

병렬권선 운전시 SRM의 부하분담 특성에 관한 연구

이상훈, 임현호, 박성준 *, 안진우 * *
KT전기(주), * 동명대학, * * 경성대학교

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

S. H. Lee, H. H. LIM, S. J. Park *, and J. W. Ahn * *
KTElectric Co. * Tongmyung College, * * Kyungsung Univ.

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 a circuit designer. In order to compensate this problem, a proper resistance is experimentally 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

SRM은 다른 전동기에 비하여 낮은 스위칭 주파수로 운전이 가능하며, 인버터의 낮은 스위칭 주파수로 인하여 인버터의 스위칭 손실 및 전동기의 철손이 크게 감소하여 고효율 운전이 가능하다.

SRM에서 출력을 증대하기 위해서는 스위칭 온시점을 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. 이를 극복하기 위해서 스위칭 소자의 병렬운전에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 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 많은 연구가 이루어지고 있으나, 아직도 실용화하기 위해서는 많은 문제를 안고 있다. 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 스위칭 소자의 파라미터가 전류분담에 영향을 미치지 않는 새로운 병렬운전기법인 상권선 병렬운전기법 제안함으로써 스위칭 소자의 전류분담을 증대시키고, 신뢰성을 제시하였다. 또한 실험을 통하여 제안된 방식의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 상권선의 병렬운전

상당 발생 토크의 크기는 식 (1)에서와 같이 상권선에 흐르는 전류 i 의 제곱과 회전자 위치각 θ 에 대한 인덕턴스 L 의 변화율에 비례한다.

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

전동기 설계에서 결정되어진 정격전압과 정격전류에 의해서 SRM의 구동인버터 소자의 정격이 결정되어진다.

결정된 스위칭 소자의 전류정격을 갖는 스위칭 소자를 구할 수 없거나, 경제성이 없는 경우 일반적

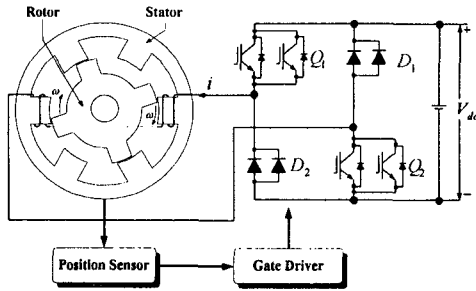


그림 1 기존의 병렬스위칭 방식의 SRM구동시스템
Fig. 1 The conventional SRM drive system of the parallel switching method

으로 선택되는 것은 그림 1과 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 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 2(b)와 같이 부하전류에 의해 두 스위칭 소자의 드레인 소스단 전압인 V_{DS1} 가 V_{S1} 이 되다면 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_{S2} 일 때의 전류값이 된다.

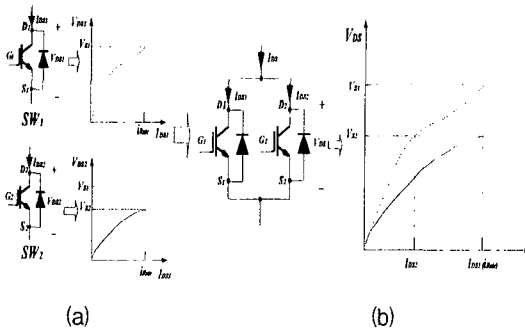


그림 2 병렬 스위칭 방식의 전류분담 특성
(a) 포화전압 특성
(b) 전류분담 특성

Fig. 2 Characteristics of current division in parallel switching method
(a) Characteristics of saturation voltage
(b) Characteristics of current division

즉 스위칭 소자를 병렬운전 할 경우 소자의 포화전압이 높은 쪽의 스위칭 소자로 전류가 집중되어

결국 전류 분담율이 매우 낮게되어 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. 또한 스위칭 소자의 포화전압 특성은 주변 온도에 따라 변하게 되므로 정확한 전류분담은 매우 어려운 상태가 된다. 병렬 스위칭 운전에서 소자의 전류분담은 소자의 특성에 의해 좌우되는 병렬 스위칭방식으로는 완전한 전류분담을 행하기는 거의 불가능하다.

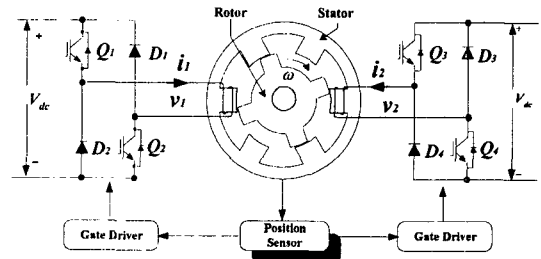


그림 3 제안된 병렬 권선방식의 SRM 구동시스템
Fig. 3 The proposed SRM drive system of the parallel winding method

그림 3은 본 논문에서 제안된 상권선 병렬 운전 방식의 SRM 구동시스템이다. 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. 일반적으로 SRM의 한상에 대한 전압방정식은 아래와 같다.

$$\frac{d\lambda}{dt} = V - Ri \quad (2)$$

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.

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

여기서, L 은 상 인덕턴스, ω 는 각속도, θ 는 회전자 위치각이 된다. 위 식의 우변 1번째 항은 상전류의 과도상태를 지배하는 항이며, SRM의 상전류가 플랫탑(flatted tap) 전류가 형성되었다면 각 상전류의 변동분이 없으므로 이항은 영이 된다. 따라서 총쇄교자속 변화분은 상전류와 직접적으로 비례

하는 항이 되며, 정상상태에서 상전류와 총 쇄교자속 변화분의 관계는 다음 식과 같이 간단히 표현된다.

$$i = K_e \frac{d\lambda}{dt} \quad (4)$$

단, $K_e = \frac{1}{\omega} \frac{d\theta}{dL}$

따라서 총 쇄교자속 변화분만 구하면 상전류를 구할 수 있다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 SRM의 상권선 총 쇄교자속 변화분은 상권선에 인가되는 전압에서 권선저항에 의한 전압강하성분을 뺀 것과 같다. SRM을 운전하기 위해서 상권선의 연속적인 여자가 이루어지므로 SRM의 스위칭 운전에는 크게 여자모드(Mode A), 릴링모드(Mode B), 감자모드(Mode C)로 구별된다. 따라서 총 쇄교자속 변화분을 해석하기 위해서는 위에서 언급한 각 모드별로 해석하여야 한다. 그림 4로부터 스위칭소자, 다이오드 및 저항의 전압강하를 고려한 각 모드별 총 쇄교자속 변화분은 아래 식과 같다.

$$\text{mode A : } \frac{d\lambda_A}{dt} = V_{dc} - 2V_S - Ri \quad (5-1)$$

$$\text{mode B : } \frac{d\lambda_B}{dt} = -(V_D + V_S + Ri) \quad (5-2)$$

$$\text{mode C : } \frac{d\lambda_C}{dt} = -(V_{dc} + 2V_D + Ri) \quad (5-3)$$

SRM의 운전모드는 일반적으로 단일펄스모드와 PWM모드로 나눌 수 있다. 단일펄스모드로 SRM을 제어할 때 모드 A와 모드 C만 나타나게 된다. 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. PWM의 한 주기내에서 상에 인가되는 평균전압은 아래 식과 같이 주어진다.

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

식 (6)에서 시비율이 1인 경우에는 단일펄스 모드의 식 (5-1)과 같게된다. 따라서 총 쇄교자속 변

화분은 식 (6)에 의해 해석하면 된다. 상권선의 전류분담을 해석하기 위해 상에 병렬로 감겨진 제 1권선 및 제 2권선의 총 쇄교자속 변화분은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda_{A1}}{dt} &= dV_{dc} - (1+d)V_{S1} - (1-d)V_{d1} - R_1 i_1 \\ \frac{d\lambda_{A2}}{dt} &= dV_{dc} - (1+d)V_{S2} - (1-d)V_{d2} - R_2 i_2 \end{aligned} \quad (7)$$

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.

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

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

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

식 (12)로부터 스위칭 소자의 전류 분담비는 스위칭 소자의 전압강하분의 차의 항으로 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 (13)으로부터 두 권선의 저항이 상이할 경우 전류 관계식은 아래와 같다.

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

식 (14)로부터 스위칭 소자의 전류분담비는 두 권선의 저항 차로 나타나게 된다. 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 (15)으로부터 두 권선의 전류 관계식은 아래와 같다.

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

3. 실험결과 및 고찰

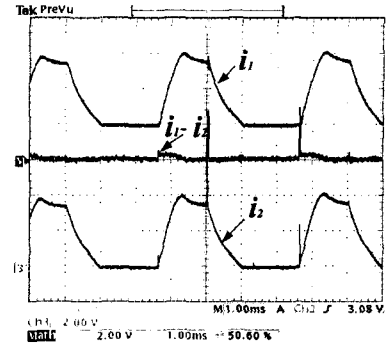
제안된 방식의 타당성을 검증하기 위해 본 실험에서 사용된 SRM은 3상 12/8 SRM으로 그 사양은 표 1과 같다.

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

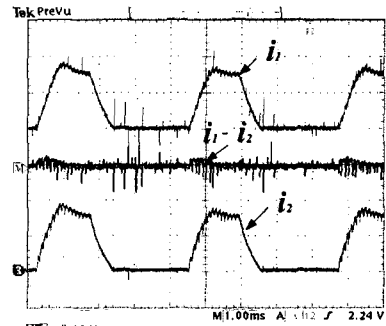
고정자 극수	12	회전자 극수	8
고정자 극호	16°	회전자 극호	20°
고정자 외경	132.0 mm	회전자 외경	72.5 mm
공극	0.2 mm	철심 길이	28.0 mm
상당 권선수	140 turn	도체 직경	0.52 mm
상당 저항	2.5Ω	정격속도	3000 rpm

실험에 사용된 피 실험전동기는 12/8 SRM으로 전류분담특성을 조사하기 위해서 각 상의 권선은 2 조로하여 병렬권선작업을 하였다. 본 실험에서는 상전류병렬운전특성을 비교하기 위해 12/8 SRM의 B상 권선에만 상권선 병렬운전을 행하고 다른 권선에는 상권선 병렬운전을 행하지 않는 상태에서 실험을 행하였다.

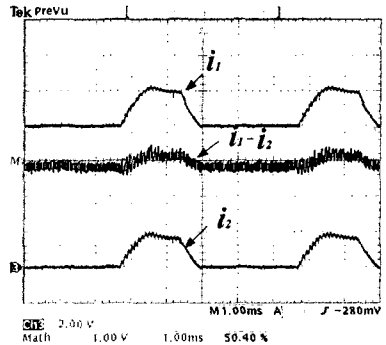
그림 4(a)는 단일펄스모드에서 제1권선과 제2권선으로 구성된 병렬권선의 부하분담특성을 살펴본 그림이다. 이 경우 각각의 권선에 흐르는 전류는 균일하게 분담되고 있음을 알 수 있다. 그림 4(b)는 PWM 모드에서 해당병렬권선의 전류분담특성을 살펴본 그림이다.



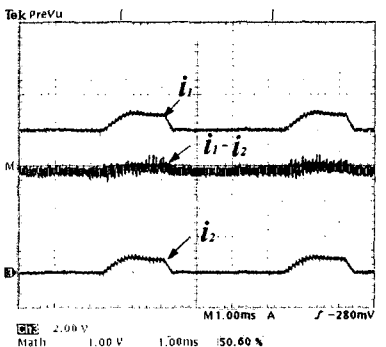
(a) 단일펄스모드 운전시
(a) Single-pulse mode operating



(b) PWM모드 운전시
(b) PWM mode operating



(c) PWM 모드 운전시 (d = 0.5, ΔR = 0.5)
(c) PWM mode operating (d = 0.5, ΔR = 0.5)



(d) PWM 모드 운전시 (d = 0.25, ΔR = 0.5)
(d) PWM mode operating (d = 0.25, ΔR = 0.5)

그림 4 병렬권선의 전류분담특성
Fig. 4 The characteristics of current division of parallel winding.

그림 4(c)는 PWM 모드에서 듀티비 $d = 0.5$ 로 하고 제 1권선과 제 2권선의 저항차를 인위적으로 0.5[ohm]만큼의 차이를 두어 분담특성을 보였다. 그림 4(d)는 PWM 모드에서 듀티비 $d = 0.25$ 로 한 경우의 전류파형으로 그림 4(c)와는 달리 저항의 차이로 인한 전류의 치우침이 작게 나타남을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 연구는 인버터의 전류정격을 키우기 위해 전동기와 연계된 인버터의 구성에 관한 연구로 기존의 병렬 스위칭 방식의 단점인 스위칭 소자의 포화 전압 특성의 영향을 적게 받는 새로운 병렬운전기법인 상권선 병렬운전기법에 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.

본 연구는 과학재단 목적기초연구 (R01-2001-000300-0) 지원으로 수행하였음

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.
- [3] C. Wu, 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.
- [4] D. E. Cameron, J. H. Lang and S. D. Umans : "The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Doubly Salient Variable-Reluctance Motors", IEEE Trans. on Industrial Applications, vol. 28, no. 6, pp. 1250-1255, 1992.
- [5] Graham E.Dawson, Anthony R.Eastham and Jerzy

Mizia; "Switched Reluctance Motor Torque Characteristics : Finite Element Analysis and Test Results", IEEE Trans. on IA, Vol. 23, No. 3, pp. 532-537, 1987.