

# 소음저감을 위한 SRM 드라이브의 새로운 여자방식에 관한 연구

論 文

48B-6-1

## A Study on Novel Excitation Method to Reduce Acoustic Noise in SRM Drive

文 載 元<sup>\*</sup> · 吳 錫 奎<sup>\*\*</sup> · 安 珍 雨<sup>\*\*\*</sup> · 黃 煥 文<sup>§</sup>

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

**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.

The energy conversion ratio is increased because the next phase is excited following one phase excited at the two phase excitation method. Acoustic noise is lower than that of conventional SRM because one of the next two phase is excited already when torque developes.

**Key Words** : Two phase excitation, Self inductance, Mutual inductance, Acoustic noise, Energy conversion ratio

### 1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 전자기적인 구조가 간단 견고하며, 고효율, 고토오크/관성비, 넓은 범위의 가변속운전 등의 장점을 가진 전동기로서 여러 산업분야 및 가전분야에 그 적용범위를 넓혀 가고 있다. 그러나 SRM의 토오크 리플과 소음 진동 등이 다소 커 해결해야 할 문제점으로 대두되고 있다. 이러한 소음 진동은 릴럭턴스 토오크의 발생과정에서 회전력으로 작용하는 접선 방향의 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[2,3], 전동기의 자기회로를 적절하게 설계하여 운전영역의 공진 모드를 제거하는 방법[4], 그리고 SRM의 권선방식과 여자방식을 기존의 방식과 다르게 함으로써 진동, 소음을 감소시키는 방법[5,6] 등이 제시되었다.

권선방식에 의한 소음 진동 저감은 기존의 단절권 방식을 전절권 방식으로 바꿈으로써 상호작용 토오크를 이용하는 방

법이 제기되었으나 전절권에서 발생하는 동손으로 인한 효율이 감소하는 단점이 있다[5]. 그리고 기존의 권선방식을 이용하여 단일방향으로 두상을 대칭적으로 여자함으로써 진동소음을 감소시킬 수 있는 방법이 제시되었으나 기존의 여자방식보다 발생토오크가 감소하는 단점이 있다[6].

본 논문에서는 기존의 한 순간에 한 상만을 여자하는 자기 릴럭턴스만을 이용하는 구동방식을 동시에 2상을 여자시켜 자기릴럭턴스 뿐만 아니라 두 상의 상호작용에 의해서도 릴럭턴스 토오크를 발생시킴으로써 소음 진동을 저감하는 SRM의 새로운 여자방식을 제안하려고 한다[7].

기존의 SRM 여자방식은 한 상이 오프하고 다른 상이 온하는 과정에서 상전압이 양(+)에서 음(-)으로 순간적인 변화가 큼으로 자속이 급격히 감소되고 이로 인해 고정자 프레임의 방사방향으로 변위를 일으켜 진동 소음이 발생된다. 그러나 본 논문에서 제안한 방식은 연속적인 2상 스위칭에 의해 자속을 계속 유지함으로써 방사방향의 순간적인 힘의 변화를 줄여 진동과 소음을 감소시킬 수 있다. 또한 제안한 여자방식의 제어시스템을 구성하여 실험적 해석을 통하여 그 타당성을 검증하려고 한다.

### 2. 2상 여자방식에 의한 SRM의 구동

#### 2.1 2상 여자방식의 동작

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

<sup>\*</sup> 正 會 員 : 釜山大 電氣工學科 博士課程

<sup>\*\*</sup> 正 會 員 : 晉州産業大 産業自動化學科 專任講師 · 工博

<sup>\*\*\*</sup> 正 會 員 : 京城大 電氣電子컴퓨터工學部 副教授 · 工博

<sup>§</sup> 正 會 員 : 釜山大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1998年 6月 30日

最終完了 : 1999年 4月 19日

여자방식과는 달리 맞은편의 동일상의 권선과는 반대 방향으로 감겨져 있으며, 각 상권선의 한쪽 단자는 공통으로 묶어서 Y결선으로 되어 있다. 2상 여자방식의 SRM은 권선의 여자 방향을 바꾸고 여자 되는 두상을 반대극성으로 스위치 온 함으로써, 정방향 토크를 발생시키는 데 자기인덕턴스 및 상호인덕턴스의 변화율을 이용하게 된다

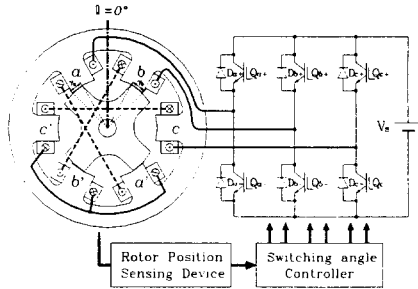


그림 1 2상 여자방식에 의한 SRM 시스템의 구성  
Fig. 1 Configuration of SRM system with 2 phase excitation method

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

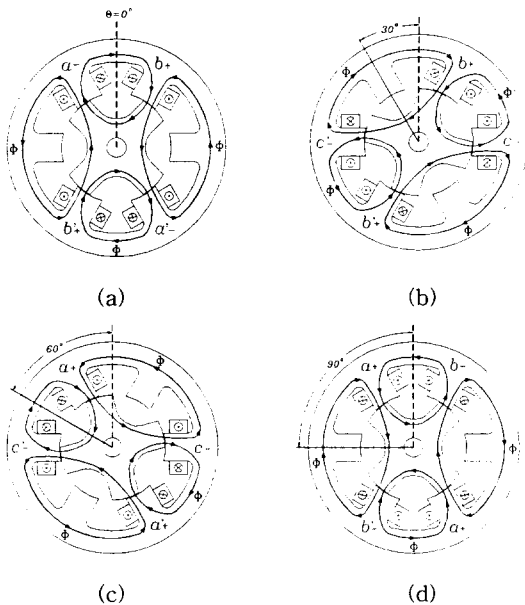


그림 2 상여자순서별 회전자의 위치변화에 따른 자속분포  
(a) a상(-), b상(+) (b) c상(-), b상(+)  
(c) c상(-), a상(+) (d) b상(-), a상(+)  
Fig. 2 Flux distribution of excitation sequence according to rotor position  
(a) ph.a(-), ph.b(+) (b) ph.c(-), ph.b(+)  
(c) ph.c(-), ph.a(+) (d) ph.b(-), ph.a(+)

상을 오프하고 a상을 정(+)으로 여자한 경우로서 (a)의 경우보다 회전자가 60° 회전한 정지점이다. (d)는 a상을 정(+)으로 계속 여자하며, c상을 오프하고 b상을 역(-)으로 여자한 경우로서 (a)의 경우보다 회전자가 90° 회전하게 된다. 이와 같이 2상 여자방식의 SRM은 항상 2상이 여자 되어 정방향 토크를 연속적으로 발생시키며, 여자 되는 두 상의 극성은 항상 반대가 된다. 기존의 1상 여자방식의 각 상여자시 6/4극인 경우 자속의 폐경로가 2개 형성되는 것과는 달리 자속의 폐경로가 4개 형성되게 된다.

2.2 상호인덕턴스 및 자기인덕턴스

2상 여자방식의 자속경로를 보여주는 그림 2(a)에서 a상의 여자시 a상의 기자력에 의해 발생된 자속은 고정자의 b극과 b'극을 통해 b상의 권선과 b'상의 권선을 쇠교하고 고정자의 계철(back iron)을 통해 a상을 다시 쇠교하는 자속의 폐경로를 형성한다. 그러므로 회전자 위치각 변화에 따른 a-b상의 상호인덕턴스( $M_{ab}(\theta)$ )는 누설자속과 철심재료의 자기저항을 무시하게 되면 고정자의 a극과 b극의 회전자극과의 중첩각( $\gamma_a, \gamma_b$ )에 의해 대략적으로 식(1)과 같이 근사화시킬 수 있다[8].

$$M_{ab}(\theta) = -\frac{N^2}{R_g} = -\frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot l_c \cdot D_r}{g} \frac{(\gamma_a(\theta) \cdot \gamma_b(\theta))}{(\gamma_a(\theta) + \gamma_b(\theta))} \tag{1}$$

여기서,  $N$ 는 상권선의 턴수,  $R_g$ 는 공극의 자기저항,  $\mu_0$ 는 공극의 투자율,  $l_c$ 는 철심의 적층길이,  $D_r$ 은 회전자 자극의 직경,  $g$ 는 공극의 길이 그리고  $\gamma$ 는 고정자극과 회전자극의 중첩각이다.  $M_{ab}(\theta)$ 는 권회수의 제곱과 고정자의 a극과 b극이 모두 회전자극과 중첩될 때(그림 2(a) 참조) 자극면을 통과하는 공극자속경로만을 고려한 상호인덕턴스이다. 상호인덕턴스의 극성은 그림1과 그림2에서 보여준 권선의 방향에 의해서 음(negative)으로 정해지게 된다.

b-c상의 상호인덕턴스( $M_{bc}(\theta)$ )와 c-a상의 상호인덕턴스( $M_{ca}(\theta)$ )는 기하학적 대칭성에 의해서 6/4극 2상 여자방식의 SRM인 경우, a-b상의 상호인덕턴스( $M_{ab}(\theta)$ )를 각각 30°, 60° 씩 위상차를 가짐으로써 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} M_{bc}(\theta) &= M_{ab}(\theta - 30^\circ) \\ M_{ca}(\theta) &= M_{ab}(\theta - 60^\circ) \end{aligned} \tag{2}$$

그림 2에서 a상의 기자력에 의하여 고정자의 a극에서 발생된 자속은 회전자의 위치각변화에 따라 공극을 통해 인접 회전자의 자로를 경유하여 인접한 고정자의 b극(그림 2(a)의 경로 참조) 또는 c극(그림 2(c)의 경로 참조)을 통하여 a극으로 다시 되돌아오는 각각의 자속경로를 가진다. 그러므로 a상의 자기인덕턴스( $=L_a(\theta)$ )는 누설성분을 무시하므로써 a-b상의 상호인덕턴스( $=M_{ab}(\theta)$ )와 a-c상의 상호인덕턴스( $=M_{ac}(\theta)$ )의 합에 의하여 구할 수 있고, b상의 자기인덕턴스( $=L_b(\theta)$ )와 c상의 자기인덕턴스( $=L_c(\theta)$ )도 마찬가지로 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 L_a(\theta) &= -(M_{ab}(\theta) + M_{ac}(\theta)) \\
 L_b(\theta) &= -(M_{ba}(\theta) + M_{bc}(\theta)) \\
 L_c(\theta) &= -(M_{ca}(\theta) + M_{cb}(\theta))
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

그림 3은 2상 여자방식에서 이상적인 자기인덕턴스 및 상호인덕턴스 프로파일과 이때 정토크를 발생시킬 수 있는 이상적인 3상 전류파형을 보여준다. 상호인덕턴스 프로파일은 자기포화 등이 없다는 가정하에 고정자의 a극과 b극이 모두 회전자극과 중첩될 때, 그리고 a극과 b극중 한 극만 회전자극과 중첩되고 나머지 극은 중첩되지 않을 때 각각의 공극 자속경로에서 자기저항으로 근사적으로 나타낸 것이다.

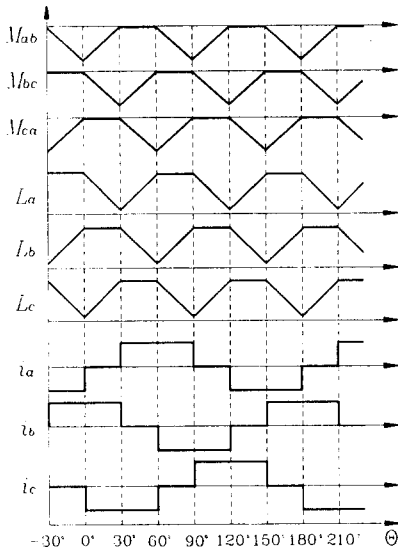


그림 3 회전자의 위치에 따른 이상적인 자기인덕턴스, 상호인덕턴스 및 전류형상

Fig. 3 Idealized self inductance, mutual inductance and current waveforms according to rotor position

자기인덕턴스 프로파일은 2개의 상호인덕턴스 프로파일의 합에 의하여 형성할 수 있고, 자기인덕턴스의 최대구간은 고정자 극호각과 회전자 극호각의 비에 따라 최대구간에서 불연속적인 부분이 생길 수 있으며, 이 경우 부토크의 원인이 될 수 있으므로 자기인덕턴스의 최대구간에서 부토크가 발생하지 않도록 적절한 고정자 극호각과 회전자 극호각의 설계가 필요하다.

### 3. 토크발생 및 저소음운전

#### 3.1 2상 여자방식의 토크발생

2상 여자방식의 SRM에서 토크는 코에너지(coenergy)를 회전자 위치각의 편미분에 의해서 식(4)와 같이 표현할 수 있다. 본 여자방식은 각 여자구간(그림 3의 6/4극인 경우 30° 임)마다 2상이 여자 됨으로 발생토크는 자기인덕턴스에 의한 항과 다른 상과의 상호인덕턴스에 의한 항으로 나누어진다. 여자 되는 2상을 서로 반대 극성으로 여자 하면 동일방향의 자속경로를 가지게 되어 정방향으로 토크를 발생시키게 된다.

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_c}{d\theta} \\
 &+ i_a \cdot i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} + i_b \cdot i_c \frac{dM_{bc}}{d\theta} + i_c \cdot i_a \frac{dM_{ca}}{d\theta}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

여기서 T는 토크, I는 전류, L은 자기인덕턴스, M은 상호인덕턴스,  $\theta$ 는 회전자위치각이다.

토크의 발생을 각 여자구간별로 살펴보기로 한다. 그림 3에서 30° ~60° 구간에서 토크는 a상 전류의 제공에 비례하므로  $i_a$ 와 자기인덕턴스( $L_a$ )의 변화율에 의해서 정토크(self reluctance torque)를 발생시킬 수 있고, 또한 a상 전류(+)와 c상 전류(-)의 곱과 a-c상의 상호인덕턴스( $M_{ac}(\theta)$ )의 변화율(-)에 의해서도 정토크(mutual reluctance torque)를 발생시킬 수 있다. 그리고 이 구간에서 c상의 자기인덕턴스( $L_c$ )는 일정하므로 자기인덕턴스에 의한 토크는 발생하지 않는다.

다른 여자구간에서도 마찬가지로 자기인덕턴스의 변화율과 상호인덕턴스의 변화율에 의해서 토크가 발생된다.

#### 3.2 2상 여자방식의 저소음운전

SRM은 고정자권선에 전압이 인가하여 발생된 자속이 자기회로 내에서 폐루프를 형성하고 이때 자기회로에서의 릴럭턴스가 감소하는 방향으로 회전자의 회전력을 발생시킴으로써 구동된다. 이러한 회전력이 고정자에 영향을 미쳐 회전축의 중심방향으로 고정자의 변형을 발생하게 한다. 그리고 정토크 발생구간이 끝나기 전에 상 인가전압을 오프 하게 됨에 따라 자속의 폐루프가 없어져 고정자에 회전축의 중심방향으로 작용하던 힘도 갑자기 사라지게 되어 고정자의 진동이 발생된다. 그러므로 오프시 자속의 순간적인 변화율은 진동의 크기와 직접적인 관계가 있다. 또한 자속의 변화율은 오프시 인가전압의 변화에 비례하게 된다.

기존의 방식에 의해 SRM을 구동할 때 상 인가전압이 양(+)의 값에서 음(-)의 값으로 변화할 때 자속이 증가에서 감소로 급격한 자속의 변화율을 초래하므로 고정자에 작용하던 힘의 변화도 크게 되어 큰 진동을 발생하게 된다.

2상 여자방식인 경우 항상 두 상이 동작하게 되므로 오프시에도 두 상중 한 상만 오프 되고 나머지 한 상은 온 되어 있는 상태이므로 오프된 상권선 전류는 온 된 상을 통해서 있는 상태이므로 오프된 상권선 전류는 온 된 상을 통해서 프리윙링하면서 감소하게 된다. 그러므로 오프한 시점의 자속의 변화율이 감소하게 되어 고정자의 진동에 의한 소음도 감소하게 된다.

그림 4는 인가전압의 변화, 자속의 변화 및 오프시 진동의 발생을 보여준다. 그림 4의 구간 ①은 a상이 온 되어 전압이 인가되는 구간이고, 구간 ②는 a상의 오프구간이다.

그림 5는 그림 4의 구간 ①(온구간)과 구간 ②(오프구간)에 해당하는 자속의 변화 및 진동의 발생을 보여준다. (a)가 기존의 여자방식이고, (b)가 2상 여자방식이다.

그림 4의 기존의 여자방식인 경우, 그림 5(a)의 구간 ① 동안 상권선에 전압이 인가되어 자속이 증가하면서 고정자는

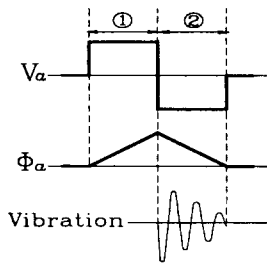


그림 4 온, 오프시 인가전압, 자속파형의 변화 및 진동의 발생

Fig. 4 Voltage, flux-linkage and vibration product when switch on, off

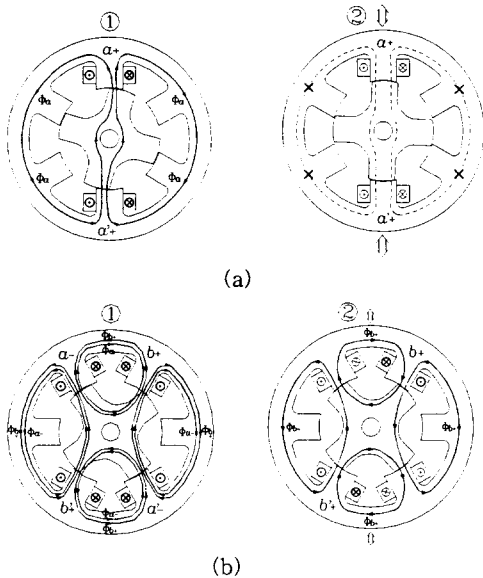


그림 5 온, 오프시 자속의 변화 및 진동의 발생비교 (a) 기존의 여자방식 (b) 2상 여자방식

Fig. 5 Flux variation and vibration product (a) Conventional excitation method (b) 2 phase excitation method

회전축의 중심방향으로 힘이 작용하게 된다. 그리고 구간 ②는 a상이 오프 되면서 상권선은 역전압으로 바뀌면서 자속이 급격히 감소하기 시작하면서 고정자는 회전축 중심방향으로 힘이 없어져 고정자의 진동이 발생하게 된다.

2상 여자방식인 경우 교류기용 브릿지 인버터를 이용하며, 그림 5(b)의 구간 ① 동안 a상권선과 b상권선에 전압이 인가되어 a-b상의 자속이 증가하면서 고정자는 회전축의 중심방향으로 힘이 작용하게 된다. 이때 회전력이 작용되는 고정자극은 4극으로 기존의 방식보다 2배로 증가하므로 고정자를 회전축의 중심방향으로 작용시키는 힘을 분산시켜 감소시킬 수 있다.

그림 5(b)의 구간 ②는 b상이 정방향으로 온 되어 있는 상태에서 역방향으로 여자된 a상이 오프 되면서 진동이 발생하는 구간인데, 이때 오프된 a상의 전류는 다이오드와 온 되어 있는 b상을 통해서 프리휠링하게 되므로 오프시 자속이 순간적으로 유지되므로 회전축 중심방향으로 작용하는 힘이 없어지지 않아 진동이 감소하게 된다. 따라서 소음도 감소하게 된다.

4. 실험결과 및 해석

4.1 동작특성 비교

실험에 사용된 스위치드 릴렉턴스 전동기는 3상 12/8극으로써 750[w]급이다. 고정자의 극호각이 17°, 회전자의 극호각이 16°이며, 고정자극피치는 30°이다. 그리고 고정자권선의 극당 턴수가 150[turns], 공극의 길이는 0.3mm이고 적층 길이는 60mm이다. 12/8극을 사용하면 6/4극인 경우보다 회전당 극수와 스위칭수가 2배로 증가되므로 토오크 리플이 줄어들게 되고, 자속의 이동경로의 길이도 줄어들게 되는 장점을 가지고 있다.

2상 여자방식은 기존의 방식에 상 여자방향만 바꾸면 간단히 구현이 가능하다. 그리고 인버터는 스위칭소자와 프리휠링 다이오드가 모듈화되어 있는 기존의 AC전동기용 인버터의 사용이 가능하다.

그림 6은 각 상의 여자 순서별 인버터의 동작모드를 보여준다. 모드 1은 a상을 정(+), b상을 역(-)방향으로 온 될 때 전류도통모드이다. 모드 2는 b상을 역(-)방향으로 계속 온 되어 있고 a상을 오프 할 때 전류도통모드이다.

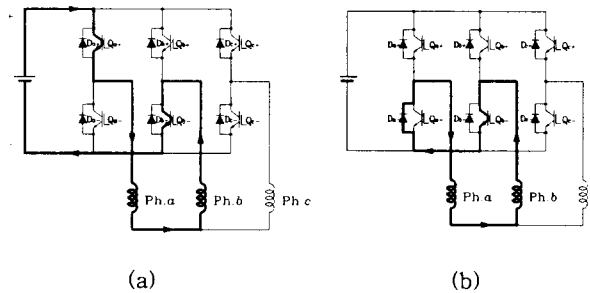


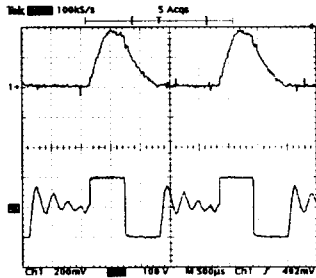
그림 6 인버터의 동작모드 (a) 모드 1. a상(+), b상(-):ON (b) 모드 2. b상(-):ON, a상(+):OFF

Fig. 6 Operation mode of inverter (a) mode 1. ph.a(+), ph.b(-):ON (b) mode 2. ph.b(-):ON, ph.a(+):OFF

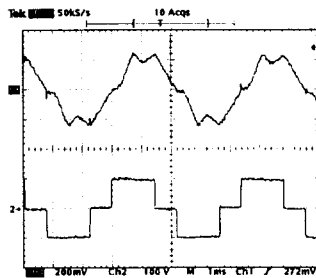
기존의 SRM 인버터에서는 상의 여자후 오프시 각 상의 인덕턴스에 저장된 에너지를 전원측으로 회수시키거나 상 자체적인 프리휠링(freewheeling)을 통해서 줄열로 소모시키게 된다. 그러나 본 전동기의 인버터에서는 상의 여자방식의 인가전압이 100[V]로 동프리 인덕턴스에 저장된 에너지는 도통되어 있는 상을 통해 프리휠링하게 되므로 전원측으로 회수될 수 없이 다음 상에서 활용하게 된다. 그리고 2상 여자방식의 SRM은 a상전압이 정(+) 전압에서 오프시 온 되어 있는 b상을 통하여 프리휠링하므로 영전압루프(모드 2. 참조)를 거친 후 역(-)전압으로 바뀌므로 기존의 구동방식보다 전류(commutation)시 전압의 스텝변화율이 감소하게 된다.

그림 7은 기존의 여자방식 SRM의 상전압과 2상 여자방식 SRM의 선간전압의 변화를 보여 주고 있다. 두 가지 여릴하게 인가될 때 온, 오프시 전압의 변화를 보여 주는 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 여자방식인 경우 인가전압이 100[V]에서 스위칭소자의 오프시 프

리휠링구간인 0[V]로 선간전압이 변화하고 있다. 그러므로 2상 여자방식의 경우 온, 오프시의 전압변화가 절반으로 줄어들게 된다. 스텝변화율이 감소하게 되면 자속의 순간적인 변화율이 감소하게 되므로 오프시 고정자진동이 감소하게 되고, 이로 인하여 구동소음의 크기가 줄어들게 된다.



(a)



(b)

그림 7 상전류 및 전압파형 (a) 기존 여자방식(상단 : 전류 [1.25A/div.], 하단 : 상전압 [100V/div.]) (b) 2상 여자방식(상단 : 전류[1.25A/div.], 하단 : 선간전압[100V/div.])

Fig. 7 Phase current waveforms and voltage waveforms (a) Conventional method (upper : current[1.25A/div.], lower : voltage[100V/div.]) (b) 2 phase excitation method (upper : current[1.25A/div.], lower : voltage[100V/div.])

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 8은 기존의 SRM과 2상여자방식의 SRM에 대한 3400rpm의 일정속도에서 부하토크의 가변에 따른 소음도(acoustic noise level)의 변화를 보여준다. 여기서 소음도(acoustic noise level)는 소음계(dB meter)를 일정한 거리의 동일위치에 설치하여 측정하였다. 부하토크를 증가시켜 출력력이 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 접선방향의 힘뿐만 아니라 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 5에서 알 수 있듯이 2상 여자방식의 SRM은 한 상이 온 되어 있는 상태

에서 다음 상이 온 되며, 오프 시에도 다음 상이 이미 온 되어 있으므로 오프 될 때 이미 온 된 상이 고정자의 진동을 억제하는 역할을 하여 온, 오프시의 진동이 줄어들게 되므로 소음이 감소하게 된다.

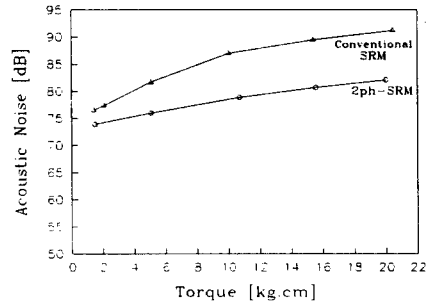


그림 8 일정속도 운전시 부하토크 가변에 따른 소음도 비교(3400rpm)

Fig. 8 Comparison of acoustic noise level with load torque variation (3400rpm)

그림 9는 토크를 5kg.cm로 일정하게 유지하고 속도를 증가시키에 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.

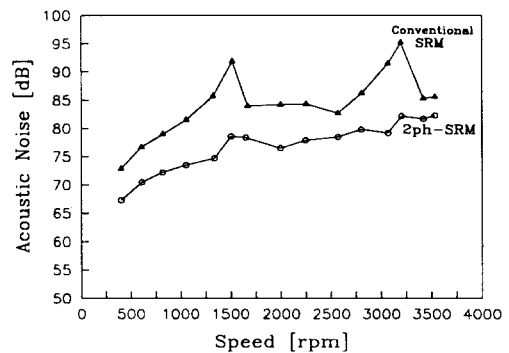


그림 9 일정토크 운전시 속도 가변에 따른 소음도 비교 (5kg.cm)

Fig. 9 Comparison of acoustic noise level with speed variation (5kg.cm)

그림 10은 기존방식과 2상 여자방식으로 운전시의 소음파형과 소음파형에 대한 FFT분석 스펙트럼을 보여준다. 여기서 운전속도를 3400rpm으로 일정하게 유지하고 5kg.cm의 부하토크를 가할 때로써 (a)가 기존의 여자방식이고, (b)가 2상 여자방식이다. 상단은 소음파형이고, 하단은 소음의 FFT 분석 스펙트럼이다. 소음파형은 일정한 거리의 동일위치에 장착된 소음계의 출력신호를 동일한 증폭율에서 증폭하여 상대적인 크기를 측정, 비교하였다.

기존의 여자방식의 경우 스위칭 주파수인 1.3kHz 근처에서 큰 고조파성분이 나타나고 있는데, 이것은 각 상을 온, 오프

프 할 때의 고정자진동에 의한 소음이 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 그리고 소음파형에서 전동기 1회전당 주기가 뚜렷하게 나타났다.

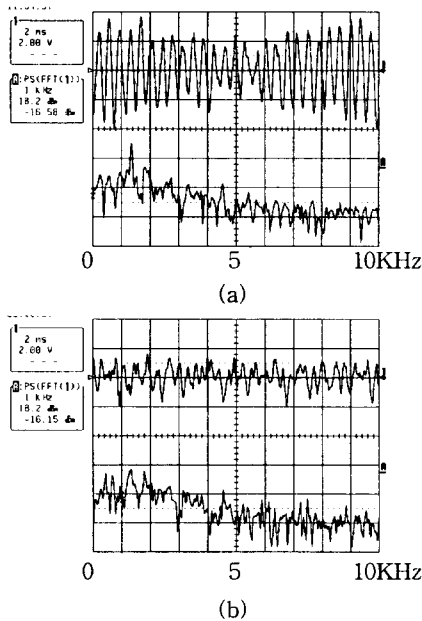


그림 10 소음파형 및 주파수 스펙트럼 (속도 : 3400rpm, 토크 : 5kg.cm) (상단 : 소음파형, 하단:FFT 스펙트럼)  
(a) 기존의 방식 (b) 2상 여자방식

Fig. 10 Acoustic noise waveforms and frequency spectrum (3400rpm, 5kg.cm) (a) conventional method (b) 2 phase excitation method

소음파형은 일정한 거리의 동일위치에 장착된 소음계의 출력신호를 동일한 증폭율에서 증폭하여 상대적인 크기를 측정, 비교하였다.

기존의 여자방식의 경우 스위칭 주파수인 1.3kHz 근처에서 큰 고조파성분이 나타나고 있는데, 이것은 각 상을 온, 오프 할 때의 고정자진동에 의한 소음이 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 그리고 소음파형에서 전동기 1회전당 주기가 뚜렷하게 나타났다.

이에 반하여 동일한 속도, 부하 조건에서 2상 여자방식으로 운전할 경우 스위칭주파수대인 1.3kHz 부근의 주파수대의 고조파가 기존의 방식에 비해 감소하였다. 이것은 각 상의 온, 오프시 발생하는 소음이 상대적으로 감소하였음을 알 수 있으며, 소음파형에서 1회전당 주기가 뚜렷하지 않았다.

두 가지 여자방식의 FFT분석에서 스위칭 주파수대인 1.3kHz부근에서 가장 큰 고조파성분이 발생하였으므로 1.3kHz근처의 고조파성분만을 필터링 하여 그 성분을 비교하여 보기로 한다. 그림 11은 3400rpm의 일정속도로 운전할 때 부하토크 5kg.cm인 경우의 스위칭주파수(1.3kHz)대역의 소음파형과 상전류파형을 나타낸다. 여기서 (a)가 기존의 SRM이고, (b)가 2상 여자방식의 SRM이다. 각 그림에서 상단이 스위칭주파수대역의 소음파형이며, 하단이 상 전류의 파형이다.

소음파형은 3400[rpm]의 일정속도로 회전하는 경우 12/8극 SRM인 경우 1회전당 24회 스위칭하므로 스위칭주파수는

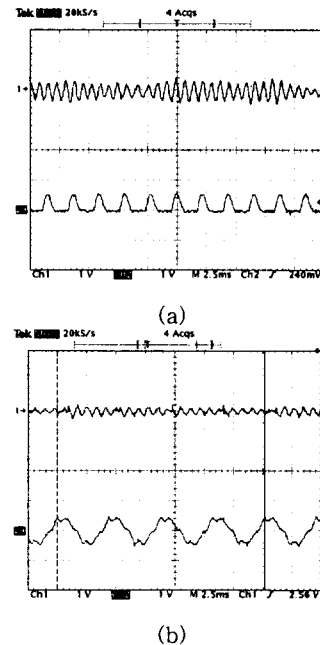


그림 11 스위칭주파수(1.3kHz)대역의 소음과 전류파형비교 (속도 : 3400rpm, 토크 : 5kg.cm) (상단 : 소음[1V/div.], 하단:상전류[6.25A/div.])  
(a) 기존의 방식 (b) 2상 여자방식

Fig. 11 Acoustic noise of switching frequency zone and current waveform (3400rpm, 5kg.cm) (upper : acoustic noise[1V/div.], lower : phase current[6.25A/div.])  
(a) conventional method (b) 2 phase excitation method

1.36kHz(3400rpm/60sec×24회)가 된다. 소음은 각 상을 온, 오프할 때 주로 발생되므로 소음을 발생시키는 주된 주파수대는 스위칭 주파수대인 1.36kHz근처가 되며, 소음파형은 다시 1회전을 단위로 주기가 생기게 된다.

효율특성은 저토크영역에서 2상 여자방식은 자속의 경로가 4개로 나누어지므로 자기회로의 포화의 영향을 작게 받게 되어 철손의 영향이 적으므로 효율이 높으나, 고토크영역으로 가면 전류의 크기가 증가하고 자기회로의 포화의 영향을 직접 받게 되므로 철손과 동손의 영향이 기존의 방식보다 증가하게 되어 효율이 다소 감소하였다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 스위치 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 여자 되어서므로 에너지변환율을 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 동작원리 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 측정되었고, 고토오크영역에서는 다소 감소하는 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. Annual Meeting, Vol.1, pp.448-455, 1995.
- [4] R.S.Colby, F.M.Mottier, T.J.E.Miller, "Vibration Modes and Acoustic Noise in a Four-Phase Switched Reluctance Motor", IEEE trans. on IA, Vol.32, No.6, pp.1357-1364, 1996.
- [5] B.C.Mecrow, "New Winding Configurations for Doubly Salient Reluctance Machines", IEEE trans. on IA, Vol.32, No.6, pp.1348-1356, 1996.
- [6] 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.
- [7] Jae-Won Moon, Seok-Gyu Oh, Jin-Woo Ahn, and Young-Moon Hwang "Switched Reluctance Motor with 2-phase Excitation", Proc. of IEEE-IAS'98, St. Louis, pp.547-552, Oct. 1998.
- [8] B.C.Mecrow, "Fully Pitched Winding Switched Reluctance and Stepping Motor Arrangements", Proc. of IEE Pt.B, Vol.140, No.1, pp.61-70, 1993.
- [9] Y.Li, J.D.Lloyd, G.E.Horst, "Switched Reluctance Motor with DC Assisted Excitation", IEEE IAS. Annual Meeting Vol.2, pp.801-807, 1996.

**저 자 소 개**



**문 재 원(文載元)**

1971년 6월 27일생. 1994년 경성대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 051) 260-3529  
E-mail : jwmoon1@netian.com



**오 석 규(吳錫奎)**

1967년 6월 2일생. 1991년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1993년~1994년 현대중공업 근무. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 진주산업대 산업자동화공학과 전임강사

Tel : 0591) 751-3385  
E-mail : sgoh@cjcc.chinju.ac.kr



**안 진 우(安珍雨)**

1958년 5월 26일생. 1984년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 경성대 전기전자 컴퓨터공학부 부교수.

Tel : 051) 620-4773  
E-mail : jwahn@star.kyungsung.ac.kr



**황 영 문(黃煥文)**

1934년 4월 13일생. 1957년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1959년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1972년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1991년~1992년 당 학회회장 역임. 현재 부산대 공대 전기공학과 교수

Tel : 051) 510-2366  
E-mail : ymhwang1@hyowon.cc.pusan.ac.kr