

직병렬권선방식 전환을 통한 견인용 SRM 토크특성 개선

김태형, 이동희, 안진우
 경성대학교 전기전자메카트로닉스 공학부

Torque Characteristic Improvement of SRM for Traction Drive
 using Series-Parallel Winding Connection.

Tae-Hyoung Kim, Dong-Hee Lee, Jin-Woo Ahn
 Division of Electrical and Mechatronics Eng., Kyungung Univ.

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

전기 자동차용 전동기를 비롯한 견인용 전동기 구동 시스템에서는 저속 고토크 특성과 고속운전영역에서의 구동특성이 우수해야 한다. 이와 함께 적용대상의 특성상 발생하는 진동 및 발열 등 열악한 운전환경에서도 강인하며, 일정한 출력특성이 필요하다.[1]

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)은 회전자와 고정자가 돌극 구조로 구성된 이중 돌극형 구조로 고정자에만 권선이 위치한 집중권 방식의 구조를 가지고 있다. 따라서 기계적 구조가 타 전동기에 비해 단순하고 강인하다는 장점을 가지며, 스위칭 방식에 의한 구동방식을 사용하기 때문에 구형 또한 용이하다. 이와 함께 직류 직권 전동기의 특성을 가지고 있기 때문에 저속 고토크 특성을 가지고 있으며, 회전자에서 발생하는 자속이 없기 때문에 이로 인한 역기전력이 적어 넓은 속도 영역에서 구동이 가능하다는 장점을 가지고 있다. SRM은 자기구조상 인덕턴스의 변환구간에서 토크를 발생하는 메카니즘을 가지고 있기 때문에 인덕턴스 변환구간에서의 여자전류의 확보가 매우 중요하다. 고속운전영역에서는 토크구간의 확보와 여자전류의 확립을 위해 낮은 인덕턴스 상태가 유리하며, 저속 운전 영역에서는 토크리플의 억제를 위하여 비교적 높은 인덕턴스 상태가 유리하다.

본 논문에서는 견인용 3상 SRM의 운전특성을 개선하기 위하여 직렬권선과 병렬권선방식의 운전특성을 해석하고, 견인용 SRM의 성능을 만족하기 위한 직병렬 Hybrid 제어방식을 제안한다. 제안하는 Hybrid 제어방식은 저속에서는 고토크 및 토크리플을 고려한 직렬 운전방식으로 제어되고 고속영역에서는 충분한 여자전류의 확립을 위해 병렬권선방식으로 제어된다. 제안된 hybrid 제어방식의 특성과 효율해석을 통하여 제안된 방식의 실효성을 검증하였다.

2. 직병렬 전환에 따른 견인용 SRM의 구동특성

2.1 일반적인 SRM의 설계

일반적인 SRM의 구동시스템과 등가회로를 나타내고 그림 2와 같으며, 이에 대한 전압방정식과 출력방정식은 식(1)과 식(2)와 같으며, 이에 따른 토크는 식 (3)과 같이

전류의 제곱과 인덕턴스의 편차의 곱으로 나타난다. 이때 발생하는 토크의 방향은 전류의 방향과는 무관하며, 인덕턴스의 기울기에 의해 방향이 결정된다.

인덕턴스의 크기는 철심에서 발생하는 자계저항을 무시한다면 SRM의 자기적 구조에 의하여 식(4)와 같이 설계시 고려된 권선수와 공극의 크기, 공극의 면적에 의해 결정된다. 일반적인 설계에서는 전동기의 체적과 요구출력에 의해 권선수, 공극의 크기 및 공극의 면적이 결정되므로 구동속도에 인덕턴스는 일정하다. 단 자속포화로 인한 상전류에 따른 인덕턴스는 변화 될 수 있다.

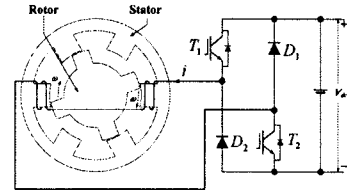


그림 2. SRM 구동시스템과 등가회로

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

$$W_{elec} = V_s i = Ri^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Li^2 \right) + \frac{i^2}{2} \frac{dL}{d\theta} \omega \tag{2}$$

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \tag{3}$$

$$L(x) = \frac{N^2 \mu_0 A_{gap}}{2g} \tag{4}$$

전동기 설계에서 중요하게 고려되는 사항은 크게 부하 토크 또는 출력과 정격속도로 볼 수 있다. 일반적으로 정격 속도에서 부하가 요구하는 토크 및 출력을 만족하고, 높은 구동 효율을 가지는 전동기를 설계하는데 중점을 두게 된다. 따라서 적용되는 대상에 따라 운전속도 범위가 낮은 전동기와 운전속도 범위가 높은 전동기의 설계로 나뉘고 고려사항은 다르게 나타난다.

2.2 속도영역에 따른 SRM의 특성

견인용 전동기의 경우 저속에서 높은 구동토크를 요구하고 넓은 속도 범위에서 구동토크를 요구한다. 따라서 견인용 전동기의 경우 저속과 고속 구동에 대한 특성을 고려한 설계가 필요하다.

견인용 전동기는 정지관성 및 마찰에 의해 저속구간에서 요구되는 큰 토크가 요구된다. 그러므로 SRM의 토크방정식에 따라 높은 상전류가 필요하다. 그러나 높은 상전류에 의존한 가지는 설계의 경우 대용량의 전력변환기의 구성이 필요하고, 전압방정식에 따라 권선에 의한 열

손실 및 전동기의 발열 등의 문제를 가질 수 있다. 따라서 이 경우 전력변환기의 용량에 따른 시스템의 안정성과 전력변환기의 구성비용 및 방열구조 설계를 함께 고려해야 한다는 한계를 가지게 된다. 따라서 견인용 SRM의 저속운전영역에서는 대용량의 전력변환기와 인덕턴스의 편차가 높은 전동기의 설계가 함께 요구된다.

견인용 전동기의 고속 영역 구동에서는 저속영역에 비해 요구되는 토크가 낮아 비교적 낮은 전류에 의해 토크를 발생시킬 수 있다. SRM의 경우 회전자자의 자속에 의한 역기전력이 낮아 다른 전동기에 비해 넓은 속도범위에서 토크의 발생이 가능하다. 속도가 상승함에 따라 역기전력이 증가하고 이로 인해 전류의 빠른 여자가 어렵다. 이와 함께 여자구간 또한 충분하지 않기 때문에 이러한 문제는 더욱 심화된다. 따라서 고속에서 동일한 속도 범위에서는 인덕턴스가 작을수록 전류의 확립이 쉽고 감자 또한 용이하기 때문에 인덕턴스 상승 구간을 더 많이 사용할 수 있어 출력효율의 증가를 기대할 수 있다.

3. 직렬 권선에 따른 SRM 특성 해석

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. 그러나 설계에서 상을 구성하는 극 당 권선이 직렬 또는 병렬로 고정되어 구성된 방식에서는 인덕턴스의 변화는 불가능하다.

본 논문에서는 SRM의 극수비가 12/8인 SRM의 권선 구조를 이용하여, 전력변환기의 용량을 고려하여 토크 특성 및 효율향상을 위해 전기적으로 상권선의 구성을 전환하여 구동하는 방식을 제안하였다.

3.1 견인용 SRM의 설계

그림 3은 12/8 SRM의 A상 권선의 분포와 직렬과 병렬 권선을 통한 상권선의 구성을 나타내고 있다. 점선은 자속의 방향으로 일반적으로 직렬 구성에 관계없이 그림과 같은 자속의 방향을 가지도록 설계한다.

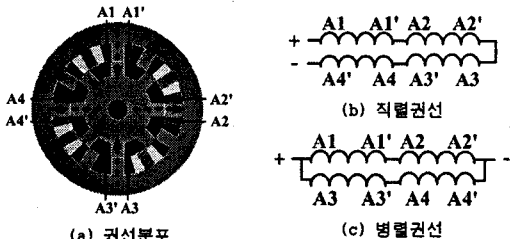


그림 3. 12/8 SRM의 권선분포와 권선방식

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 3의 (b)와 같은 구조를 가지게 된다. L1과 L2를 병렬로 연결한 경우는 (c)와 같은 구조를 가진다. 각 권선의 저항을 R이라고 하면 직렬시에는 4R, 병렬시에는 R의 합성저항을 가지게 된다. 따라서 동일한 전압을 인가하였을 경우 병렬연결이 직렬연결에 비해 4배의 전류를 가지게 된다. 따라서 부하가 전류를 요구할 경우 병렬권선이 더 많은 전류를 공급할 수 있으므로 토크 방정식에 의해 토크가 더 크게 나타나야 한다. 이는 전력변환기의 용량이 충분히 크다는 조건을 필요로 하며, 병렬권선의 경우 직렬에 비해 전류가 상승하지만 식(4)의 상권선수가 1/2로 감소하므로 인덕턴스 역시 감소하게 된다. 따라서 저속에서 전력변환기의 최대 전류용량이 제한되어 전류제어를 수행한다면, 직렬권선과 병렬권선방식은 동일한 전류가 흐

르게 되고 상권선이 직렬권선으로 구성된 경우가 큰 토크를 발생하게 된다.

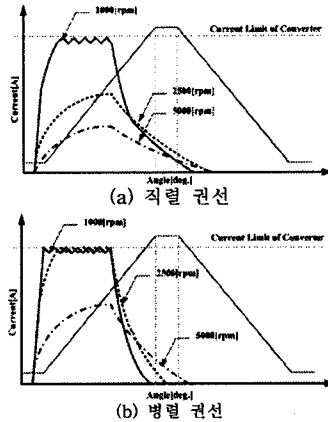


그림 4. 권선방식과 속도에 따른 상전류

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 여자와 감자의 수행이 가능하다. 따라서 고속에서 전류확립에 필요한 선행각으로 인해 발생하는 손실이 줄고 토크발생구간을 넓게 사용할 수 있으므로 전동기의 특성을 개선할 수 있다.

3.2 상권선 결선방식에 따른 특성 시뮬레이션

상기 비교된 상권선 결선방식에 따른 특성을 검증하기 위하여 SRM 전용 설계도구인 PC-SRD를 이용하여 동일 조건하에서 직렬권선 방식과 병렬권선 방식의 특성을 비교하였다. 시뮬레이션 대상은 LSEV용 3.5kW급 12/8 3상 SRM이며, 배터리의 100[A]의 정격용량을 가진 배터리를 기준으로 전류제한만을 수행하였다.

표 1. LSEV용 3.5kW급 12/8 SRM 사양

고정자극수	12	회전자극수	8
고정자극호	14°	회전자극호	16°
고정자 외경	138mm	회전자외경	76mm
고정자계철폭	16mm	회전자계철폭	11mm
공극	0.25mm	철심길이	100mm
극당 권선수	11turn	도체직경	1.726mm

그림 5와 그림 6은 각 권선결선 방식에 따른 속도별 토크와 이때의 상전류를 그래프로 나타낸 것이다. 직렬 방식의 결선으로 구성된 경우 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. 저속에서는 직렬 결선 방식과 병렬 결선 방식 모두 부하의 요구에 의해 전류 제한에 해당하는 전류가 확립되고 이 전류에 제공에 해당하는 값과 각 권선의 결선방식에 따른 인덕턴스에 의해 토크를 발생하게 된다. 속도가 증가할 경우에는 그림 7의 (a),(c),(d)와 같이 병렬권선방식의 절반에 해당하는 전류가 권선에 흐르게 되므로 점차 병렬권선에 의한 토크가 더 크게 나타나게 된다. 이와 함께 속도가 증가함에 따라 병렬권선의 경우는 빠른 여자특성과 함께 감

자특성을 갖게 됨을 알 수 있다.

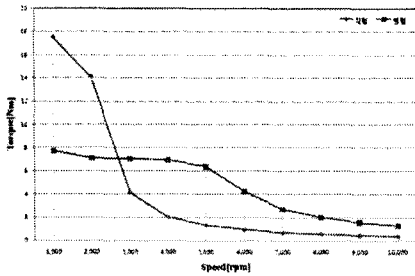


그림 5. 권선방식과 속도에 따른 토크

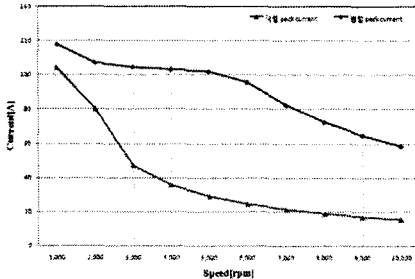


그림 6. 권선방식과 속도에 따른 상전류

그림 8은 권선방식에 따른 효율을 나타내고 있으며, 저속의 경우 직렬권선방식이 병렬권선방식에 비해 높은 효율을 가지고 고속영역에서는 병렬권선방식이 직렬권선방식에 비해 높은 효율을 나타내고 있음을 알 수 있다.

본 논문에서는 상기 시뮬레이션 결과를 바탕으로 저속 영역에서는 동일한 전류로 큰 토크를 발생시키는 직렬권선방식을 사용하고 고속에서는 병렬권선을 사용하여 전류의 빠른 전류의 확립이 가능한 병렬권선방식을 사용하는 직병렬 권선 방식을 제안한다. 그림 9는 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.

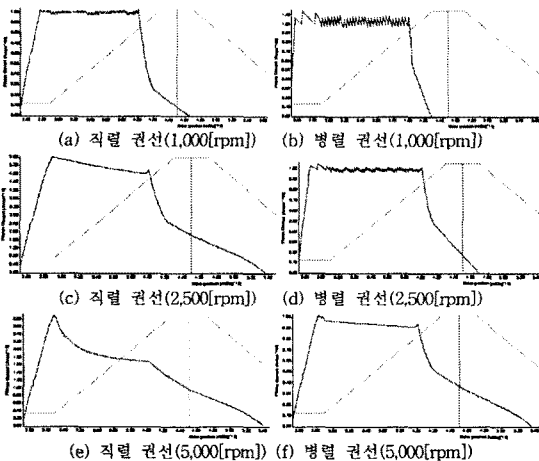


그림 7. 속도에 따른 상전류 형태의 변화

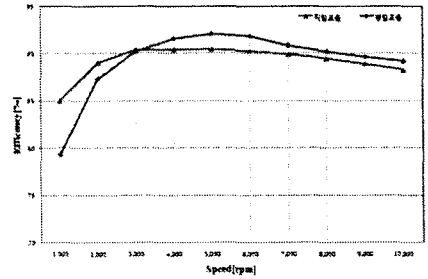


그림 7. 권선방식과 속도에 따른 효율

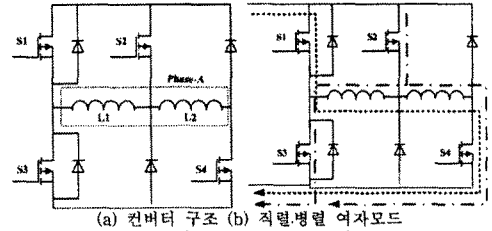


그림 8. 제안된 전력변환기의 구조 및 여자시 전류경로

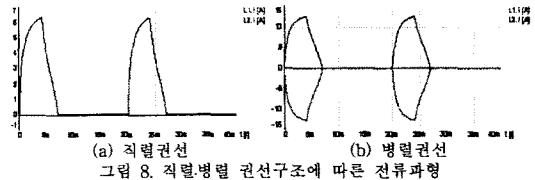


그림 8. 직렬병렬 권선구조에 따른 전류파형

4. 결 론

본 논문에서는 견인 구동을 위한 SRM의 토크특성을 개선하기 위하여 저속과 고속영역에서 상권선의 결선방식에 따른 성능변화를 고찰하고 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 컨버터의 용량 및 견인부하조건 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 산업자원부 대학전력연구센터 육성·지원사업(I-2007-0-261-01)에 의한 마이크로그리드연구센터 주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

- [1] M.Zeraoulia, M.E.H. Benbouzid, D. Diallo, "Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion System : A comparative Study", IEEE Trans-Vehicular Technology, Vol.55, Issue 6, 1756 - 1764, 2006.11
- [2] ekhiche M, Kirtley J.L, Tolikas M, Ognibene E, Kiley J, Holmanský E, Nimblett F; "High Speed Motor Drive Development for Industrial Applications", International Conference IEMD '99, 9-12, IEEE CNF, pp.244-248, 1999.
- [3] 안진우, "스위치드 릴럭턴스 전동기", 오성미디어, pp.1-4 54, 2004.
- [4] 안진우, 박성준, 김태형, "SRM의 센서리스 제어를 위한 인덕턴스 추론기법", 전력전자학회 논문지, 8권 5호, 427-434, 2003.10