

저토크리플 및 역률개선을 위한 수정된 단상 SRM 구동시스템

안 영 주†

(원고접수일 : 2007년 7월 16일, 심사완료일 : 2007년 11월 7일)

Modified Single-Phase SRM Drive for Low Torque Ripple and Power Factor Improvement

Young-Joo An†

Abstract : The single-phase switched reluctance motor(SRM) drive requires DC source which is generally supplied through a rectifier connected with a commercial source. The rectifier is consist of a diode full bridge and a filter circuit. Usually the filter circuit uses capacitor with large value capacitance to reduce ripple component of DC power. Although the peak torque ripple of SRM is small, the short charge and discharge current of the filter capacitor draws the low power factor and system efficiency. A modified single phase SRM drive system is presented in this paper, which includes drive circuit realizing reduction of torque ripple and improvement of power factor. In the proposed drive circuit, one switching part and diode which can separate the output of AC/DC rectifier from the filter capacitor is added. Also, a upper switch of drive circuit is exchanged a diode in order to reduce power switching device. Therefore the number of power switch device is not changed, two diodes are only added in the SRM drive. To verify the proposed system, some simulation and experimental results are presented.

Key words : Single-phase SRM(단상 SRM), Power factor improvement(역률개선), Torque ripple(토크리플), Switching topology(스위칭 토폴로지)

1. 서 론

릴럭턴스 토크를 이용하는 SRM은 본질적으로 가변속 전동기이다. 대부분 전동기 구동전원은 상용전원으로부터 다이오드 브리지 정류기와 대용량의 필터 커패시터를 이용한 직류전원을 사용한다. 소형 단상 SRM의 경우 대용량 필터 커패시터

의 짧은 충전구간으로 인해 전원 측에 고조파 성분이 다량 포함된 피크성 교류전류가 흐르고, 이로 인해 역률이 낮아져 불필요한 무효전력의 발생으로 전원장치의 이용률 및 에너지효율이 감소되는 문제점이 있다. 최근 이러한 저역률에 대한 문제점의 개선방안으로 역률개선(Power Factor Correction, PFC)회로를 적용한 SRM 구동회로의 설계 및 스

† 교신저자(부경대학교 전기제어공학부), E-mail : anyj@pknu.ac.kr, Tel : 051)620-1638

위칭 토폴로지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾.

기존의 SRM 구동회로에서 역률개선은 다이오드 정류기와 대용량 필터용 커패시터 간에 역률보상회로를 추가하는 방법^{(2),(3)}, AC/DC 정류기 회로를 수정하여 역률을 개선하는 방법⁽⁴⁾, SRM측 컨버터의 내부구성을 수정하여 역률을 개선하는 방법^{(5),(6)} 등이 있다. 진자의 두 방법은 역률개선회로에 필요한 수동소자 및 스위칭 소자의 추가로 별도의 부품이 요구되고, 구동방법 역시 복잡하다. 단상 SRM의 적용분야 확대를 위해서는 낮은 토크 리플 및 역률이 높은 것이 요구되며, 구동회로에 있어서 경제성도 고려해야 한다.

본 논문에서는 기존의 단상 SRM 구동회로에 2개의 다이오드를 추가 및 원래의 스위치 위치를 변경함으로써, 브리지 정류기의 출력단과 대용량 커패시터를 분리시키고, 저토크리플 및 역률개선을 위한 스위칭 소자의 적절한 동작을 통해 상용전원으로부터의 정류 전원과 커패시터 전원을 교번적으로 단상 SRM에 인가하는 구동회로 및 스위칭 방법을 제안한다. 제안된 단상 SRM의 구동드라이브는 능동회로가 추가되지 않으므로 회로구성이 간단하고, 스위칭 소자의 수가 원래의 브리지 컨버터와 동일한 형태가 되어 경제적이며, 제어 방법 또한 기존과 차이 없이 가능하여 저토크리플 및 역률개선을 동시에 구현할 수 있는 장점을 갖고 있다. 논문에서 제안하는 단상 SRM 구동시스템은 수학적 모델을 통한 수치 시뮬레이션과 실험을 통하여 타당성을 입증한다.

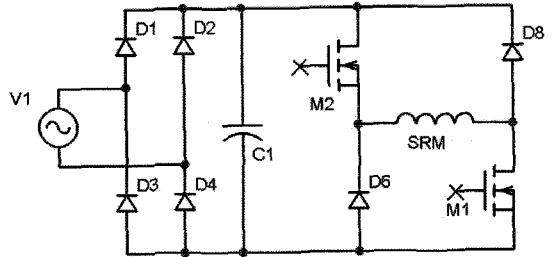
2. 수정된 SRM 드라이버

2.1 드라이버의 구성

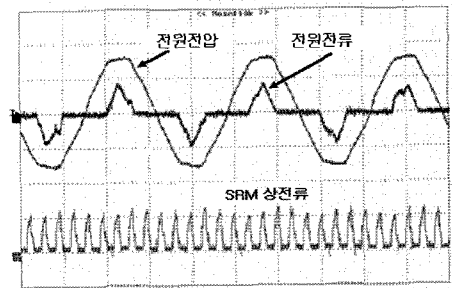
일반적으로 사용되는 단상 SRM 구동회로는 다이오드 브리지 정류기와 필터 커패시터에 의한 직류전원과 스위칭 동작을 위한 브리지 컨버터로 구성되어 있으며, Fig. 1과 같다.

기존의 구동회로는 전력회로가 간단하고 피크 토크리플이 작지만, 대용량 필터 커패시터의 충·방전 전류에 의해 교류전원에 펄스형태의 전류가 흐

른다. 결과적으로 교류 전원에는 고조파 성분전류가 다량 포함되어 역률 및 에너지 효율이 감소하는 문제점이 있다.



(a) Driver circuit



(b) Source voltage, current and phase current

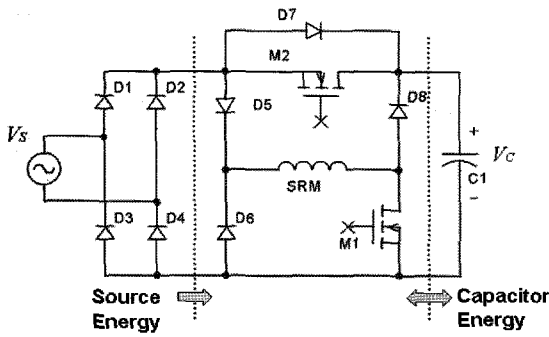
Fig. 1 Conventional single-phase SRM drive

Fig. 2는 수정된 단상 SRM 구동회로, 전원전압 및 전류파형을 나타내고 있다. 제안된 드라이브는 구동회로의 능동소자 M_2 의 위치 변경 및 커패시터 충전 경로 제공을 위한 다이오드 1개를 추가하고, 원래의 능동소자는 다이오드로 대체하여 여자전류의 경로를 제공하는 방법이다.

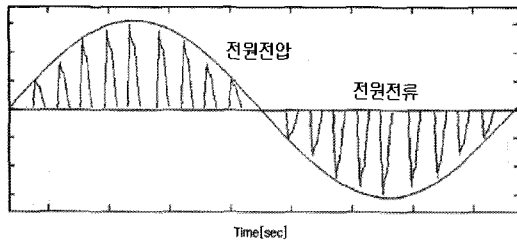
능동소자 M_2 는 전원 측과 대용량의 커패시터를 분리시키고 동시에 전원전압과 충전된 커패시터의 전압을 교번적으로 SRM에 인가하도록 동작한다. 또한 추가된 다이오드 D_7 은 전원전압보다 커패시터 전압이 낮을 경우 항상 충전을 하기 위한 경로를 제공한다.

이 방법에서는, SRM이 여자구간일 경우 전원 측과 커패시터의 충전 전압을 비교하여 높은 쪽의 전원을 선택하여 SRM의 빠른 여자를 위한 전류를 확보하고, SRM이 소자구간일 경우에는 SRM의

잔류 자계에너지를 커패시터로 회수하며, SRM의 토크발생구간에는 스위치 M_2 를 오프시켜 전원 측의 전기에너지를 SRM에 공급하여 기계에너지로 변환하도록 한다. 그러므로 역률저하에 영향이 큰 여자구간과 소자구간에서는 커패시터와 SRM이 에너지 교환을 하도록 하고, 역률향상에 유리한 토크발생구간에서는 전원과 SRM이 직접 에너지 교환을 하도록 하여 역률을 개선한다. 이상적인 전원 전압과 전류파형은 Fig. 2(b)에 보이고 있다.



(a) Driver circuit



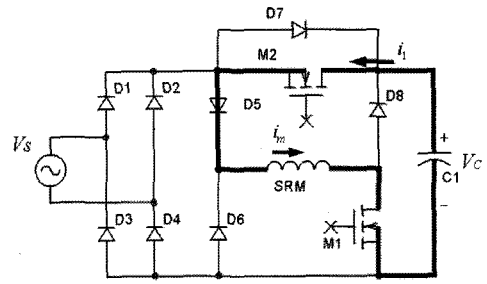
(b) Source voltage and current

Fig. 2 Modified single-phase SRM drive

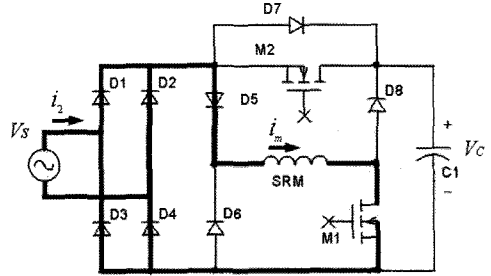
2.2 수정된 단상 SRM 드라이버의 동작모드

수정된 단상 SRM드라이버는 구동에 필요한 상 스위치 M_1 과 방전 스위치 M_2 의 동작조건에 따라, Fig. 3과 같이 각각 4가지 동작상태 - 커패시터 여자모드, 전원 여자모드, 에너지 회수모드, 전원 충전모드로 나누어진다.

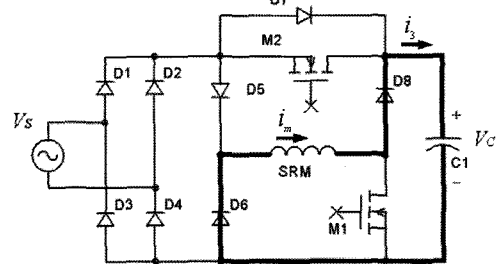
Fig. 3(a)의 커패시터 여자모드는 충전된 커패시터의 전압이 전원전압보다 높을 동안 상 스위치 M_1 과 방전 스위치 M_2 가 모두 온일 경우 나타나며, 이 모드에서 전류 i_1 , 즉 SRM의 상전류 i_m 은 C_1



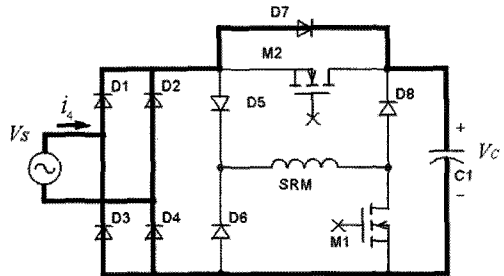
(a) Capacitor excitation



(b) Source excitation



(c) Energy recovery



(d) Source charging

Fig. 3 Operational modes of the proposed converter

$\rightarrow M_2 \rightarrow D_5 \rightarrow M_1$ 을 통하여 흐른다. 상전류 확립구간에서 이 모드로 작동할 경우, 전원전압보다 높게 충전된 커패시터 전압으로 신속하게 필요한 상전류

를 확립할 수 있다. 이때의 회로방정식은 다음의 식 (1)과 같다.

$$v_c = R i_1 + L_{\min} \frac{di_1}{dt} = \frac{1}{C_1} \int i_1 dt \quad (1)$$

여기서, R 는 SRM의 상 저항, L_{\min} 은 SRM의 최소 인덕턴스, C_1 는 에너지 회수용 커패시턴스이다.

한편, 토크 발생구간에서 이 모드로 작동할 경우, 커패시터에 축적된 에너지가 SRM의 기계에너지로 전환된다. 낮은 전원전압구간에서도 부하토크 발생에 필요한 상전류를 생성할 수 있으므로, 전원전압의 변화로 인해 나타나는 출력토크의 리플을 감소시킬 수 있다. 이때의 회로방정식은 다음 식 (2)와 같다.

$$v_c = R i_1 + L(\theta) \frac{di_1}{dt} + i_1 \frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta} \omega_{rm} = \frac{1}{C} \int i_1 dt \quad (2)$$

Fig. 3(b)의 전원 여자모드는 상 스위치 M_1 이 온, 방전 스위치 M_2 가 오프일 경우 또는 방전 스위치 M_2 가 온되어도 전원전압이 커패시터 전압보다 높을 경우 나타난다. 이때, SRM의 상전류 i_2 는 전원 측 다이오드 정류기 $\rightarrow D_5 \rightarrow M_1$ 를 통하여 흐른다.

전류확립구간에서 이 모드로 작동할 경우, 커패시터를 경유하지 않고 전원에서 직접 필요한 상전류를 생성하게 한다. 이 경우의 회로방정식은 식 (3)과 같다.

$$|v_s| = R i_2 + L_{\min} \frac{di_2}{dt} \quad (3)$$

한편, 토크 발생구간에서 이 모드로 작동하게 할 경우, 전원의 에너지가 직접 SRM의 기계에너지로 전환되며, 방전스위치 M_2 의 동작에 따라 구동시스템의 역률개선에 기여한다. 이 경우의 회로방정식은 식 (4)와 같다.

$$|v_s| = R i_2 + L(\theta) \frac{di_2}{dt} + i_2 \frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta} \omega_{rm} \quad (4)$$

Fig. 3(c)의 에너지 회수모드는 상 스위치와 방전 스위치가 모두 오프 되는 순간부터 시작되며,

휠링 다이오드 D_6 와 D_8 를 통하여 상권선의 자계 에너지를 커패시터에 회수한다. 이때의 회로방정식은 식 (5)와 같다.

$$v_c = R i_3 + L(\theta) \frac{di_3}{dt} + i_3 \frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta} \omega_{rm} = \frac{1}{C} \int i_3 dt \quad (5)$$

Fig. 3(d)의 전원 충전모드는 상 스위치의 동작과는 무관하게 전원의 순간전압이 커패시터 전압보다 높을 동안 지속된다. 이때 전원과 커패시터 사이의 충전전류는 다음의 식 (6)으로부터 얻을 수 있다.

$$|v_s| = v_c = \frac{1}{C} \int i_4 dt + v_c(0) \quad (6)$$

3. 제안된 SRM 컨버터의 동작

3.1 역률개선을 위한 스위칭 방법

Fig. 4는 역률 개선을 위한 회로의 스위칭 방법에 대한 방전 스위치 M_2 와 상 스위치 M_1 의 게이트 신호, 커패시터 전압 및 SRM 상전류 파형을 보여준다.

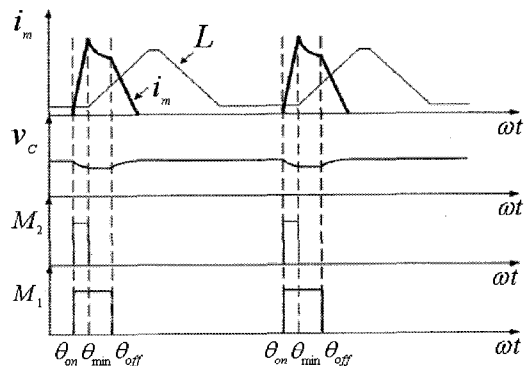


Fig. 4 The gate signals, voltage and current for PFC

회전자 위치가 스위치 온각 θ_{on} 에 도달할 시점에 M_1 과 M_2 를 모두 온시켜 커패시터 여자모드로 동작하고, 충전된 커패시터의 높은 전압으로 신속하게 상전류를 확립하게 한다. 이 동안에는 커패시터의 전압은 방전으로 인해 점차 낮아진다. 또한, 회

전자의 위치가 회전자극과 고정자극의 종단부가 만나는 위치, 즉 토크가 발생하기 시작하는 위치 θ_{min} 에 도달할 시점에 M_2 를 오픈시키면 커패시터 여자모드에서 전원 여자모드로 전환되고, SRM의 토크 발생구간에는 전원에서 에너지를 공급하게 되어 역률을 개선하는 작용을 한다. 이 기간 동안에 전원전압이 커패시터 전압보다 낮을 경우에는 다이오드 D_7 이 역바이어스가 되어 커패시터의 전압은 변화하지 않지만, 전원전압이 높은 경우는 다이오드 D_7 을 통하여 전원전압에 의해 충전상태가 되므로 전원 여자모드와 전원충전모드가 동시에 발생한다.

회전자 위치가 스위치 오프각 θ_{off} 에 도달할 시점에 M_1 을 오픈하면 컨버터는 에너지 회수모드로 동작하며, SRM 상권선의 잔류 자계에 에너지를 커패시터로 회수되므로 커패시터의 전압은 충전으로 인해 상승하게 된다.

3.2 역률개선 스위칭의 문제점

Fig. 5는 3.1절의 역률개선을 위한 컨버터회로의 스위칭 방식을 적용하여 시뮬레이션을 하였을 때, 전원 전압, 전원전류 및 상전류 파형이다.

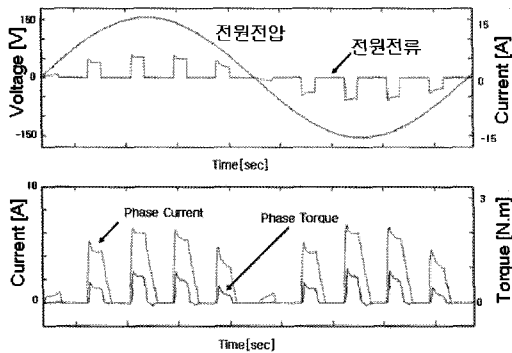


Fig. 5 Waveform of source voltage, source current and phase current using switching topology for PFC

Fig. 5의 결과로부터 전원 측의 전압과 전류는 동위상 성분이 증가하여 역률이 개선되는 반면, 전원 여자모드에서 정현파 전원전압에 의해 SRM의 상권선에 흐르는 전류 및 출력토크에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이는 SRM의 토크 발생구간

에 역률개선을 위해 전원으로부터 직접 SRM에 에너지를 공급하게 되면서 발생하는 것으로서 역률개선에는 효과가 있지만, 기존의 SRM 구동회로에 비해 피크 토크리플이 증가하는 것을 예측할 수 있다.

3.3 토크리플 억제를 고려한 스위칭

고역률 구동과 피크 토크리플을 억제하기 위해 수정된 스위칭 방법이 고려되어야 한다. SRM이 토크발생 구간에서 리플이 적은 출력토크를 발생하려면 SRM의 상전류가 Fig. 6의 i_m 과 같이 일정하여야 하며, 고역률 구동을 위해서는 전원전류가 Fig. 6의 i_s 와 같이 입력 전원전압 v_s 와 동위상인 정현파 파형을 이루어야 한다. 이러한 두 조건을 동시에 만족시키기 위해서는 에너지 회수용 커패시터에 저장된 에너지로 그 차이를 보상하는 방법이 고려될 수 있다.

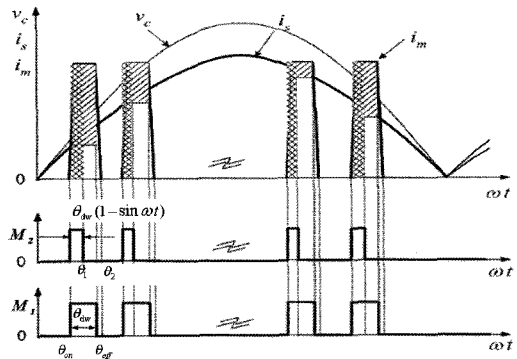


Fig. 6 Switching topology for torque ripple reduction and power factor correction

본 논문에서는 토크리플의 억제와 역률개선을 위해 커패시터 여자모드와 전원 여자모드의 동작구간을 적절히 조절하여 단상 SRM의 역률개선 및 피크 토크리플 억제가 가능하도록 한다. 이것은 상스위치 M_1 의 온 구간에서 방전 스위치 M_2 의 오프 전환시점을 적절하게 선정함으로써 달성되며, 본 연구에서는 전원전압의 크기 또는 전원의 위상에 따라 방전스위치 M_2 의 동작구간을 설정하는 방법을 적용한다.

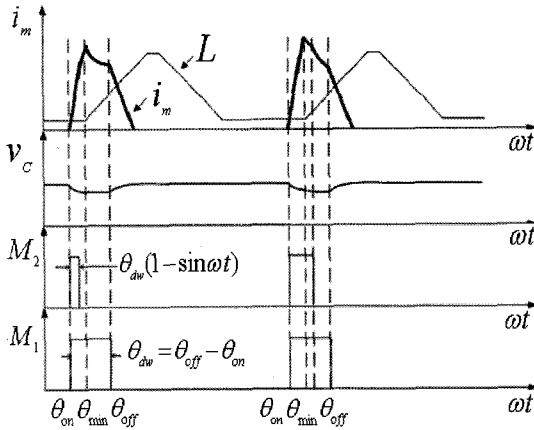


Fig. 7 Timing chart of gate signal, voltage and current for torque ripple reduction

SRM 권선여자시간을 θ_{dw} , 전원 여자시간을 θ_x 라고 하면, 다음 식(7)과 같이 전원 여자시간을 조정한다.

$$\theta_x = \theta_{dw} \sin \omega t \tag{7}$$

여기서, ω 는 전원의 각주파수이다.

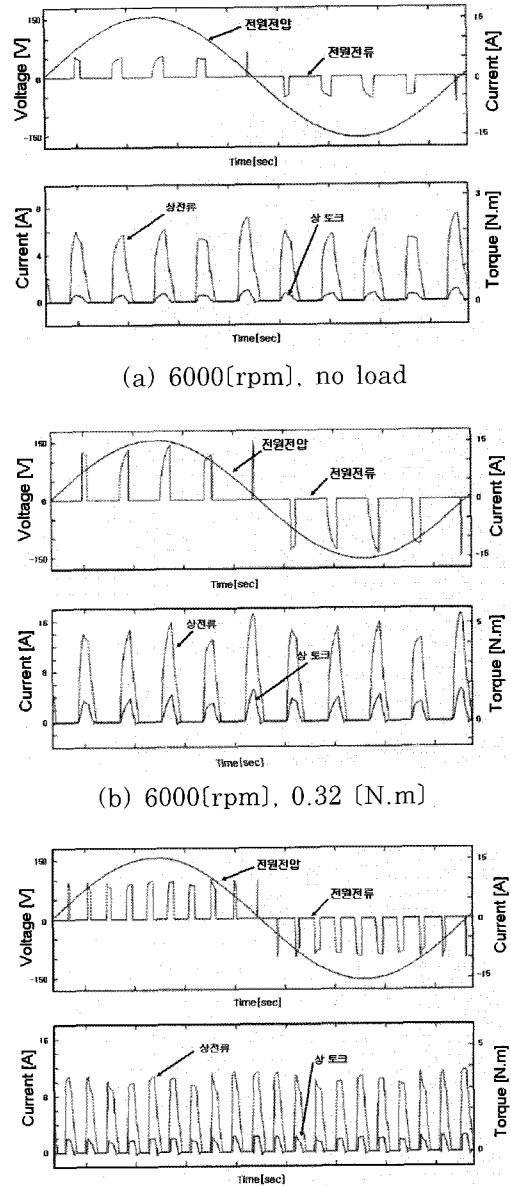
한편, 커패시터 여자모드 동작시간은 θ_{dw} ($1 - \sin \omega t$)가 된다.

Fig. 7은 역률개선과 토크리플 억제를 위한 구동회로의 방전 스위치 M_2 와 상 스위치 M_1 의 게이트 신호, 커패시터 전압과 SRM 상전류 파형을 보여준다.

4. 시뮬레이션 및 실험

4.1 시뮬레이션 및 고찰

제안된 방식의 유효성 검증을 위해 시뮬레이션을 하였다. SRM 모델은 실험을 통해 측정된 인덕턴스 프로파일에 근거를 둔 비선형모델이며, 특정 파라미터는 실험대상인 단상 SRM에서 측정된 것이다. 단상 SRM은 극수가 6/6, 고정자와 회전자의 극호각은 각각 20, 24[deg], 최소 및 최대 인덕턴스는 각각 3, 16[mH]이다. 전원은 단상 110[V], 60[Hz]의 정현파 교류이다.



(a) 6000[rpm], no load
(b) 6000[rpm], 0.32 [N.m]
(c) 12000[rpm], 0.16[N.m]
Fig. 8 Simulation results of SRM drive

Fig. 8은 운전속도 및 부하토크에 따른 시뮬레이션 결과이다. Fig. 8(a)는 운전속도 및 부하토크 6000[rpm], 무부하, (b)는 6000[rpm], 0.32[N.m], (c)는 12,000[rpm], 0.16[N.m]일 경우의 전원 전압과 전류, 상전류와 출력토크의 결과 파형을 보인다.

시뮬레이션 결과로부터 운전속도가 높을수록 상전류 파형의 왜곡이 적으며, 전원전압이 낮은 구간에서도 입력전류가 공급되고 있으므로 역률이 향상됨을 알 수 있다. 또한, 무부하시보다 부하가 증가할수록 역률개선이 뚜렷해지고 있다.

5.2 실험 및 고찰

실험에서 사용한 SRM은 200(W) 급으로 시뮬레이션에 적용한 것이며, 구동드라이버는 실험을 용이하게 하기 위해 DSP 기반으로 구성하였다. Fig. 9는 단상 SRM 구동시스템을 보여주고 있다.

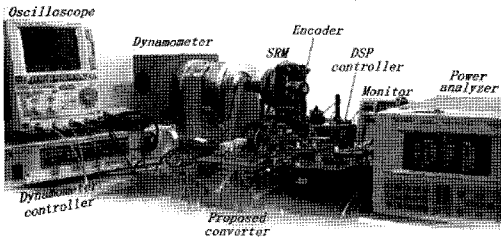
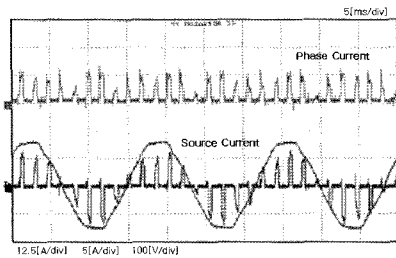
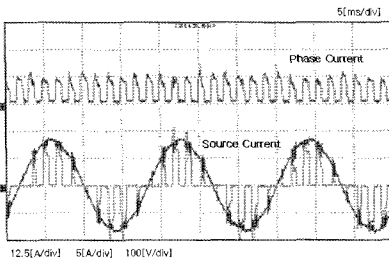


Fig. 9 Single-phase SRM driver system

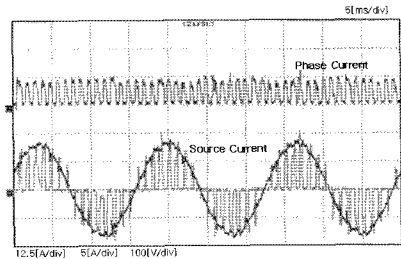


(a) using switching topology for high power factor

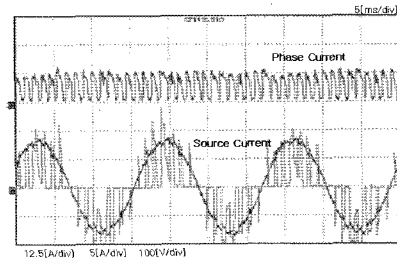


(b) using switching topology for high power factor and torque ripple reduction
 Fig. 10 Experimental waveform before and after using switching topology for torque ripple reduction at 6000[rpm]

Fig. 10(a)는 역률개선만을 (b)는 토크리플 억제를 함께 고려한 스위칭 방법 적용에 따른 실험결과이다. 실험은 정격속도 6000[rpm], 정격토크 0.32[N.m]로 행하였다. Fig. 10의 결과로부터 두 가지 방법 모두 역률개선 효과가 있지만, 토크리플 억제가 고려된 스위칭 방식이 역률개선만을 위한 스위칭 방법을 사용했을 경우보다 피크 토크리플이 현저히 저감된 상전류가 흐르는 것을 알 수 있다.



(a) no load



(b) 0.21[N.m]

Fig. 11 Experimental waveform with 9000[rpm]

Fig. 11은 제시한 구동회로에 역률개선을 포함한 토크리플 개선의 스위칭 방식을 적용하였을 경우, 9000[rpm], 무부하 및 정격부하에서의 실험결과이다. 무부하 및 부하 시의 경우에도 스위칭 토폴로지에 따라 전원전류는 정현파의 포락선을 잘 유지하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 기존의 SRM 구동방식과 제시한 SRM 구동시스템의 방식에 대한 운전속도별 역률을 측정된 결과이다. 3000[rpm] 이하는 정격토크, 이상은 정격부하가 인가된 상태로 측정된 것이다. Fig. 12로부터 제시한 SRM 구동시스템의 효율이 전체 속도 범위에 걸쳐 약 0.01~0.04 정도 높은 역률을 나타내고 있음을 알 수 있다.

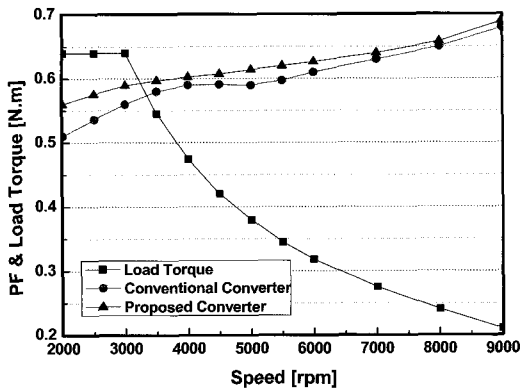


Fig. 12 Experimental result for power factor correction

5. 결 론

본 논문에서는 토크리플 억제와 역률개선을 위하여 별도의 능동회로를 추가하지 않고, 또한 전력용 스위칭 소자도 원래의 구동회로와 차이가 없는 단상 SRM의 구동드라이브와 스위칭 방식을 제안하였다. 제안한 방식은 능동소자를 사용하는 방식에 비해 간단하면서도 토크리플의 억제와 역률 개선이 가능하다는 장점이 있다. 또한, 제안된 드라이브와 스위칭 방식은 시뮬레이션과 SRM 구동실험을 통해 그 타당성이 입증되었다.

참고문헌

- [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, 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.
- [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, pp. 1647~1652, 2002.
- [4] 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, pp. 541~545, 1997.
- [5] 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, vol. 2, pp. 1055~1059, 2002.
- [6] A. Consoli, M. Cacciato and F. Gennaro, "Single Chip Integration for Motor Drive Converters with Power Factor Capability", IEEE Trans. on P.E, vol. 19, pp. 1372~1379 2004.
- [7] J. Reinert, S. Schroder, "Power-Factor Correction for Switched Reluctance Drives", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 49, pp. 54~57, 2002.

저 자 소 개



안영주(安永珠)

1957년생, 1986년 부산공업대학교 전기공학과 졸업, 1995년 부산대학교 전기공학과(공학박사), 2007년 현재 부경대학교 공과대학 전기·제어공학부 부교수