

DC link 전압리플과 환류 다이오드를 고려한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성 해석

이승준, 최재학, 임성엽, 이주  
한양대학교 전자전기컴퓨터공학부

The Characteristic Analysis of Switched Reluctance Motor  
Considering DC Link Voltage Ripple and Freewheeling diodes

Seung-Jun Lee, Jae-Hak Choi, Seong-Yeop Lim, Ju Lee  
Dept. of Electrical Engineering at Hanyang University

**Abstract** - This paper presents a characteristic analysis switched reluctance motor (SRM) considering hard chopping and DC link voltage ripple by using time-stepped voltage source finite element method in which the magnetic field is combined with drive circuit. We also examine the influence of freewheeling diodes and DC link voltage ripple on the performance of the SRM such as torque ripples and radial force on the surface of the teeth. The freewheeling diodes and DC link voltage ripples must be taken into account in predicted the performance of SRM

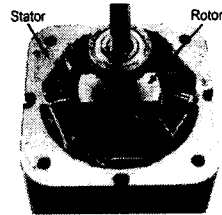


그림. 1 스위치드 릴럭턴스 모터의 구조

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 구조가 간단하고 제조비용이 낮으며, 높은 토크의 장점을 가지고 있으며 최근에는 전력전자 기술의 발달에 의해 산업용에서부터 가정용까지 적용이 널리 확대되어가고 있다. 릴럭턴스 토크를 이용한 SRM은 토크리플이 크기 때문에 소음과 진동을 발생시킨다. 기하학적인 모터의 형상 설계와 전기적인 제어 기술로 토크 리플을 줄일 수 있다[1].

SRM은 높은 토크를 얻기 위해서 높은 입력전압, 전류, 상 인덕턴스를 필요로 한다. 그러나 가격과 크기 문제 때문에 SRM 구동회로의 정류기에 소용량 캐패시터를 사용함으로써 DC link 전압에 리플을 발생시킨다. 이와 같은 현상들은 극 표면의 방사방향의 전자력과 전동기 토크특성에 나쁜 영향을 미치므로 반드시 고려되어야 한다[2]. 일반적으로 SRM 해석할 때, 환류 다이오드와 캐패시터의 충전과 방전으로 인한 DC link 전압을 고려하지 않고 전압이 일정하다는 가정에 해석해 왔었다. 본 논문에서는 시간 차분 전압원 유한 요소 해석을 이용하여 환류 다이오드와 DC link 전압 리플을 고려한 SRM을 특성 해석하고 실험을 통해 상전류와 DC 링크 전압 리플을 측정하여 제안된 해석 방법이 SRM 해석에 타당함을 보여준다.

2. 본 론

2.1 해석모델과 구동회로

그림. 1은 본 논문의 해석 모델인 고정자 극호각 30° 회전자 극호각 50° 6/4 SRM 구조를 나타내며[3], 그림. 2는 입력 AC 전원을 DC 전원으로 바꿔주는 단상 전파 정류기와 모터에 전원을 공급하는 비대칭 브릿지 컨버터 드라이버로 구성되어 있다. 그림. 2에서와 같이 상 권선에 연결되어 있는 DC link 전압(Vdc)은 스위치 S1과 S2를 턴 온 했을때, 전류는 A상 권선에 흐른다. A상 권선에 흐르는 전류는 자속을 발생시키고 회전자는 릴럭턴스

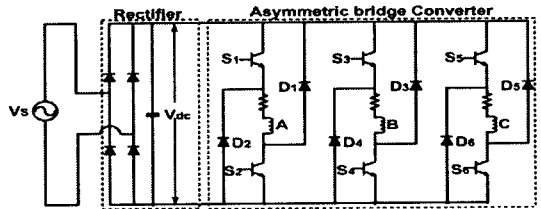


그림. 2 구동회로

최소 방향과 인덕턴스 최대방향으로 당겨지게 된다. 연속적인 토크를 발생시키기 위해서 구동회로의 스위치는 연속적으로 제어해야 하며, 부 토크를 방지하기 위해서는 여자된 전류를 정렬위치에서 빨리 소호시켜야 한다. 스위치 S1과 S2를 턴 오프 했을 때 자계에 저장된 에너지는 환류 다이오드 D1과 D2를 통해 흐르고 자계 에너지는 DC Link 캐패시터에 재저장 되거나 다음 상에 영향을 준다.

2.2 유한 요소 정식화

자기 벡터 포텐셜과 전류밀도가 z축 성분을 가진다면 SRM의 2차원 지배방정식은 자기 벡터 포텐셜 A에 의해 다음과 같이 표현 되어진다.

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

여기서 Az는 z성분의 자기 벡터 포텐셜, Jo는 전류밀도이고 μ는 투자율이다. 전압원 회로 방정식을 표현하였다.

$$V = RI + L_i \frac{di}{dt} + E \quad (2)$$

여기서 R은 상 권선의 저항, Li는 고정자 코일 단부의 누설 인덕턴스, E는 상 권선의 역기전력, V는 상 전압 그리고 I는 상전류이다[4].

2.2.1 회로 방정식

비대칭 브릿지 컨버터에 의해 구동되는 SRM의 회로 방정식은 DC link 캐패시터가 충전과 방전을 반복하고 각 상마다 전류(Commutation)가 일어남에 따라 4가지 경우 구성되어진다.

1) State A: 캐패시터가 충전되고 한 상에 전류가 흐를 때 (예. A상 턴 온)

캐패시터가 충전되고 있으므로 캐패시터의 전압( $V_{dc}$ )은 정류전압( $V_s$ )과 같아진다. 그림. 3(a)에서 보이는 것처럼 스위치  $S_1$ 과  $S_2$  턴 온 되어 순환 전류  $I_o$ 에 대한 회로의 전압 방정식은 다음과 같이 표현 되어진다.

$$V_s = R_a I_o + L_l \frac{dI_o}{dt} + E_o \quad (3)$$

2) State B: 캐패시터가 충전되고 두 상에 전류가 흐를 때 (예. A상 턴 오프, B상 턴 온)

캐패시터의 전압은 정류된 전압과 동일하다. 연속적인 토크를 발생하기 위해서 A상 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 는 턴 오프 하고 B상의 스위치  $S_3$ 과  $S_4$ 를 턴 온 시킨다. A상의 스위치( $S_1, S_2$ )가 턴 오프 되었을때 A상에 흐르던 전류는 그림. 3(b)에서 나타난 것처럼 점선을 따라 환류 다이오드  $D_1$ 와  $D_2$ 를 통해 캐패시터에 재충전되거나 다른 상으로 전류가 흐른다. B상의 스위치는 턴 온 되면, 그림. 3(b)에 나타난 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 (5)로 쓰여 질 수 있다. 식 (4)에서 스위치( $S_1, S_2$ ) 턴 오프 되었을 때 환류 다이오드 통해 흐르는 전류에 의한 다이오드 전압강하를 고려해야 한다.

$$-V_{dc} = R_o I_o + L_l \frac{dI_o}{dt} + E_o - V_d \quad (4)$$

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

여기서  $V_d$ 는 환류 다이오드의 전압강하이다.

3) State C: 캐패시터가 방전되고 한 상에 전류가 흐를 때 (예. A상 턴 온)

정류전압이 캐패시터 전압보다 낮아진다면, 캐패시터는 방전하게 된다. 캐패시터가 방전하고 A상 스위치( $S_1, S_2$ ) 턴 온 되었을 때, 전류는 그림. 3(c)에서 보이는 것처럼 실선을 따라 흐른다. 회로 방정식은 식 (3)과 동일하지만 캐패시터가 방전함에 따라 캐패시터의 전압이 미지수 값이 되기 때문에 방전하는 전압 방정식 식 (6)이 추가적으로 필요하다.

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

여기서 C는 정전용량이다.

4) State D: 캐패시터가 방전되고 두 상에 전류가 흐를 때 (예. A상 턴 오프, B상 턴 온)

그림. 3(d)에서 보이는 것처럼 회로 방정식은 식 (4), (5)와 동일하다. 캐패시터가 방전할 때 캐패시터의 전압은 미지수의 값이 되기 때문에 식 (7)이 추가적으로 필요하다. A상 스위치가 턴 오프 되었을 때 전류는 환류 다이오드  $D_1$ 과  $D_2$ 를 통해 흐른다. 전류는 그림. 3(d)에 나타난 것처럼 점선을 따라 흐르며 DC link 캐패시터에 재저장 되거나 다른 상으로 흐른다. 전류는 B상의 스위치가 턴 온 되었을 때 그림. 3(d)에 나타난 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.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C} I_{dc} = -\frac{1}{C} (-I_o + I_b) = \frac{1}{C} I_o - \frac{1}{C} I_b \quad (7)$$

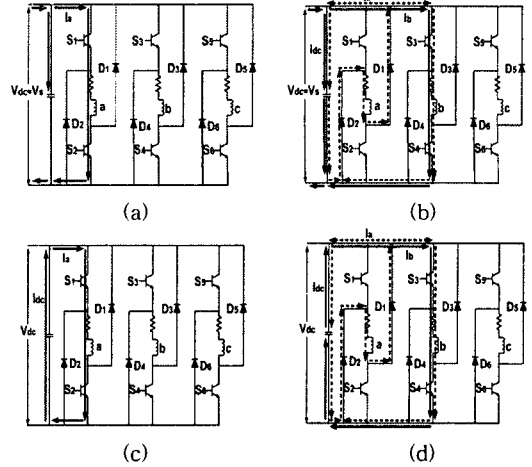


그림. 3 비대칭 브릿지 컨버터의 구동회로의 전류흐름

## 2.2.2 계 행렬 방정식

식 (1)을 칼런킨 법을 적용하여 식 (2) 전압 방정식을 결합하면 자기백터 포텐셜, 전류 그리고 DC link 전압을 미지수로 하는 계 행렬 방정식을 구성할 수 있다. 회로 방정식에서 시간의 미분항을 처리하기 위하여 후퇴 차분법을 적용하였다. 캐패시터가 충전되고 전류가 한 상 또는 두 상으로 흐를 때는 식 (8)과 같은 계 행렬 방정식으로 나타내고, 캐패시터가 방전하고 전류가 한 상 또는 두 상으로 흐를 때는 식 (9)과 같은 계 행렬 방정식으로 나타낸다. 여기서 Q는 고정자 권선과 관련이 있으며, F는 역기전력과 관련이 있다. 스위치가 턴 오프 되었을 때, 환류 다이오드의 전압강하( $-V_d$ )는 식 (8)과 (9)에 추가되었다. 하지만 스위치가 턴 온 되었을 때는 환류 다이오드의 전압강하 ( $V_d=0$ )는 0이 될 것이다. Table I는 그림. 3 또는 식 (8)과 (9)의 스위칭 조건을 나타내었고 Table II는 그림. 3(c),(d) 또는 식 (9)에서 회로의 스위칭 조건에 따라 DC link 캐패시터의 충전 또는 방전 상태를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} [S] \\ F_o/\Delta t \\ F_o/\Delta t \\ F_o/\Delta t \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_a \\ R_a + L_l/\Delta t \\ 0 \\ R_b + L_l/\Delta t \\ R_c + L_l/\Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_b \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ R_c + L_l/\Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_c \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ R_c + L_l/\Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A]^{t-\Delta t} \\ I_o \\ I_b \\ I_c \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_o/\Delta t \\ F_o/\Delta t \\ F_o/\Delta t \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ L_l/\Delta t \\ 0 \\ L_l/\Delta t \\ L_l/\Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A]^t \\ I_o \\ I_b \\ I_c \\ V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_o(V_{d1}) \\ K_o(V_{d2}) \\ K_o(V_{d3}) \\ K_o(V_{d4}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -V_d \\ -V_d \\ -V_d \\ -V_d \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} [S] \\ F_o/\Delta t \\ F_o/\Delta t \\ F_o/\Delta t \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_a \\ R_a + L_l/\Delta t \\ 0 \\ R_b + L_l/\Delta t \\ K_o(1/C) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_b \\ 0 \\ R_b + L_l/\Delta t \\ 0 \\ K_o(1/C) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_c \\ 0 \\ 0 \\ R_c + L_l/\Delta t \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A]^{t-\Delta t} \\ I_o \\ I_b \\ I_c \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_o/\Delta t \\ F_o/\Delta t \\ F_o/\Delta t \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ L_l/\Delta t \\ 0 \\ L_l/\Delta t \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A]^t \\ I_o \\ I_b \\ I_c \\ V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -K_o \\ -K_o \\ -K_o \\ K_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -V_d \\ -V_d \\ -V_d \\ V_{dc} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Table I  
(회로의 스위칭 상태)

State	A 상		B 상		C 상	
	Equation (Ka)	Circuit (on)	Equation (Kb)	Circuit (on)	Equation (Kc)	Circuit (on)
(A),(C)	+1	S1,S2	0	.	0	.
	0	.	+1	S3,S4	0	.
	0	.	0	.	+1	S5,S6
(B),(D)	-1	D1,D2	+1	S3,S4	0	.
	0	.	-1	D3,D4	+1	S5,S6
	+1	S1,S2	0	.	-1	D5,D6

식 (8),(9)에서 계 행렬 방정식 계수(Ka,Kb,Kc)

Table II

(회로의 스위칭 조건에 따라 캐패시터의 충전 또는 방전의 상태)

State	Capacitor State	Current state	A 상	B 상	C 상
			Equation (Ka)	Equation (Kb)	Equation (Kc)
(C)	방 전	·	+1	0	0
			0	+1	0
			0	0	+1
(D)	충 전	$I_a > I_b$	-1	+1	0
	방 전	$I_a < I_b$	0	-1	+1
	충 전	$I_b > I_c$	0	-1	+1
	방 전	$I_b < I_c$	+1	0	-1
	충 전	$I_c > I_a$	+1	0	-1

식 (9)에서 개 행렬 방정식 계수(Ka,Kb,Kc)

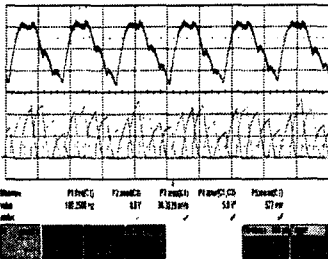
2.3 해석결과

그림. 4는 하드쇼프 모드에서 환류 다이오드와 DC link 전압을 고려한 실험과 해석 결과를 나타내었다. 큰 DC link 전압리플이 발생되었으며, 제안된 유한요소법을 사용함에 의해 실험결과가 시뮬레이션 결과와 일치하는 것을 볼 수 있다.상전류가 방전구간에 전류(Commutation)된다면 DC link 캐패시터는 환류 다이오드 전류가 다음 상전류와 같아질 때 까지 재충전 되어진다.

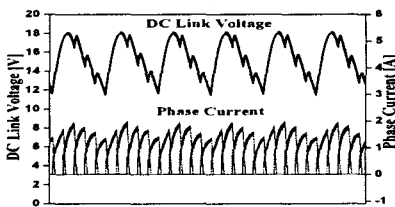
그림. 5는 정전용량의 변화에 의해 DC link 전압리플을 보여준다. 해석 결과로부터 적절한 캐패시터 선정이 DC link 전압 리플이 감소하는 효과를 알 수 있다.

그림. 6는 유한요소법을 이용하여 환류 다이오드와 DC link 전압 리플을 고려한 것과 고려하지 않은 것들 한 상의 전류와 한 상의 전압으로 나타내었다. 그림. 6(a)에서 보이는 것처럼 상전류의 파형과 폭은 주기적이지만 그림. 6(b)에서 전류는 주기적이지 않다. 그림. 6(a)의 전류의 최대값은 그림. 6(b)의 전류의 최대값 보다 크다.

그림. 7은 유한요소법을 이용하여 500rpm에서 환류 다이오드와 DC link 전압 리플을 고려한 것과 고려하지 않은 토크리플과 회전자 표면의 방사방향의 힘을 나타내었다. 환류 다이오드와 DC link 전압 리플을 고려한 방사방향의 힘과 토크리플이 고려하지 않은 것보다 낮게 나타난 것을 알 수 있다. 이유는 상전류가 작게 흐르기 때문이다. 환류 다이오드와 DC link 전압 리플은 SRM의 성능을 예측하기 위해서는 반드시 고려되어야만 한다.



(a) 실험결과



(b) 해석결과

그림. 4 DC link 전압 리플과 상전류 (3000rpm)

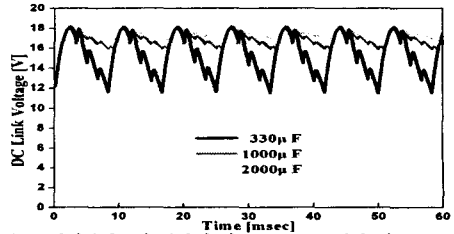
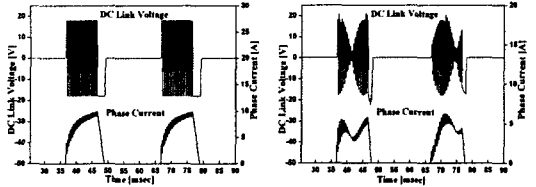
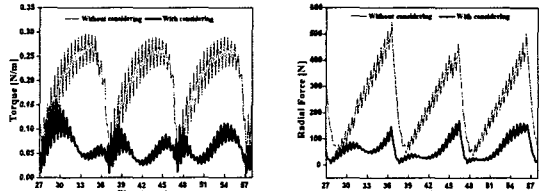


그림. 5 캐패시턴스의 변화에 따른 DC link 전압 리플 (3000rpm)



(a) With considering (b) Without considering  
그림. 6 한 상 전류와 한 상 전압 (500rpm)



(a)토크리플 (b)방사방향의 힘  
그림. 7 토크리플과 방사방향의 힘 (500rpm)

3. 결 론

본 논문에서는 DC Link 전압 리플과 환류 다이오드를 고려하여 시간 차분 전압원 유한요소 수치해석 방법으로 SRM의 특성을 해석하였고 제안된 해석 방법이 효과적임을 제시하였다. 환류 다이오드와 DC Link 전압 리플 고려한 SRM의 토크 특성 및 방사방향의 힘에 미치는 영향을 알 수 있고 캐패시터의 용량에 따라 리플이 많이 변화한다는 것을 알 수 있다. 제시된 방법은 SRM과 드라이브가 결합된 설계 및 해석에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글  
본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프로그축지원사업으로 수행된 논문입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] T. J. E. Miller, Switched Reluctance Motors and their control, Hillsboro, OH: Magna Physics Publishing and London: Oxford University Press, 1993
- [2] Tae Heung Kim, Jae-Hak Choi, Kwang Cheol 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, (Sep 2003)
- [3] Y. H. Kim, J. H. Choi, S. I. Jung, Y. D. Chun, J. Lee, M. S. Chu, K. J. Hong, and D. H. Choi, "Optimal design of switched reluctance motor using two-dimensional finite element method," Journal of Applied Physics, vol. 91, no. 10, 6967, (May 2002)
- [4] Sheppard J. Salon, Finite Element Analysis of Electric Machines: Kluwer Academic Publishers, 1995