

# SRM의 DC linke 전압리플을 고려한 단일 펄스 구동 방식의 특성 해석

論 文

57-11-13

## The Characteristic Analysis of SRM Driven by Single-pulse Mode Considering the Voltage Ripple of DC Linke

李 聖 九\* · 鄭 大 成\* · 李 柱†  
(Sung-Gu Lee · Dae-Sung Jung · Ju Lee)

**Abstract** - This paper deals the characteristic analysis of Switched Reluctance Motor(SRM) driven by single-pulse mode considering dc link voltage ripple. Two dimensional time-stepped Finite Element Method(FEM) is used to analyze the characteristic of SRM driven by single-pulse mode with dc link voltage ripple. The analysis results is verified by experimental test.

**Key Words** : Switched Reluctance Motor, Single-pulse driving mode, DC link voltage ripple, Time-stepped Finite Element Method

### 1. 서 론

SRM은 고정자, 회전자 구조가 간단하며, 제조과정이 간단할 뿐만 아니라 제조비용이 낮으며, 높은 토크를 갖는 장점을 가지고 있다. 또한 발열의 대부분이 고정자 권선에서 나타나므로 냉각이 빠르고 용이하며, 회전자에 영구자석이 없으므로 영구 자석형 전동기에 비하여 온도 상승에 따른 문제가 발생하지 않는다는 장점을 가진다. 반면에 토크 리플이 크고, 소음과 진동이 심하며, 위치센서가 필요하다는 단점이 존재한다. 이런 단점은 기하학적인 모터의 형상 설계와 전기적인 제어 기술로 줄일 수 있다[1].

SRM의 제작 시 가격적인 측면과 전체 시스템 크기 측면에서의 경제성으로 인해 SRM 구동회로의 정류기에는 일반적으로 소용량 캐패시터가 사용되며 이는 SRM 구동 시 DC link 전압에 리플을 발생시키는 원인이 된다[2]. 이와 같은 현상들은 극 표면의 방사방향의 전자력과 전동기 토크특성에 나쁜 영향을 미치므로 반드시 고려되어야 한다[3]. 일반적으로 SRM을 해석할 때, 환류 다이오드와 캐패시터의 충전과 방전으로 인한 DC link 전압리플을 고려하지 않고 전압이 일정하다는 가정 하에 해석해 왔었다. 본 논문에서는 구동 드라이브와 DC link 캐패시터에 충전과 방전을 통해 발생하는 DC link 전압리플을 고려한 시간 차분 유한요소법을 이용하여 단일 펄스 구동 방식으로 구동되는 SRM의 특성을 해석하였다. 또한 해석의 타당성을 검증하기 위해 실제 제작된 SRM의 실험결과와 비교하였다.

### 2. SRM 모델

그림 1은 본 논문에서 해석에 사용한 스위치 릴럭턴스 전동기를 나타내고 있다. 이 전동기는 3상 고정자 6극, 회전자 4극의 내전형 스위치 릴럭턴스 전동기로서 집중권 고정자 권선에 회전자에는 권선이 없는 형태이다. 그림 2는 본 논문에서 FEM 해석 시에 사용한 SRM의 해석 모델을 나타내고 있다. 모델의 제원은 표 1과 같다. 그림 3은 AC 전원을 DC 전원으로 바꿔주는 단상 전파 정류기와 모터에 전원을 공급하는 비대칭 브릿지 컨버터 드라이브로 구성되어 있다.

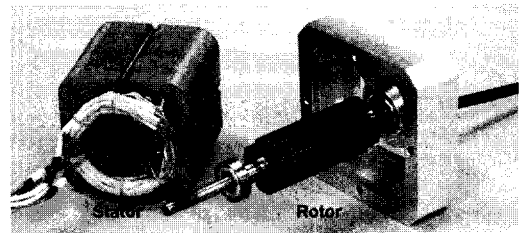


그림 1 실제 SRM의 외형  
Fig. 1 The configuration of SRM

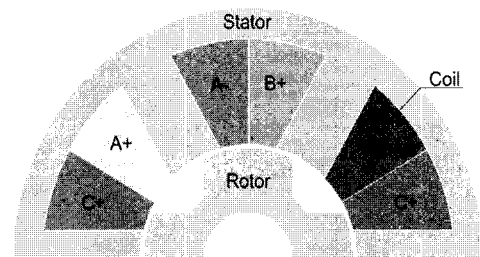


그림 2 SRM의 FEM 2D 해석 모델  
Fig. 2 FEM 2D analysis model of SRM

\* 正 會 員 : 漢陽大學 大學院 電氣工學科  
† 교신저자, 正會員 : 漢陽大學 電氣制御生體工學部科  
副教授 · 工博

E-mail : julee@hanyang.ac.kr

接受日字 : 2008年 6月 23日

最終完了 : 2008年 10月 2日

표 1 SRM 제원

Table 1 The specification of SRM

구분	제원	
정격	정격출력	300 [W]
	입력전압	48 [V]
	정격속도	3000 [rpm]
	정격토크	1 [Nm]
고정자	극수	6
	극호각	30 [°]
	상수	3
	외경	80.4 [mm]
	적층폭	80 [mm]
	상당 권선수	30 [turn]
회전자	선간저항	0.46 [Ω]
	극수	4
	극호각	50 [°]
	외경	36 [mm]
	적층폭	80 [mm]
공극	사프트 외경	15 [mm]
	공극길이	0.4 [mm]

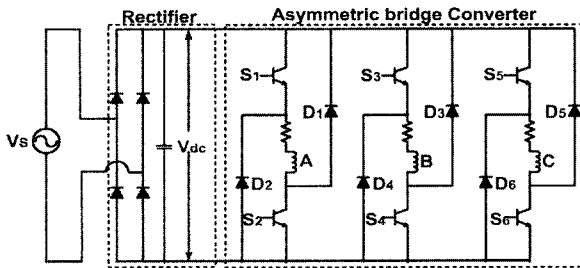


그림 3 SRM 구동회로

Fig. 3 The driving circuit of SRM

2. 시간 차분 유한요소법

스위치드 릴럭턴스 전동기의 2차원 유한요소 해석을 위한 지배방정식을 도출하기 위하여 (a)전류성분은 z방향 성분만 존재하고 (b)철심은 등방성이고 (c)전류밀도는 도체 내에서 일정하다고 가정한다. 이를 통해 다음 식 (1)과 같은 지배방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{1}{\mu} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) \right] + J_0 = 0 \quad (1)$$

여기서,  $A_z$ 는 벡터 포텐셜,  $J_0$ 는 입력전류밀도,  $\mu$ 는 철심을 투자율을 나타낸다. 그림 4는 단일 펄스 구동에서 도통각(Dwell angle)이 30[deg]일 때, 3상의 턴 온과 턴 오프의 스위칭 상태를 나타내고 있으며, 이에 따라 캐패시터의 충전 구간과 방전구간으로 분류하였다. 캐패시터 충전구간에서는 입력전압 크기로 충전되기 때문에 캐패시터 전압은 입력 전압과 같아서 캐패시터 전압이 미지수가 되지 않지만, 캐패시터 방전구간에서는 캐패시터 전압이 입력 전압보다 크기 때문에 캐패시터 전압은 미지수가 된다.

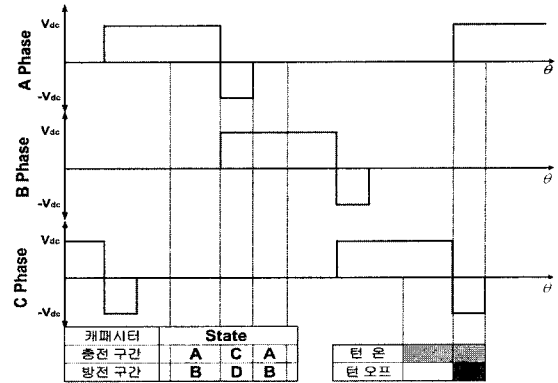


그림 4 캐패시터 충전, 방전 구간에서 단일 펄스 구동의 스위치 위치 상태

Fig. 4 FEM 2D analysis model of SRM

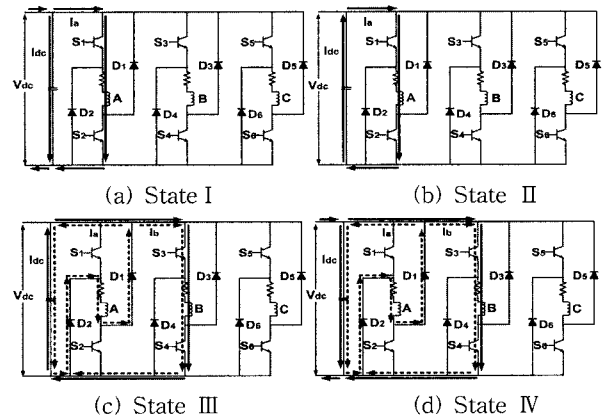


그림 5 단일펄스 구동 회로의 동작

Fig. 5 FEM 2D analysis model of SRM

a) State I: 캐패시터 충전 구간에서 턴 온 시 한 상에 전류가 흐를 경우 충전 상태에서 캐패시터의 전압( $V_{dc}$ )은 정류된 입력전압( $V_s$ )의 크기로 충전 된다. 그림 5(a)에서 보이는 것처럼 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 가 턴 온 되었을 때, 상 전류  $I_a$ 에 대한 회로의 전압 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{dc} = R_a I_a + L_l \frac{dI_a}{dt} + E_a \quad (2)$$

b) State II: 캐패시터 방전 구간에서 턴 온 시 한 상에 전류가 흐를 경우 정류된 입력전압( $V_s$ )이 캐패시터 전압( $V_{dc}$ )보다 낮아진다면, 캐패시터는 방전하게 된다. 캐패시터가 방전하고 A상 스위치( $S_1, S_2$ )가 턴 온 되었을 때, 전류는 그림 5(b)에서 보이는 것처럼 실선을 따라 흐른다. 이때 회로 방정식은 식 (2)와 동일하지만 캐패시터가 방전함에 따라 캐패시터 전압이 미지수 값이 되기 때문에 방전시의 전압 방정식에 해당하는 식 (3)이 추가적으로 필요하다.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C} I_a = -\frac{1}{C} I_a \quad (3)$$

여기서 C는 정전용량이다.

3) State III: 캐패시터가 충전 구간에서 두 상에 전류가 흐를 경우 충전 상태에서 캐패시터의 전압( $V_{dc}$ )은 정류된 입력전압( $V_s$ )의 크기로 충전 된다. 연속적인 토크를 발생하기 위해서 A상 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 는 턴 오프하고 B상의 스위치  $S_3$ 과  $S_4$ 를 턴 온 시킨다. A상의 스위치( $S_1, S_2$ )가 턴 오프 되었을 때, A상에 흐르던 전류는 그림 5(c)에서 나타낸 것처럼 점선을 따라 환류 다이오드  $D_1$ 과  $D_2$ 를 통해 캐패시터에 재충전 되거나 다른 상으로 전류가 흐른다. B상의 스위치( $S_3, S_4$ )가 턴 온 되면, 그림 5(c)에 나타낸 것처럼 실선을 따라 전류가 흐른다. 스위치( $S_1, S_2$ ) 턴 오프 되고 스위치 ( $S_3, S_4$ ) 턴 온 되었을 때의 전압 방정식은 식 (4)와 식 (5)와 같다. 식 (4)에서 스위치( $S_1, S_2$ ) 턴 오프 되었을 때, 환류 다이오드를 통해 흐르는 전류에 의한 다이오드 전압강하를 고려하였다.

$$-V_{dc} = R_a I_a + L_l \frac{dI_a}{dt} + E_a - V_d \quad (4)$$

$$V_{dc} = R_b I_b + L_l \frac{dI_b}{dt} + E_b \quad (5)$$

여기서  $V_d$ 는 환류 다이오드의 전압강하이다.

4) State IV: 캐패시터 방전 구간에서 두 상에 전류가 흐를 경우 그림 5(c)에서 보이는 것처럼 회로 방정식은 식 (4), (5)와 동일하다. 캐패시터가 방전할 때 캐패시터의 전압은 미지수의 값이 되기 때문에 식 (6)이 추가적으로 필요하다. A상 스위치가 턴 오프 되었을 때 전류는 환류 다이오드  $D1$ 과  $D2$ 를 통해 흐른다. 전류는 그림 5(d)에 나타낸 것처럼 점선을 따라 흐르며 DC link 캐패시터에 충전되거나 다른 상으로 흐른다. 전류는 B상의 스위치가 턴 온 되었을 때, 그림 5(d)에 나타낸 것처럼 실선을 따라 흐른다. A상의 스위치가 턴 오프 되었을 때, A상의 환류 되는 전류가 B상의 전류 보다 클 때에는 캐패시터는 충전되고 A상의 환류 되는 전류가 B상의 전류보다 작아지면 캐패시터는 방전한다.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C} I_{dc} = -\frac{1}{C} (-I_a + I_b) = \frac{1}{C} I_a - \frac{1}{C} I_b \quad (6)$$

한편, 권선에 유기되는 역기전력  $\frac{d\Phi}{dt}$ 는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi}{dt} &= N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \frac{d}{dt} \int_S (\nabla \times \vec{A}) \cdot d\vec{S} \\ &= \frac{d}{dt} \oint_l \vec{A} \cdot d\vec{h} = \frac{d}{dt} [(A^+ - A^-)h] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $h$ 는  $z$ 방향의 철심의 유효 적층폭을 나타내며,  $A^+, A^-$ 은 동일한 권선이 감겨있는 슬롯에서 방향이 서로 반대인 자기벡터 포텐셜의 평균값으로 식 (8)과 같다.

$$A^+, A^- = \int_S A dx dy \quad (8)$$

따라서 각 권선( $N$  턴)에 유기되는 평균 역기전력은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{S} \int_s N \frac{d\Phi}{dt} dS = \frac{Nl}{S} \frac{d}{dt} \int_s (A^+ - A^-) dS \\ &= \frac{Nl}{S} \frac{d}{dt} \left( \int_{S_n} A^+ dx dy - \int_s A^- dx dy \right) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $S$ 는 슬롯 면적,  $S_n$ 은 코일변의 단면적이다. 이상의 결과로 회로방정식을 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$[F] \frac{d}{dt} \{A\} + RI + L \frac{d}{dt} I = V_{dc} \quad (10)$$

식 (9)은 해석영역 내부의  $N$ 턴의 권선에 대한 역기전력으로, 일부만을 해석하는 경우에는 전동기 한 상의 직렬 턴 수와 해석영역 내부의 턴 수와의 비를 곱해 주면 다음과 같다.

$$P[F] \frac{d}{dt} \{A\} + RI + L \frac{d}{dt} I = V_a \quad (11)$$

여기서,  $[F] = \pm \frac{Nh \Delta^e}{3S}$  이다.

캐패시터가 충전되고 전류가 한상만이 도통하고 있을 때 전류의 흐름이 하나이므로 미지 전류 값은 하나가 되고, 상 전환이 발생하는 경우는 두개의 전류의 흐름이 존재하므로 미지 전류 값은 두개가 된다. 캐패시터가 방전 될 때에는 캐패시터의 전압은 미지수의 값이 되기 때문에 미지 전압 값 한 개를 추가되어야 한다. 식 (2) 그리고 식 (10)의 시간 미분항을 처리하기 위해 미소 시간폭  $\Delta t$ 로 나누고 이 구간에서는 현상이 선형적으로 변한다고 가정하여 미분방정식을 이산화하고 후퇴차분법을 적용하면 자기 벡터 포텐셜과 전류, 전압은 다음 식(12), 식(13), 식(14)으로 나타낸다.

$$\frac{d\{A\}}{dt} = \frac{\{A\}^{t+\Delta t} - \{A\}^t}{\Delta t} \quad (12)$$

$$\frac{d\{I\}}{dt} = \frac{\{I\}^{t+\Delta t} - \{I\}^t}{\Delta t} \quad (13)$$

$$\frac{d\{V\}}{dt} = \frac{\{V\}^{t+\Delta t} - \{V\}^t}{\Delta t} \quad (14)$$

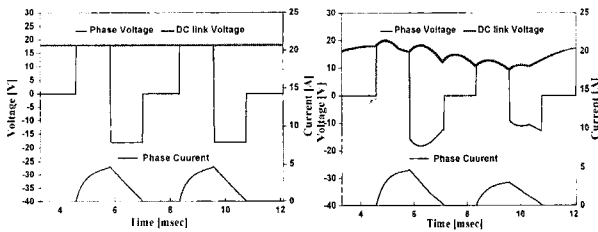
단일 펄스 구동에서 캐패시터가 충전되고 전류가 한 상 또는 두 상으로 흐를 때는 식 (14)과 같은 계 행렬 방정식으로 나타내고, 캐패시터가 방전하고 전류가 한 상 또는 두 상으로 흐를 때는 식 (15)과 같은 계 행렬 방정식으로 나타낸다. 여기서  $Q$ 는 고정자 권선과 관련이 있으며,  $F$ 는 역기전력과 관련이 있다.

$$\begin{bmatrix} [S] & Q_a & Q_b & Q_c \\ F_a/\Delta t & R_a + L_l/\Delta t & 0 & 0 \\ F_b/\Delta t & 0 & R_b + L_l/\Delta t & 0 \\ F_c/\Delta t & 0 & 0 & R_c + L_l/\Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A]^{t+\Delta t} \\ I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ F_a/\Delta t & L_l/\Delta t & 0 & 0 \\ F_b/\Delta t & 0 & L_l/\Delta t & 0 \\ F_c/\Delta t & 0 & 0 & L_l/\Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A]^t \\ I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_a(V_{dc}) \\ K_b(V_{dc}) \\ K_c(V_{dc}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -V_d \\ -V_d \\ -V_d \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} [S] & Q_a & Q_b & Q_c & 0 \\ F_a/\Delta t & R_a + L_l/\Delta t & 0 & 0 & -K_a \\ F_b/\Delta t & 0 & R_b + L_l/\Delta t & 0 & -K_b \\ F_c/\Delta t & 0 & 0 & R_c + L_l/\Delta t & -K_c \\ 0 & K_a(1/C) & K_b(1/C) & K_c(1/C) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A]^{t+\Delta t} \\ I_a \\ I_b \\ I_c \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ F_a/\Delta t & L_l/\Delta t & 0 & 0 & 0 \\ F_b/\Delta t & 0 & L_l/\Delta t & 0 & 0 \\ F_c/\Delta t & 0 & 0 & L_l/\Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A]^t \\ I_a \\ I_b \\ I_c \\ V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -V_d \\ -V_d \\ -V_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

2.1 해석 결과

그림 6은 유한요소법을 이용하여 환류 다이오드와 DC link 전압 리플을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때, 한 상의 전압과 한 상의 전류를 나타내었다. 속도 4000rpm의 단일펄스 구동에서 한상의 스위칭 시간은 1.25[msec]이며, 500rpm에서 한상의 스위칭 시간은 10 [msec]이다. 스위칭 순간마다 상전류 파형은 리플이 있는 DC link 전압의 영향을 받아서 속도와 위치에 따라 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 DC link 전압 리플을 고려하지 않은 그림 6(a)에서는 나타나지 않는 현상이다.



(a) DC link 커패시터 무시 (b) DC link 커패시터 고려

그림 6 한 상 전압과 한 상 전류 (4000rpm)  
Fig. 6 A single-phase voltage and single-phase current (4000rpm)

그림 7과 8에 각각 부하 시 유한요소법을 이용하여 500rpm에서 환류 다이오드와 DC link 전압 리플을 고려한 것과 고려하지 않은 토크 리플과 회전자가 받는 방사방향의 힘을 나타내었다. 이를 통해 DC link 전압 리플을 고려한 실제적인 경우 토크 리플과 방사방향의 힘이 고려하지 않은 경우보다 전체적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

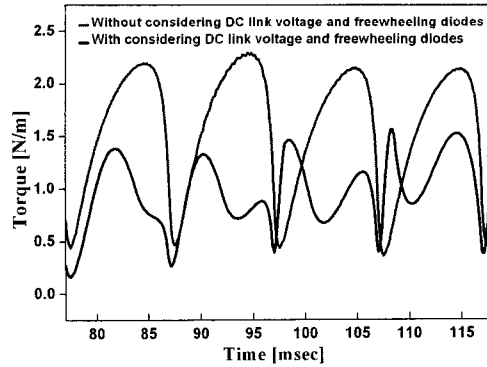


그림 7 토크 리플 (500rpm)  
Fig. 7 Torque ripple (500rpm)

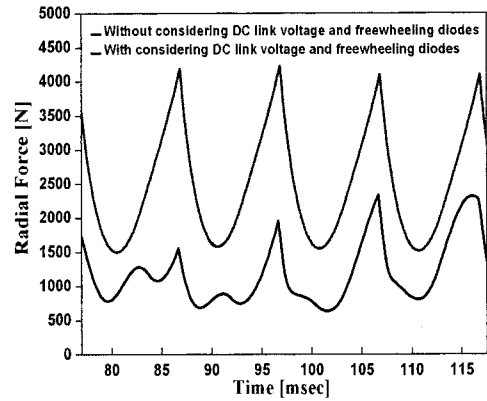


그림 8 방사방향의 힘 (500rpm)  
Fig. 8 Torque ripple (500rpm)

3. 실험

그림 9, 10에 본 논문에서 실험을 위해 제작된 SRM 구동 시스템과 실험 장치의 개념도와 실제 외형을 나타내었다. 그림 9의 구동 회로는 입력 AC 전원을 DC 전원으로 바꿔 주는 단상 전파 정류기와 모터에 구동 전원을 공급하는 비대칭 브릿지 컨버터 드라이브로 구성되어 있다.

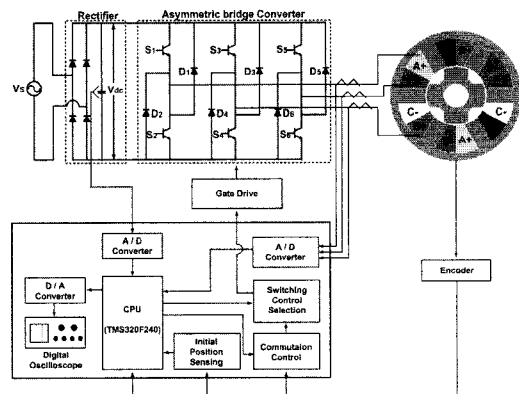


그림 9 SRM 구동 시스템 및 실험 장치의 개념도  
Fig. 9 The concept figure of the driving system of SRM and measuring system

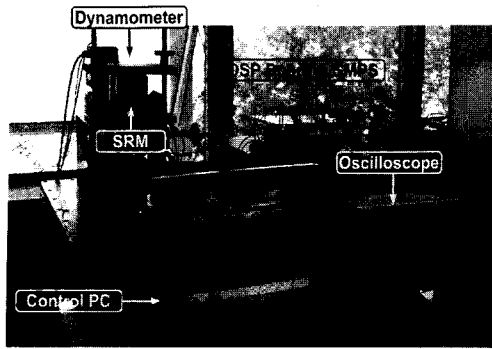
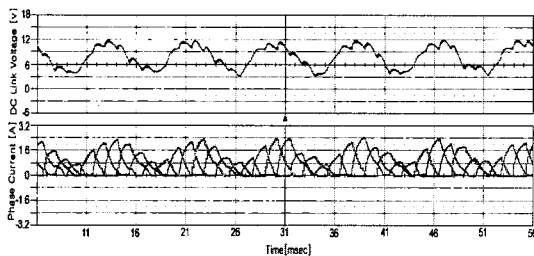
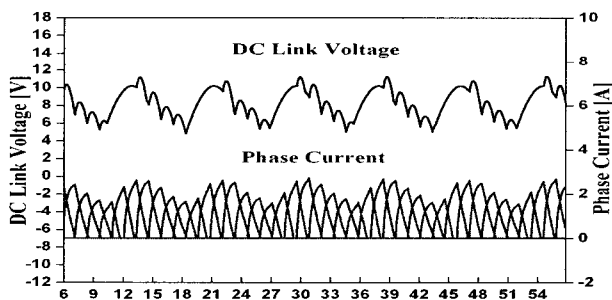


그림 10 SRM 실험 장치 세트  
Fig. 10 The test system of SRM

그림 11은 단일펄스 스위칭 방식으로 구동되는 SRM의 환류 다이오드와 DC link 전압을 고려한 해석과 실제 실험 결과를 나타내었다. 이를 통해 단일 펄스 구동 방식의 SRM의 DC link 전압 리플과 상전류에 대한 특성 해석이 만족할 만한 오차 범위 안에서 실험결과와 부합됨을 확인할 수 있었다.



(a) 실험 결과



(b) 해석결과

그림 11 DC link 전압 리플과 상 전류 (4000rpm)  
Fig. 11 DC link voltage ripple and phase current (4000rpm)

#### 4. 결 론

실험과의 비교를 통해 단일 펄스 스위칭 방식으로 구동되는 SRM의 DC link 전압 리플을 시간 차분 유한요소법을 이용하여 상당한 정확도를 가지고 해석할 수 있었다. 본 논문에서 제시된 방법은 단일 펄스 구동방식으로 구동되는 SRM의 설계 및 해석에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] T. J. E. Miller, Switched Reluctance Motors and their control, Oxford University Press, 1993.
- [2] Tae Heoung Kim, Jae-Hak Choi, Kwang Chae Ko, and Ju Lee, "Finite-element analysis of brushless dc motor considering freewheeling diodes and dc link voltage ripple," IEEE Transaction On Magnetics, vol. 39, no. 5, pp. 3274-3276, September 2003.
- [3] Youn-Hyun Kim, Jae-Hak Chok, Sung-In Jung, Yon-Do Chun, Sol Kim, Ju Lee, Min-Sik Chu, Kyung-Jin Hong and Dong-Hun Choi, "Optimal design of switched reluctance motor using two-dimensional finite element method," Journal of Applied Physics, vol. 91, no. 10, pp. 6967-6969, May 2002.

#### 저 자 소 개



##### 이 성 구 (李 聖 九)

1980년 4월 23일생. 2003년 한양대 전자전기공학부 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-2220-0349

Fax : 02-2295-7111

E-mail : firewirelee80@hotmail.com



##### 정 대 성 (鄭 大 成)

1977년 4월 10일생. 2004년 한경대 전기공학과 졸업. 2006년 한양대 전기공학과 졸업(석사). 2006년 ~ 현재 동 대학원 박사과정

Tel : 02-2220-0349

E-mail : jungds61@hanyang.ac.kr



##### 이 주 (李 柱)

1963년 8월 30일 생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1988년 ~ 1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 SYSTEM 정보과학연구과 졸업(공학박). 1997년 한국철도기술연구원 선임 연구원. 1997년 ~ 현재 한양대 공대 전기 제어생체공학부 부교수

Tel : 02-2220-0342

E-mail : julee@hanyang.ac.kr