

고속 SRM 구동 시스템 설계

이주현, 김봉철, 이동희, 안진우
경성대학교

A Design of High Speed SRM Drive System

Ju-Hyun Lee, Bong-Chul Kim, Dong-Hee Lee, Jin-Woo Ahn
Kyungsung University

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 12/8 SRM is designed and analyzed. In order to get a fast build-up and demagnetization of excitation a current, new 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.

1. 서 론

최근 시스템의 소형 경량화 및 동력 전달의 효율성을 위하여 부하와 직결된 고속 회전 시스템에 대한 관심이 크게 증가하고 있다[1-3]. 기존의 고속 회전기 시스템의 동력원으로 견고성과 유지보수가 우수한 농형 유도전동기가 많이 사용되어 왔다. 그러나 고속 운전을 위해 입력되는 높은 주파수로 인해 모터내의 철손과 권선에서의 손실이 증가하는 등 많은 문제점이 제기되고 있다. 농형 유도전동기를 대체할 동력원으로 직류기나 영구자석 교류전동기 등이 거론되고 있으나 고속 회전에서 브러시 사용의 어려움 또는 영구자석 내부에서의 소자현상의 발생과 기계적 파괴 등을 초래하게 된다. 반면, SRM(Switched Reluctance Motor: 이하 SRM)은 펄스형 여자 전원에 의해 구동되는 전자기적인 구조를 갖는 전동기로서, 기계적인 구조가 매우 단순하고, 견고하며, 유도전동기에 비해 효율이 높아 고속 회전기 시스템의 동력용 전동기에 매우 적합하므로, SRM을 적용한 고속 운전시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[4-5].

SRM의 고속 운전영역에서는 여자전류를 확립하기 위한 시간과 감자시간이 매우 짧아져서, 충분한 여자전류의 확립이 매우 어렵고 감자전류가 부ток 영역까지 확장되는 문제가 발생한다. 이러한 문제로 인하여 SRM의 여자 전류는 고속 운전에 요구되는 토크를 충분히 발생하지 못하며, 제어 특성도 매우 나빠지게 된다[5]. 또한 일정한 제어주기 내에서 검출된 회전자 위치에 의해 상여자 시기를 결정하게 되는 일반적인 마이크로 프로세서 기반의 제어 시스템에서는 고속 운전영역에서 제어주기에 의한 상여자 위치의 오차가 매우 커져서 정상적인 운전이 매우 어렵다.

본 논문에서는 송풍기용 고속 SRM을 설계하고, 짧은 시간내에 충분한 토크 전류를 확립하기 위하여 충전된

높은 여자전압을 상권선에 인가하고, 감자 전류가 부토크 영역에서 발생하지 않도록 빠른 감자 특성을 가지는 4-레벨 인버터를 제안하였다. 또한 고속 운전영역에서 상 스위칭 패턴의 정밀도 감소 문제를 해결하기 위하여, 메인 프로세서와 별도로 엔코더의 위치 멀티로부터 순시적으로 상 스위칭 패턴을 결정하는 순시 패턴 발생장치를 적용하였다.

제안된 4-레벨 인버터와 순시 상여자 패턴을 적용한 고속 SRM 구동 시스템은 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 고속 운전용 SRM의 설계 및 운전특성

2.1 고속 SRM의 설계 결과

SRM의 설계에서 고정자 권선을 제외한 파라미터들은 기존 송풍기용으로 적용되고 있는 3상 SRM을 참조하였다. 고속운전을 위한 SRM의 설계에서 고정자 권선의 인덕턴스는 매우 중요한 요소가 된다. 전동기의 인덕턴스를 결정하는 주요변수로는 전동기의 적층길이와 권선수가 있는데, 적층길이는 직경과 함께 용도에 의해 고정되어지므로 아래와 같이 권선수에 대한 변화를 시뮬레이션 하여 설계하였다. 그림 1과 그림 2는 턴수 변화에 따른 출력 및 전류의 변화를 나타낸 것이다.

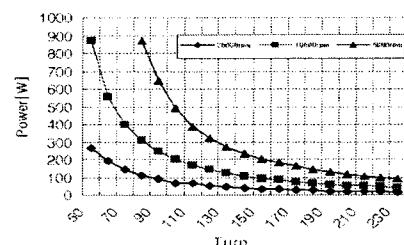


그림 1 극당 턴수에 따른 출력
Fig. 1 Power according to turn per pole

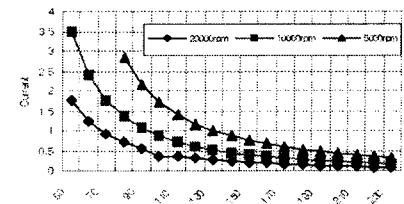


그림 2 극당 턴수에 따른 전류
Fig. 2 Current according to turn per pole

그림 3은 설계에 따른 3-D 자화 곡선과 co-energy 곡선을 보인다. 고속 운전을 고려하여 고정자 권선의 턴수를

줄임으로써 자속 포화가 발생하지 않으므로 자속이 거의 선형으로 변함을 알 수 있다. 설계한 고속 SRM의 치수는 표1에 나타내었다.

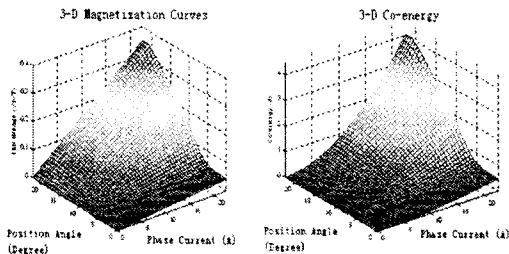


그림 3-3 D 자화 곡선과 co-energy 곡선
Fig. 3-3 D Magnetization curves and 3-D co-energy curves

표 1. 설계된 전동기의 주요 사양
Table 1. The specification of the designed motor

Stator pole number	12
Rotor pole number	8
Stator outer diameter	132mm
Rotor inner diameter	74mm
Number of phase	3
Core length	28.7mm
Air gap length	0.250mm
Stator pole arc	18[deg.]
Rotor pole arc	14[deg.]
Winding resistance per phase	0.536Ω
Number of turn per phase	150 Turn
Rotor inertia	4.430e-04 kg · m ²
Friction coefficient	0.00001 N · s / rad

2.2 고속 SRM의 제어 특성

SRM의 여자 전류는 토크 발생 영역에서 충분한 토크를 발생할 수 있는 크기로 확립되어야 한다. 일반적인 저속 운전 영역에서는 어드밴스 각도의 조절에 의하여 여자 전류의 확립이 가능하지만, 고속 운전 영역에서는 여자 전류의 확립에 필요한 시간이 충분하지 못하므로 제어기에서 요구되는 토크를 발생하기가 매우 어렵다. 그림 4는 고속 운전 영역에서 SRM의 여자 전류의 형상을 나타내고 있다. 그림 4에서 고속 운전 영역에서 SRM의 여자전류는 충분히 확립되지 못하고, 감자 시에도 부토크 영역까지 Tail 전류가 확장되어 제어 특성이 매우 나빠지게 된다.

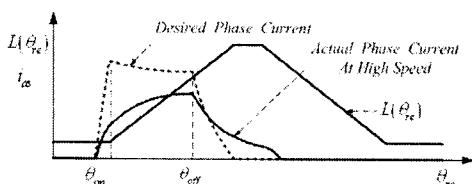


그림 4 고속 운전 영역에서의 SRM의 상전류
Fig. 4 Phase current of SRM at high speed drive area

빠른 여자 전류의 확립을 위해서는 전류의 확립구간에서 높은 여자전압의 인가가 필요하다.

그림 5는 일정한 샘플링 주기를 가지는 제어 시스템에서 샘플링 주기에 의해 결정되는 상여자 위치 결정 오차와 이에 의한 상전류 형상을 나타내고 있다.

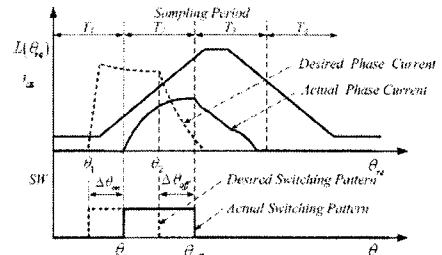


그림 5 샘플링 주기에 의한 여자위치 결정 오차
Fig. 5 Error of excitation position from sampling period

일반적인 중·저속 영역에서 텐-온 각도 오차($\Delta\theta_{on}$)과 텐-오프 각도 오차($\Delta\theta_{off}$)는 크게 문제되지 않지만, 고속 운전 영역에서는 샘플링 주기에 따라 정상적인 운전이 불가능하다.

따라서, 본 논문에서는 고속 SRM의 안정적인 운전을 위하여 여자 전류의 빠른 확립과 빠른 감자 특성을 가지는 4-레벨 인버터와 회전자 위치로부터 순시적으로 상여자 패턴을 결정하는 패턴 발생기를 적용하였다.

3. 고속 SRM 운전 시스템

3.1 4-레벨 인버터의 동작 모드

그림 6은 본 논문에서 제안된 고속 SRM을 구동하기 위한 4-레벨 인버터를 나타내고 있다. 4-레벨 인버터는 기존의 비대칭 컨버터(asymmetric converter)에서, 높은 여자 전압을 인가하기 위한 스위치와 다이오드가 각각 1개씩 추가된 형태로 구성되어 있으며, 충전부의 전압이 크게 증가하는 경우에 이를 소비하기 위한 회생부로 구성된다.

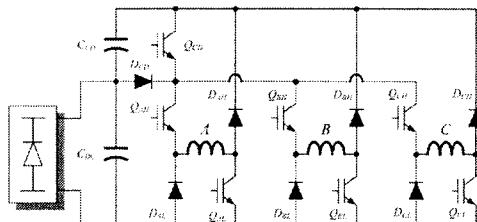


그림 6 제안된 고속 SRM용 4-레벨 인버터
Fig. 6 The proposed 4 level inverter for high speed SRM

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

모드 1-4 : Fast build-up and demagnetization

그림 7은 제안된 4-레벨 인버터의 빠른 여자 전류를 확립하기 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 인가되며, 그 크기는 식 (1)과 같다. 여자 전류의 감자는 링크단 상부의 충전 커패시터로 충전된다.

$$v_{as} = V_{DC} + V_{CD} \quad (1)$$

제안된 4-레벨 인버터의 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 오프되어, 감자 전류는 그림 7(b)와 같이 충전 단 커패시터 Q_{CD} 에 충전되며, SRM의

상권선에 인가되는 전압은 식 (2)와 같다.

$$v_{as} = -(V_{DC} + V_{CD}) \quad (2)$$

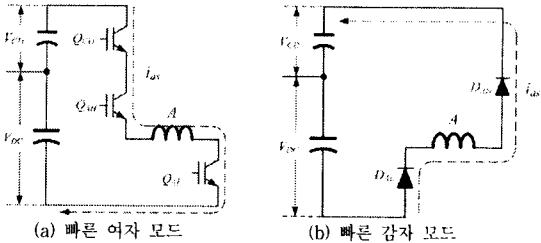


그림 7 4-레벨 인버터의 빠른 여자 및 감자 모드
Fig. 7 Fast Build up and demagnetization mode of 4 level inverter

모드 2 - 3 : Current control mode

그림 8은 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.

$$v_{as} = V_{DC} \mid_{T_{on_on}} \\ v_{as} = 0 \mid_{T_{on_off}} \quad (3)$$

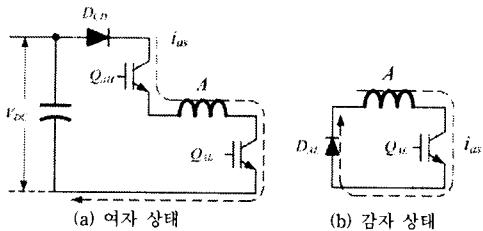


그림 8 4-레벨 인버터의 전류 제어모드
Fig. 8 Current control mode of 4-level inverter

그림 9는 제어된 4-레벨 인버터의 동작 모드별 상권선 전압과 전류의 형상을 나타내고 있다.

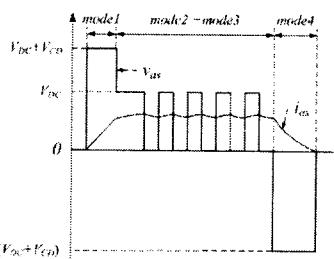


그림 9 4-레벨 인버터의 상권선 전압 및 전류
Fig. 9 Phase voltage and current of 4-level inverter

고속 운전용 SRM에서 4-레벨 인버터는 저속 운전 구간에서는 모드 2 - 모드 4로 동작하고, 중고속 운전구간에서는 모드 1 - 모드 4로 동작하며, 고속 운전 영역에서는 모드 1, 모드 2 및 모드 4로 동작하게 된다.

3.2 순시 상여자 위치 결정모드

마이크로 프로세서 또는 DSP 기반의 제어 시스템으로 구동되는 SRM 드라이브는 일정한 전류 제어주기 내에서 회전자의 위치를 검출하게 되며, 매 제어 주기에서

검출된 위치 정보로부터 상여자를 위한 스위칭 패턴을 결정하게 된다. 하지만, 고속 운전 영역에서는 일정한 dwell 구간에 대한 시간이 매우 짧아지게 되어 일정한 전류 제어 주기에서 검출된 위치 정보에 따른 스위칭 패턴은 매우 큰 오차를 가지게 된다. 특히 속도가 20,000[rpm] 이상으로 증가하게 되면, 12/8 SRM의 경우 한 전기각의 구동 시간이 375[μs] 정도이므로, 50 ~ 100 [μs]의 전류 제어 주기를 가지는 제어 시스템에서 dwell 각에 대한 정상적인 제어가 불가능하다. 즉, 50[μs]의 전류 제어 주기를 가지는 디지털 제어 시스템에서 제어 주기 동안 변동하는 회전자의 전기적 위치각은 20,000[rpm]의 경우 48° 정도이며, 이는 한상의 전기적 dwell 각이 100°로 가정하는 경우에 약 48[%]의 턴-온 및 턴-오프 오차를 가지게 된다.

그림 10은 위치정보를 검출하는 제어 주기와 속도에 따른 SRM의 토크 오차를 나타내고 있다. 그림에서 실제 응용에서 50[μs]의 제어 주기에서 운전속도가 증가할수록 지령에 대한 실제 토크의 오차가 70[%]까지 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 동일한 dwell 각도에 대하여 어드밴스 각도의 오차에 의해 부ток 영역까지 감자 전류가 확장되기 때문이다.

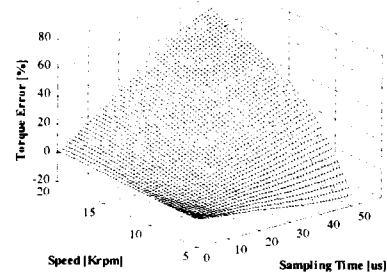


그림 10 제어주기와 속도에 따른 SRM 토크 오차
Fig. 10 SRM torque error according to Ts and speed

따라서 본 논문에서는 속도 및 전류 제어는 메인 DSP에서 처리하고, 엔코더의 위치 정보로부터 상여자 패턴은 순시적으로 결정하는 순시 상여자 패턴 발생기를 적용하였다.

그림 11은 본 논문에서 적용한 SRM의 순시 상여자 패턴 발생기의 내부 블록을 나타내고 있다.

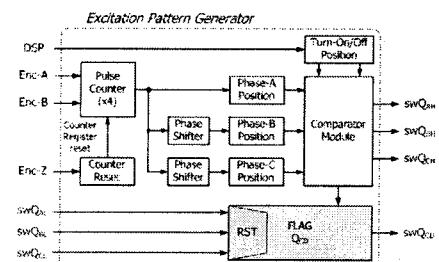


그림 11 고속 SRM용 순시 상여자 패턴 발생기 블록도
Fig. 11 Block diagram of instant phase current pattern generator

그림 11에서 순시 여자 패턴 발생기는 기본적으로 엔코더의 필스를 4체배하여 A, B 및 C상의 스위칭 구간을 결정하게 되며, 턴-온 및 턴-오프 각도는 메인 DSP에서 설정된 케이스터와 비교하여 스위칭 패턴을 발생하게 된다. 그림 10에서 swQ_{CD} 는 충전 전압을 인가하기 위한 상당 스위치의 턴-온 신호를 나타내고 있으며, swQ_{CD} 신호는 각 A, B 및 C 상의 턴-온 구간에 동기하여 턴-온되고, 순시 전류 제어기의 턴-오프 시점에서 플래그를 리셋하여 턴-오프 시키도록 설계되었다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 12는 본 논문에서 제안된 고속 운전용 SRM 구동 시스템의 속도 제어 블록을 나타내고 있다. 메인 제어기는 속도 제어기와 전류 제어기에 의한 PWM 패턴을 생성하고, 상여자 신호와 최종 스위칭 패턴은 상여자 패턴 발생기와의 조합에 의해 결정된다.

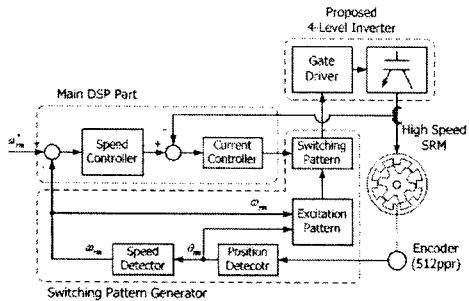
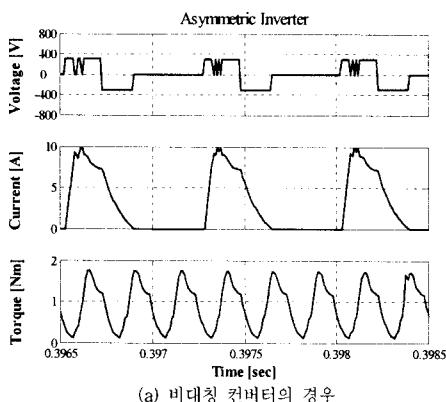
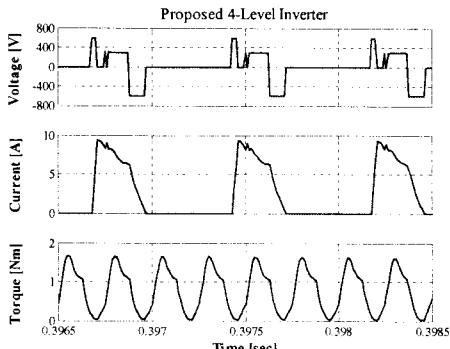


그림 12 제안된 고속 SRM 구동 시스템 제어블록도
Fig. 12 Block diagram of the proposed high speed SRM drive

시뮬레이션은 Matlab을 이용하여 비대칭 컨버터와 제안된 4-level 인버터를 비교하였다. 그림 13은 저령속도 10,000[rpm]에서 기존의 비대칭 컨버터와 제안된 4-level 인버터의 상권선 전압과 전류 및 토크를 비교한 결과를 나타낸다. 그림 13 (a)에서 상 전류의 크기는 제안된 4-레벨 인버터의 경우보다 리플이 크고, 여자 전류의 확립을 위하여 어드밴스 각도를 크게 설정하였다. 또한 여자 전류의 소호 구간도 제안된 4-레벨 인버터에 비하여 매우 길어지게 된다.



(a) 비대칭 컨버터의 경우



(b) 제안된 4-레벨 인버터의 경우

그림 13 전압, 전류 및 토크 파형의 비교(10,000[rpm])
Fig. 13 Comparison of Asymmetric Inverter with proposed 4-level inverter

제안된 4-레벨 인버터의 여자 전류 확립구간은 근본적으로 감자 구간에서 소호되는 전류의 충전분을 사용하고 있기 때문에, Q_{CD} 스위치의 단온 구간을 너무 크게 설정하게 되면, 충전 전압이 지속적으로 감소하게 되는 문제가 발생한다. 하지만, 실제 고속운전 영역에서, 여자 전류의 확립 구간에서 어드밴스 각도 제어를 통하여 충전 전압의 크기를 적절하게 제어하여야 한다.

그림 14는 제안된 4-레벨 인버터와 비대칭 컨버터를 적용한 경우의 속도 응답 특성을 나타내고 있다. 제안된 방식의 경우에 기존의 방식에 비하여 약 1.8배 정도 빠른 응답특성을 나타내고 있다.

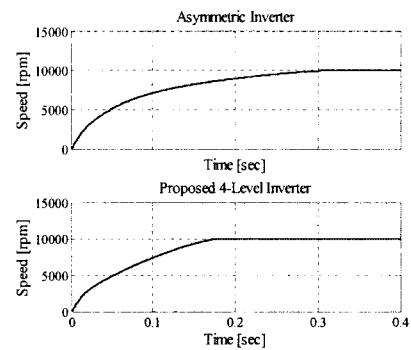


그림 14 속도 응답 특성 비교(10,000[rpm])
Fig. 14 Compare of speed response(10,000[rpm])

5. 결 론

본 논문에서는 송풍기용 20,000[rpm]급 12/8 SRM을 설계하고, 구동 시스템의 설계를 위하여 고속운전 영역에서 빠른 여자전류의 확립과 빠른 감자특성을 가지는 새로운 4-레벨 인버터를 제안하였다. 제안된 4-레벨 인버터는 시뮬레이션을 통해 매우 우수한 전류제어 특성을 확인하였다. 또한 고속운전영역에서 제한된 샘플링 주기에 대한 상여자 위치 오차에 대한 문제를 해결하기 위하여, 제어주기와 관계없이 회전자 위치정보로부터 직접 상여자 스위칭 패턴을 결정하는 정밀 상여자 패턴 결정 회로를 설계하였다.

제안된 고속 SRM 구동 시스템은 MATLAB을 이용한 시뮬레이션을 통해 적용 가능성을 확인하였다.

**본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력연구원
(과제번호: R-2004-B-213)주관으로 수행된 과제임.**

[참 고 문 헌]

- [1] Soong, W.L., Kliman, G.B., Johnson, R.N., White, R.A., Miller, J.E., "Novel High Speed Induction Motor for a Commercial Centrifugal Compressor", IEEE, ISA, VOL 36, 2000
- [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] Bon Ho Bae, Seung-Ki Sul, Jeong Hyeck Kwon, Jong Sub Shin, "Implementation of Sensorless Vector Control for Super-High Speed PMSM of Turbo-Compressor", IEEE/ISA Chicago Annual Meetig, 2001
- [4] M. Dahmane, F.Meibody Tabar, F M. Sargos, "An Adapted Converter For Switched Reluctance Motor/Generator for High Speed Applications", IEEE
- [5] 안진우, "스위치드 릴렉턴스 전동기", 오성미디어, pp.1-454, 2004