v_s$ 와 동위상인 정현파 파형을 이루어야 한다.

상기 두가지 조건을 동시에 만족시키기 위해서는 충전된 에너지 회수용 커패시터에 저장된 전기에너지로 그 차이를 보상하여야 한다. 그림 6은 이를 위한 방전 스위치  $Q_F$ 와 상 스위치  $Q_U, Q_D$ 의 게이트 신호와 커패시터 전압 및 상전류 파형을 보여준다.

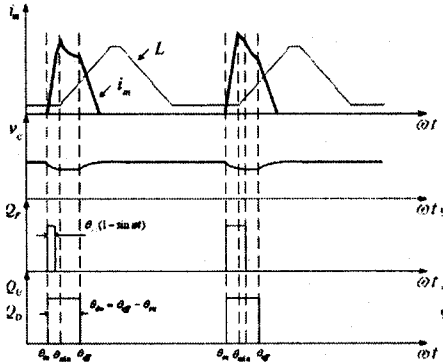


그림 6 역률개선 및 토크리플 억제에 위한 게이트 신호와 전압, 전류

Fig. 6 Gate signal, voltage and current of proposed topology

본 논문에서는 토크리플의 억제와 역률개선을 위하여 방전전류 여자모드와 입력전류 여자모드의 작동주기를 적절하게 조절하여, 단상 SRM의 역률개선과 토크리플 억제가 가능하도록 하였다. 상 스위치  $Q_U, Q_D$ 의 온 구간인 도통구간에서 방전 스위치  $Q_F$ 의 온오프 전환시점을 아래 식과 같이 적절히 선정할 수 있다.

$$i_m \cdot \theta_x = i_s \cdot \theta_{dw} \quad (7)$$

$$\theta_x = \theta_{dw} \sin \theta \quad (8)$$

여기서,  $\theta_x$ 는 입력전류 여자모드로 작동하는 구간,  $\theta_{dw}$ 는 도통각을 각각 나타낸다.

한편, 방전전류 여자모드로 동작하는 구간은  $\theta_{dw}(1-\sin\theta)$ 가 될 것이며, 이 구간동안 SRM에 투입되는 에너지도 전원에서 공급하는 것으로서, 실제 전원 입력측의 전류는 앞에서 언급한  $i_s$ 보다 큰  $i_s^*$ 가 된다.

### 3. 수학적 모델을 이용한 시뮬레이션

제안된 방식의 유효성을 검증하기 위해 실험에 앞서 제시된 수학적 모델을 이용하여 기존의 단상구동시스템과 제안된 시스템에 대한 시뮬레이션을 진행하였다.

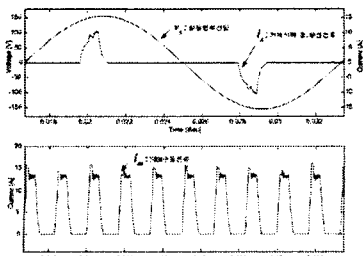


그림 7 기존의 단상 SRM 구동드라이브 및 전압, 전류  
Fig. 7 Conventional single-phase SRM drive, voltage and current

시뮬레이션에서 사용한 단상 SRM은 극수가 6/6이고, 고정자와 회전자 극자극이 각각 20, 24(deg.)이며, 최소 및 최대 인덕턴스는 각각 0.003, 0.016[H]이다. 시뮬레이션에서의 SRM은 실험을 통해 측정된 인덕턴스를 기반으로 한 비선형모델이다. 전원전압은 단상 110[V], 60[Hz]의 교류전압이라고 가정하였다.

그림 7은 그림 1과 같은 일반적인 단상 SRM의 구동시스템을 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타내고 있으며, 그림 8은 제안된 1단 구조방식의 단상 SRM 구동회로에 제안된 스위칭 기법을 적용한 시뮬레이션 결과이다. 결과와 같이 전류파형의 왜곡이 적고 정현파에 근접하면서 역률이 많이 향상됨을 알 수 있다. 그림 9는 기존의 단상 구동회로와 제안된 회로의 역률을 비교한 것으로 제안된 기법의 역률이 일반 비대칭 컨버터에 의한 단상 SRM의 구동보다 높음을 알 수 있다.

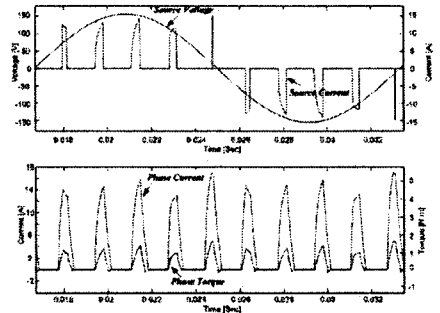


그림 8 제안된 기법에 의한 SRM 구동 시뮬레이션 결과  
Fig. 8 Simulation result of SRM drive using by proposed method

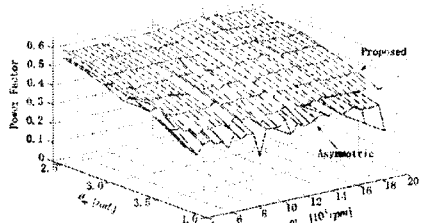


그림 9 시뮬레이션을 통한 PFC회로의 역률개선 효과  
Fig. 9 Power factor correction Effect of PFC drive by simulation

### 4. 실험 및 고찰

그림 10은 실험에 이용된 단상 SRM 구동시스템을 나타내고 있다. 제어기는 TI사의 TMS320F2812를 이용하였으며, 부하조절과 역률측정을 위하여 전력분석기와 동력계를 이용하였다.

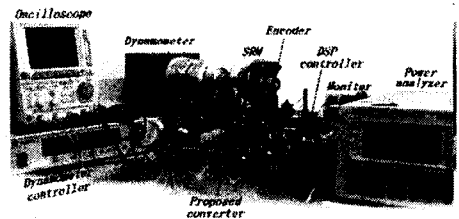
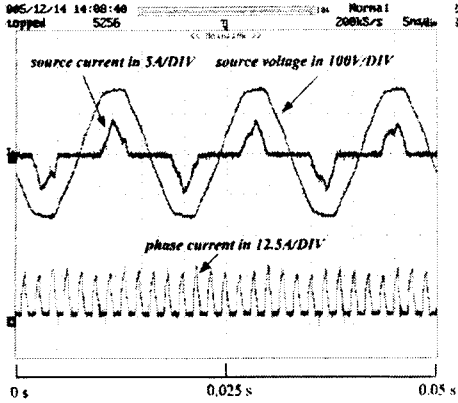


그림 10 단상 SRM의 구동시스템  
Fig. 10 Single-phase SRM drive system

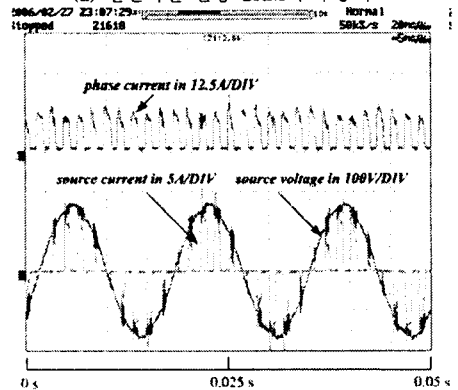
그림 11은 일반적인 단상 SRM 구동회로와 제안된 PFC회로와 역률 및 토크리플 저감을 위한 스위칭기법을 적용한 각각의 실험결과를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과에서와 같이 전류파형의 왜곡이 적고 정현파에 근접하면서 역률이 향상되었음을 알 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] J. W. Ahn, Z. G. Lee, "Micro controller based Single-phase SRM Drive with High Power Factor," The Transactions of The Korean Institute of Power Electronics, Vol.11, No.1, pp.90-96, February 2006.
- [2] L. Caruso, A. Consoli, G. Scarcella and A. Testa, "A Switched Reluctance Motor Drive Operating at Unity Power Factor," Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE, Vol.1, 6-10 Oct. 1996 pp. 410 - 417
- [3] T. Gopalarathnam, H. A. Toliyat, "A High Power Factor Converter Topology for Switched Reluctance Motor Drives," Conf. Rec. of 31st IAS Annual Meeting, Vol.3, 13-18 Oct. 2002 pp. 1647 - 1652
- [4] C. H. Rim, W. H. Kim, E. S. Kim and K. C. Lee, "A Choppingless Converter for Switched Reluctance Motor with Unity Power Factor and Sinusoidal Input Current," Conf. Rec. of 25th PESC, IEEE 20-25 June 1994, pp. 500 - 507
- [5] Y. A. Kwon, K. J. Shin and G. H. Rim, "SRM Drive system with Improved Power Factor," Conf. Rec. of 23rd IECON, IEEE Vol.2, 9-14 Nov. 1997, pp. 541 - 545
- [6] F. S. Kang, J. H. Lee, S. J. Park, "Single-Stage Power Factor Corrected SRM Driver," IECON 02 [Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference of the], Vol.2, 5-8 Nov. 2002, pp. 1055 - 1059
- [7] A. Consoli, M. Cacciato and F. Gennaro, "Single Chip Integration for Motor Drive Converters with Power Factor Capability," IEEE Tr. on P.E, Vol.19, Issue 6, Nov. 2004, pp. 1372 - 1379
- [8] J. Reinert, S. Schroder, "Power-Factor Correction for Switched Reluctance Drives," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol.49, Issue 1, Feb. 2002, pp. 54 - 57 comparison



(a) 일반적인 단상 SRM의 구동회로



(b) 제안된 1단구조방식의 PFC회로

그림 11. 기존 구동 기법과 제안된 기법의 실험파형 비교  
Fig. 11 Comparison of experimental waveform with conventional driving method and proposed method

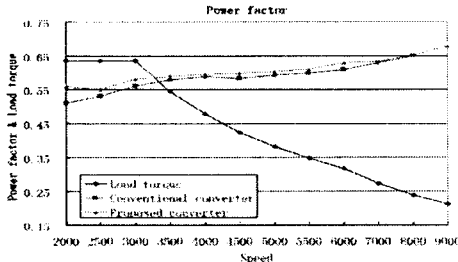


그림 12. 실험을 통한 제안된 기법의 역률개선효과  
Fig. 12 Power factor correction Effect of PFC drive by experiment

5. 결 론

본 논문에서는 토크리플 억제와 역률개선의 목적으로 부가적인 능동회로가 없이 단상 SRM의 구동드라이브와 스위칭 토폴로지를 제안하였다. 제안한 방식은 PFC회로가 1단 구조 방식으로 구성되어 2단구조방식의 PFC 회로에 비해 간단하면서도 토크리플의 억제와 역률 개선이 가능하다는 장점이 있다. 또한, 제안된 드라이브와 스위칭 토폴로지는 수치해석과 DSP 기반의 단상 SRM 구동실험을 통해 그 타당성을 입증하였다.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력연구원 (과제번호 : R2005-B-109)주관으로 수행된 과제임.