

C-dump Converter에 의한 차량용 스위치드 릴럭턴스 전동기 구동 시스템의 고성능제어

김도균, 윤용호, 이태원, 원충연, 김영렬*,
성균관대학교, 안양대학교*

High Performance Control of Switched Reluctance Motor Drive System for Automobiles by C-dump Converter

D.K. Kim, Y.H. Yoon, T.W. Lee, C.Y. Won, and Y.R. Kim*
Sung Kyun Kwan University, An-yang University*

ABSTRACT

Recently, SRMs are used in automobiles for power assistant steering, accessory motion control and traction drives. Especially in the motion control and traction drives, safety and efficiency are of paramount important. The paper describes the essential elements, faced in designing and constructing drive circuits for a switched reluctance motor for automobiles.

These converters will be referred to as energy efficient C-dump converter and modified C-dump converter. Energy efficient C-dump converter topology eliminate all the disadvantages of the C-dump converter without sacrificing its attractive features, and also provide some additional advantages that have lower number of power devices, full regenerative capability, free-wheeling in chopping or PWM mode, simple control strategy, and faster demagnetization during commutation. The experiments are performed to verify the capability of proposed control method on 6/4 salient type SRM.

1. 서 론

우수한 고전압, 대전류, 고속스위칭 반도체 소자의 개발과 전력전자기술의 향상으로 가변전압, 가변주파수 전원을 사용하는 유도전동기의 가변속 전동기구가 증가하고 있다.^{[1][2]}

이러한 추세와 함께 최근에 구조적으로 유도전동기보다 간단하고 구동특성도 우수한 SRM에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.^[7]

본 논문에서는 현재까지 차량에 접화용 스타터, 엔진의 냉각 팬용, 오일펌프 및 냉각순환용의 용도로 사용되는 직류전동기나 BLDC 전동기 대신에 SRM을 사용하여 연구하고자 한다.^[5]

이와 함께 경제성과 회로의 간단한 Modified C-dump 컨버터와 에너지 특성을 살린 Energy efficient C-dump 컨버터를 가지고 250W급 SRM으로 실험하여 시뮬레이션과 비교하였다.

2. Energy efficient C-dump 컨버터

2.1 컨버터 토폴로지

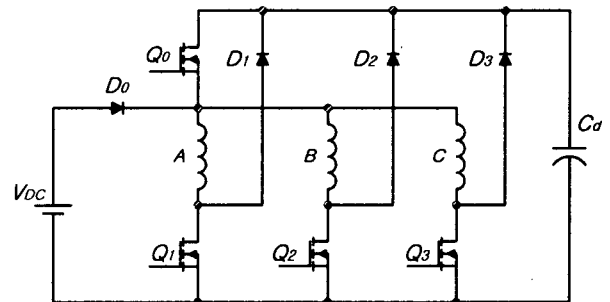


그림 2-1. Modified C-dump 컨버터
Fig 2-1. Modified C-dump converter

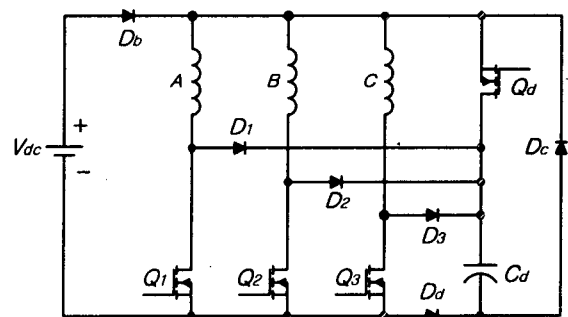


그림 2-2. Energy efficient C-dump 컨버터
Fig 2-2. Energy efficient C-dump converter

그림 2-1은 Modified C-dump 컨버터를 나타내고 그림 2-2는 Energy efficient C-dump 컨버터를 나타내고 있다. 그림 2-2는 상수보다 하나 더 많은

스위치와 다이오드, 덤프커패시터 그리고 전원 측에 직렬로 블러킹 다이오드가 추가되는 구조이다. 모터의 초핑모드 동안에 어떤 복잡한 제어 없이 상전류의 환류가 가능하므로 제어의 단순함을 가져오고 스위칭 소자의 전압정격은 modified C-dump 컨버터에서 공급전압의 2배($2V_{dc}$)가 걸리는 것에 비해 1배(V_{dc})가 걸리므로 컨버터 파워소자에 드는 비용을 줄일 수 있는 장점을 지닌다.

또한, modified C-dump 컨버터에서 가능하지 않았던 각 상전류의 중첩을 가능하게 함으로써 토오크 발생 영역을 충분히 활용할 수 있다.^{[3][4]}

2.2 모드별 해석

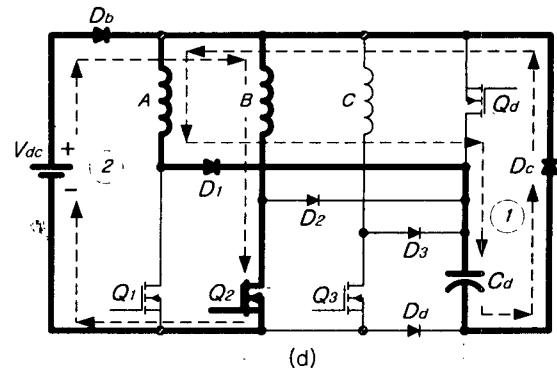
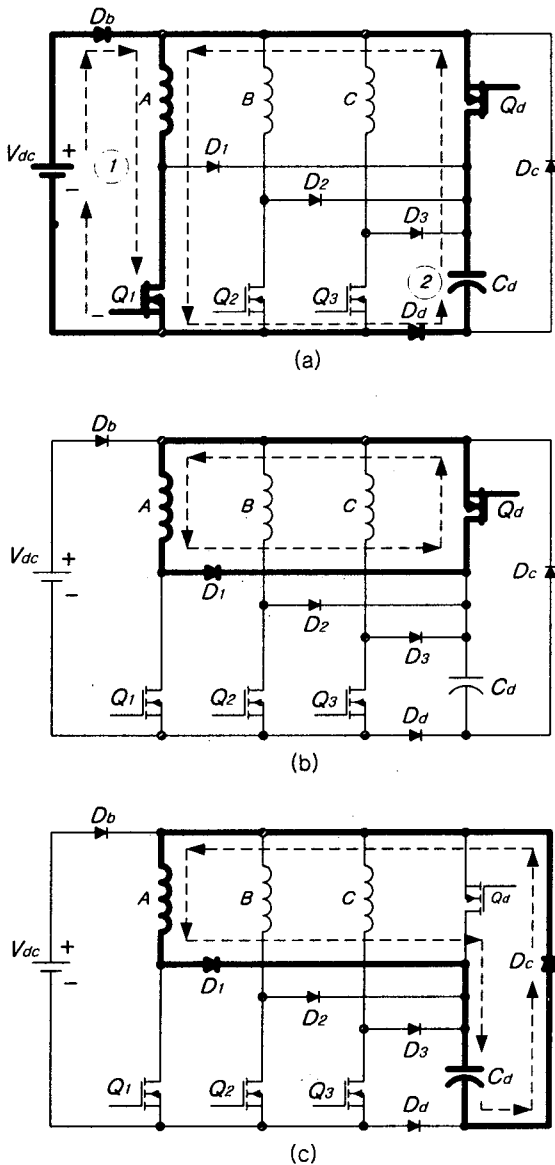


그림 2-3. Energy efficient C-dump 컨버터의 모드

- (a) 전도모드
- (b) 환류모드
- (c) 전류모드-I
- (d) 전류모드-II

Fig 2-3. Operation mode Energy efficient C-dump converter

- (a) Conduction mode
- (b) free-wheeling mode
- (c) commutation mode-I
- (d) commutation mode-II

그림 2-3의 모드 (a)에서 Q_1 과 Q_d 를 턴온시켜 A 상을 여자 한다. 상은 덤프커패시터 C_d 의 에너지에 의해 공급되다가 ② 공급전압레벨까지 감소하게 되면 블러킹 다이오드 D_b 가 정방향 바이어스 되어 공급전압의 에너지가 상으로 공급하게 된다 ①.

이때의 상전류는 스위치 Q_1 이 온과 오프를 스위칭함으로써 일정한 레벨을 유지하게 된다.

모드 (b)에서 보는 바와 같이 Q_1 이 오프될 때 상전류는 스위치 D_1 과 Q_d 를 통해 환류한다.

모드 (c)에서 Q_1 과 Q_d 모두 오프일 때 상권선의 에너지는 커패시터로 충전하게 된다. 커패시터의 전압은 공급전압 V_{dc} 보다 약간 위에서 유지된다. 다이오드 D_d 는 상의 감자시에 전류가 공급 측으로 흐르는 것을 막아준다.

모드 (d)에서 상 A가 감자되는 동안에 Q_2 를 턴온 함으로써 상 B가 여자 될 수 있음을 보여준다. 이것은 상전류가 중첩이 될 수 있음을 의미한다.

2.3 C_d 의 설계

그림 2-4는 energy-efficient C-dump 컨버터의 전류(commutation)시의 등가회로를 나타내고 있다.

권선 저항을 무시하고 상권선에 있는 잔류에너지가 커패시터 C_d 에 충전이 되는 단계가 그림 2-4(a)를 나타내고 이때의 전압 방정식은

$$\frac{d\lambda_{ph}}{dt} + \frac{i}{C_d} \int i_{ph} dt + V_{ci} = 0 \quad (2-1)$$

식 (2-1)과 같다.

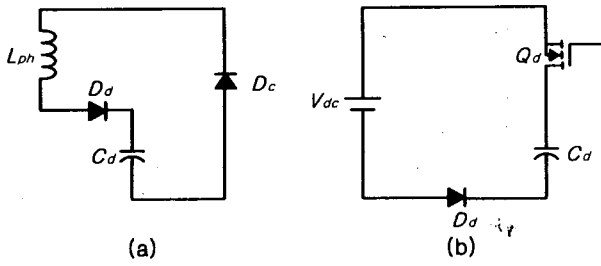


그림 2-4. 전류기간동안의 컨버터의 등가회로
 (a) 상권선의 소자(demagnetization) (b) 커패시터 방전
 Fig 2-4. Equivalent circuit for commutation
 (a) demagnetization of phase winding
 (b) Discharge of Capacitor

식 (2-1)에서 λ_{ph} 는 상권선의 쇠교자속을 나타내고, C_d 는 덤프커패시터의 값, i_{ph} 는 상전류, V_{ci} 는 커패시터의 초기 전압값을 각각 나타내고 있으며 상권선의 포화(saturation)를 무시할 경우 방정식은 식 (2-2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{ph} \frac{di_{ph}}{dt} + i_{ph} \omega \frac{dL_{ph}}{d\theta} + \frac{1}{C_d} \int i_{ph} dt + V_{ci} = 0 \quad (2-2)$$

정렬위치(aligned position)시에 $\frac{dL_{ph}}{d\theta} = 0$ 이고 전류 또한 0 으로 감소하기 때문에 역기전력성분 $i_{ph} \omega \frac{dL_{ph}}{d\theta}$ 는 급속히 0 으로 감소하게 된다.

C_d 에 대한 설계 값은 역기전력성분을 무시하여 얻을 수 있다.

식(2-3)는 식(2-3)에서 역기전력성분 $i_{ph} \omega \frac{dL_{ph}}{d\theta}$ 을 무시할 때의 방정식을 나타내며,

$$i_{ph}(t) = V_{ci} \sqrt{\frac{C_d}{L_{ph}}} \sin\left(\sqrt{\frac{t}{L_{ph} C_d}}\right) + I_o \cos\left(\sqrt{\frac{t}{L_{ph} C_d}}\right) \quad (2-3)$$

상권선의 에너지가 덤프 커패시터로 완전히 충전하는데 소요되는 시간(T_d)은 식 (2-2)와 (2-3)에 의해 구한다.

$$T_d = \sqrt{L_{ph} C_d} \tan^{-1}\left(I_o \sqrt{\frac{L_{ph}}{C_d}}\right) \quad (2-4)$$

식 (2-4)에서 I_o 는 전류(commutation) 초기($t=0$)시의 상전류 값을 나타내며 덤프 커패시터 양단 전압 값의 변화량은 식 (2-5)을 나타내고 있다.

$$\Delta V_c = \frac{1}{C_d} \int_{t=0}^{t=T_d} i_{ph} dt \quad (2-5)$$

식 (2-5)에서 i_{ph} 와 T_d 를 식(2-6)처럼 간단히 나타내어

$$\Delta V_c = \sqrt{V_{ci}^2 + I_o^2 \frac{L_{ph}}{C_d}} - V_{ci} \quad (2-6)$$

식 (2-7)과 같은 덤프 커패시터의 설계 값을 얻을 수 있다.

$$C_d = \frac{I_o^2 L_{ph}}{(\Delta V_c + V_{ci}^2) - V_{ci}^2} \quad (2-7)$$

본 논문에서는 비정렬(Unaligned)상태인 경우,

$$C_d = \frac{I_o^2 \cdot L_1}{(\Delta V_c + V_{ci})^2 - V_{ci}^2} = \frac{16^2 \cdot 1.332mH}{(3+12)^2 - 12^2} \cong 4000\mu F$$

정렬(aligned)상태인 경우,

$$C_d = \frac{I_o^2 \cdot L_1}{(\Delta V_c + V_{ci})^2 - V_{ci}^2} = \frac{16^2 \cdot 0.241mH}{(3+12)^2 - 12^2} \cong 750\mu F$$

로 C_d 의 값을 구하였고, 반복적인 실험을 통하여 $1000\mu F$ 으로 결정하였다.

3. 시뮬레이션

3.1 Modified C-dump 컨버터

그림 3-1은 Modified C-dump 컨버터의 속도를 500rpm에서 1000rpm 지령속도를 주었을 때의 속도응답 파형과 상전류와 덤프 커패시터의 전압 파형이다. 그림 3-2는 속도 1000rpm시의 상전류, 덤프 커패시터 전압, 상전압 파형들을 확대했을 때의 모습이다. 덤프 커패시터의 전압이 입력전압의 2 ($2V_{dc}$)배의 전압이 충전·방전상태를 알 수 있다.

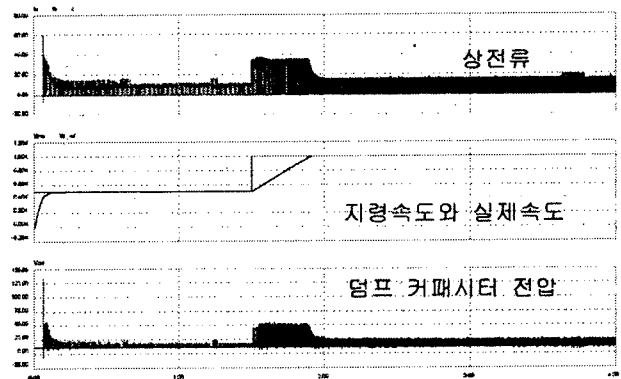


그림 3-1. 500rpm 에서 1000rpm 가변시 각부 파형
 Fig 3-1. Waveforms of each parts from 500rpm to 1000 rpm

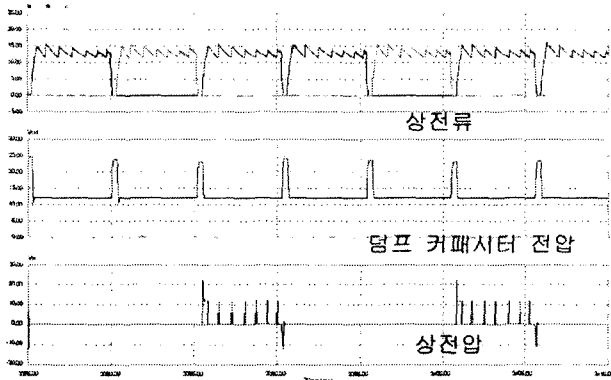


그림 3-2. 1000rpm시 각부 파형
Fig 3-2. Waveforms of each parts at 1000 rpm

3.2 Energy efficient C-dump 컨버터

그림 3-3은 Energy efficient C-dump 컨버터의 속도를 500rpm에서 1000rpm으로 저령속도를 주었을 때의 속도응답 파형과 상전류와 덤프 커패시터의 전압 파형을 보여준다.

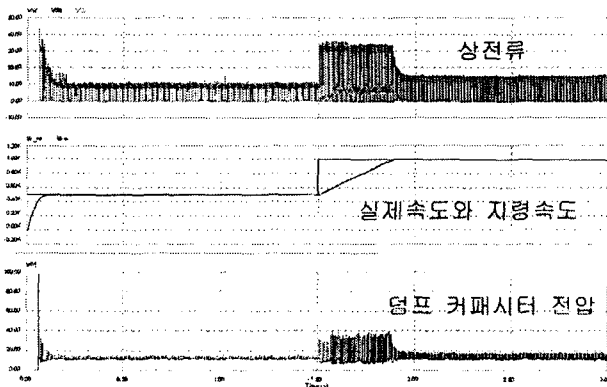


그림 3-3. 500rpm에서 1000rpm시 각부 파형
Fig 3-3. Waveforms of each parts from 500rpm to 1000 rpm

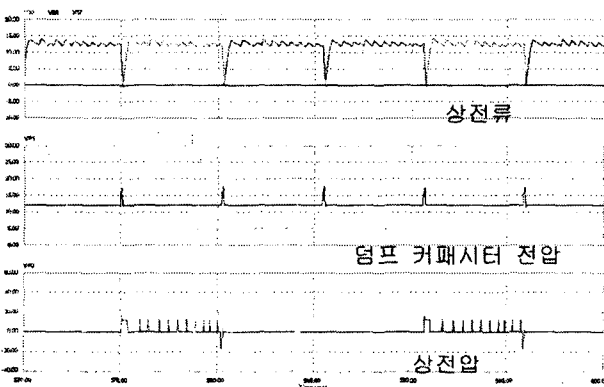


그림 3-4. 1000rpm시 각부 파형
Fig 3-4. Waveforms of each parts at 1000 rpm

그림 3-4는 1000rpm시 확대파형이고 Modified C-dump 컨버터는 덤프 커패시터의 전압이 $2V_{dc}$ 가 나타나는 반면 Energy efficient C-dump 컨버터는 덤프 커패시터의 전압이 입력전압의 1배인 V_{dc} 가 나타나고 각 상의 전류 파형이 중첩이 되는 것을 확인할 수 있다.

각각의 파형을 분석하게 되면 모드 1에서 모드 4까지의 동작을 하고 있는 것을 알 수 있고, 덤프 커패시터에 나타나는 전압은 커패시터 값에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

4. 실험 결과

본 논문에서는 SRM의 가변속 구동을 위하여 PI 제어기를 사용하였다. 전원으로는 12V 배터리 대신 DC power supply와 C-dump 컨버터를 연결하였으며 위치센서는 근사 증분형 엔코더를 사용하였다.

그림 4-1은 전체 시스템의 구성도이고, 표1은 사용된 전동기 사양이다.

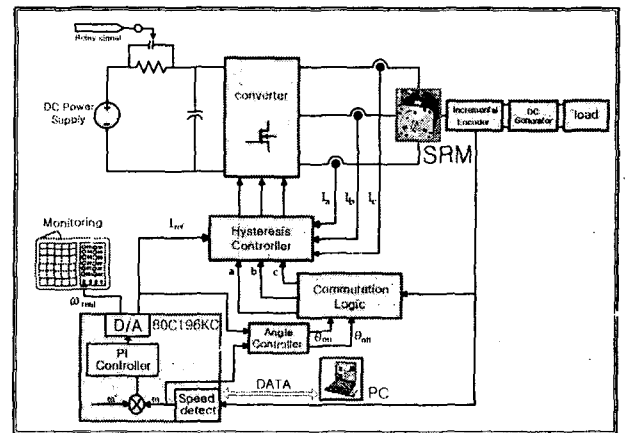


그림 4-1. 전체시스템 구성도
Fig 4-1. An Overall system block

표 1 전동기 사양

Table 1. Motor parameters

정격 출력	250[W]	상 권선저항	0.02166[Ω]
정격 전압	12[V]	최대 인덕턴스	1.332[mH]
상 수	3[상]	최소 인덕턴스	0.241[mH]
고정자 극수	6[pole]	회전자 극수	4[pole]

4.1 Modified C-dump Converter

그림 4-2는 1000rpm을 기준으로 전류 파형과 덤프 커패시터의 충·방전하는 파형으로 공통 스위치와 A상의 스위치가 턴오프하여 권선에 저장되어 있던 에너지와 전

원에너지인 24V가 덤프 커패시터에 공급되다가 공급전압인 12V 레벨까지 감소하게 되면 다음 상인 C상을 여자 시키므로써 덤프 커패시터의 에너지가 방전하는 모습을 볼 수 있다.

그림 4-3은 속도가변에 따른 상전류의 변화를 보여준다.

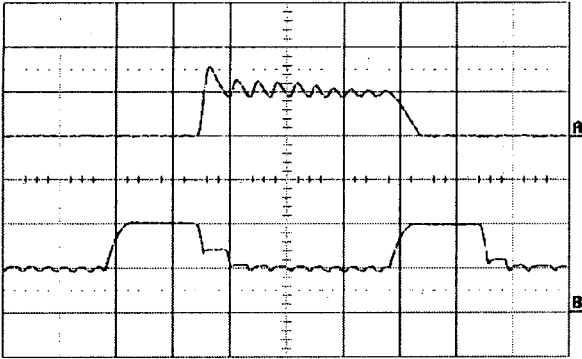


그림 4-2. 상전류와 덤프 커패시터 양단전압 파형
Fig 4-2. Waveforms of phase current and dump capacitor (1000rpm, 10A/div 12V/div, 1ms)

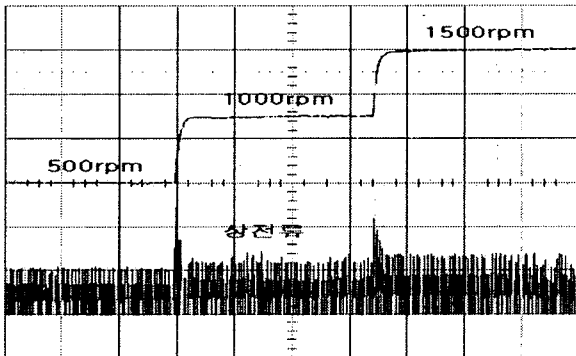


그림 4-3. 속도와 상전류 파형
Fig 4-3. Waveforms of speed and phase current (2s/div, 10A/div)

4.2 Energy efficient C-dump 컨버터

그림 4-4는 1000rpm시 상전류와 덤프 커패시터 양단 전압 파형이다.

커패시터에 인가되는 전압은 입력전압인 12V보다 약간 큰 전압으로 충전하였다가 12V로 방전하는 파형이다.

그림 4-5는 속도가변에 따른 상전류의 변화를 보여준다. 구조상 Modified C-dump 컨버터보다 다이오드 2개 더 추가된 구조로 제어가 약간 더 복잡하다.

그러나 입력전압이 높은 시스템을 사용할 경우 각 소자의 정격사양 선택시 훨씬 더 경제적이고 중첩제어가 가능하여 토크 리플이 적어 소자 수를 줄이고 회로를 간단히 하면서 비대칭 컨버터와 비슷한 효율을 얻을 수 있다.

그림 4-6은 실험에 사용된 SRM 시스템을 보여준다.

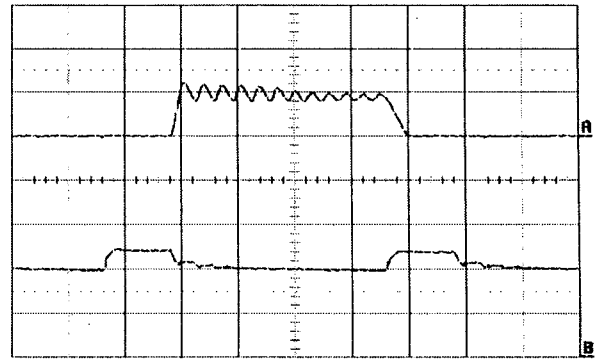


그림 4-4. 상전류와 덤프 커패시터 양단전압 파형
Fig 4-4. Waveforms of phase current and dump capacitor (1000rpm, 10A/div 6V/div, 1ms)

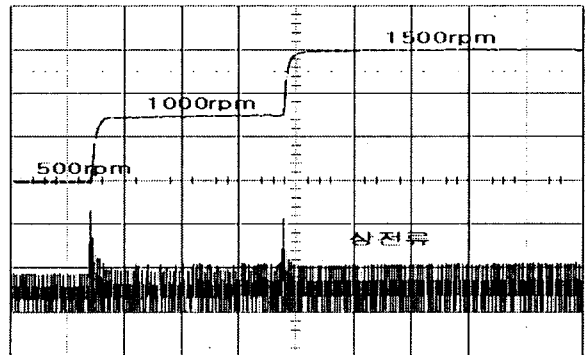


그림 4-5. 속도와 상전류 파형
Fig 4-5. Waveforms of speed and phase current (2s/div, 10A/div)

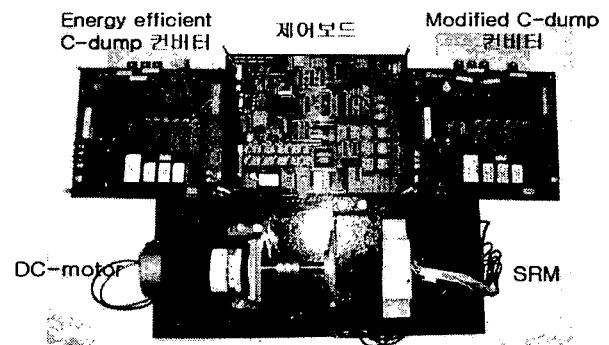


그림 4-6. 실험에 사용된 SRM 시스템
Fig 4-6. SRM system using for experiments

4.3 제어각 변화에 따른 속도 측정

그림 4-7은 부하가 고정된 상태에서 EPROM의 data 값을 바꾸어 가면서 실험을 하여 얻은 값으로 어드밴스 각도가 9.6°일 경우 역기전력과 전원전압의 크기가 같아지게 되어 충분한 전류확보를 가지게 되어 모터의 정격속도를 얻을 수 있어서 어드밴스각을 9.6°로 선택하였고 그림에서 Energy efficient C-dump 컨버터가

Modified C-dump 컨버터에 비해 어드밴스각을 기준으로 하여 볼 때 속도특성이 약간 우수하다는 것을 결과를 얻었다.

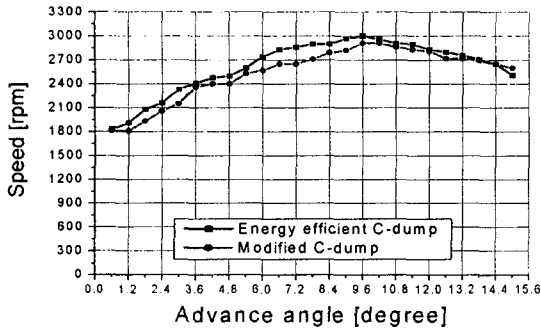


그림 4-7. 어드밴스각의 변화에 따른 두 컨버터의 구동특성
Fig 4-7. Drive characteristic of two converters according to variation of advance angle

4.4 효율 측정

본 논문에서는 컨버터에 따른 SRM 구동시스템의 효율을 측정하는데 목적이므로 컨버터단의 직류입력을 전체 시스템의 입력으로 계산하여 직류전압계와 직류전류계를 정류 다이오드와 필터 커패시터 사이에 설치하여 입력전력을 계산하였다.

즉 정류부의 손실은 무시하였다. 이 실험을 하기 위해 적용된 시스템의 구성도는 그림 4-8과 같다.

출력은 직류발전기의 출력전압과 전류로부터 출력전력을 구한 후 직류발전기의 출력단자를 개방하고 회전시켰을 경우의 무부하 입력을 포함하여 계산하였다. 그 외의 직류발전기에서의 손실은 고려하지 않고 비교하였다.

속도에 따른 효율의 측정을 위하여 마이크로 컨트롤러 내에 PI제어기를 구현하여 인가전압을 초핑함으로써 지령속도를 추종하도록 하였으며, 부하는 지령속도를 추종할 수 있는 상태에서의 최대부하를 인가하였다.

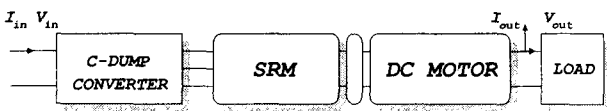


그림 4-8. 효율 측정을 위한 시스템의 구성도
Fig 4-8. SRM system block diagram for measuring efficiency

그림 4-9는 최적의 스위칭각을 앞서 실험으로 얻은 어드밴스각도 9.6°에서 Modified C-dump 컨버터와 Energy efficient C-dump 컨버터를 각각 사용하여 전체 시스템의 효율을 나타내는 것으로 효율은 모두 속도의 증가에 비례하며, Energy efficient C-dump 컨버터가 Modified C-dump 컨버터에 비해서 전체적으로 우수한 효율을 나타내었다.

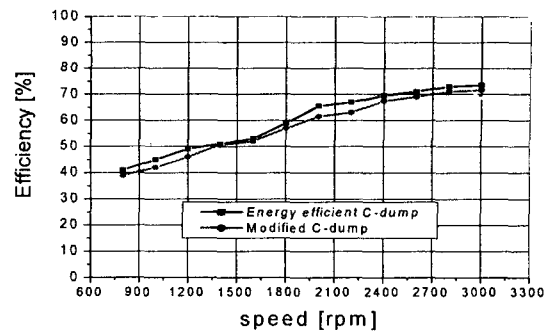


그림 4-9. 전체 시스템 효율
Fig 4-9. Efficiency for overall system

5. 결 론

SRM구동용 위치검출회로를 구성하고 250W급 6/4극 SRM을 스위칭 소자수를 줄이고도 우수한 제어 성능을 얻으며 저 가격이면서 상대적으로 제어성능이 뛰어난 Modified C-dump 컨버터와 Energy efficient C-dump 컨버터를 구동용 컨버터로 사용하여 최대속도, 효율, 최적의 스위칭각을 중심으로 비교하였다.

어드밴스각은 9.6°에서 최적의 스위칭각을 얻었으며 효율은 Energy efficient C-dump 컨버터가 약 4% 향상을 가졌다. 그 결과 차량용 SRM 구동 드라이버로써 Energy efficient C-dump 컨버터가 Modified C-dump 컨버터에 비해서 우수한 제어성능을 얻었다.

이 논문은 과학재단의 연구비 지원(R01-2001-000-00306-0)에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] T. J. E Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Oxford University press, 1993.
- [2] R.Krishnan, " SWITCHED RELUCTANCE MOTOR DRIVES ", CRC Press. 2000.
- [3] 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.
- [4] Sayeed Mir, "Energy efficient C-dump Converters for Switched reluctance Motors", IEEE Transaction on Power Electronics vol. 12, No. 5 1997. pp. 912~921
- [5] Eric Chowanietz, "Automobile Electronics", Newnes, 1995.
- [6] 엄기명, "차량용 SRM의 가변속 구동을 위한 퍼지 제어기 설계", 성균관대학교 석사학위 논문, 2000.
- [7] 송병섭, "개선된 Anti-Windup PI제어기를 이용한 스위치드 릴럭턴스 전동기 속도제어", 성균관대학교 석사학위 논문, 2001.