

SRM 드라이브의 2상여자방식에 관한 연구

문재원^{*}, 안영주^{*}, 안진우^{**}, 황영문^{***}

* 부산대학교, ** 부경대학교, *** 경성대학교

A Study on 2 Phase Excitation Method of SRM Drive

Jae-Won Moon^{*}, Young-Ju An^{*}, Jin-Woo Ahn^{**}, Young-Moon Hwang^{***}

* Pusan Nat'l Univ., ** Pukyung Nat'l Univ., *** Kyungsung Univ.

Abstract - A new excitation method of switched reluctance motor drive is described in this paper. This motor produces reluctance torque by mutual action between two phases as well as conventional self reluctance torque. The change of self inductance and mutual inductance are used to produce torque. This paper suggests the operational principle, the mechanism of torque product and the driving characteristics of Switched Reluctance Motor with 2 phase excitation against conventional SRM experimentally. The energy conversion ratio is increased because the next phase is excited after one phase is already excited. Acoustic noise of SRM with 2 phase excitation is decreased than that of conventional SRM due to the mechanism of torque production.

1. 서 론

Switched Reluctance Motor(SRM)는 견고하고 간단한 구조를 가지며, 고효율, 고토크/관성비 특성, 가변속운전에 적합성 등 기존의 전동기보다 우수한 성능을 가진 전동기구이다. 최근들어 이러한 장점으로 여러 산업분야 및 가전분야에 적용을 검토하고 있으나 SRM의 토크발생메커니즘상 토오크리풀과 고소음특성 등이 적용의 제한요소로 작용하고 있다. 이러한 소음은 릴럭턴스토오크의 발생과정에서 방사방향의 힘이 작용하여 각 상을 온(on), 오프(off)할 때 고정자를 수축, 팽창시키게 되어 진동이 발생하기 때문이다[1].

본 논문에서 제시하려고 하는 SRM의 새로운 여자방식은 스텝모터의 2상여자방식을 응용한 것으로 한 상이 온되어 있는 상태에서 다음상이 온되며, 오프시에도 다음상이 이미 온되어 있으므로, 즉 동시에 각 상이 온, 오프되지 않으므로 온, 오프시에 진동이 줄어들게 되어 소음이 감소하게 될 것이다. 그리고 고정자에서의 진동은 순간적인 전압의 스텝변화가 클수록 증가되어지는데[2], 기존의

SRM은 오프시 상전압이 정(+)에서 역(-)으로 순간적인 변화가 크다. 그러나 제안한 방식은 교류기전동기구동용의 기존인버터를 사용하므로 상전압이 정(+) 또는 역(-)전압에서 영전압루프를 거친 후 역(-) 또는 정(+)전압으로 바뀌므로 전압의 스텝변화율이 감소하여 소음이 줄어들 것이다. 그리고 토오크발생을 위한 자계를 형성하는데 한 상이 여자된 상태에서 다음상이 여자되므로, 한 상의 자속을 발생시키는 데 두상이 관여하게 되므로 에너지변환율을 증가시킬 수 있다.

본 여자방식은 기존의 SRM과 같이 자기릴럭턴스뿐만 아니라 두 상의 상호작용에 의해서도 릴럭턴스토오크를 발생시킬 수 있다. 그럼 1은 2상여자방식에 의한 SRM 구동시스템을 보여주고 있다. 각 자극의 권선방향은 맞은편의 동일 상의 권선과 반대 방향이다. 2상여자방식의 SRM은 권선의 여자방향을 바꿈으로써, 정방향 토크를 발생시키는 데 자기인력턴스 및 상호인력턴스의 변화율을 이용할 수 있다.

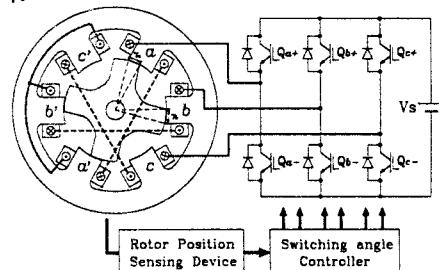


그림 1. 2상여자방식의 SRM 드라이브 시스템

2. 동작원리 및 토크발생

그림 2는 2상여자방식 SRM의 회전원리를 보여주는 그림으로서 상 여자순서에 따른 회전자위치각변화를 보여준다. 그림 2의 (a)는 a상을 정(+), b상을 역(-)으로 여자(excitation)할 때의 자속의 릴럭턴스가 최소가 되는 점 즉, 자속쇄교수가 최대로

여기서, $i_a \cdot i_b < 0$, $i_b \cdot i_c < 0$, $i_c \cdot i_a < 0$ 이다.

그림 3에서 $30^\circ \sim 60^\circ$ 구간 동안을 살펴보면, a 상 전류(i_a)와 자기인덕턴스(L_{aa})의 변화율에 의해서 정토오크를 발생시킬 수 있고, 또한 이 구간에서 c 상 전류(i_c)가 역방향이므로 a 상 전류와 c 상 전류의 곱과 $a-c$ 상의 상호인덕턴스($L_{ac}(\theta)$)의 변화율에 의해서 정토오크를 발생시킬 수 있다. 그리고 이 구간에서 c 상의 자기인덕턴스(L_{cc})는 일정하므로 토오크를 발생시키지 못한다.

$$T(30^\circ \sim 60^\circ) = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_{aa}}{d\theta} - i_a \cdot i_c \frac{dL_{ac}}{d\theta} \quad (5)$$

다른 구간에서도 마찬가지로 자기인덕턴스와 상호인덕턴스의 변화율에 의해서 토오크를 발생시킬 수 있다.

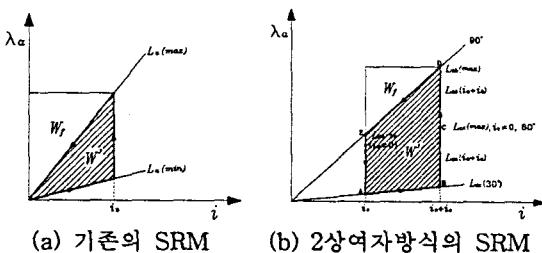


그림 4. 비포화시 자속쇄교수-전류곡선

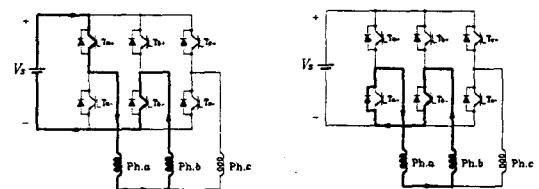
포화를 고려하지 않은 경우 기존의 SRM과 2상여자방식 SRM의 a 상의 자속쇄교수(λ_a) 대 전류곡선을 그림 4에 나타내었다. 그림 3의 회전자의 위치각, $\theta=30^\circ$ 구간에서 c 상이 온된 상태에서 a 상이 온되게 되므로 a 상의 자속쇄교수(λ_a)는 그림 4(b)의 A점부터 시작하여 B점까지 $L_{ac}(30^\circ)$ 선을 따라 증가하게 된다. B~C구간($\theta=30^\circ \sim 60^\circ$)에서 자속쇄교수(λ_a)는 $L_{ac} \cdot i_a$ 와 $L_{ac} \cdot i_c$ 의 합에 의해서 증가한다. C점($\theta=60^\circ$)에 도달하면 i_c 는 오프되고 i_b 가 온된다. 따라서 C~D구간($\theta=60^\circ \sim 90^\circ$)에서는 $L_{ab} \cdot i_a$ 와 $L_{ab} \cdot i_b$ 의 합에 의해서 증가하게 된다. D~E구간($\theta=90^\circ$)에서는 i_a 가 감소하여 E점에서 영(=0)이 된다. 그러므로 E~A구간($\theta=90^\circ$)에서는 i_b 와 L_{ab} 의 곱에 의해서 감소하게 된다. i_b 는 A구간($\theta=90^\circ$)부터 L_{ab} 와 관련되어 b 상의 자속쇄교수(λ_b)를 발생하게 된다. 이상과 같이 2상여자방식의 SRM에서 동일한 방향의 자속쇄교수를 만드는 두 상중에서 한 상이 이미 여자된 상태에서 나머지 상이 여자되어지므로, 비포화시 한 상의 자속쇄교수는 그림4(b)의 궤적을 따라 바뀌므로 기존의 SRM의 경우인 (a)와 비교할 때 에너지변환율($\frac{W_f}{W}$)은 증가됨을 알 수 있다.

3. 실험결과

본 논문의 2상여자방식에 의한 SRM의 구동특성을 기존의 SRM방식과 비교하여 보았다. 실험에 사

용된 전동기는 12/8극 750[w]급이다. 2상여자방식의 SRM은 기존의 SRM에 상 여자방향만 바꾸면 간단히 구현이 가능하다. 그리고 인버터는 스위치와 다이오드가 모듈(module)화되어 있는 기존의 AC전동기용 인버터의 사용이 가능하다.

그림 5는 각상의 여자 순서별 인버터의 동작모드를 보여준다. 모드1은 a 상을 정(+), b 상을 역(-)방향으로 온될 때 도통모드이다. 모드2는 b 상을 역(-)방향으로 계속 온되어 있고 a 상을 오프할 때 전류도통모드이다. 기존의 SRM 인버터에서는 상의 오프시 각 상의 인덕턴스에 저장된 에너지를 전원측으로 회수시키거나 상 자체적인 freewheeling을 통해서 소모시키게 된다. 그러나 본 전동기의 인버터에서는 상의 오프시 저장된 에너지는 도통되어 있는 상을 통해 freewheeling하게 되므로 전원측으로 회수될이 없이 다음 상에서 활용하게 된다. 그리고 2상여자방식의 SRM은 a 상전압이 정(+) 전압에서 오프시 온되어 있는 b 상을 통하여 freewheeling하므로 영전압루프(모드 2. 참조)를 거친 후 역(-)전압으로 바뀌므로 전압의 스텝변화율이 감소하여 소음의 크기가 줄어들 것이다.



모드1. a (+), b (-):ON 모드2. b (-):ON, a (+):OFF

그림 5. 인버터의 동작모드

그림 6은 2상여자방식의 SRM의 일정전압인가시부하토오크의 가변에 따른 속도-토오크 곡선으로써 기존의 SRM과 같이 직류직권기의 수하특성을 나타낸다.

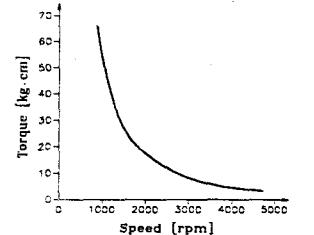
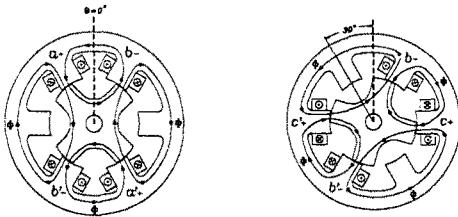


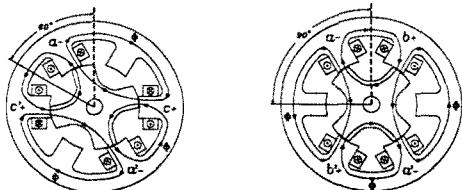
그림 6. 속도-토오크 곡선

그림 7은 3400rpm의 일정속도에서 부하토오크의 가변에 따른 소음도(sound level)를 보여준다. 여기서 소음도(sound level)는 소음계(dB meter)를 일정한 거리의 동일위치에 설치하여 측정하였다. 부하토오크를 증가하여 출력이 증가함에 따라 소음도의

되는 회전자의 정지점이다. (b)는 b 상을 역(-)으로 계속 여자하고 c 상을 정(+)으로 여자한 경우로서 (a)의 경우보다 반시계방향으로 30° 회전한다. (c)는 c 상을 정(+)으로 계속 여자하고 a 상을 역(-)으로 여자한 경우로서 (a)의 경우보다 60° 회전한다. (d)는 a 상을 정(+)으로 계속 여자하고 b 상을 역(-)으로 여자한 경우로서 (a)의 경우보다 90° 회전하게 된다. 이와같이 2상여자방식의 SRM은 항상 2상이 여자되어 토오크를 발생시킨다.



(a) a 상(+), b 상(-):여자시 (b) c 상(+), b 상(-):여자시



(c) c 상(+), a 상(-):여자시 (d) b 상(+), a 상(-):여자시

그림 2. 상여자순서별 회전자의 위치변화

그림 1에서 a 상의 여자시 a 상의 기자력에 의해 발생된 자속은 고정자의 b 극과 b' 극을 통해 b 상의 전선을 쇄교하고 고정자의 back iron을 통해 a 상을 다시 쇄교하는 자속의 폐경로를 형성한다. 그러므로 회전자의 위치각변화에 따른 $a-b$ 상의 상호인덕턴스($L_{ab}(\theta)$)는 누설자속과 철심재료의 자기저항을 무시함으로써 고정자의 a 극과 b 극의 회전자극과의 중첩각(γ_a, γ_b)에 의해 대략적으로 식 (1)과 같이 근사화시킬 수 있다.

$$L_{ab}(\theta) = \frac{N^2}{R_s} = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot l_c \cdot D_r}{4g} \frac{(\gamma_a \cdot \gamma_b)}{(\gamma_a + \gamma_b)} \quad (1)$$

여기서, N =상권선의 턴수, R_s =공극의 자기저항, μ_0 =공극의 투자율, l_c =철심의 적층길이, D_r =회전자 자극의 직경, g =공극의 길이이다. 식 (1)의 $L_{ab}(\theta)$ 는 턴수의 제곱과 고정자의 a 극과 b 극이 모두 회전자극과 중첩될 때 자극면을 통과하는 공극자속 경로만을 고려한 자기저항에 의한 값이다.

$b-c$ 상의 상호인덕턴스($L_{bc}(\theta)$)와 $c-a$ 상의 상호인덕턴스($L_{ca}(\theta)$)는 기하학적 대칭성에 의해 $6/4$ 2상여자방식의 SRM인 경우, $a-b$ 상의 상호인덕턴스($L_{ab}(\theta)$)를 각각 $30^\circ, 60^\circ$ 씩 위상이동함으로써 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} L_{bc}(\theta, i) &= L_{ab}(\theta - 30^\circ, i) \\ L_{ca}(\theta, i) &= L_{ab}(\theta - 60^\circ, i) \end{aligned} \quad (2)$$

그림 1에서 a 상의 기자력에 의하여 고정자의 a 극에서 발생된 자속은 공극을 통해 인접 회전자의 자로를 경유하여 인접한 고정자의 b 극(그림 2(a)의 경로 참조) 또는 c 극(그림 2(c)의 경로 참조)을 통하여 a 극으로 다시 되돌아오는 각각의 자속경로를 가진다. 그러므로 a 상의 자기인덕턴스($=L_{aa}(\theta)$)는 누설성분을 무시하므로써 $a-b$ 상의 상호인덕턴스와 $a-c$ 상의 상호인덕턴스의 합에 의하여 구할 수 있고, $L_{bb}(\theta)$ 와 $L_{cc}(\theta)$ 도 마찬가지의 방법으로 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} L_{aa}(\theta, i_a) &= L_{ab}(\theta, i_a) + L_{ac}(\theta, i_a) \\ L_{bb}(\theta, i_b) &= L_{ba}(\theta, i_b) + L_{bc}(\theta, i_b) \\ L_{cc}(\theta, i_c) &= L_{ca}(\theta, i_c) + L_{cb}(\theta, i_c) \end{aligned} \quad (3)$$

그림 3은 식(1), (2), (3)에 의해서 근사화된 자기 및 상호인덕턴스와 이상적인 3상 전류파형을 나타낸다. 상호인덕턴스는 식 (1)의 고정자의 a 극과 b 극이 모두 회전자극과 중첩될 때 자극면을 통과하는 공극자속경로만을 고려한 자기저항과 2상여자방식의 SRM은 a 극과 b 극중 한 극만 회전자극과, 중첩되고 나머지 극은 중첩되지 않는 경우가 존재하므로 이 경우의 공극자속경로를 고려한 자기저항에 의하여 근사적으로 나타낸 것이다.

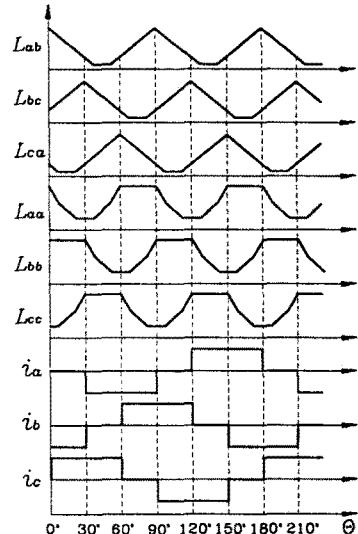


그림 3. 자기, 상호인덕턴스 및 이상적인 전류형상

토오크는 코에너지의 회전자의 위치각의 편미분에 의해서 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} T &= \frac{\partial W}{\partial \theta} \Big|_{i=\text{const.}} \\ &= \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_{ab}}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_{ba}}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_{ca}}{d\theta} \\ &\quad - i_a \cdot i_b \frac{dL_{ab}}{d\theta} - i_b \cdot i_c \frac{dL_{bc}}{d\theta} - i_c \cdot i_a \frac{dL_{ca}}{d\theta} \end{aligned} \quad (4)$$

차이가 커져 2상여자방식의 SRM은 기존의 SRM보다 정격출력토오크 근처에서 소음도가 약6[dB]정도 낮음을 알 수 있다. SRM은 토오크의 발생 과정에서 방사방향의 힘이 작용하게 되므로 각 상을 온, 오프 할 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]. 본 논문의 그림 3에서 알 수 있듯이 2상여자방식의 SRM은 한 상이 온되어 있는 상태에서 다음상이 온되며, 오프시에도 다음상이 이미 온되어 있으므로 오프될 때 이미 온된 상이 고정자의 진동을 억제하는 역할을 하여 오프시의 진동이 줄어들게 되므로 소음이 감소하게 된다.

그림 8은 3400rpm의 일정속도에서 부하토오크의 가변에 따른 효율비교곡선을 보여준다. 2상여자방식의 SRM은 기존의 SRM에 비해 저토오크 영역에서는 다소 효율이 높으나 고토오크영역에서는 다소 낮았다. 2상여자방식의 SRM은 고토오크영역으로 가면 전류의 크기가 증가하게 되므로 철손과 동손의 영향이 기존의 방식보다 증가하게 되어 효율이 감소하게 된다.

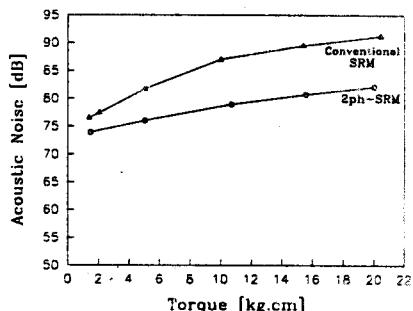


그림 7. 부하토오크 가변시 소음도비교(3400rpm)

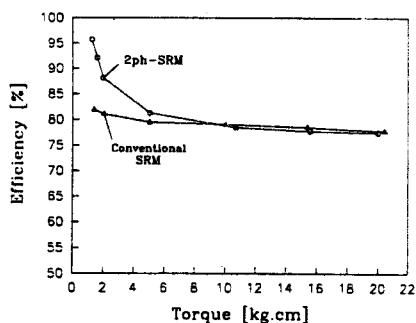
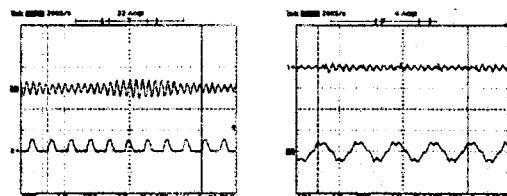


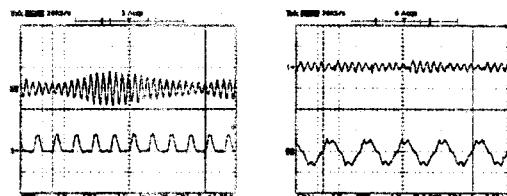
그림 8. 부하토오크 가변시 효율비교(3400rpm)

그림 9는 부하토오크의 가변시 소음의 파형 및 전류의 파형을 보여준다. 여기서 위쪽이 소음파형이며 아래쪽이 상 전류의 파형이다. 소음파형은 일정한 거리의 동일위치에 장착된 소음계의 출력신호를 증폭하여 동일한 증폭율에서 상대적인 크기를 측정, 비교하였다. (a)는 부하토오크 5[kg.cm]이고

(b)는 부하토오크 10[kg.cm]일 때로써 좌측이 기존의 SRM이고 우측이 2상여자방식의 SRM이다.



기존의 SRM[6.25A/div.] 2상여자방식[6.25A/div.]
(a) 부하토오크 : 5[kg.cm]인 경우 [소음:1V/div.]



기존의 SRM[6.25A/div.] 2상여자방식[6.25A/div.]
(b) 부하토오크 : 10[kg.cm]인 경우 [소음:1V/div.]

그림 9. 전류와 소음파형비교(3400rpm 일정속도)
(상연:소음, 하연:상전류)

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 SRM여자의 상 릴럭턴스에 의한 토오크뿐만 아니라 두 상의 상호작용에 의해 릴럭턴스토오크를 발생시키는 2상여자방식에 의한 SRM의 동작원리 및 토오크발생과정을 해석하고, 기본적인 운전특성을 실험을 통해서 검토하였다. 새로운 여자방식의 전동기는 한 상의 여자가 이미 확립된 상태에서 다음 상이 여자되어지므로 에너지변환율을 증가시킬 수 있으며, 토오크의 발생에 자기인력턴스 및 상호인력턴스의 변화율을 이용할 수 있다. 본 여자방식의 SRM은 온, 오프시 다음 상이 이미 여자되어 있는 토오크발생메카니즘의 특성상 기존의 SRM방식보다 소음이 감소하였으며 운전효율도 기존의 SRM에 비해 저토오크영역에서 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.