

공진형 C-dump 컨버터에 의한 SRM의 고성능 운전

정균하, 윤용호, 김세주, 원충연, 김영렬*
성균관대학교, 안양대학교*

High performance operation of SRM by Resonant C-dump Converter

Kyun-Ha Jeong, Yong-Ho Yoon, Se-Joo Kim, Chung-Yuen Won, Young-real Kim*
SungKyunKwan University, Anyang University*

ABSTRACT

In this paper, the operational performance of SRM can be improved by using current hysteresis control method. This method maintains a generally flat current waveform. At the high speed, the current chopping capability is lost due to the development of the back-EMF. Therefore SRM operates in single pulse mode. By using zero-current switching and zero-voltage switching technique, the stress of power switches can be reduce in chopping mode. When the commutation from one phase winding to another phase winding, the current can be zero as fast as possible in this period because several times negative voltage of DC-source voltage produce in phase winding. This paper is compared to performance based on conventional C-dump converter topology and the proposed resonant C-dump converter topology. Simulation and experimental results are presented to verify the effectiveness of the proposed circuit.

1. 서 론

SRM은 다른 전동기보다도 간단한 구조를 가지고 있어 제작 단가가 저렴하고 영구자석이 없어 고온 등의 열악한 환경에도 신뢰성이 높으며, 브러시 등이 없어 유지비가 거의 들지 않는 장점을 지니고 있는 전동기이다. 그러나 토크맥동이 크고 소음이 심한 단점이 있으나 최근 전력용 반도체 소자의 발달로 고주파수 스위칭 동작이 가능하게 되었고 전동기를 구동하는 컨버터의 성능이 개선되고 있다.^[1]

컨버터 구동 방식 중 하드초핑 방식으로 구동하게 되면 스

위치 오프시 빠른 전류소호로 인하여 꼬리전류에 의한 역토크의 발생에 의한 전동기의 성능의 저하를 방지할 수 있으나 스위칭시 높은 전력손실이 발생되고 순간적인 전압의 변화에 따른 EMI가 소프트초핑 방식에 비해 높게 나타난다.

본 논문에서는 하드초핑 방식으로 구동하면서 직렬공진을 이용해 스위치의 턴 온시 발생하는 스위칭 손실을 줄일 수 있었다.

기존의 발표된 논문에서는 단일펄스 구동방식으로 구현하여 상의 전류 시에만 공진을 발생시킨다.

이러한 구동방식의 단점은 단일펄스로 구동하기 때문에 저속에서의 구동시 높은 토크리플을 발생시켜 원활한 운전성능을 저하시키는 요인이 된다.

반면에 본 논문에서는 히스테리시스 전류제어를 추가하여 각상의 전류를 평활한 전류형태로 유지함으로써 저속에서의 토크리플을 저감시키고 또한 스위칭 손실을 저감시켜 상대적으로 고성능의 운전을 가능하게 하고 공진형 C-dump 컨버터와 Energy efficient C-dump 컨버터를 가지고 시뮬레이션과 실험으로 확인하였다.

2. 제안된 공진형 C-dump 컨버터의 동작원리

동작모드 1

그림 1의 동작모드 1은 초기 공진 커패시터 C_r 에 에너지가 충전되어 있는 정상상태를 가정한다. 공진 커패시터 C_r 에 충전되어 있는 에너지는 C_r 과 스위치 Q_1 , 공진 인덕터 L_r 그리고 공진 다이오드 D_r 을 통하여 스위치 턴 온시 영전류 스위칭을 하게 된다.

스위치에 흐르게 되는 전류는 식(1)과 같다.

$$I_Q = I_{Cr} + I_{La} \quad (1)$$

그림 5에서 동작모드 1 구간에서의 전압 방정식은

$$L_r \frac{di_{Lr}}{dt} + V_{Cr} = 0 \quad (2)$$

이 구간에서 흐르는 공진 인덕터 전류 i_{Lr} 의 초기

치를 $i_{Lr}(t_0)=I_{L0}$, $V_{Cr}(t_0)=V_{C0}$ 라고 하면

$$i_{Lr}(t)=L_r C_r \frac{d^2 i_{Lr}}{(dt)^2} \quad (3)$$

$$i_{Lr}(t)=I_{L0} \cos \omega_0(t-t_0) \quad (4)$$

$$v_{Cr}(t)=V_{C0} \cos \omega_0(t-t_0) \quad (5)$$

V_{C0} :초기 공진 커패시터 전압, I_{L0} :초기 공진 인덕터 전류, Z_0 :특성 임피던스, f 공진주기, t_0 :시작시간

이때의 공진 각주파수는

$$\omega_0=2\pi f_0=\frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (6)$$

그리고 특성 임피던스는

$$Z_0=\sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (7)$$

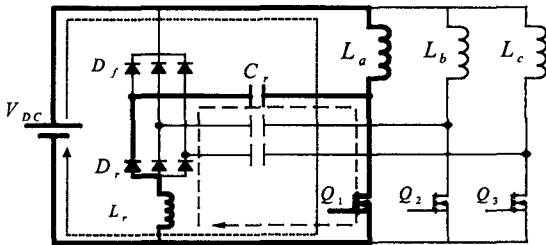


그림 1 동작모드 1
fig. 1 Operational mode 1

동작모드 2

그림 2의 동작모드 2는 두 개의 폐회로를 구성한다. 공진 커패시터 전압 V_{Cr} 이 방전하다가 V_{DC} 와 등전 위가 되면 공진이 완료되고 공진전류 I_{Cr} 은 더 이상 A상 스위치 Q_1 으로 흐르지 않는다.

그림 5에서 동작모드 2의 구간에서 공진 인덕터 L_r 에 인가되는 전압은

$$\frac{V_{Lr}}{L_r}(t-t_1)=i_{Lr}(t)-i_{Lr}(t_1) \quad (8)$$

따라서 공진 인덕터 전류 $i_{Lr}(t)$ 는

$$i_{Lr}=\frac{V_{Lr}}{L_r}(t-t_1)+i_{Lr}(t_1) \quad (9)$$

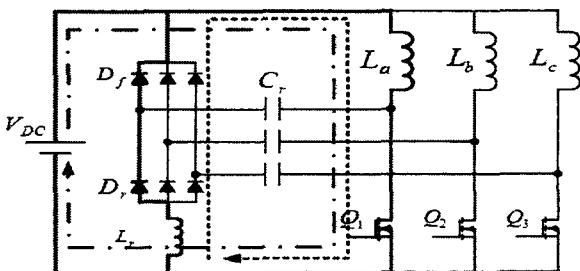


그림 2 동작모드 2
fig. 2 Operational mode 2

동작모드 3

그림 3의 동작모드 3에서 히스테리시스 전류 밴드에 의해 상위 전류값이 $I_a > I_{high}$ 가 되면 스위치 Q_1 은 턴 오프하게 되고, 상권선 L_a 에 축적되어 있는 에너지는 공진 커패시터 C_r 에 에너지를 덤프하게 된다. 이 때, L_a , C_r 환류다이오드 D_f 을 통하여 폐회로가 형성되어 입력전원은 차단되고 상권선 L_a 의 전압 V_{La} 가 입력전원이 되어 환류모드(free-wheeling)의 형태를 가지게 된다.

이 동작모드의 과정은 히스테리시스 전류밴드의 하위 전류값 $I_a < I_{low}$ 상태가 되면, A상 스위치 Q_1 이 다시 턴 온 하게 된다. 동작모드 1, 2, 3은 다음 상 스위치 Q_2 가 턴 온 될 때까지 반복하게 된다.

그림 5에서 동작모드 3의 구간에서 전압 방정식은

$$L_a \frac{di_{La}}{dt} + V_{Cr}=0 \quad (10)$$

이 구간에서 공진 커패시터 C_r 에 흐르는 전류 i_{La} 의 초기치를 $i_{La}(t_2)=I_{L2}$, $V_{Cr}(t_2)=V_{C2}$ 로 하면,

$$i_{La}(t)=I_{L2} \cos \omega_0(t-t_2) \quad (11)$$

V_{C2} :초기 공진 커패시터 전압, I_{L2} :초기 공진 인덕터 전류, Z_0 :특성 임피던스, f 공진주기, t_2 :시작시간

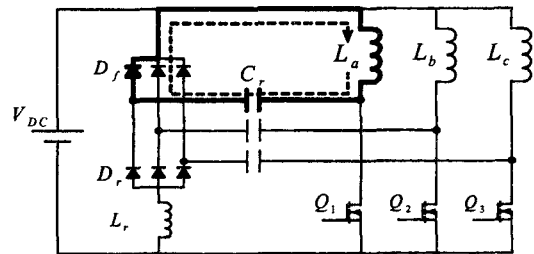


그림 3 동작모드 3
fig. 3 Operational mode 3

동작모드 4

그림 4의 동작모드 4는 한 상의 여자가 종료되고 다음 상을 여자 시키는 전류(Commutation)구간으로 B상 스위치 Q_2 가 턴 온 되면, 초기에 B상의 공진 커패시터에는 어떠한 에너지도 충전되어 있지 않으므로 동작하지 않고 A상의 공진 커패시터 C_r 에 덤프되어 있는 에너지가 다음 상으로 A상권선 L_a 를 통하여 그림 2(d)의 ①과 같은 폐회로를 구성하여 B상을 여자 시키며 이 때 입력전원 V_{DC} 는 차단되고 공진 커패시터 C_r 을 입력전원으로 하여 $V_{Cr}=V_{DC}$ 가 될 때까지 B상을 여자 시킨다.

공진 커패시터 C_r 이 완전히 V_{DC} 가 되면 ②와 같은 폐회로를 구성하여 입력전원으로 B상을 여자 시킨다.

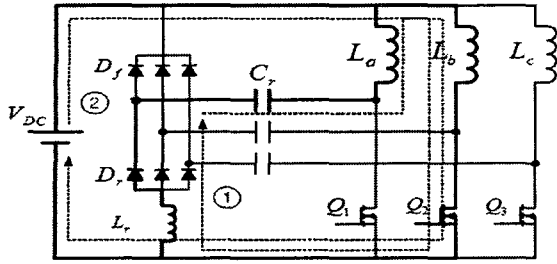


그림 4 동작모드 4
fig. 4 Operational mode 4

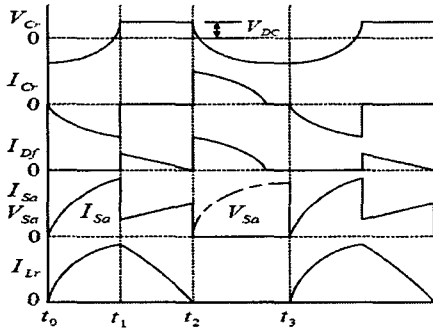


그림 5 각 모드에서의 각 소자별 분석
 $t_0 \sim t_1$: 동작모드 1, $t_1 \sim t_2$: 동작모드 2, $t_2 \sim t_3$: 동작모드 3
Fig.5 Analysis of operational mode
 $t_0 \sim t_1$: operational mode 1, $t_1 \sim t_2$: operational mode 2
 $t_2 \sim t_3$: operational mode 3

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션의 구성

그림 6의 시뮬레이션 회로는 Psim 6.0을 사용하여 실제 구성된 실험회로의 동작원리와 유사하도록 모델링 하였다.

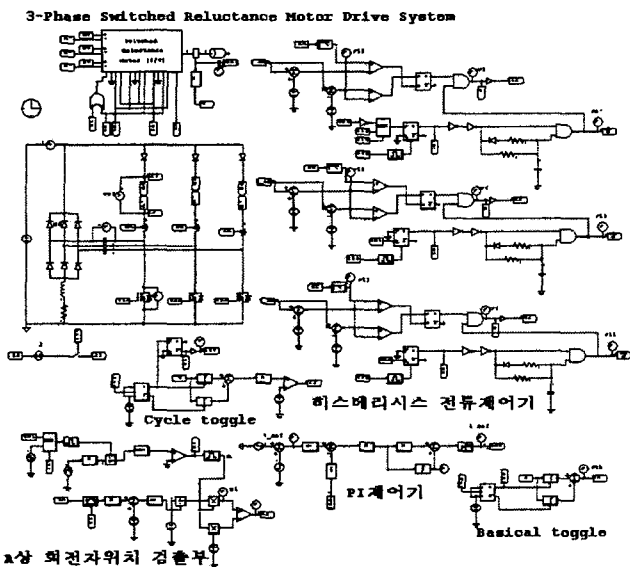


그림 6 전체 시뮬레이션 회로도
Fig.6 Overall simulation circuit

기준전류와 CT에서 검출한 실제전류에 대해 히스테리시스 밴드를 거치게 되는데 시뮬레이션에 사용된 히스테리시스 전류제어기의 밴드 폭은 100mA로 하였다.

시뮬레이션에 사용된 PI제어기는 전류 제한치를 30A로 설정하여 오차 값을 PI제어기를 거쳐 히스테리시스 전류제어기에 기준 값으로 각 상에 인가하여 속도를 제어하도록 하였다.

3.2 시뮬레이션 결과과형

3.2.1 제안된 공진형 C-dump 컨버터의 시뮬레이션 결과
그림 7는 제안된 토폴로지에 의한 500rpm시에 3상 전류파형이다. 토폴로지 특성상 하드쇼핑의 방식을 적용함으로써 LC 시정수의 변화폭이 급격하여 Energy efficient C-dump 컨버터보다 많은 쇼핑이 일어난다. 하지만 그림 8에서 보는바와 같이 영전압, 영전류 스위칭을 함으로써 보다 높은 효율을 얻을 수 있다.

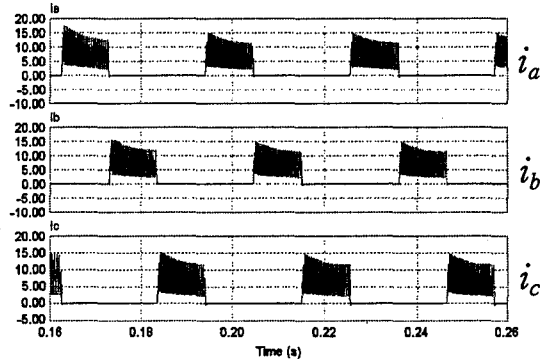


그림 7 500rpm에서의 3상 전류파형
Fig.7 Conventional C-dump 3ph. current(500rpm)

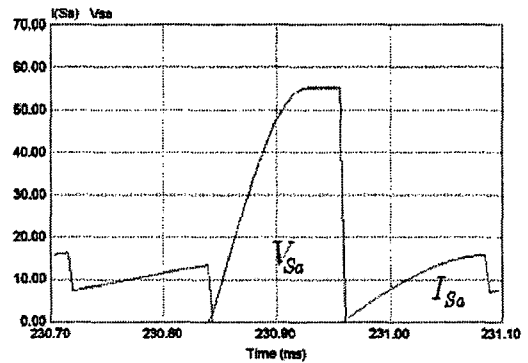


그림 8 한 상의 스위치 전압 및 전류
Fig.8 V, I in a phase switch

4. 실험결과

4.1 전체 시스템 구성도

그림 9은 본 논문에서 사용한 전체 시스템 구성도이다. 컨버터 토폴로지를 제외하고 모든 구성을 동일한 조건하에서 실험하였다.

컨버터의 입력전원은 DC Power supply를 사용하였고, 위치검출을 위하여 600펄스 증분형 엔코더를 사용하였다.

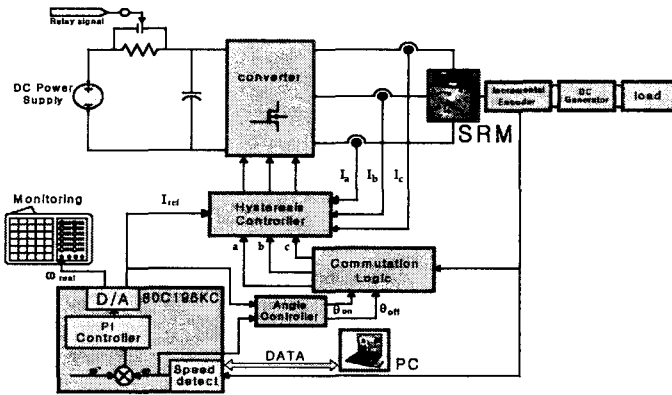


그림 9 전체 시스템 구성도
Fig.9 Overall system block

표1은 실험에 사용된 전동기 파라미터를 나타내고 있다.

표 1 전동기 파라미터
Table 1. Motor parameter

정격 출력	250 [W]	상 권선저항	0.02166 [Ω]
정격 전압	12 [V]	L_{max}	1.332 [mH]
상 수	3 [상]	L_{min}	0.241 [mH]
고정자 극수	6 [pole]	회전자 극수	4 [pole]

4. 2 Energy efficient C-dump 컨버터의 실험 결과파형

그림 10은 500rpm 구동시 3상 전류파형이다. 히스테리시스 전류제어에 의해 일정전류로 제어되고 있음을 확인할 수 있다.

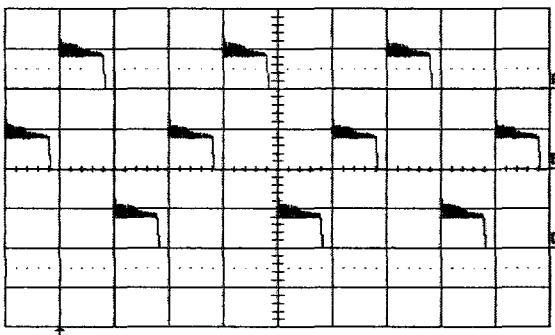


그림 10 500rpm 에서의 3상 전류파형 (10A/div, 10ms)
Fig. 10 Conventional C-dump 3ph. phase(500rpm)
(10A/div, 10ms)

그림 11은 300rpm 구동시 3상 전류파형이다. 그림에서 보듯이 고속 운전시 빠른 전류소호가 이루어지지 않아 꼬리전류가 발생함을 확인할 수 있다.

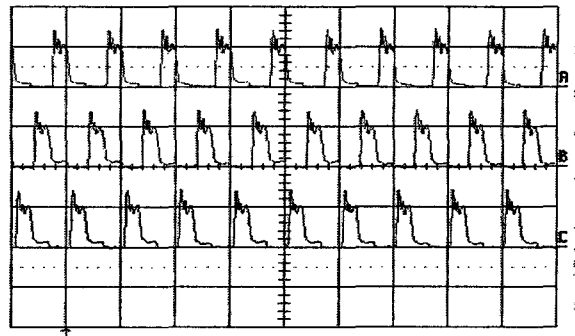


그림 11 3000rpm 에서의 3상 전류파형 (10A/div, 5ms)
Fig.11 Conventional C-dump 3ph. phase(3000rpm)
(10A/div, 5ms)

그림 12는 한 상의 스위치 전압 및 전류파형이다. 그림에서 보는 바와 같이 스위치의 턴온, 턴 오프시 전압 및 전류가 겹치는 부분이 발생한다. 이 부분이 스위치의 전력손실이 되며, 스위칭 수가 증가 할수록 손실은 더욱 커지게 된다. 따라서 이 부분의 손실을 최소화하는 것이 필요하다.

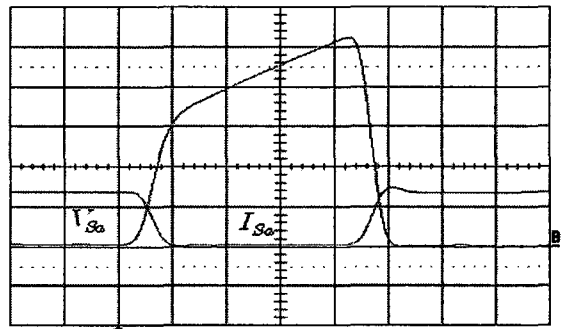


그림 12 한 상의 스위치 전압 및 전류파형
(10V/div, 2A/div, 20us)

Fig.12 V, I in a phase switch (10V/div, 2A/div, 20us)

4.3 공진현 C-dump 컨버터의 실험 결과파형

그림 13은 500rpm에서의 3상 전류파형이다. 하드초핑에 의한 방식이 적용되므로 Energy efficient C-dump 컨버터 보다 히스테리시스 전류제어 폭이 상당히 넓게 이루어진다.

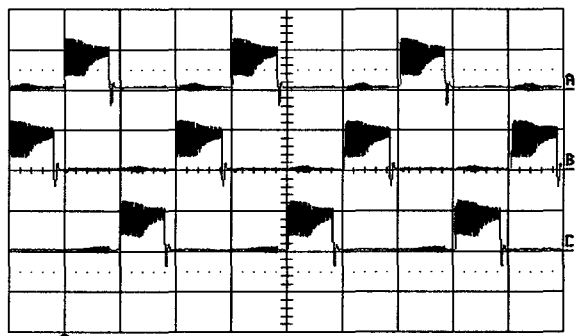


그림 13 500rpm 에서의 3상 전류파형 (10A/div, 10ms)
Fig.13 Conventional C-dump 3ph. phase(500rpm) (10A/div, 10ms)

그림 14는 300rpm에서의 3상 전류파형이다.

히스테리시스 전류제어의 특성으로 고속운전으로 갈수록 한 상의 초핑수는 감소하여 적절한 운전성능을 가진다. 그리고 한 상의 전류시 상전류가 음의 방향으로 증가하다 감소함을 볼 수 있는데, 이것은 A상에 덤프된 에너지가 전류시 다음 상을 여자함으로써 효율을 상승시킨다.



그림 14 3000rpm에서의 3상 전류파형 (10A/div, 5ms)
Fig.14 Current waveform of 3ph. phase(3000rpm) (10A/div, 5ms)

그림 15는 한 상의 스위치 전압 및 전류파형이다. 스위치의 전 온시 ZCS를 이루고 턴 오프시 ZVS 및 ZCS가 이루어 짐을 확인할 수 있다. 하드초핑에 의해서 우려되는 스위치의 손실을 그림 12에서 보는 바와 같이 무손실의 스위칭을 함으로써 Energy efficient C-dump 컨버터보다 높은 성능의 운전이 가능하다.

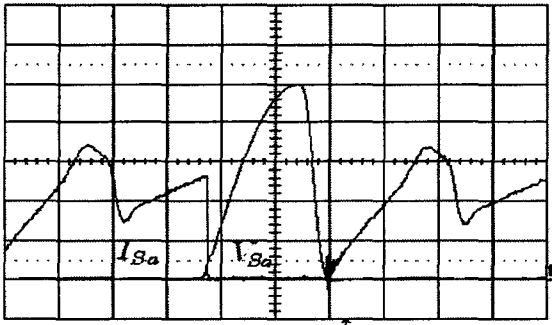


그림 15 한 상의 스위치 전압 및 전류파형
(10V/div, 2A/div, 20us)
Fig.15 V, I in a phase switch
(10V/div, 2A/div, 20us)

5. 결 론

본 논문에서는 SRM의 고성능운전을 위하여 기존 Energy efficient C-dump 컨버터와 제안된 공진형 C-dump 컨버터를 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

단일펄스 형태로 구동하는 종래의 공진형 C-dump

컨버터에서 저속에서 발생하는 토크 맥동문제를 해결하기 위하여 히스테리시스 제어기를 추가하여 구동함으로써 SRM의 가변속 운전성능을 개선하였다.

하드초핑 방식을 적용함으로써 전류(commutation)시 빠른 전류 소호방식을 가지도록 하여 역토크에 의한 전동기의 운전성능 저하를 개선하였다.

하드초핑 방식에 있어서 턴 온, 턴 오프시 발생하는 전압, 전류의 전력손실에 대한 문제를 공진형 컨버터를 적용하여 ZVS, ZCS를 사용함에 따라 전력손실을 최소화 하였다.

기존의 공진형 C-dump 컨버터에서 각 상의 입력단에 연결되어 있는 다이오드를 제거함으로써 소자수를 줄일 수 있었다.

이 논문은 에너지관리공단(2003-0809-000)의 에너지 절약기술개발 사업 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] 안진우, 황영문, "스위치드 릴럭턴스 전동기 구동과 응용", 신진서원, 1998.
- [2] A. Hava, V. Blasko, and T. A. Lipo, "A modified C-dump converter for variable reluctance machines", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 28, Sept./Oct. 1992.
- [3] T. J. E Miller, "Electronic Control of Switched Reluctance Machines", Newnes, 2001.
- [4] Rajarathnam, A.V. Rahman, K.M. Ehsani, M. "Improvement of Hysteresis Control in Switched Reluctance Motor Drives", International Conference IEMD, 1999 pp.537~539
- [5] Yoshihiro Murai and Ji Cheng, "A Simple Soft-Switched Reluctance Motor Drive", Industrial Electronics Society, IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE, Vol.2, 31 Aug.-4 Sept. 1998 pp. 911~916
- [6] 정동효, "Energy efficient C-dump 컨버터에 의한 SRM 구동시스템의 고성능 제어", 성균관대학교 박사학위 논문, 2002.
- [7] 윤용호, "C-dump 컨버터에 의한 차량용 스위치드 릴럭턴스 전동기 구동 시스템의 고성능 제어", 성균관대학교 석사학위 논문, 2002.