

고속 SRM 구동시스템 설계

김태형, 안영주*, 이동희, 안진우
 경성대학교, *부경대학교

Design of High Speed Drive

Tae-Hyoung Kim, Dong-Hee Lee, Jin-Woo Ahn, Young-Joo An*
 Kyungsu Univ., *Pukyong National Univ.

Abstract - This paper proposes high speed SRM drive system for blower with a new 4-level inverter and precise excitation position generator. For the high speed blower, a proper inverter and control method are proposed and the output characteristics are analyzed. In order to get a fast build-up and demagnetization of excitation a current, 4-level inverter system is proposed. The proposed 4-level inverter has additional charge capacitor, power switch and diode in the conventional asymmetric converter. The charged high voltage is supplied to the phase winding for fast current build-up, and demagnetization current is charged to additional capacitor of 4-level inverter.

In addition, a precise excitation position generator can reduce turn-on and turn-off angle error according to sampling period of digital control system. The proposed high speed SRM drive system is verified by computer simulation and experimental result.

1. 서론

SRM은 특성상 고속 운전에 매우 유리하지만, 이를 구동하기 위한 제어 측면에서는 몇 가지 문제점이 제기되고 있다. 특히, SRM의 고속 운전영역에서는 여자전류를 확립하기 위한 시간과 감자시간이 매우 짧아져서, 충분한 여자전류의 확립이 매우 어렵고 감자구간이 부토크 영역까지 확장되는 문제가 발생한다. 따라서 SRM의 여자전류는 고속 운전에 요구되는 토크를 충분히 발생하지 못하며, 제어 특성도 매우 나빠지게 된다.

또한 일정한 제어주기 내에서 검출된 회전자 위치에 의해 상여자 시기를 결정하게 되는 일반적인 마이크로프로세서 기반의 제어 시스템에서는 고속 운전영역에서 제어주기에 의한 상여자 위치의 오차가 매우 커져서 정상적인 운전이 매우 어렵다.[1][2][3][4]

본 논문에서는 송풍기용 고속 SRM에 대하여, 짧은 시간 내에 충분한 토크 전류를 확립하기 위하여 충전된 높은 여자전압을 상권선에 인가하고, 감자 전류가 부토크 영역에서 발생하지 않도록 빠른 감자 특성을 가지는 4-레벨 인버터를 제안하였다. 한편, 고속 운전영역에서 샘플링 제어주기로 인한 상 스위칭 패턴의 정밀도 감소 문제를 해결하기 위하여 순시 패턴 발생기를 적용하였다.

제안된 4-레벨 인버터와 순시 상여자 패턴 발생기를 적용한 고속 SRM 구동 시스템은 시뮬레이션 및 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 고속 운전용 SRM의 운전특성

2.1 고속 운전구간에서의 여자전류 확립

그림 1은 고속 운전 영역에서 회전자 위치각에 따른 인덕턴스와 여자전류의 형상을 나타내고 있다. 그림 1에서 알 수 있듯이 고속 운전 영역에서는 여자전류가 인

덕턴스의 상승구간에서 충분히 확립되지 못하여 발생토크가 충분치 못한다. 감자 시에도 부토크 영역까지 전류가 확장되어 제어 특성을 나쁘게 하는 원인이 된다.

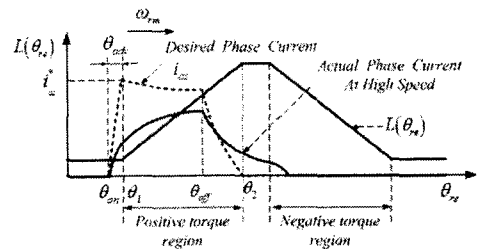


그림 1. 고속 운전영역에서의 SRM의 상전류
 Fig. 1 Phase current of SRM at high speed drive area

여자전류의 확립에 요구되는 시간은 순시 전압 방정식으로부터 전류의 변화분을 여자전류의 크기로 가정하여 다음과 같이 계산된다. 또한 여자전류가 확립되는 시간 Δt_r 로부터 SRM의 운전 속도에 따라 다음과 같이 선행각의 요구치가 결정될 수 있다.

$$\Delta t_r = L_{min} \cdot \frac{i_{abs}^*}{V_{abs} - R_a \cdot i_{abs}^*} \quad (1)$$

단, L_{min} : 비정렬 위치에서의 인덕턴스

i_{abs}^* : 상 여자전류의 지령치

$$\theta_{adv} = \omega_{rm}^* \cdot \Delta t_r \quad (2)$$

단, θ_{adv} : 선행각 [rad]

ω_{rm}^* : SRM 지령 속도 [rad/sec]

Δt_r : 여자전류의 확립 시간[sec]

일반적인 비대칭 컨버터로 동작하는 경우, 상용전원에서 요구되는 여자전류의 크기가 가속 구간에서 8[A]인 경우에 설계된 SRM에서의 여자전류 확립시간 Δt_r 은 약 0.165[μ]이다. 운전속도가 20,000[rpm]인 경우에 요구되는 선행각이 19.8[deg]가 되며, 이는 허용 가능한 최대 선행각 12[deg]를 초과하게 되어 제어가 불가능해진다.

만일 요구되는 선행각이 허용 가능한 선행각의 범위가 내라 하더라도 선행각을 크게 하면, 토크가 발생하지 않는 영역에서의 동손이 크게 증가하게 되어 효율이 크게 감소하게 된다. 또한 여자전류의 소호를 위하여 고속영역에서는 턴-오프 각을 조절하여야 하므로 실제 토크 발생 영역이 크게 감소하게 된다.[5][6]

2.2 샘플링 주기에 의한 여자위치 결정오차

그림 2는 일정한 샘플링 주기를 가지는 제어 시스템에서 샘플링 주기에 의해 결정되는 상여자 위치 결정 오차와 이에 의한 상전류 형상을 나타내고 있다.

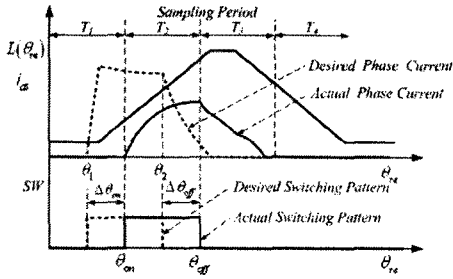


그림 2 샘플링 주기에 의한 여자위치 결정 오차
Fig. 2 Error of excitation position from sampling period

일반적인 중·저속 영역에서 턴-온 각도 오차와 턴-오프 각도 오차는 크게 문제되지 않지만, 고속에서는 12/8 극 구조의 SRM에서 10,000[rpm]에서 100[μs]의 샘플링 주기는 기계각으로 6[deg]의 오차를 가지게 된다.

따라서 고속 구동은 제어기에서 요구하는 토크를 발생하기 위한 충분한 여자전류의 확보가 어렵고 고속 운전 영역에서 샘플링 주기의 지연이 발생하여 토크 오차를 발생하게 되어 적절한 제어가 어렵다.[7][8]

3. 제안된 고속운전 시스템

본 논문에서는 고속 SRM의 안정적인 운전을 위하여 4-레벨 인버터와 아날로그 델타 PWM 방식을 이용한 순시 상여자 패턴 발생기를 제안하였다.

3.1 4-레벨 인버터의 동작모드

그림 3은 제안된 고속 SRM을 구동하기 위한 4-레벨 인버터를 나타내고 있다. 4-레벨 인버터는 기존의 비대칭 컨버터에서, 높은 여자 전압을 인가하기 위한 스위치와 다이오드가 각각 1개씩 추가된 형태로 구성되어 있으며, 충전부의 전압이 크게 증가하는 경우에 이를 소비하기 위한 회생부로 구성된다.

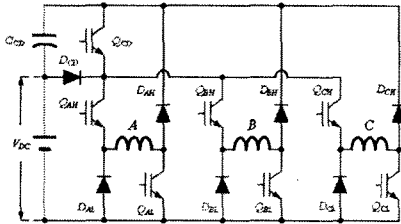


그림 3. 제안된 고속 SRM용 4-레벨 인버터
Fig. 3 The proposed 4-level inverter for high speed SRM

제안된 고속 SRM용 4-레벨 인버터의 동작 모드는 크게 4가지 모드로 구분되며, 각 동작 모드에서의 구동 특성은 다음과 같다.

A. 모드 1-4 : Fast build-up and demagnetization

그림 4는 제안된 4-레벨 인버터의 빠른 여자 전류를 확보하기 위하여 충전된 전압이 상권선에 인가되는 여자 모드와 여자 전류를 빠르게 소호시키기 위한 감자 모드를 나타내고 있다. 여자 상태에서 상권선에 인가되는 전압의 크기는 전원전압 V_{DC} 와 충전 전압 V_{CD} 가 같이 인가된다.

빠른 감자모드는 여자 전류가 빠르게 감자되어 부토크 영역으로 확장되지 않도록 하는 구간이다. 이 모드에서는 충전단의 스위치 Q_{CD} 와 상권선의 Q_{AH} 및 Q_{AL} 이 모두 턴-오프되어, 감자 전류는 그림 4(b)와 같이 충전단 커패시터 Q_{CD} 에 충전된다.

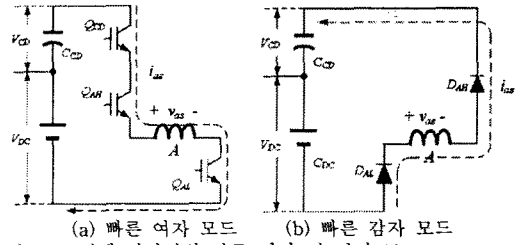


그림 4. 4-레벨 인버터의 빠른 여자 및 감자 모드
Fig. 4 Fast Build-up and demagnetization mode of 4-level inverter

B. 모드 2 - 3 : Current control mode

그림 5는 여자 전류의 확립에 따라, SRM의 토크를 일정하게 제어하기 위한 전류 제어 모드 구간에서의 동작을 나타내고 있다. 충전 전압을 인가하는 스위치 Q_{CD} 가 오프되고, 일반적인 비대칭 컨버터와 동일하게 동작하는 구간으로, 상권선에 인가되는 전압의 크기는 상용전원으로부터 공급되는 직류 링크단 전압 V_{DC} 와 스위치 오프 상태에서는 0으로 2가지의 전압이 공급된다.

그림 6은 제안된 4-레벨 인버터의 동작 모드별 상권선 전압과 전류의 형상을 나타내고 있다. 고속 운전용 SRM에서 4-레벨 인버터는 저속 운전 구간에서는 모드 2~모드 4로 동작하고, 중고속 운전 구간에서는 모드 1~모드 4로 동작하며, 고속 운전 영역에서는 모드 1, 모드 2 및 모드 4로 동작하게 된다.

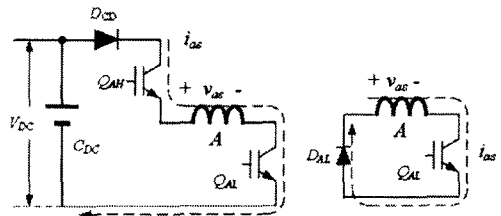


그림 5. 4-레벨 인버터의 전류 제어모드
Fig. 5 Current control mode of 4-level inverter

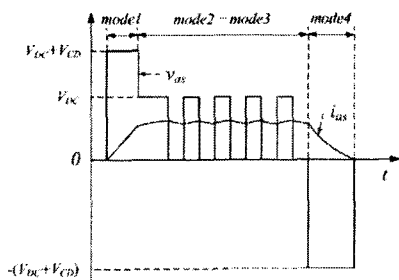


그림 6. 4-레벨 인버터의 상권선 전압 및 전류
Fig. 6 Phase voltage and current of 4-level inverter

3.2 고정도 순시 상여자 패턴 발생기

그림 7은 본 논문에서 적용한 SRM의 순시 상여자 패턴 발생기의 내부 블록을 나타내고 있다.

그림 8은 인덕턴스에 따른 고속 SRM용 순시 상여자 패턴 발생기의 스위칭 패턴 구간을 나타내고 있다. 엔코더의 위치 정보로부터 각 상 스위치의 턴 온-오프 구간을 결정해주어 순시적으로 상여자 스위칭 패턴을 발생시켜 메인 DSP에 미리 설정된 레지스터와 비교하여 스위칭 패턴을 발생시키게 된다.

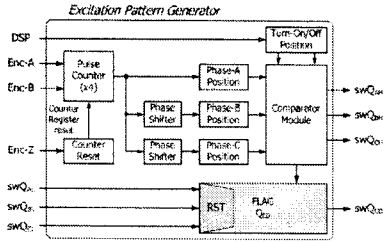


그림 7. 고속 SRM용 순시 상여자 패턴 발생기 블록도
Fig. 7 Block diagram of instant phase current patten generat er

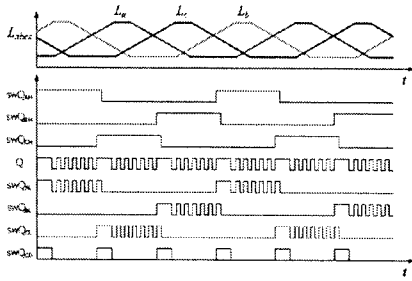


그림 8. 순시 상여자 패턴 발생기의 스위칭 패턴
Fig. 8 Switching patten of instant phase current patten generator

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

제안된 기법의 효율성을 입증하기 위해 4-레벨 인버터와 순시 상여자 패턴 발생기를 3상 12/8극 송풍기용 300W급 SRM에 적용하여 시뮬레이션과 실험을 수행하였다.

4.1 시뮬레이션 결과

그림 9는 제안된 고속 운전용 SRM 구동 시스템의 속도 제어 블록을 나타내고 있다. 제안된 순시 상여자 패턴 발생과 전류 제어를 위하여 샘플링 시간을 가지는 디지털 제어 시스템에서 지령 전류를 발생하고, 순시 전류 제어는 델타 PWM이 가능한 제어기로 구현하였다.

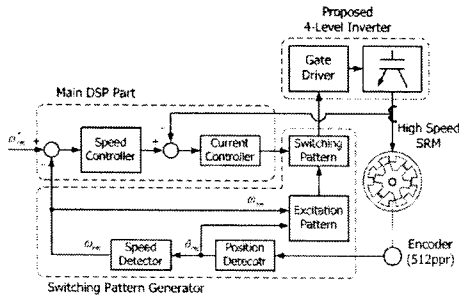


그림 9. 제안된 고속 SRM 구동 시스템 제어블록도
Fig. 9 Block diagram of the proposed high speed SRM drive

시뮬레이션은 Matlab을 이용하여 비대칭 컨버터와 제안된 4-level 인버터를 비교하였다.

그림 10은 지령속도 10,000[rpm]에서 기존의 비대칭 컨버터와 제안된 4-level 인버터의 상전류를 비교한 결과를 나타낸 것이며 그림 11은 속도응답특성을 비교한 결과이다. 그림 10(a)의 상전류의 크기는 제안된 4-레벨 인버터보다 리플이 크고, 여자 전류의 확립을 위하여 선행각을 크게 설정하였다. 또한 여자 전류의 소호 구간도 제안된 4-레벨 인버터에 비하여 매우 길어지게 된다. 속도 응답 특성에서도 4-레벨 인버터가 비대칭인버터에 비해 고속 응답 특성이 우수하여 전류 제어 특성이 크게 개선됨을 나타내고 있다.

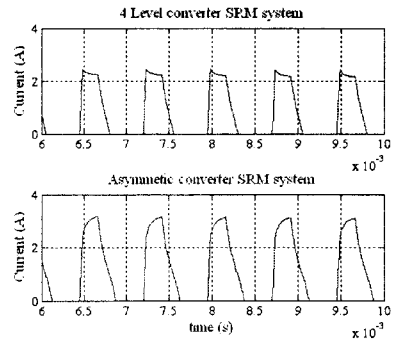


그림 10. 전류 파형의 비교 (10,000[rpm])
Fig. 10 Comparison result of current waveform(at 10,000[rpm])

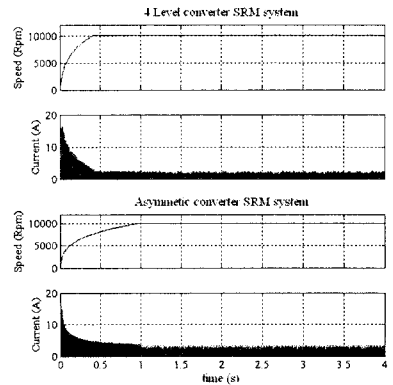


그림 11. 속도 응답 특성 비교 (10,000[rpm])
Fig. 11 Compare of speed response (10,000[rpm])

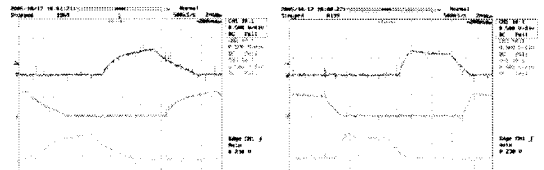
4.2 실험 결과 및 검토

제안된 고속 SRM 구동 시스템의 성능을 검증하기 위하여 실험장치를 설계하고 그 성능을 평가하였다.

그림 12는 4,000[rpm] 운전 상태에서 비대칭 컨버터와 제안된 4-레벨 인버터의 동일한 운전 조건에서의 상전류 파형을 비교한 것이다. 4-레벨 인버터의 경우 기존의 비대칭 컨버터에 비하여 전류의 여자 구간이 매우 짧고, 소호상태에서도 빠른 응답 특성을 보이고 있다.

그림 13은 운전속도 10,000[rpm]에서 제안된 순시 여자 패턴 발생기를 사용하지 않는 비대칭 컨버터와 순시 여자 패턴 발생기를 적용한 비대칭 컨버터 및 제안된 방식의 운전 성능을 나타내고 있다.

그림 14는 15,000[rpm]에서의 제안된 방식으로 운전되는 SRM의 총방전 전류, 상전류, 회전자 위치 및 상전압의 파형을 나타내고 있다. 적용된 엔코더의 기계적 배어링의 한계로 인해 15,000[rpm]에서 측정이 실행되었다.

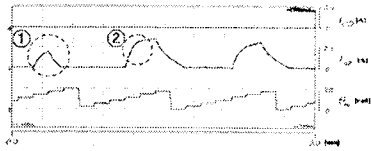


(a) 비대칭 컨버터(2.5[A]/div, 200[μs]/div)
(b) 제안된 4-레벨 인버터(2.5[A]/div, 200[μs]/div)
그림 12. 비대칭 컨버터와 4-레벨 인버터의 상전류 파형 (4,000[rpm])
Fig. 12 Current comparison Asymmetric inverter and 4-level inverter (4,000[rpm])

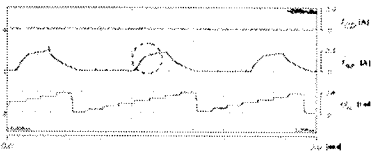
그림 15는 비대칭 컨버터와 제안된 시스템의 지령속도

도달 시간을 비교하였다. 제안된 시스템의 경우에 기존의 비대칭 컨버터에 비하여 지령속도 도달 시간이 매우 단축되는 것을 확인할 수 있다.

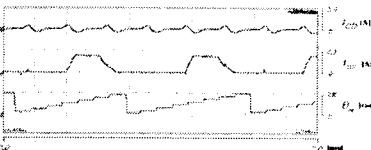
그림 16은 제안된 시스템과 비대칭 컨버터의 속도-효율 특성을 실험한 결과를 보이고 있다. 감자 에너지를 저장하여 여자 구간에서 재사용하므로 짧은 선행각으로 여자 전류를 확립할 수 있어 비대칭 컨버터 운전에 비하여 높은 운전 효율 특성을 나타내었다.



(a) 순시 여자 패턴 발생기를 적용하지 않은 비대칭 컨버터



(b) 순시 여자 패턴 발생기를 적용한 비대칭 컨버터



(c) 제안된 고속 SRM 제어기

그림 13. 전류 및 회전자 위치각(10,000 rpm)

Fig. 13 Comparisons of current and rotor position

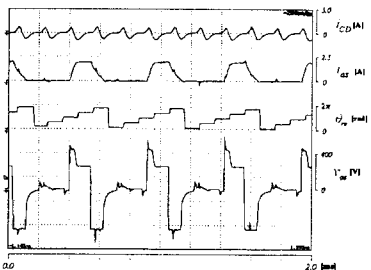
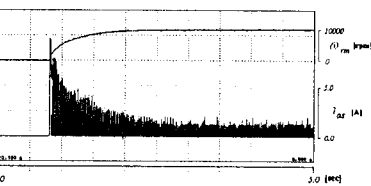
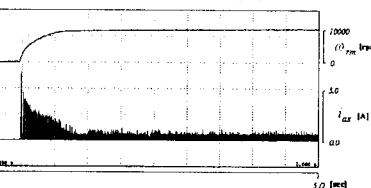


그림 14. 제안된 고속 운전 시스템의 운전 특성(15,000 [rpm])

Fig. 14 Capacitor, phase current, rotor position and phase voltage of the proposed system(15,000[rpm])



(a) 비대칭 컨버터



(b) 제안된 4-레벨 인버터

그림 15 비대칭 컨버터와 제안된 4-레벨 인버터의 지령속도 도달시간 비교(10,000[rpm])

Fig. 15 Speed response of asymmetric inverter with the prop

osed system (10,000[rpm])

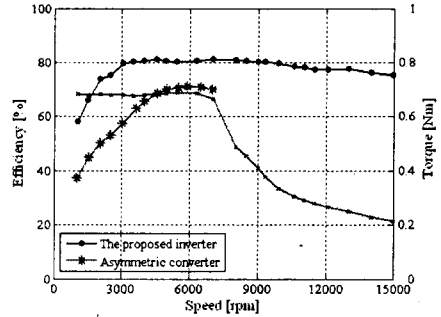


그림 16. 속도 및 효율 특성 비교

5. 결론

본 논문에서는 고속 SRM의 운전을 위하여 빠른 여자 전류의 확립과 빠른 감자특성을 가지는 새로운 4-레벨 인버터와 제어주기와 관계없이 상여자 스위칭 패턴을 결정하는 정밀 상여자 패턴 결정회로를 제안하였다. 제안된 4-레벨 인버터는 고속 운전 영역에서 짧은 구간내에 토크 전류를 확립할 수 있고, 이로 인한 고효율 운전이 가능함을 확인하였다. 또한 고속 운전 영역에서 제한된 샘플링 제어 주기로 인한 상여자 위치 오차에 대한 운전 특성을 실험을 통하여 비교하였으며, 제안된 순시 상여자 패턴 발생기의 유효함을 증명하였다.

제안된 고속 SRM 제어 시스템은 시뮬레이션 및 실험 결과에서 매우 우수한 특성을 보임을 확인하였다.

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

[참고 문헌]

- [1] Mekhiche M, Kirtley J.L, Tolikas M, Ognibene E, Kiley J, Holmansky E, Nimblett F; "High Speed Motor Drive Development for Industrial Applications", International Conference IEMD '99, 9-12, IEEE CNF, pp.244-248, 1999.
- [2] M. A. Rahman, A. Chiba, T. Fukao; "Super High Speed Electrical Machines-Summary" Power Engineering Society General Meeting IEEE 6-10, June, 2004 pp.1272 - 1275 Vol.2, 2004.
- [3] 안진우; "스위치드 릴럭턴스 전동기", 오성미디어, pp.1-454, 2004.
- [4] Borges T.T., de Andrade D.A., de Azevedo H.R., Luciano M.; "SWITCHECD RELUCTANCE MOTOR DRIVE AT HIGH SPEEDS, WITH CONTROL OF CURRENT", Electric Machines and Drives Conference Record, IEEE International 18-21 pp.TB1/12.1 - TB1/12.3, IEMDC, 1997.
- [5] M. Dahmane, F.Meibody-Tabar, F-M. Sargos; "An Adpted Converter For Switched Reluctance Motor/Generator for High Speed Applications", IEEE, 2000.
- [6] T. J. E Miler; "Switched Reluctance Motor and Their Control," Oxford University Pree, pp.22, 70, 161-180, 1993.
- [7] Changhwan Choi, Daek Lee, Kyihwan Park, "Fuzzy design of a switched reluctance motor based on the torque profile optimization", Magnetics, IEEE Transactions on, Volume 36, Issue 5, Part 1, pp.3548-3550, Sept 2000.
- [8] S. Vukosavic and V. R. Stefanovic; "SRM Inverter Topologies: A Comparative Evaluation" IEEE Trans. on IA, Vol. 27 no. 6 pp. 1034-1047, 1991.