

병렬권선 운전시 SRM의 부하분담 특성에 관한 연구

李相勳*, 朴晟濬, 崔 哲, 安珍雨, 金喆禹

The Study on the Characteristics of the Load Sharing in SRM
with the Parallel Operation of Phase Winding

Sang-Hun Lee, Sung-Jun Park, Choi-Cheol, Jin-Woo Ahn, and Cheul-U Kim

요 약

SRM의 구동에 있어 전류정격은 스위칭 소자의 정격과 직결되고 경제적인 측면에서 적은 정격전류 스위칭 소자를 이용하여 구동하기 위해서는 스위칭 소자의 병렬운전이 필수적이다. 스위칭 소자의 병렬 운전시 스위칭 소자의 전류분담을 균일하기 위해서 제조업체의 기술자료를 중심으로 많은 연구가 이루어졌으나, 아직도 실용화하기 위해서는 많은 문제를 앓고 있다. 스위칭 소자의 병렬운전은 스위치의 특성 즉, 전류에 대한 상이한 포화전압이 그 근본적인 원인이 되고 있다. 이를 보상하기 위해서 스위칭 소자에 직렬로 적당한 저항값을 삽입하는 방법이 있지만 이 방법은 근본적인 대책이 될 수 없다. 본 논문에서는 스위칭 소자의 포화전압과 같은 파라미터가 전류분담에 영향을 미치지 않는 새로운 병렬운전기법인 상권선 병렬운전기법 제안하였다.

ABSTRACT

In SRM driving, the current rate is directly related to the rate of a switching device and in cost reduction, the parallel switching operation is the alternatives because it has the smaller current rate through current division. There are many investigations for the parallel switching operations to equaling the current division. However it remains many problems for practical usage. The reason is that the switching characteristics are mainly relied on the different saturation voltage of each device etc. and these factors are not altered by a circuit designer. In order to compensate this problem, a proper resistance is experimently inserted to the switching device. But this method can not be the optimal solution. Therefore this paper proposes a new parallel operation of SRM which uses a parallel phase winding to remove the traditional effect of switching device such as saturation voltage according to the division of current. Also the reliable and stable driving is improved through experiments and the detailed principles.

Key Words : SRM, parallel switching operations, current division, parallel phase winding

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 단일 여자기기로 구조가 간단하고, 자속밀도가 기존의 교류전동기보다 매우 높아 단위 중량당 출력이 크다. 또한 직류직권 전동기의 속도-토크 특성을 가지고 있고 광범위한 속도운전범위와 정·역회전특성이 우수하고 강인하다는 특성을 가지고 있다. 이러한 장점으로 인하여 SRM에 대한 연구는 선진국을 중심으로 가전기기, 전기자동차, 항공기 및 산업전

*OTIS-LG 서보 R&D Part 대리

E-mail : thinkbig72@hanmail.net

접수일자 : 2002. 7.26

1차심사요청일 : 2002. 7.30 2차심사요청일 : 2002. 9.18

심사완료일 : 2002. 10.29

반에 걸쳐 그 응용영역을 확대해가고 있다¹¹⁻¹²⁾. SRM은 톨럭턴스 토크를 극대화하기 위해 회전자와 고정자가 모두 돌극형의 구조를 가지며, 권선은 고정자에만 집중권으로 감겨 있어 전자계 구조상 단속적인 여자전원이 각 상 권선에 순차적으로 인가되어 구동되므로 낮은 스위칭 주파수로 운전이 가능하여 고속 운전 및 효율적인 측면에서 강한 장점을 갖고있다¹³⁾. 특히 SRM은 다른 전동기에 비하여 낮은 스위칭 주파수로 운전이 가능하며, 인버터의 낮은 스위칭 주파수로 인하여 인버터의 스위칭 손실 및 전동기의 철손이 크게 감소하여 고효율 운전이 가능하다¹⁴⁾.

Base speed 이상의 토크 제어시 어드밴스 각 조정을 통한 스위칭 온 시점을 적절하게 앞당겨주는 것이 일반적이다. 이러한 온각의 증대는 상전류의 피크치를 증가시켜 스위칭 소자의 전류정격을 증대시키는 결과를 낳는다. 특히 저전압 대전류용 SRM에서는 큰 전류정격이 실제시스템 구성에 큰 장애로 작용하는 실정이다. 전동기의 구동에 있어 전류정격은 스위칭 소자의 정격과 직결되고 경제적인 측면에서 적은 정격전류 스위칭 소자를 이용하여 구동하기 위해서는 스위칭 소자의 병렬운전이 필수적이다. 스위칭 소자의 병렬 운전시 스위칭 소자의 전류분담을 균일하기 위해서 제조업체의 기술자료를 중심으로 많은 연구가 이루어졌으나, 아직도 실용화하기 위해서는 많은 문제를 안고 있다¹⁵⁾.

스위칭 소자의 병렬운전은 스위치의 특성 즉, 전류에 대한 상이한 포화전압이 그 근본적인 원인이 되고 있다. 이 스위칭 소자의 포화전압의 차이는 설계자가 변경할 수 없는 요소이며 이를 보상하기 위해서 스위칭 소자에 직렬로 적당한 저항값을 삽입하는 방법이 있지만 이 방법은 근본적인 대책이 될 수 없다. 따라서 본 논문에서는 스위칭 소자의 포화전압과 같은 파라미터가 전류분담에 영향을 미치지 않는 새로운 병렬 운전기법인 상권선 병렬운전기법 제안하였다. 제안된 방법에서는 기존의 스위칭 소자의 병렬구성 대신 상권선의 병렬 구성을 통하여 상전류 분담에 따른 과도상태 및 정상상태에서의 특성을 고찰하였다. 이를 위해 해당 상권선 쇄교자속에 대한 일반식을 도출하여 스위칭 소자 및 상권선 파라미터 변화에 따른 영향을 각각 분석하였다. 그 결과 제안된 방법을 적용함으로써 스위칭 소자의 전류분담율의 증가와 안정적인 전류분담이 될 수 있음을 실험을 통하여 검증하였다.

2. 상권선의 병렬운전

SRM에서의 전동력 발생은 여자된 자기회로에서 자

기궤럭턴스(magnetic reluctance)가 최소가 되는 방향으로 토크가 발생하므로 그림 1에서와 같은 자기회로 구조에서 연속적인 운전을 하기 위해서는 회전방향의 반대방향으로 각 상을 주기적으로 여자시킬 때 이루어진다. 이 때 상당 발생 토크의 크기는 식 (1)에서와 같이 상권선에 흐르는 전류 i 의 제곱과 회전자 위치각 θ 에 대한 인덕턴스 L 의 변화율에 비례한다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (1)$$

여기서 인덕턴스의 변화율은 SRM의 구동전압과 정격전류에 의해 전동기 설계시 결정되어진다. 전동기 설계에서 결정되어진 정격전압과 정격전류에 의해서 SRM의 구동인버터 소자의 정격이 결정되어진다.

결정된 스위칭 소자의 전류정격을 갖는 스위칭 소자를 구할 수 없거나, 경제성이 없는 경우 일반적으로 선택되는 것은 그림 2와 같이 소자의 병렬운전으로 전동기의 전류정격을 높이게 된다. 전류정격을 높이기 위해 스위칭 소자의 병렬운전을 할 경우 스위칭 소자 전류분담은 소자의 포화전압특성곡선에 의해 좌우된다.

그림 2(a)와 같은 포화전압을 갖는 스위칭 소자에서 SW₁의 스위칭 소자는 드레인 소스단 전압이 V_{S1} 이 될 때 소자의 정격전류가 흐르게 되고, SW₂의 스위칭 소자는 드레인 소스단 전압이 V_{S2} 가 될 때 소자의 정격전류가 흐르는 특성을 갖는다고 가정하자.

그림 2(a)와 같이 상이한 스위칭 포화전압을 갖는 두 스위칭 소자를 병렬운전 할 경우 정상상태에서 전류분담특성은 그림 2(b)로 나타낼 수 있다. 두 스위칭 소자를 병렬로 연결하므로 드레인 소스전압은 하나가 되고 이 전압에 의해 두 스위칭 소자는 포화전압 특성에 의해 전류분담율이 정해진다.

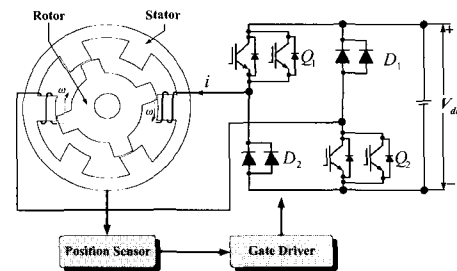


그림 1 기존의 병렬스위칭 방식의 SRM 구동시스템
Fig. 1 The conventional SRM drive system of the parallel switching method

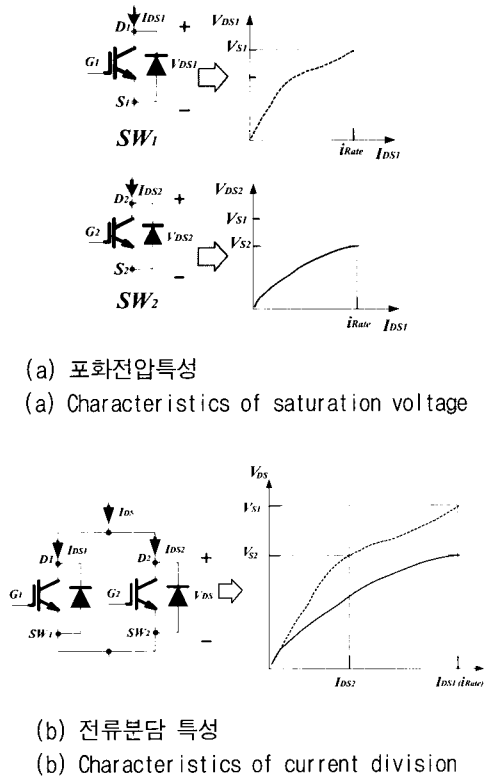


그림 2 병렬 스위칭 방식의 전류분담 특성
Fig. 2 Characteristics of current division in parallel switching method

그림 2(b)와 같이 부하전류에 의해 두 스위칭 소자의 드레인 소스단 전압인 V_{DS} 가 V_{SI} 가 되다보면 SW_1 에 흐르는 전류는 소자의 정격전류인 i_{RATE} 가 흐르는 상태가 되고, 이 때 SW_2 에 흐르는 전류는 I_{DS2} 가 되어 소자의 정격전류보다 적은 전류가 흐르게 된다. 이 전류의 크기는 스위치 SW_1 의 포화특성 곡선에서 V_{DS} 일 때의 전류값이 된다. 즉 스위칭 소자를 병렬운전 할 경우 소자의 포화전압이 높은 쪽의 스위칭 소자로 전류가 집중되어 결국 전류 분담율이 낮게 되어 스위칭 소자의 전류분담의 의미를 상실하게 된다. 이를 보상하기 위해 스위칭 소자에 직렬로 저항을 삽입하는 방식을 사용하여 전류 분담율을 증가시키는 방식도 있으나, 스위칭 소자의 특성이 소자마다 다른 특성을 가지기 때문에 소자의 교체시 스위칭 소자에 삽입된 저항의 교체도 필수적이 된다.

이는 스위칭 소자의 포화전압은 사용자가 임의로 결정하는 것이 아니라 스위칭 소자를 만들 때 이미 결정되어지기 때문이다. 또한 스위칭 소자의 포화전압 특성은 주변 온도에 따라 변하게 되므로 정확한 전류분

담은 매우 어려운 상태가 된다. 따라서 병렬 스위칭 운전에서 소자의 전류분담은 소자의 특성에 의해 좌우되는 병렬 스위칭방식으로는 완전한 전류분담을 행하기는 거의 불가능하다.

그림 3은 본 논문에서 제안된 상권선 병렬 운전방식의 SRM 구동시스템이다. 이 구동시스템은 기존의 스위칭 소자 병렬운전의 단점인 스위칭 소자의 전류분담이 소자의 특성에 의해 좌우되는 방식과 달리 부하의 특성에 의해 좌우되는 방식이 된다. 이 방식은 스위칭 소자와 전동기의 상권선을 직렬로 연결함으로써 스위치에 흐르는 전류특성이 스위칭 소자의 특성에 의해 지배받는 것이 아니라 권선의 특성에 의해 결정되어지는 방식이 되고, 권선의 특성은 전동기 설계시 결정할 수 있는 파라메타가 된다. SRM의 한 상에 대한 전압방정식은 아래와 같다.

$$\frac{d\lambda}{dt} = V - Ri \tag{2}$$

여기서 λ 는 총쇄교자속, V 는 상에 인가되는 전압, R 은 권선저항, i 는 상전류가 되며, 위 식의 좌변 항인 총 쇄교자속 변화분은 다음과 같다.

$$\frac{d\lambda}{dt} = L \frac{di}{dt} + i\omega \frac{dL}{d\theta} \tag{3}$$

여기서 L 은 상 인덕턴스, ω 는 각속도, θ 는 회전자 위치각이 된다. 위 식의 우변 1번째 항은 상전류의 과도상태를 지배하는 항이며, SRM의 상전류가 플랫폼(flatted tap) 전류가 형성되었다면 각 상 전류의 변동분이 없으므로 이항은 영이 된다. 따라서 총쇄교자속 변화분은 상전류와 직접적으로 비례하는 항이 되며, 정상상태에서 상전류와 총 쇄교자속 변화분의 관계는 다음 식과 같이 간단히 표현된다.

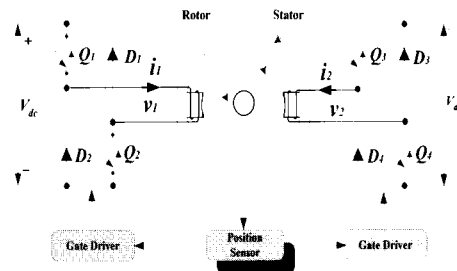


그림 3 제안된 병렬 권선방식의 SRM 구동시스템
Fig. 3 The proposed SRM drive system of the parallel winding method

$$i = K_e \frac{d\lambda}{dt} \tag{4}$$

여기서, $K_e = \frac{1}{\omega} \frac{d\theta}{dL}$ 가 된다.

따라서 총 쇠교자속 변화분만 구하면 상전류를 구할 수 있다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 SRM의 상권선 총 쇠교자속 변화분은 상권선에 인가되는 전압에서 권선 저항에 의한 전압강하성분을 뺀 것과 같다.

그림 4는 총 쇠교자속 변화분을 분석하기 위한 비대칭 인버터에서 SRM의 전류 루프를 나타내고 있다. SRM을 운전하기 위해서 상권선의 연속적인 여자가 이루어지므로 SRM의 스위칭 운전은 여자모드(Mode A), 환링모드(Mode B), 감자모드(Mode C)로 구별된다.

따라서 총 쇠교자속 변화분을 해석하기 위해서는 위에서 언급한 각 모드별로 해석하여야 한다. 그림 4로부터 스위칭소자, 다이오드 및 저항의 전압강하를 고려한 각 모드별 총 쇠교자속 변화분은 아래 식과 같다. 여기서 V_s 는 능동 스위칭 소자의 드레인 소스간의 전압강하분, V_D 는 다이오드의 순방향 전압강하분을 나타내고 있다.

SRM의 운전모드는 일반적으로 단일펄스모드와 PWM모드로 나눌 수 있는데, 단일펄스모드로 운전할 경우 여자모드와 감자모드가 한번씩 나타나므로 간단히 해석되나, PWM모드로 동작한 경우 전류정착을 위한 여자모드와 전류평탄화를 위한 여자 및 환링모드가 교번적으로 나타나는 모드가 있고, 전류 소호를 위한 감자모드가 존재한다. 본 논문에서는 단일펄스모드와 PWM모드를 구별하여 분석한다.

우선 그림 5는 단일펄스모드로 SRM을 제어할 때 상에 인가되는 전압을 분석한 그림이다. 여기서 ΔV 는 스위칭 소자의 전압강하를 나타내고, Ri 는 권선저항에

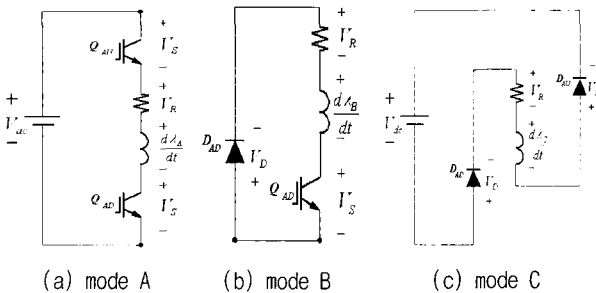


그림 4 각 모드별 전류루프
Fig 4 Current loop according to each mode

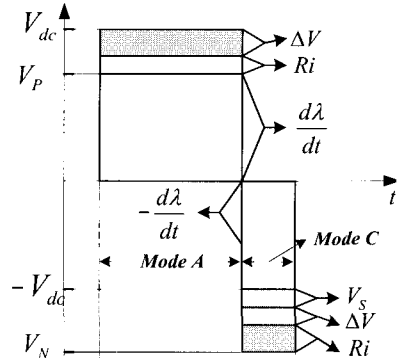


그림 5 단일펄스모드시 상 인가전압
Fig. 5 Applied phase voltage at one pulse mode

의한 전압강하를 나타내고 있으며, V_p 는 여자시 이상적인 상권선에 인가되는 전압, V_n 는 감자시 이상적인 상권선에 인가되는 전압을 나타내고 있다. 이 운전모드에서는 전류루프가 모드 A와 모드 C만 나타나게 되고, 상권선의 전류분담을 고려함에 있어 두 모드인 모드 A와 모드 C 중에서 모드C는 고려할 필요가 없다. 그 이유는 모드 C에서는 상전류가 감소하는 영역이므로 전류분담이 어느 정도 상이하더라도 소자의 정격에는 문제가 없다.

따라서 단일펄스모드로 SRM을 운전할 경우 모드 A에서의 전류분담만을 고려한다. 또한 PWM모드로 운전할 경우에는 상에 인가되는 평균전압이 부인 경우는 전류가 감소하는 영역이 되므로 상에 인가되는 평균전압이 정인 경우에만 고려하면 된다.

PWM모드에서는 상에 인가되는 평균전압은 모드 A와 모드 B가 스위칭 주파수내에서 발생하며 그 평균전압은 PWM의 시비율(d)에 의해 결정되어진다.

그림 6은 단일극성 PWM으로 상전압을 인가할 경우 상에 인가되는 전압을 나타내고 있다. 여기서 T_s 는 PWM 주기를 나타내고 있다. 그림으로부터 PWM의 한 주기내에서 상에 인가되는 평균전압은 아래 식과 같이 주어진다.

$$\frac{d\lambda_A}{dt} = dV_{dc} - (1+d)V_s - (1-d)V_d - Ri \tag{6}$$

식 (6)에서 시비율이 1인 경우에는 단일펄스 모드의 식 (5-1)과 같게된다. 따라서 총 쇠교자속 변화분은 식 (6)에 의해 해석하면 된다. 상권선의 전류분담을 해석하기 위해 그림 5로부터 상에 병렬로 감겨진 제 1권선 및 제 2권선의 총 쇠교자속 변화분은 아래와 같다.

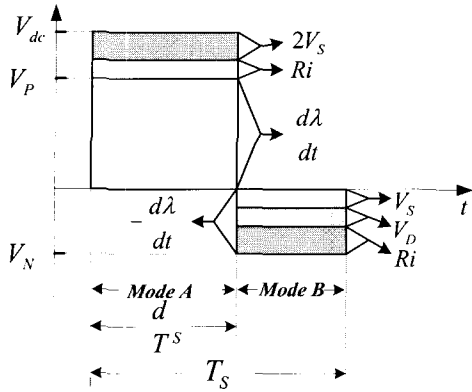


그림 6 PWM모드시 상 인가전압
Fig 6 Applied phase voltage at PWM mode

$$\frac{d\lambda_{A1}}{dt} = dV_{dc} - (1+d)V_{S1} - (1-d)V_{D1} - R_1 i_1 \quad (7)$$

$$\frac{d\lambda_{A2}}{dt} = dV_{dc} - (1+d)V_{S2} - (1-d)V_{D2} - R_2 i_2$$

만일 두 코일에 연결된 스위칭 소자의 전압강하와 코일의 권선 저항이 아래의 식(8)과 같이 동일하다면 식(7)로부터 두 권선의 총쇄교자속 변화분은 동일한 값이 된다.

$$\begin{aligned} V_{S1} &= V_{S2} \\ V_{D1} &= V_{D2} \\ R_1 &= R_2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{d\lambda_{A1}}{dt} = \frac{d\lambda_{A2}}{dt} \quad (9)$$

또한 두 코일 권선의 회수가 같다면($N_1=N_2$) 두 권선에 흐르는 전류도 동일하게 된다.

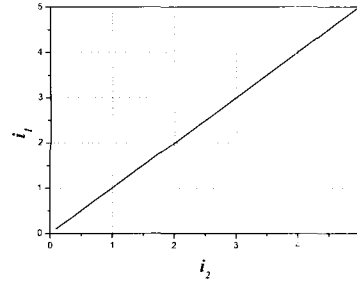
$$i_2 = i_1 \quad (10)$$

위 식의 관계식을 도식적으로 표현하면 그림 7(a)와 같다.

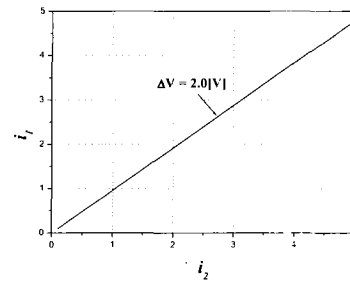
만일 전동기의 두 권선 저항값이 동일하고, 스위칭 소자의 전압강하분의 차(ΔV)만 발생한다면 식(7)로부터 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta V &= (1+d)(V_{S1} - V_{S2}) + (1-d)(V_{D1} - V_{D2}) \\ R &= R_1 = R_2 \end{aligned} \quad (11)$$

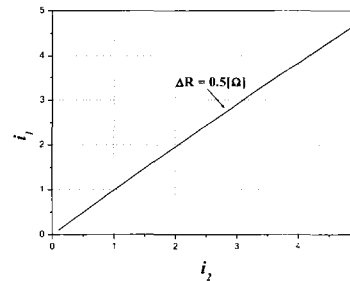
따라서 두 권선의 전류 관계식은 아래와 같다.



(a) 인가전압 및 권선저항이 동일한 경우
(a) The same case of applied voltages and winding resistances



(b) 인가전압이 상이한 경우 ($\Delta V=2.0$)
(b) The different case of applied voltages($\Delta V=2.0$)



(c) 권선저항이 상이한 경우($\Delta R=0.5$)
(c) The different case of winding resistances($\Delta R=0.5$)

그림 7 파라메타 변동에 따른 전류분담 특성
Fig. 7 Characteristics of division of current according to changing of parameters

$$i_2 = \left(1 - \frac{\Delta V}{V_2 + \Delta V}\right) i_1 \quad (12)$$

위 식의 관계식을 도식적으로 표현하면 그림 7(b)와 같다. 식(12)로부터 스위칭 소자의 전류 분담비는 스위칭 소자의 전압강하분의 차의 향으로 나타나게 되고, 일반적으로 인가전압차는 인가전압에 비하여 상당히 작으므로 이항의 영향은 매우 적다. 위 식은 SRM에서 상의 각 권선의 저항이 동일하다는 가정 하에서

성립되는 식이다. 따라서 상의 각 코일의 저항변화에 따른 전류분담특성을 조사하기 위해서 각상의 전압이 동일하고, 두 코일의 저항 차는 아래 수식과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_2 &= V_1 \\ R_2 &= R_1 + \Delta R \end{aligned} \quad (13)$$

식 (6) 및 식 (13)으로부터 두 권선의 저항이 상이할 경우 전류 관계식은 아래와 같다.

$$i_2 = i_1 - \frac{\Delta R i_1^2}{V_2 + \Delta R i_1} \quad (14)$$

위 식의 관계식을 도식적으로 표현하면 그림 7(c)와 같다. 식 (14)로부터 스위칭 소자의 전류분담비는 두 권선의 저항 차로 나타나게 된다. 전류가 적은 경우에는 저항의 전압강하를 무시할 수 있어 전류분담이 저항에 관계없이 동일하게 되나, 전류가 커지면 전류분담이 작게 되는 경향이 있어 두 권선의 저항차를 작게 하는 것이 필요하다. 따라서 각 스위칭 소자의 전류분담을 같게 하기 위해서는 각 권선의 저항차를 줄이는 것이 필요하다.

만일 스위칭 소자의 전압강하분의 차와 권선저항차를 모두 무시할 수 없는 경우 전압과 저항의 차를 아래 수식으로 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} V_1 &= V_2 + \Delta V \\ R_2 &= R_1 + \Delta R \end{aligned} \quad (15)$$

식 (6) 및 식 (15)로부터 두 권선의 전류 관계식은 아래와 같다.

$$i_2 = i_1 - \frac{\Delta V i_1 - \Delta R i_1^2}{V_2 + \Delta V - \Delta R i_1} \quad (16)$$

위 식의 관계식을 도식적으로 표현하면 그림 8과 같다. 그림 8은 본 실험에 사용된 전동기에서 전압변동이 2[V], 병렬 상권선의 저항차가 0.5[Ω]로 둔 경우의 전류분담특성을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 전체 전류분담율을 식 (17)과 같이 정의하였다. 소자의 정격 전류(i_{Rate})를 5[A]로 한 경우 전류분담율이 적은 경우의 최대전류(i_{Max})가 약 4.5[A]가 되어 전체전류분담율은 95[%]정도가 됨을 알 수 있다.

$$i_{\%} = \frac{i_{Rate} + i_{Max}}{2 i_{Rate}} \times 100 [\%] \quad (17)$$

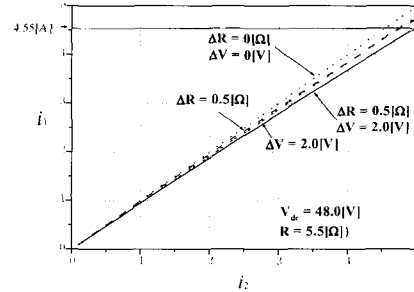


그림 8 전류분담 특성
Fig. 8 Characteristic of division of currents

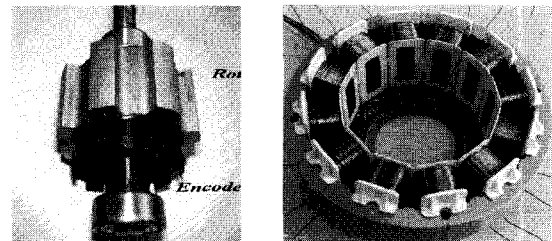
3. 피시험 전동기 실험장치구성

피시험 전동기인 SRM에서 회전자 위치각에 동기시켜 상스위치를 온, 오프하기 위해서는 회전자 위치각 정보가 필요하다. 옵토인터럽터로부터 얻은 정보는 전기각 60°단위의 디지털 위치 정보이므로 연속의 회전자 위치각의 정보는 없다. 따라서 연속된 회전자 위치 정보를 얻기 위해서 속도 추정이 필요하다. 속도는 엔코더의 에지에서 발생된 인터럽터에서 카운트 값을 참조함으로써 얻을 수 있으며, 전동기의 속도는 매 인터럽터 마다 아래 식에 의해서 결정되어 진다.

$$\omega_r = \frac{\pi}{12 T_I} \quad (18)$$

본 연구에서 SRM의 상스위치를 제어할 위한 엔코더와 SRM은 그림 9에 나타나 있다.

그림 9(a)와 같이 회전자의 위치를 검출하기 위해 전기각 360°에 해당하는 기계각 45°주기로 슬롯을 형성한 원판형 디스크를 취부하였으며, 전기각 120°에 해당하는 기계각 15°간격으로 3개의 옵토인터럽터



(a) 회전자 및 엔코더 디스크 (b) 고정자 및 엔코더
(a) Rotor & encoder disk (b) Stator & encoder

그림 9 12/8 SRM 구동용 엔코더
Fig. 9 Encoder of 12/8 SRM Driver

를 그림 9(b)와 같이 설치하였다. 이 옵토인터럽터는 전기각 60°단위의 디지털 위치 정보를 발생시킨다.

그림 9(c)는 12/8 SRM의 고정자의 구성을 보여준 그림이다. 제어기는 DSP241을 사용하여 제작하였으며 각 제어변수 값을 보기 위해 7세그먼트 디스플레이와 12bit 4 채널용 DA컨버터인 AD644를 장착하였다. 파워보드는 실험용으로 12/8 SRM에서 두상(A, C상)은 병렬운전을 하지 않는 상태로 두고 B상 한 상만 병렬운전을 하게 하여 그 특성을 파악하였다.

제안된 실험을 위하여 스위칭 소자는 IRF840을 사용하였다. 제안된 방식의 타당성을 검증하기 위해 본 실험에서 사용된 SRM은 400[W] 3상 12/8 SRM으로 그 사양은 표 1과 같다.

그림 10은 상스위칭 발생도를 나타내고 있다. 그림 10(a)는 12/8 SRM의 회전자 전기각을 나타내고 있으며 a상 인덕턴스의 증가시점이 위치각 영이 되도록 엔코더를 설치하였다. 그림 10(b), (c) 및 (d)는 엔코더의 3상 출력신호를 나타내고 있다. 이 신호는 DSP241의 캡처신호에 연결되어 있으며, 각상의 상승에지에서 인터럽터를 발생시킨다. 이 인터럽터의 발생시점을 그림 10(e)에 나타내고 있다. DSP241에서는 인터럽터가 발생하면 캡처인터럽터 소스로부터 전기각 120도 단위의 회전자 위치각을 얻고 현재의 상스위칭 상태를 참조하여 온되어야 할 다음 상에 스위치를 결정하여 스위칭 상태인 그림 10(f)를 발생한다. 이전 인터럽터의 주기(TI)와 온각 지령치에 의해 스위칭 온각의 예약시간인(Tr)을 계산하고 그기에 맞는 값을 타이머 1의 데이터 값으로 저장한다. 타이머 1의 값과 저장된 비교값이 일치하면 DSP241의 COMP1단자에서 그림 10(f)와 같이 펄스신호인 SHIFT신호를 발생한다. 그리고 스위칭 상태신호는 상스위칭 온각 예약신호인 SHIFT신호의 상승에지에 동기되어 비대칭형 인버터의 각상 하단 스위칭 신호인 그림 10(h), (i), (j)를 발생시킨다. 이 방식은 스위칭각 정도가 마이크로프로세서의 샘플링 주기에 관계없이 카운터의 클럭주파수에 의해 결정됨으로 광범위한 속도제어범위를 확보할 수 있다.

표 1 피 실험 전동기의 설계 정수
Table 1 Design parameters of the experimental SRM

고정자 극수	12	회전자 극수	8
고정자 극호	16°	회전자 극호	20°
고정자 외경	132.0 [mm]	회전자 외경	72.5 [mm]
공극	0.2 [mm]	철심 길이	28.0 [mm]
상당 권선수	140 [turn]	도체 직경	0.52 [mm]
상당 저항	2.5 [Ω]	정격속도	3000 [rpm]

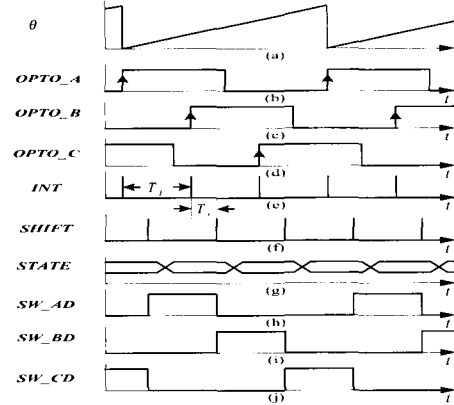


그림 10 상스위칭 발생 개념도
Fig. 10 Encoder of 12/8 SRM Driver

4. 실험결과 및 고찰

실험에 사용된 피실험전동기는 12/8 SRM으로 전류 분담특성을 조사하기 위해서 각 상의 권선은 2조로 하여 병렬권선작업을 하였다. 본 실험에서는 상전류병렬 운전특성을 비교하기 위해 12/8 SRM의 B상 권선에만 상권선 병렬운전을 행하고 다른 권선에는 상권선 병렬운전을 행하지 않는 상태에서 실험을 행하였다.

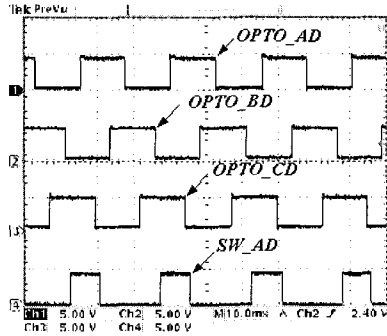
그림 11(a)는 제작한 엔코더의 3상 출력신호에 대하여 A상은 OPTO_AD, B상은 OPTO_BD 그리고 C상은 OPTO_CD로 표현하였으며 a상 하단 스위칭신호는 SW_AD로 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 a상 스위칭 신호는 A상 엔코더 출력신호 보다 전기각 40° 앞선 시점에서 온 함을 알 수 있다.

그림 11(b)는 엔코더의 A상 출력신호(OPTO_A), A상 스위칭 예약시점 신호(SHIFT) 및 상스위칭의 상태신호(STATE_A) 및 A상 아랫단 스위칭 신호(SW_AD)를 나타내고 있다.

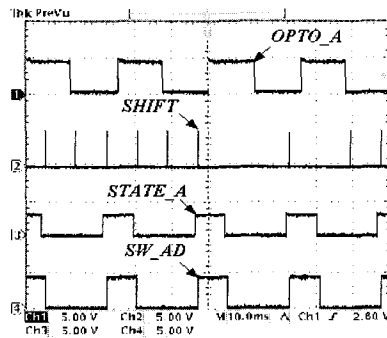
그림 11(c)는 엔코더의 A상 출력신호, 상스위칭 예약시점 신호를 나타낸 것이며 비대칭 인버터의 A상 윗단(SW_AU)와 아랫단 스위칭 신호(SW_AD)를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 A상 윗단은 PWM 신호로 스위칭 되고 아랫단 스위칭 신호는 단일펄스로 동작함을 알 수 있다.

그림 12는 병렬운전을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 전류분담특성을 고찰하기 위하여 단일 권선으로 구성된 A상과 병렬 권선으로 구성된 B상의 전류를 나타낸 것이다. 제안된 시스템의 경우 기저속도(base speed)이하에서는 PWM모드로 이상에서는 단일

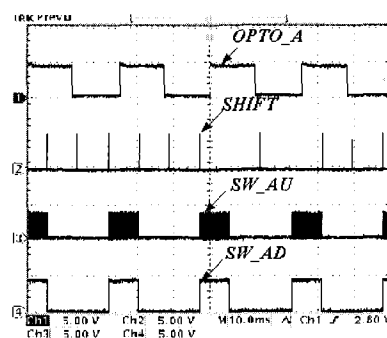
펄스모드로 구동하기 때문에 개별 모드에 대한 분담특성을 살펴보았다.



(a) 엔코더 출력신호
(a) Output signals of encoder

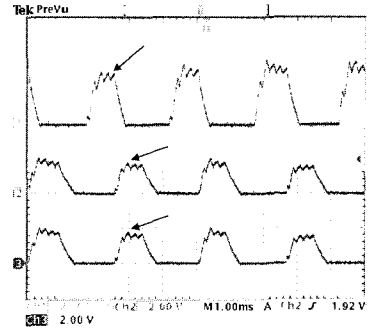


(b) A상 스위칭 신호(1)
(b) Switching signal(1) of phase A

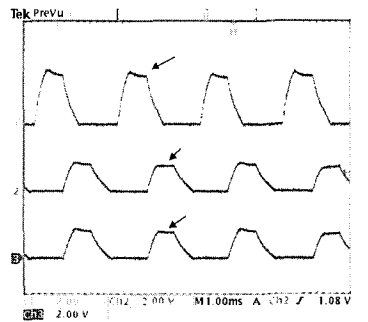


(c) A상 스위칭 신호(2)
(c) Switching signal(2) of phase A

그림 11 엔코더 출력신호 및 상 스위칭 신호
Fig 11 Output signals of encoder & switching waveforms of phase



(a) PWM 모드
(a) PWM mode



(b) 단일펄스모드
(b) Single Pulse mode

그림 12 병렬권선의 전류분담특성(1)

Fig 12 The characteristics(1) of current division of parallel winding.

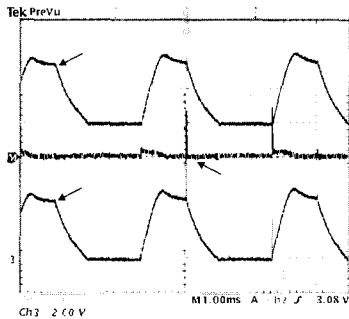
그림 12(a)의 경우 PWM 모드에서 운전한 경우로 병렬권선의 전류분담이 단일 권선의 절반이 되고 그림 12(b)의 경우 단일펄스모드로써 동일한 특성을 고찰할 수 있다.

그림 14 (a)는 단일펄스모드에서 제1권선과 제2권선으로 구성된 병렬권선의 부하분담특성을 살펴본 그림이다. 이 경우 제 1권선에 흐르는 전류는 i_1 으로 제 2 권선은 i_2 로 구분하였으며 이때 전류분담은 균일함을 알 수 있다. 그러나 이때 해당병렬권선 각각의 전류차가 제시된 파형과 같이 존재하는 것은 해당상에 대하여 이른바 병렬스위칭 개념에 따라 동시점에서 전압이 인가되지 않기 때문에 발생하는 전류차에 해당한다.

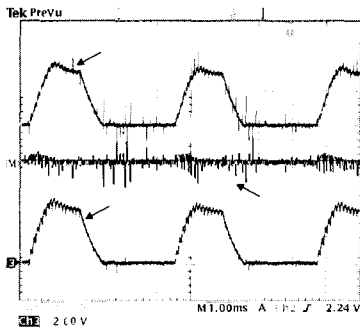
그림 14 (b)는 PWM 모드에서 해당병렬권선의 전류 분담특성을 살펴본 그림이다. 그림 14 (a)와 같이 균일하게 분담되고 있음을 알 수 있다. 그림 14(c)는 PWM 모드에서 듀티비 $d = 0.5$ 로 하고 제 1권선과 제 2권선의 저항차를 인위적으로 $0.5[\text{ohm}]$ 만큼의 차이를 두어

분담특성을 보였다. 이때 전류의 분담은 저항이 작은 제 1권선에 상대적으로 전류가 많이 분담됨을 확인할 수 있다.

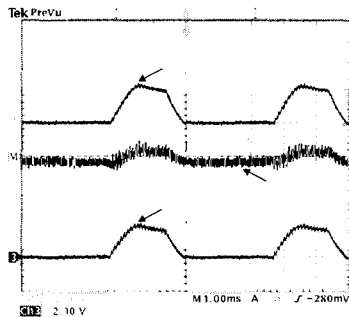
그림 14 (d)는 PWM 모드에서 듀티비 $d = 0.25$ 로 한 경우의 전류파형으로 그림 13(c)와는 달리 저항의 차이로 인한 전류의 치우침이 작게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 그림 8에 제시된 전류분담특성과 같이 병렬권선에 흐르는 전류가 작은 경우는 저항차로 인한 전류분담이 균일한 반면 전류가 클수록 전류분담의 차이가 나타남을 알 수 있다.



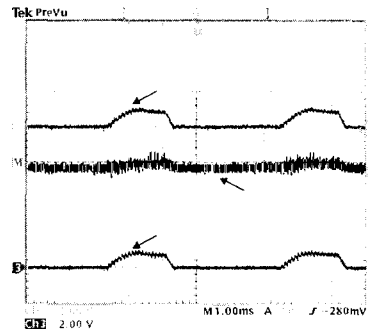
(a) 단일펄스모드 운전시
(a) Single-pulse mode operating



(b) PWM모드 운전시
(b) PWM mode operating



(c) PWM 모드 운전시($d = 0.5$, $\Delta R = 0.5$)
(c) PWM mode operating($d = 0.5$, $\Delta R = 0.5$)



(d) PWM 모드 운전시($d = 0.25$, $\Delta R = 0.5$)
(d) PWM mode operating($d = 0.25$, $\Delta R = 0.5$)

그림 14 병렬권선의 전류분담특성(2)
Fig 14 The characteristics(2) of current division of parallel winding.

5. 결 론

본 연구는 인버터의 전류정격을 키우기 위해 전동기와 연계된 인버터의 구성에 관한 연구로 기존의 병렬 스위칭 방식의 단점인 스위칭 소자의 포화전압 특성의 영향을 적게 받는 새로운 병렬운전기법인 상권선 병렬 운전기법에 대한 것이다. 제안된 상권선 병렬운전기법에서 전류분담에 영향을 주는 주 파라메타인 권선저항과 상권선에 인가되는 전압 변동분에 대한 영향을 수식적으로 해석하였다. 또한 상권선 병렬 운전에 있어 최대허용전류에 대한 해석을 행하였으며 이를 근거로 하여 실제 상권선 병렬운전의 전류정격을 결정할 수 있으리라 생각되며, 스위칭 소자의 교체시 기존의 스위칭 병렬운전에서 전류 분담율을 증가시키기 위한 스위칭 소자와 직결된 저항을 제거할 수 있었다. 이 방식은 SRM 전동기뿐만 아니라 기존의 다른 모든 전동기에 동일하게 적용이 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] B.K. Bose, T.J.E. Miller, P.M. Szeszsy and W.H. Bocknell, "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor", IEEE Trans. on Industrial Application, vol. 22, no. 4, pp. 708~715, 1986.
- [2] C. Wu and C. Pollock, "Analysis and Reduction of Vibration and Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive", IEEE Trans. on Industrial Applications, vol. 31, no. 1, pp. 91~98, 1995.
- [3] Paralleling switching bipolar power transistors, J.T. Hutchinson, PCIM, September 1985.

- [4] J.B. Forsythe, "Paralleling of Power MOSFETs", IEEE-IAS Conference Record, October 1981.
- [5] Sung-Jun Park, "High efficiency drive of SRM using GA-Neural network", Journal of power electronics, vol. 2, no. 1, Jan. 2002
- [6] A. Kithau, "Sensorless Control of the synchronous reluctance machine", Journal of power electronics, vol. 2, no. 2, Jan. 2002.



김철우(金喆禹)

1942년생. 1969년 부산대 전기공학과 졸업. 1974년 일본 전기통신대 전자공학과 졸업(석사). 1986년 중앙대 전기공학과 졸업(박사). 1975년~현재 부산대학교 전자전기통신공학부 교수. 당 학회 자문위원.

저 자 소 개



이상훈(李相勳)

1972년생. 1997년 경성대 전기공학과 졸업. 1999년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 박사과정 수료. 2001년~2002년 9월 KT전기 기술연구소 주임연구원. 2002년 9월~현재 OTIS·LG 서보 R&D Part 대리.



박성준(朴晙濟)

1965년생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년~현재 동명대학 전기전자계열 조교수.



최 철(崔 哲)

1963년생. 1987년 중앙대 전기공학과 졸업. 1995년 경남대 전자공학과 졸업(석사). 1998년 부산대 전기공학과 졸업(석사). 2001년 8월 부산대 동 대학원 박사과정 수료. 1999년~현재 OTIS·LG 서보 R&D Part 부장.



안진우(安珍雨)

1958년생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~현재 경성대학교 전기컴퓨터공학부 교수. 당 학회 학술이사.