

## 견인용 SRM의 운전특성개선을 위한 권선전환컨버터

김태형, 이동희, 안영주\*, 안진우  
경성대학교, \*부경대학교

### Winding Connection Changing Converter for Traction SRM

Tae-Hyoung Kim, Dong-Hee Lee, Young-Joo An\*, Jin-Woo Ahn  
Kyungsoong University, \*Pukyong National University

**Abstract** - This paper presents a hybrid winding connection method for torque characteristics improving of a traction SRM. In order to get a high torque in wide speed range and torque ripple reduction, series and parallel winding connection are changed according to operating speed. From the analysis of torque character operation mode and efficiency, the proposed control scheme is verified.

#### 1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)은 단순한 이중돌극형의 단순한 구조를 가진 전동기구조로써 넓은 운전속도 범위를 가지고, 기계적으로 강인하며 단위면적당 출력비가 높다는 장점으로 인하여 전기자동차를 비롯한 견인용 전동기에 적합한 기구로 알려져 있다.

이러한 SRM은 자기구조상 인덕턴스의 변화구간에서 토크를 발생하는 기구를 가지고 있기 때문에 인덕턴스 변화구간에서의 여자전류의 확립이 매우 중요하며, 고속운전영역에서는 토크구간의 확보와 여자전류의 확립을 위해 낮은 인덕턴스 상태가 유리하며, 저속 운전 영역에서는 토크크리플의 억제를 위하여 비교적 높은 인덕턴스 상태가 유리하다.

본 논문에서는 견인용 3상 SRM의 속도에 따른 운전특성을 개선하기 위하여 전동기의 권선방식별 운전특성을 해석하고, 견인용 SRM의 성능을 만족하기 위한 직병렬 Hybrid 제어방식을 제안한다. 제안하는 Hybrid 제어방식은 저속에서는 고토크 및 토크크리플 저감을 고려한 직렬 운전방식으로 제어되고 고속영역에서는 충분한 여자전류의 확립을 위해 병렬 권선방식으로 제어된다. 제안된 방식은 특성 및 효율해석을 통하여 제안된 방식의 실효성을 검증하였다.

#### 2. 직병렬 전환에 따른 견인용 SRM의 구동특성

일반적인 SRM의 구동시스템과 등가회로를 나타내고 그림 2와 같으며, 이에 대한 전압방정식과 토크방정식은 식(1), 식(2)와 같다. 인덕턴스의 크기는 철심에서 발생하는 자계저항을 무시한다면 SRM의 자기구조에 의하여 식(3)와 같이 설계시 고려된 권선수와 공극의 크기, 공극의 면적에 의해 결정된다. 일반적인 설계에서는 전동기의 체적과 요구출력에 의해 권선수, 공극의 크기 및 공극의 면적이 결정되므로 인덕턴스는 일정하다. 단 자속포화로 인한 상전류에 따른 인덕턴스는 변화될 수 있다.

$$V_s = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega \quad (1)$$

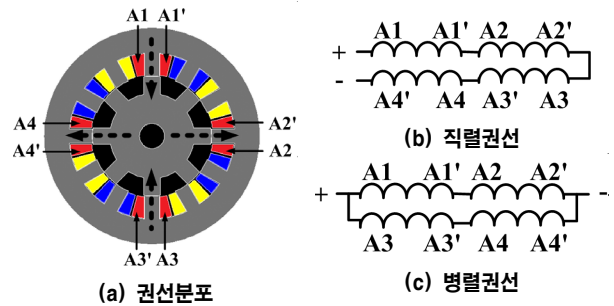
$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (2)$$

$$L(x) = \frac{N^2 \mu_0 A_{gap}}{2g} \quad (3)$$

SRM에서 운전속도는 설계시 전동기의 특성을 결정하는 중요한 요소가 된다. 고속의 전동기를 설계할 경우 고속에서의 전류확립을 고려하여 최대 인덕턴스의 크기가 작은 전동기가 유리하며, 저속의 전동기를 설계할 경우, 높은 상전류에 의한 열손실 및 전동기의 발열 등을 고려하여 최대인덕턴스가 큰 전동기를 설계하게 된다. 따라서 저속 운전영역에 따른 특성과 고속 운전영역의 특성에 따른 문제점을 일반적인 설계 및 구동 방식을 통해 동시에 극복하기는 쉽지 않다. 특히 견인용 SRM의 실제 설계시 저속운전영역과 넓은 고속운전영역을 가지게 하기 위해서는 적절한 인덕턴스 설계와 함께 전력변환기의 용량을 고려하여야 한다.

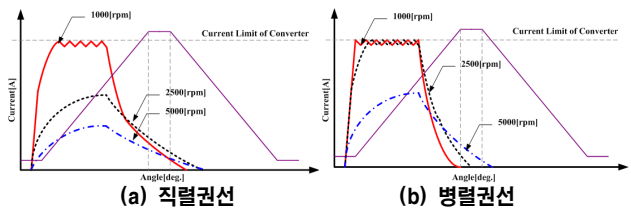
그림 3은 12/8 SRM의 A상 권선의 분포와 직렬과 병렬 권선을 통한

상권선의 구성을 나타내고 있다. 점선은 자속의 방향으로 일반적으로 직병렬 구성에 관계없이 그림과 같은 자속의 방향을 가지도록 설계한다.



〈그림 1〉 12/8 SRM의 권선분포와 권선방식

여기서 A1/A1'과 A2/A2'를 L1이라 보고, A3/A3'와 A4/A4'를 L2라고 놓고, 12/8에서 상을 구성하는 모든 극을 직렬로 연결한 경우 L1과 L2는 그림 1의 (b)와 같은 구조를 가지게 된다. 직렬과 병렬의 경우 단순한 계산을 통한 속도별 전류의 형상은 그림 4와 같이 나타난다. 앞서 제시한 바와 같이 동일한 위치에서 스위칭을 수행하더라도 상 인덕턴스가 작은 병렬권선 방식이 고속에서 빠른 여자과 감자의 수행이 가능하다. 따라서 고속에서 전류확립에 필요한 선행각으로 인해 발생하는 손실이 줄고 토크발생구간을 넓게 사용할 수 있으므로 전동기의 특성을 개선할 수 있다.



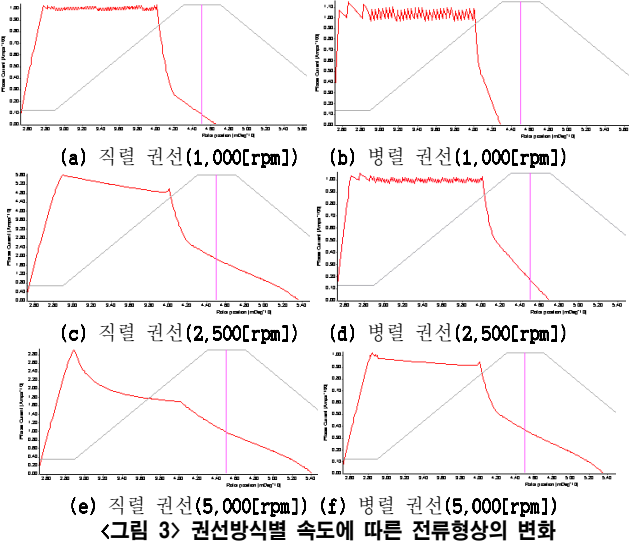
〈그림 2〉 권선방식과 속도에 따른 상전류

상기 비교된 상권선 결선방식에 따른 특성을 검증하기 위하여 SRM 전용 설계도구인 PC-SRD를 이용하여 동일 조건하에서 직렬권선 방식과 병렬권선 방식의 특성을 비교하였다. 최대전류는 코어의 최대자속밀도를 고려하여 제한되었다.

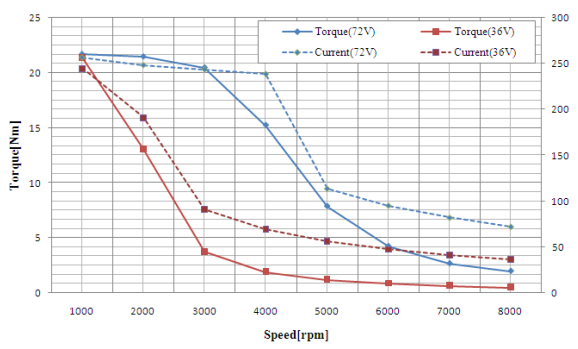
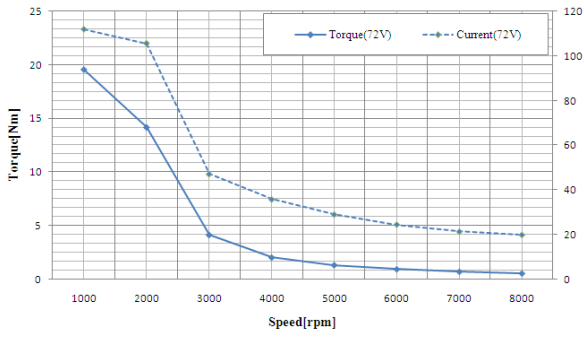
그림 3은 속도에 따른 각 권선방식별 전류의 형상을 나타낸 것이며, 그림 4는 속도에 따른 권선방식별 전류와 이에 따른 토크를 그래프로 나타낸 것이다. 그림 3에서 속도가 증가함에 따라 병렬권선의 경우는 빠른 여자특성과 함께 감자특성을 갖게 됨을 알 수 있다. 그림 4에서 직렬방식의 결선으로 구성된 경우 병렬권선방식에 비해 상대적으로 저속영역에서 낮은 전류에서 높은 토크를 생성함을 알 수 있으며, 속도증가에 따른 역기전력과 높은 인덕턴스로 인하여 토크가 급격히 감소함을 볼 수 있다. 반면 병렬방식의 결선으로 구성된 경우 저속에서는 토크가 낮으나 속도가 증가함에 따라 토크가 직렬결선 방식에 비해 크게 발생함을 알 수 있다. 이는 저속에서는 토크특성이 인덕턴스 변화율에 대하여 크게 영향을 받지만, 고속에서는 여자전류의 확립에 의해 토크특성이 나타나기 때문이다.

그림 5는 권선방식에 따른 효율을 나타내고 있으며, 저속의 경우 직렬 권선방식이 병렬권선방식에 비해 높은 효율을 가지고 고속영역에서는 병렬권선방식이 직렬권선방식에 비해 높은 효율을 나타내고 있음을 알 수 있다.

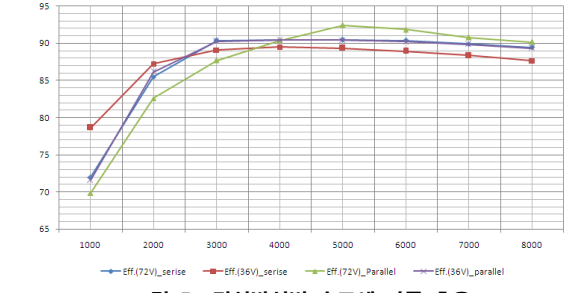
상기 시뮬레이션 결과를 바탕으로 저속영역에서는 동일한 전류로 큰 토크를 발생시키는 직렬권선방식을 사용하고 고속에서는 병렬권선을 사용하여 전류의 빠른 전류의 확립이 가능한 병렬권선방식을 사용하는 직병렬 권선 방식을 제안하였다. 그림 6은 제안된 직병렬 기법을 구현하기 위한 전력변환기의 구조를 나타내고 있다. 제안된 전력변환기는 각 상당 4개의 스위치와 4개의 다이오드를 이용하여 저속에서는 S1과 S4를 이용하여 스위칭을 수행 직렬권선방식으로 동작한다. 고속에서는 S2와 S3 및 S4가 스위칭을 수행하여 병렬 권선 방식으로 동작한다.



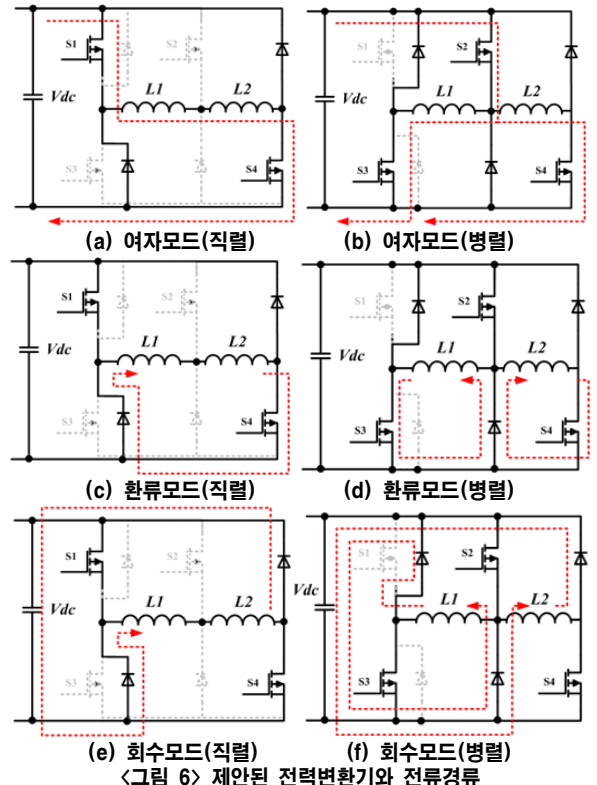
<그림 3> 권선방식별 속도에 따른 전류형상의 변화



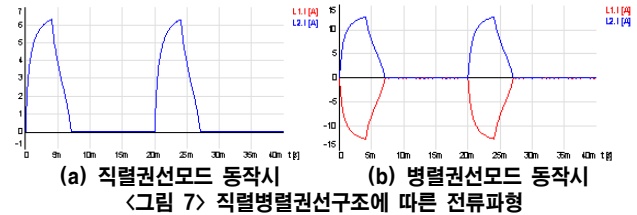
<그림 4> 권선방식별 속도에 따른 전류와 토크



<그림 5> 권선방식별 속도에 따른 효율



<그림 6> 제안된 전력변환기와 전류경류



<그림 7> 직렬병렬권선구조에 따른 전류파형

### 3. 결 론

본 논문에서는 건인 구동을 위한 SRM의 토크특성을 개선하기 위하여 저속과 고속영역에서 상권선의 결선방식에 따른 성능변화를 고찰하고 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 컨버터의 용량 및 건인부하조건 하에서 직렬결선 방식이 저속에서 유리하고, 병렬결선 방식이 유리함을 확인하였다. 이 결과를 바탕으로 결선방식을 전환하여 저속 및 고속에서 토크특성을 개선하는 방식을 제안하였으며 이를 위한 전력변환기의 구조를 제안하였다. 향후 제안된 전력변환기 및 직병렬 전환기법과 일반적인 SRM 구동시스템의 비교 실험을 통해 검증할 계획이다.

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-067)주관으로 수행된 과제임.

### [참 고 문 헌]

- [1] "An American National Standard IEEE Standard Definitions Excitation System for Synchronous Machines", pp. 8-14, 1986.
- [2] L. W. Matsch, J. D. Morgan, 'Electromagnetic and Electromagnetical Machines', John Wiley & Sons, pp. 214-215, 1987.
- [3] P. Kundur, M. Klein, G. J. Rogers, and M. S. Zywno, "Application of Power System Stabilizer for Enhancement of Overall System Stability", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 4, No. 2, pp. 614-626, May, 1989.
- [4] K. A. Riddle, "Renovation of a paper mill steam driven turbine-generator", presented at IEEE Pulp and Paper Technical Conference, Rome, GA, 1995.
- [5] IEEE Guide for Specification for Excitation Systems", IEEE Std. 421. 4. 1990