

2상 여자방식에 의한 SRM의 운전특성에 관한 연구

문재원* · 오석규** · 안진우*** · 황영문*

*부산대 전기공학과, **진주산업대 산업자동화공학과, ***경성대 전기전자컴퓨터공학부

Study on Driving Characteristics of SRM by 2-Phase Excitation Method

Jae-Won Moon* · Seok-Gyu Oh** · Jin-Woo Ahn*** · Young-Moon Hwang*

*Dept. of EE Pusan Nat'l Univ., **Dept. of AE Chinju Nat'l Univ.,

***Dept. of EE Kyung-sung Univ.,

Abstract

A new excitation method of switched reluctance motor drive is described in this paper. This excitation method produces reluctance torque by mutual action between two phases as well as conventional self reluctance torque due to two phase excitation at a time. In other words, the change of self inductance and mutual inductance are used to produce torque.

This paper suggests the operational principle, the mechanism of torque product of switched reluctance motor with two phase excitation. The acoustic noise characteristics of two phase excitation method are described against that of conventional excitation method.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 전자기적인 구조가 간단 견고하며, 고효율, 고토오크/관성비, 넓은 범위의 가변속운전 등의 장점을 가진 전동기구로서 여러 산업분야 및 가전분야에 그 적용범위를 넓혀 가고 있다. 그러나 SRM의 토오크 리플과 소음 진동 등이 다소 커 해결해야할 문제점으로 대두되고 있다. 이러한 소음 진동은 릴럭턴스 토오크의 발생과정에서 회전력으로 작용하는 접선방향의 힘뿐만 아니라 방사방향의 힘이 작용하여 각 상을 온(on), 오프(off)할 때 고정자

프레임을 방사방향으로 진동시킴으로써 발생하게 된다[1,2].

소음과 진동을 감소시키는 방안으로는 발생된 진동을 상쇄하도록 스위칭소자를 다단계로 스위치 온, 오프 시키는 기법[2], 전동기의 자기회로를 적정하게 설계하여 운전영역의 공진 모드를 제거하는 방법[3], 그리고 SRM의 권선방식과 여자방식을 기존의 방식과 다르게 함으로써 진동, 소음을 감소시키는 방법[4,5] 등이 제시되었다.

본 논문에서는 기존의 단절권 방식에서 동시에 2상을 여자시켜 자기릴럭턴스 뿐만 아니라 두 상의 상호작용에 의해서도 릴럭턴스 토오크를 발생시킴으로써 소음 진동을 저감하는 SRM의 새로운 여자방식을 제안하려고 한다. 제안한 방식에서는 연속적인 2상 스위칭에 의해 자속을 계속 유지함으로써 방사방향의 순간적인 힘의 변화를 줄여 소음 진동을 감소시킬 수 있다. 또한 제안한 여자방식의 타당성을 시스템을 구성하여 실험적 해석을 통하여 검증하였다.

2. 2상 여자방식에 의한 SRM의 구동

SRM의 자기적 구조는 릴럭턴스 토오크를 최대로 활용하기 위하여 2중 돌극형 구조를 채택하고 있는 가변 릴럭턴스 전동기이다. 그림 1은 2상 여자방식에 의한 6/4극 SRM 시스템의 구성도를 보여주고 있다. 각 자극의 권선방향은 기존의 여자방식과는 달리 맞은편의 동일상의 권선과는 반대 방향으로 감겨져 있으며, 각 상권선의 한쪽 단자는 공통으로 묶어

서 Y결선으로 되어 있다. 2상 여자방식의 SRM은 권선의 여자방향을 바꾸고 여자되는 두상을 반대극성으로 스위치 온함으로써, 정방향 토크를 발생시키는 데 자기인덕턴스 및 상호인덕턴스의 변화율을 이용하게 된다.

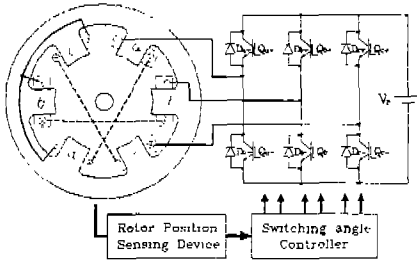


그림 1 2상 여자방식에 의한 SRM 시스템의 구성

그림 2는 2상 여자방식에 의한 SRM의 구동원리를 보여주는 그림으로서 상 여자순서에 따른 회전자의 위치각 변화를 보여준다. 그림 2(a)는 a상을 정(+), b상을 역(-)으로 여자할 때 자속경로에서 릴럭턴스가 최소로 되는 점 즉, 인덕턴스가 최대가 되는 회전자의 정지점이다. (b)는 b상을 역(-)으로 계속 여자하며, a상을 오프하고 c상을 정(+)으로 여자한 경우로서 (a)의 경우보다 회전자가 반시계 방향으로 30° 회전한 회전자의 정지점이다. (c)는 c상을 정(+)으로 계속 여자하며, b상을 오프하고 a상을 역(-)으로 여자한 경우로서 (a)의 경우보다 회전자가 60° 회전한 정지점이다. (d)는 a상을 역(-)으로 계속 여자하며, c상을 오프하고 b상을 정(+)으로 여자한 경우로서 (a)의 경우보다 회전자가 90° 회전하게 된다.

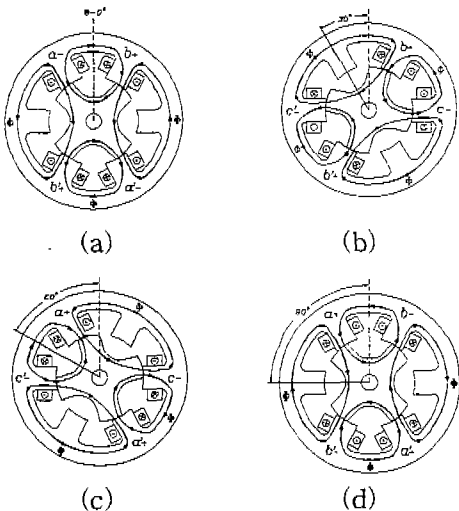


그림 2 상여자순서별 회전자의 위치변화에 따른 자속분포 (a) a상(+), b상(-) (b) b상(-), c상(+) (c) c상(+), a상(-) (d) a상(+), b상(-)

2상 여자방식의 SRM은 항상 2상이 여자되는 정방향 토크를 연속적으로 발생시키며, 여자되는 두상의 극성은 항상 반대가 된다.

3. 토크발생 및 저소음운전

2상 여자방식의 SRM에서 토크는 코에너지의 회전자 위치각의 편미분에 의해서 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 본 여자방식은 각 여자구간마다 2상이 여자됨으로 발생토크는 자기인덕턴스에 의한 항과 다른 상과의 상호인덕턴스에 의한 항으로 나누어진다.

$$T = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_c}{d\theta} + i_a \cdot i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} + i_b \cdot i_c \frac{dM_{bc}}{d\theta} + i_c \cdot i_a \frac{dM_{ca}}{d\theta} \quad (1)$$

SRM에서 회전력을 발생시키기 위해 고정자권선에 전압이 인가되어 권선전류가 흐르게 된다. 이 전류에 의해 발생된 자속이 자기회로의 릴럭턴스가 감소하는 방향으로 폐루프를 형성함으로써 회전자의 회전력을 발생시키게 되는데, 이러한 회전력이 작용될 때 고정자를 회전축의 중심방향으로 변위를 발생하게 된다. 그리고 정토크 발생구간이 끝나기 전에 상 인가전압을 오프하게 되는데, 오프시 자속의 순간적인 변화율은 진동의 크기와 직접적인 관계가 있다. 또한 자속의 변화율은 오프시 인가전압의 변화에 비례하게 된다.

2상 여자방식인 경우 항상 두 상이 동작하게 되므로 오프시에도 두 상중 한 상만 오프되고 나머지 한 상은 온되어 있는 상태이므로 오프된 상권선 전류는 온된 상을 통해서 프리휠링하면서 감소하게 된다. 그러므로 오프한 시점의 자속의 변화율이 감소하게 되어 고정자의 진동에 의한 소음도 감소하게 된다.

그림 3은 인가전압의 변화, 자속의 변화 및 오프시 진동의 발생을 보여준다. 그림 3의 구간 ①은 a상의 온되어 전압이 인가되는 구간이고, 구간 ②는 a상의

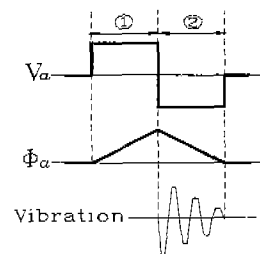


그림 3 온, 오프시 인가전압, 자속파형의 변화 및 진동의 발생

오프구간이다.

그림 4는 그림 3의 구간 ①(온구간)과 구간 ②(오프구간)에 해당하는 자속의 변화를 보여준다. (a)가 기존의 여자방식이고, (b)가 2상 여자방식이다.

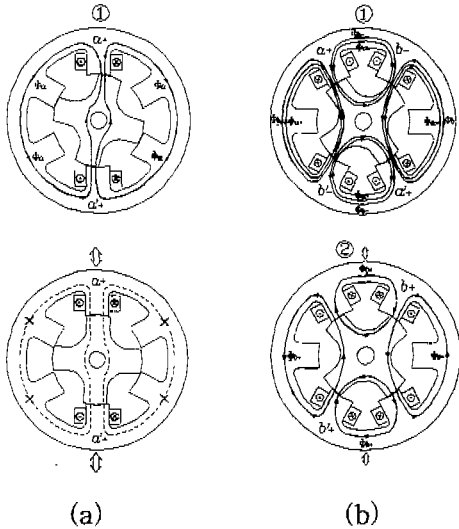


그림 4 온, 오프시 자속의 변화 및 진동의 발생비교
(a) 기존의 여자방식 (b) 2상 여자방식

그림 3의 기존의 여자방식인 경우, 구간 ① 동안 상권선에 전압이 인가되어 자속이 증가하면서 고정자는 회전축의 중심방향으로 힘이 작용하게 된다. 구간 ②는 a 상이 오프되면서 상권선은 역전압으로 바뀌면서 자속이 감소하기 시작하면서 고정자는 회전축 중심의 반대방향으로 힘이 발생되면서 고정자의 진동이 발생하게 된다.

2상 여자방식인 경우 교류기용 브릿지 인버터를 하며, 구간 ① 동안 a 상권선과 b 상권선에 전압이 인가되어 a - b 상의 자속이 증가하면서 고정자는 회전축의 중심방향으로 힘이 작용하게 된다.

구간 ②는 b 상이 정방향으로 온되어 있는 상태에서 역방향으로 여자된 a 상이 오프되면서 진동이 발생하는 구간인데, 이때 오프된 a 상의 전류는 다이오드, D_a -와 온 되어 있는 b 상을 통해서 프리휠링하게 되므로 오프시 자속이 순간적으로 유지되므로 회전축 반대방향으로 작용하는 힘이 감소하게 되어 진동이 감소하게 된다.

4. 실험결과 및 해석

4.1 동작특성 비교

본 논문의 2상 여자방식에 의한 SRM의 구동특성을 기존의 SRM방식과 비교하여 보기로 한다. 실험에 사용된 스위치드 릴럭턴스 전동기는 3상 12/8극

으로써 750[w]급이다. 12/8극을 사용하면 6/4극인 경우보다 회전당 극수와 스위칭수가 2배로 증가되므로 토오크 리플이 줄어들게 되고, 자속의 이동경로의 길이도 줄어들게 되는 장점을 가지고 있다.

그림 5는 각 상의 여자 순서별 인버터의 동작모드를 보여준다. 모드 1은 a 상을 정(+), b 상을 역(-) 방향으로 온될 때 전류도통모드이다. 모드 2는 b 상을 역(-)방향으로 계속 온되어 있고 a 상을 오프할 때 전류도통모드이다.

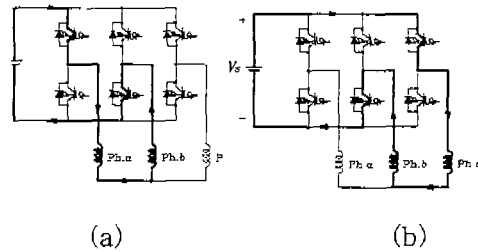


그림 5 인버터의 동작모드 (a) 모드 1. a 상(+), b 상(-) :ON (b) 모드 2. b 상(-):ON, a 상(+):OFF

이 정(+) 전압에서 오프시 온되어 있는 b 상을 통하여 프리휠링하므로 영전압루프(모드 2. 참조)를 거친 후 역(-)전압으로 바뀌므로 기존의 구동방식보다 전류(commutation)시 전압의 스텝변화율이 감소하게 된다.

그림 6은 기존의 여자방식 SRM의 상전압과 2상 여자방식 SRM의 선간전압의 변화를 보여 주고 있다. 두가지 여자방식의 인가전압이 100[V]로 동일하게 인가될 때, 오프시의 전압의 변화를 보여 주고 있는 그림으로써 (a)가 기존의 여자방식이고 (b)가 2상 여자방식이다. 여기서 상단이 전류파형이고 하단이 전압파형이다. (a)는 기존의 여자방식인 경우 전압이 100[V]로 인가된 후 스위칭소자의 오프시 역전압인 -100[V]로 변화하고 있으나 (b)의 2상 여자방

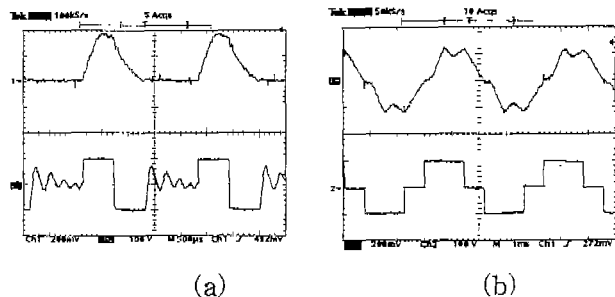


그림 6 상전류 및 전압파형 (a) 기존 여자방식 (상단:전류[1.25A/div.], 하단:상전압 [100V/div.]) (b) 2상 여자방식(상단:전류[1.25A/div.], 하단:선간 전압[100V/div.])

식인 경우 인가전압이 100[V]에서 스위칭소자의 오프시 프리휠링구간인 0[V]로 선간전압이 변화하고 있다. 그러므로 2상 여자방식의 경우 온, 오프의 전압의 변화가 절반으로 줄어들게 된다. 스텝변화율이 감소하게 되면 자속의 순간적인 변화율이 감소하게 되므로 오프시 고정자진동이 감소하게 되고, 이로 인하여 구동소음의 크기가 줄어들 것이다.

2상 여자방식 SRM의 속도-토크곡선은 부하토크의 가변에 따른 속도특성을 나타낸 것으로써 기존의 SRM과 같이 직류직권전동기의 수하특성을 가지고 있었다.

4.2 소음도 비교 및 소음주파수대역 분석

그림 7(a)는 기존의 SRM과 2상여자방식의 SRM에 대한 3400rpm의 일정속도에서 부하토크의 가변에 따른 소음도(sound level)의 변화를 보여준다. 여기서 소음도(sound level)는 소음계(db meter)를 일정한 거리의 동일위치에 설치하여 측정하였다. 부하토크를 증가하여 출력이 증가함에 따라 소음도의 차이가 커져 2상 여자방식의 SRM은 기존의 SRM보다 정격출력토크 근처에서 소음도가 약 8[db]정도 낮음을 알 수 있다. SRM은 토크의 발생 과정에서 회전방향의 점선방향의 힘뿐만 아니라 방사방향의 힘이 작용하게 되므로 각 상을 온, 오프할 때 고정자를 수축, 팽창시키게 되어 진동을 발생시키게 되므로 기존의 전동기보다 큰 소음(acoustic noise)을 발생하게 된다[1]. 특히 오프시의 진동에 의한 소음이 크다[2].

그림 7(b)는 토크를 5kg.cm로 일정하게 유지하고 속도를 증가시킴에 따른 소음도의 변화를 보여준다. 기존의 여자방식인 경우 1500rpm과 3200rpm 부근에서 공진현상에 의한 소음도가 증가함을 알 수 있다. 2상 여자방식도 1500rpm과 3200rpm 부근에서 공진현상이 나타나고 있으나 기존의 방식에서와 같이 큰 값의 소음이 발생되지 않음을 알 수 있다.

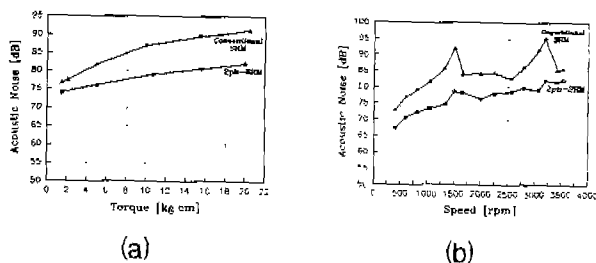


그림 7 속도, 토크에 따른 소음도비교

(a)일정속도(3400rpm) (b)일정토크(5kg.cm)

5. 결 론

본 논문에서는 스위치드 릴럭턴스 전동기의 새로운 여자방식인 2상 여자방식을 제시하였다. 2상 여자방식의 SRM은 기존의 SRM여자의 상 릴럭턴스에 의한 토크뿐만 아니라 두 상의 상호작용에 의해서도 릴럭턴스토크를 발생시킨다.

새로운 여자방식의 전동기는 한 상의 여자가 이미 확립된 상태에서 다음 상이 여자되어지므로 에너지 변환율을 증가시킬 수 있으며, 기존의 SRM은 토크의 발생에 있어서 자기인덕턴스의 변화율만을 이용하는 데 반해, 새로운 여자방식은 토크의 발생에 자기인덕턴스 및 상호인덕턴스의 변화율을 이용할 수 있다.

본 논문에서는 2상 여자방식에 의한 SRM의 동작 원리 및 토크발생과정을 해석하였다. 그리고 정속도 및 정토크로 운전시의 소음특성을 실험을 통하여 2상 여자방식과 기존의 여자방식을 비교, 검토하였다. 본 여자방식의 SRM은 항상 두 상이 동시에 동작하게 되므로 온, 오프시의 자속의 변화율이 감소하여 기존의 SRM방식보다 고정자의 진동에 의한 소음이 감소하였으며 운전효율도 기존의 방식에 비해 저토크영역에서 다소 높은 것으로 측정되었다.

참 고 문 헌

- [1] D.E.Cameron, J.H.Lang, S.D.Umans, "The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Doubly Salient Variable Reluctance Motors", IEEE Trans. on IA, Vol.28, No.6, pp.1250-1255, 1992.
- [2] C.Pollock, C.Y.Wu, "Analysis and Reduction of Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive", IEEE Trans. on IA, Vol.31, No.1, pp.91-98, 1995.
- [3] C.Pollock, C.Y.Wu, "Acoustic Noise Cancellation Techniques for Switched Reluctance Drives", IEEE IAS. Meeting, Vol.1, pp.448-455, 1995.
- [4] B.C.Mecrow, "New Winding Configurations for Doubly Salient Reluctance Machines", IEEE trans. on IA, Vol.32, No.6, pp.1348-1356, 1996.
- [5] C.Hao, L.Diji, "Symmetry of Switched Reluctance motor Drive", Proc. of International Power Electronics and Motion Control Conf., Vol.2, pp.606-610, 1996.