

전기자동차용 SRM의 상권선 병렬에 관한 연구

*홍정표, **박성준, ***원태현, *권순재
*부경대학교, **동명대학, ***동의공업대학

The study on the parallel operation of phase winding in the SR Drive for Electrical Vehicle Applications

*J.P. Hong, **S.J. Park, ***T.H. Won, and *S.J. Kwon
*Pukyong National Unvi., **TongMyong College, ***DongEui College

ABSTRACT

In a motor 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 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 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.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 단일 여자기기로 구조가 간단하고, 직류직권 전동기의 속도-토크 특성을 가지고 있고 넓은 속도 가변범위 및 고속, 정·역회전특성이 우수하고 강인하다는 특성을 가지고 있다. 이러한 장점으로 인하여 SRM에 대한 연구는 선진국을 중심으로 가전기기, 전기자동차, 항공기 및 산업전반에 걸쳐 그 응용영역을 확대해가고 있다.^{[1][2]} SRM은 릴럭턴스 토크를 극대화하기 위해 회전자와 고정자가 모두 돌극형의 구조를 가지며, 권선은 고정자에만 집중권으로 감겨 있어 전자계 구조상 단속적인 여자 전원이 각 상 권선에 순차적으로 인가되어 구동되므로 낮은 스위칭 주파수로 운전이 가능하여 고속 운전 및 효율적인 측면에서 강한 장점을 갖고있다. 특히 SRM은 인버터의 낮은 스위칭 주파수로 인하여 인

버터의 스위칭 손실 및 전동기의 철손이 크게 감소하여 고효율 운전이 가능하다.

2. 병렬권선의 동작

SRM에서의 전동력 발생은 여자된 자기회로에서 자기 릴럭턴스(magnetic reluctance)가 최소가 되는 방향으로 토크가 발생하므로 그림 1에서와 같은 자기회로구조에서 연속적인 운전을 하기 위해서는 회전방향으로 각 상을 주기적으로 여자시킬 때 이루어진다.

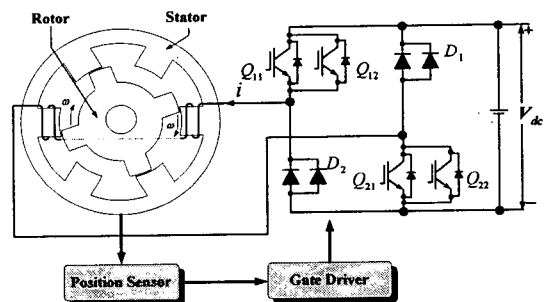


그림 1 일반적인 SRM 구성
Fig. 1 Conventional system of SRM

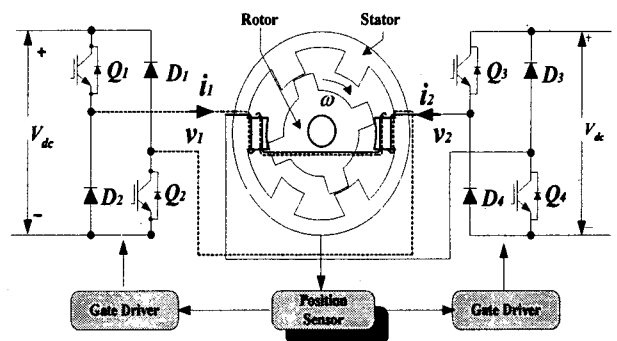


그림 2 SRM의 병렬권선에서 전류분배
Fig. 2 Parallel winding system for current sharing of SRM

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.

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

그림 2와 같은 병렬권선에서 권선의 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_1 = R_1 i_1 + \frac{d\lambda}{dt} \quad (2)$$

$$V_2 = R_2 i_2 + \frac{d\lambda}{dt}$$

여기서 V_1, V_2 는 각 권선에 인가되는 전압, i_1, i_2 는 각 권선의 전류, R_1, R_2 는 권선 저항을 나타낸다.

위 식의 우변 2번째 항인 총 쇠교자속 변화분은 다음과 같다.

$$\frac{d\lambda}{dt} = L \frac{d(i_1 + i_2)}{dt} + (i_1 + i_2) \omega \frac{dL}{d\theta} \quad (3)$$

위 식의 우변 1번째 항은 상전류의 과도상태를 지배하는 항이며, SRM의 상전류가 플랫탑(flatted tap) 전류가 형성되었다면 각 상 전류의 변동분이 없으므로 이항은 영이 된다.

식 (2) 및 식 (3)에 의하여 SRM의 한 상에 대한 전압방정식을 정상상태에서 전류 분담을 조사하기 위해서 과도상태만 지배하는 인덕턴스의 전압강하를 무시하고 정리하면 다음과 같다.

$$V_1 = R_1 i_1 + i_1 \omega \frac{dL}{d\theta} + i_2 \omega \frac{dL}{d\theta} \quad (4)$$

$$V_2 = R_2 i_2 + i_2 \omega \frac{dL}{d\theta} + i_1 \omega \frac{dL}{d\theta}$$

위 식의 두 전압방정식은 동일한 전동기에 동일한 상권선이므로 전동기의 각속도와 인덕턴스 변화분은 동일하다. 따라서 각속도 항과 인덕턴스의 변화분을 제거하기 위해서 식 (4)의 두 식을 정리하면 다음과 같다.

$$V_1 - V_2 = R_1 i_1 - R_2 i_2 \quad (5)$$

위 식으로부터 각 코일에 흐르는 정상상태 전류비는 속도와 인덕턴스의 변화율과 무관한 항이 된다. 만일 두 코일에 인가되는 전압이 동일하고 두 코일의 권선 저항이 동일하다면 식 (5)로부터 두 권선에 흐르는 전류 값은 동일한 값이 된다.

이것을 도식적으로 표현하면 그림 3(a)와 같다.

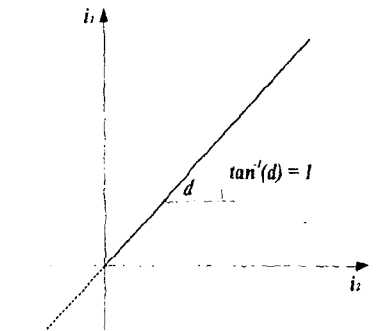
그리고 상권선에 인가되는 전압의 차는 스위칭 소자의 전압강하에 의해 나타날 수 있으므로 이를 고려하기 위해 아래 식과 같은 가정을 한다.

$$\begin{aligned} V_2 &= V_1 + \Delta V \\ R &= R_1 = R_2 \end{aligned} \quad (6)$$

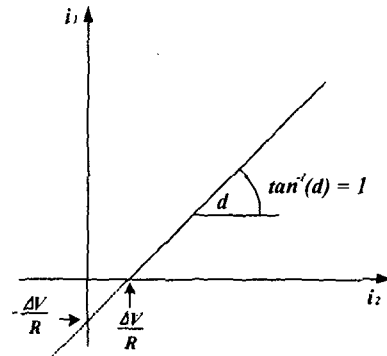
식(5) 및 식(6)으로부터 두 권선의 전류 분담비는 아래와 같다.

$$i_1 = i_2 - \frac{\Delta V}{R} \quad (7)$$

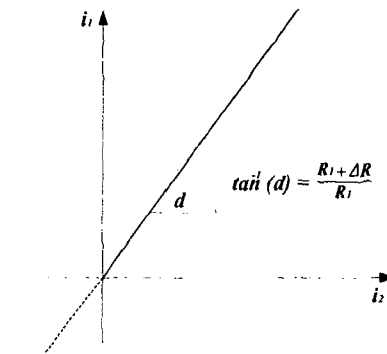
위 식의 관계식을 도식적으로 표현하면 그림 3(b)와 같다.



(a)



(b)



(c)

그림 3 파라메타 변동에 따른 전류분담 특성

(a) 인가전압 및 권선저항이 동일한 경우

(b) 인가전압이 상이한 경우

(c) 권선저항이 상이한 경우

Fig. 3 Characteristics of division of current according to changing of parameters

(a) The same case of applied voltages and winding resistances

(b) The different case of applied voltages

(c) The different case of winding resistances

식 (7)로부터 스위칭 소자의 전류 분담비는 스위칭 소자의 전압강하분의 차와 권선 저항의 항으로 나타나게 되고, 일반적으로 권선 저항 값이 전압강하분 차에 비하여 상당히 크므로 이항은 의함은 매우 적다. 각 상의 병렬 코일 수를 증가시키면 한 코일 당 전류분담이 적게 되고, 권선의 굵기도 적게 되어 상권선의 저항율이 증가하게 되며 전류 분담율이 증가하게 된다. 권선 저항이 스

위칭 소자의 포화전압 변동에 비한 전류분담 특성을 무시할 수 있는 정도로 상대적으로 큰 저항이라면 두 스위칭 소자의 전류분담은 동일하다. 위 식은 SRM에서 상의 각 권선의 저항이 동일하다는 가정 하에서 성립되는 식이다. 따라서 상의 각 코일의 저항변화에 따른 전류분담 특성을 조사하기 위해서 각상의 전압 변동을 무시하고, 두 코일의 저항 차는 아래 수식과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_2 &= V_1 \\ R_2 &= R_1 + \Delta R \end{aligned} \quad (8)$$

식 (5) 및 식 (8)으로부터 두 권선의 저항이 상이할 경우 전류 분담비는 아래와 같다.

$$i_1 = \frac{R_1 + \Delta R}{R_1} i_2 \quad (9)$$

위 식의 관계식을 도식적으로 표현하면 그림 3(c)와 같다. 식 (9)으로부터 스위칭 소자의 전류분담비는 두 권선의 저항 차로 나타나게 된다. 따라서 각 스위칭 소자의 전류분담을 같게 하기 위해서는 각 권선의 저항차를 줄이는 것이 필요하다. 만일 스위칭 소자의 전압강하분의 차와 권선저항 차를 모두 무시할 수 없는 경우 전압과 저항의 차를 아래 수식으로 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} V_2 &= V_1 \pm \Delta V \\ R_2 &= R_1 \pm \Delta R \end{aligned} \quad (10)$$

식 (5) 및 식 (10)로부터 두 권선의 전류 분담비는 아래와 같다.

$$i_1 = \frac{R_1 \pm \Delta R}{R_1} i_2 - \frac{\pm \Delta V}{R_1} \quad (11)$$

전류분담은 권선의 저항차와 인가전압에 따라 4가지 형태를 취할 수 있다. 식 (11)을 그래픽으로 나타내면 그림 4와 같다. 그림 4의 f_A 는 두 권선의 저항이 동일하고, 인가전압이 동일한 이상적인 경우가 되고 전류는 동일하게 분담되는 경우이다. f_1 와 f_2 는 제 1권선에 인가되는 전압이 제 2권선에 인가되는 전압보다 ΔV 만큼 큰 경우이며, f_3 는 R_1 이 R_2 보다 적은 경우이고 f_2 는 R_1 이 R_2 보다 큰 경우이다. f_3 와 f_4 는 제 1권선에 인가되는 전압이 제 2권선에 인가되는 전압보다 ΔV 만큼 적은 경우이며, f_4 는 R_1 이 R_2 보다 적은 경우이고 f_3 는 R_1 이 R_2 보다 큰 경우이다. 그림에서 전류분담에 영향을 주는 선은 f_1 보다 적어야하고 f_4 보다 크야 함으로 전류관계는 명암이 있는 부분에서 동작하게 된다. 이 부분의 폭을 좁혀 전류분담율을 같게 하기 위해서는 인가되는 전압의 차와 권선저항의 차를 줄이는 것이 필요하다.

그림 4과 같은 특성을 갖는 전동기에서 상스위치의 최대 전류제한의 결정과정을 도식적으로 나타내면 그림 5와 같다. 여기서 i_{Rate} 는 스위칭 소자의 허용 최대전류, i_{Max1} 과 i_{Max2} 는 상권선 병렬운전시 제 1권선과 제 2권선에 흐를 수 있는 최대전류가 된다. 실제 전류센서에서는 두 권선에 흐르는 전류의 합이 검출되므로 상전류의 최대치는 스위칭 소자의 최대허용전류와 제 1권선 및 제 2

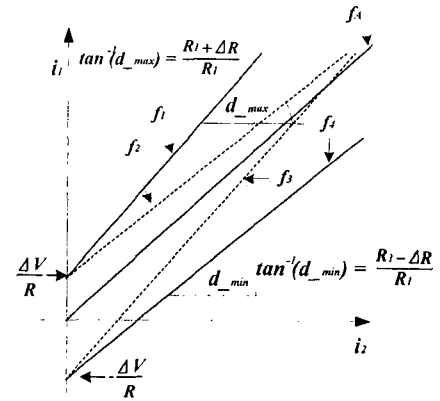


그림 4 전류분담 특성
Fig. 4 Characteristic of division of currents

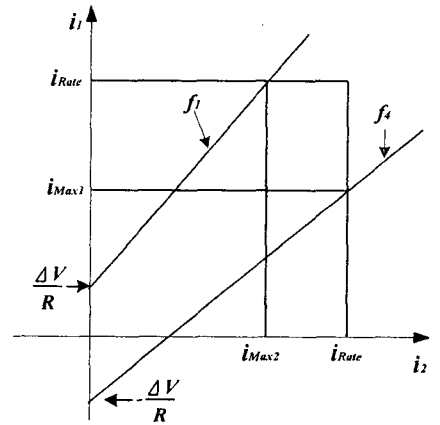


그림 5 최대전류 결정
Fig. 5 Determination of maximum current

권선의 최대허용전류보다 적은 전류 합이 된다. 두 권선에 흐를 수 있는 최대전류 중 적은 전류를 아래와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \text{if}((i_{Max1} > i_{Max2}) \quad i_{Max} &= i_{Max2} \\ \text{else} \quad i_{Max} &= i_{Max1} \end{aligned} \quad (12)$$

따라서 권선에 흘릴 수 있는 최대전류는 다음 식과 같다.

$$i_p = i_{Rate} + i_{Max} \quad (13)$$

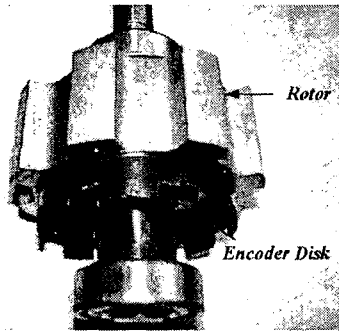
식 (13)에 의해 스위칭 소자의 전류 사용율은 아래와 같다.

$$i_{\xi} = \frac{i_{Rate} + i_{Max}}{2 i_{Rate}} \times 100 [\%] \quad (14)$$

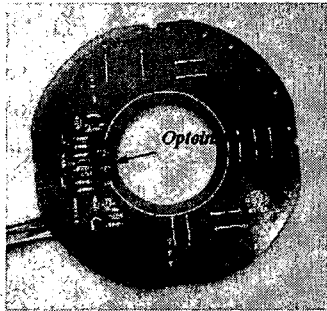
3. 제어기 구성

3.1 제어기의 구성

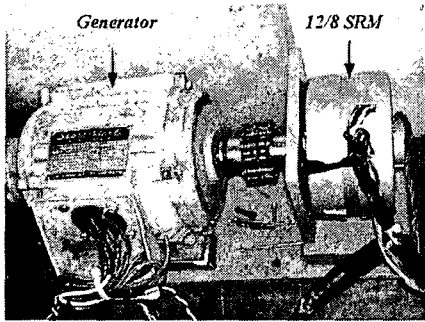
본 연구에서 SRM의 상스위치 제어를 위해 그림 6(a)와 같이 회전자 위치를 검출하기 위해 전기각 360°에 해당하는 기계각 45° 주기로 슬롯을 형성한 원판형 디스크를 취부하고, 전기각 120°에 해당하는 기계각 15° 간격으로 3개의 옵토인터럽터를 그림 6(b)와 같이 설치하



(a)



(b)



(c)

그림 6 12/8 SRM 구동용 인코더

- (a) 인코더 디스크의 사진
- (b) 옵토인터럽터의 사진
- (c) 12/8 SRM 사진

Fig. 6 Encoder of 12/8 SRM Driver

- (a) Photograph of encoder disk
- (b) Photograph of encoder optointerrupt
- (c) Photograph of the 12/8 SRM

였다. 그림 6(c)는 12/8 SRM과 부하용 발전기와 커플링된 사진이다.

또한 옵토인터럽터로부터 얻은 정보는 디지털 위치 정보이므로 연속의 회전자 위치각의 정보는 없다. 따라서 연속된 회전자 위치 정보를 얻기 위해서 속도 추정이 필요하다. 속도는 인코더의 에지에서 발생된 인터럽터에서 카운터 값을 참조함으로 얻을 수 있으며, 전동기의 속도는 매 인터럽터마다 아래 식에 의해서 결정되어 진다.

$$\omega_r = \frac{\pi}{12 T_s} \quad (15)$$

전동기의 속도가 식 (15)과 같이 결정되어 지면 회전자 위치각은 아래 식으로부터 구할 수 있다.

$$\theta_r = \int \omega_r dt + \theta_0 \quad (16)$$

식 (16)의 θ_0 는 매 인터럽터마다 그 순간의 위치를 설정하게 된다.

그림 7은 전체제어기를 나타내고 있다.

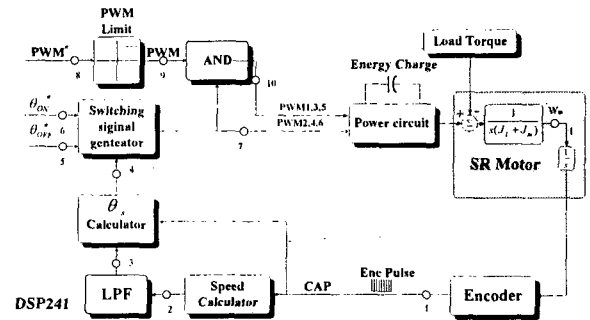


그림 7 전체 제어기의 구성

Fig. 7 Configuration of overall controller

4. 실험결과 및 고찰

그림 8은 3000[rpm]으로 운전하고 있는 상태에서 F_1 은 상권선 병렬운전을 하고 있지 않는 상인 A상 전류파형이고, F_2 및 F_3 는 병렬운전을 하고있는 상인 B상의 두 권선에 흐르는 전류파형이다.

그림 8(a)에서 보는바와 같이 F_2 과 F_3 는 전류분담율이 동일함을 알 수 있다. 그림 8(b)에서 보면 F_2 가 F_3 보다 시정수가 적음을 알 수 있으나, B상 스위치가 오프하는 시점에서 전류의 크기가 동일함으로써 정상상태에서 전류 분담율은 동일함을 알 수 있다. 그림 8(c) 및 8(d)는 SRM에서 상전류 정착 및 소호시 발생하는 전류이며, 전류의 증가 및 감소율은 F_2 가 큰 것으로 나타났다. 이는 B상 권선에 병렬로 감겨진 인덕턴스와 저항이 미소차로 나타난 것으로 사료된다.

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	2.0Ω	정격속도	3000 rpm

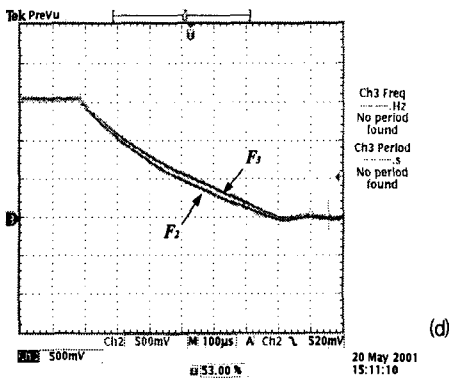
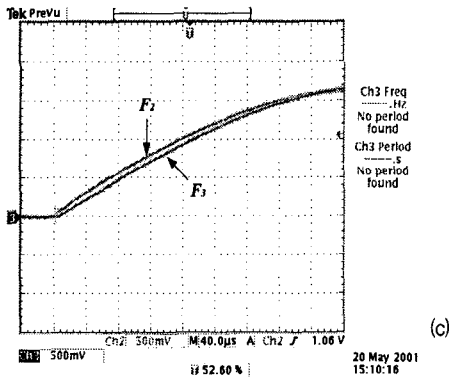
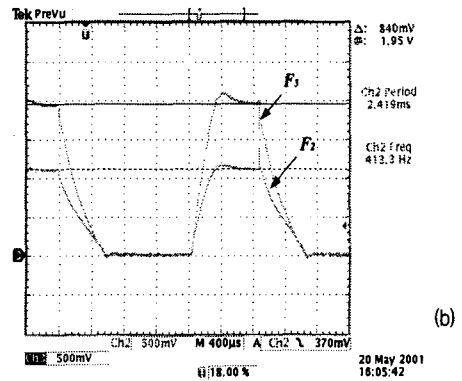
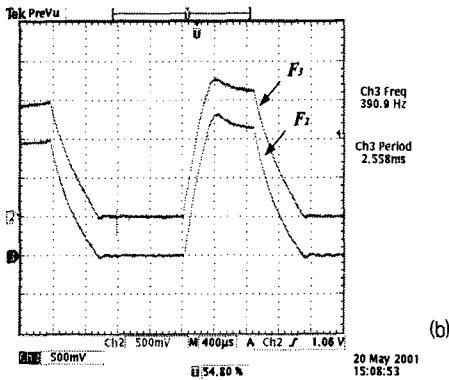
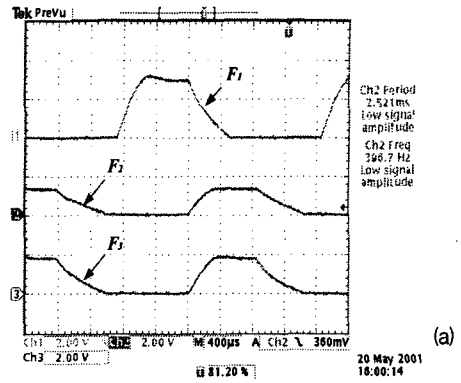
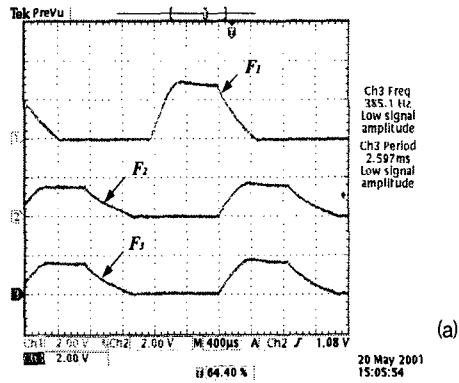


그림 8 상전류 파형
 (a) A상 전류와 B상권선의 전류 (b) B상권선의 전류
 (c) 증가영역에서 B상권선의 전류 (d) 감소영역에서 B상권선의 전류
 Fig. 8 Waveforms of the phase currents
 (a) A Phase current and B Phase winding currents
 (b) A phase winding currents
 (c) Rising winding currents of B phase
 (d) Falling winding currents of B phase

그림 9 권선저항이 다른 경우 상전류 파형
 (a) A상 전류와 B상권선의 전류 (b) B상권선의 전류
 Fig. 9 Waveforms of the phase currents when different winding resistance

(a) A Phase current and B Phase winding currents
 (b) A phase winding currents

그림 9은 상권선 저항이 다른 경우, F_1 은 상권선 병렬운전을 하고있지 않는 상인 A상 전류파형이고, F_2 는 권선에 직렬로 실제권선저항의 약 55[%]의 저항값인 1.1 [Ω]의 직렬저항을 삽입하여 권선저항을 높인 상태의 전류이고 F_3 는 직렬저항을 삽입하지 않는 권선에 흐르는 전류파형이다.

그림 9(a)에서 보는바와 같이 상권선 병렬운전을 하고 있는 전류파형인 F_2 과 F_3 의 합은 병렬운전을 하지 않는 F_1 과 거의 같으나 전류 분담율에는 큰 차이를 보이고 있다. 그림 9(b)는 전류분담의 차이를 보기 위해 그림 9(a)의 두 권선의 전류인 F_2 및 F_3 파형을 확대한 것으로 그 차이는 앞 절에서 언급한 수식과 거의 일치함을 알 수 있다.

5. 결론

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 병렬운전기법에 대한 것이다. 제안된 상권선 병렬운전기법에서 전

류분담에 영향을 주는 주 파라메타인 권선저항과 상권선에 인가되는 전압 변동분에 대한 영향을 수식적으로 해석하였다. 또한 상권선 병렬 운전에서 최대허용전류에 대한 해석을 행하였으며 이를 근거로 하여 실제 상권선 병렬운전의 전류저격을 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. Szezesny and W.H. Bocknell : "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor." IEEE Trans. on Industrial Application, vol. 22, no. 4, pp. 708-715, 1986.
- [2] I. Husain, M. Ehsani ; "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Drives by PWM Current Control," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 11, no. 1, pp. 91-98, 1996.