

SRM 구동을 위한 Energy Efficient C-Dump 컨버터에 관한 연구

최준혁* · 윤용호* · 송병섭* · 원충연* · 김규식** · 최세완***
 성균관대학교* · 서울시립대학교** · 서울산업대학교***

A study on the Energy Efficient C-Dump Converters for Switched Reluctance Motor Drives

J.H. Choi* · Y.H. Yoon* · B.S. Song* · C.Y. Won* · G.S. Kim** · S.W. Choi***
 SungKyunKwan Univ.* · Univ. of Seoul** · Seoul National Polytechnic Univ.***

ABSTRACT

This paper compared a Modified C-dump converter and energy efficient converter topologies, derived from the conventional C-dump converter, for switched reluctance motor (SRM) drives. The proposed topologies overcome the limitations of the conventional C-dump converter, and could reduce the whole cost of the SRM drive. Also, the above converters have simple control requirements, and allow the motor phase current to freewheel during chopping mode. Specially, the voltage ratings of the dump capacitor and some of the switching devices in the proposed an Energy efficient C-dump converter is reduced to the supply voltage (V_{dc}) level compared to twice the supply voltage ($2V_{dc}$) in the conventional C-dump converter. Simulation and experimental results of the proposed converters are presented and verified.

1. 서 론

SRM의 토크는 자기회로의 릴럭턴스의 변화에 의해 발생되며 효과적인 정토크의 생성과 역토크의 억제에 위하여 고정자의 각 상에 회전자의 위치에 따른 적절한 스위칭을 필요로 한다. 따라서 SRM의 구동을 위한 컨버터회로와 위치센서가 필요하며 지금까지 여러 종류의 컨버터 토폴로지가 제안되었다. 이러한 컨버터 토폴로지는 각각 그 성능 및 경제성에서 장단점을 가지고 있다. 특히 산업응용분야에서 모터와 드라이브의 설계시 비용은 중요한 요소이다. SRM의 구동회로에서 단순함, 저비용, 강인한 컨버터의 요구가 증가하고 있다. 현재 산업분야에 널리 사용되고 있는 유도전동기나 직류전동기와 경쟁하기 위해서는 컨버터의 스위치수를

최소화시키면서도 성능면에서도 우수한 컨버터 토폴로지의 개발이 필요하다. 구동용 컨버터로는 제어성능 및 효율이 가장 우수한 비대칭 브리지 컨버터 토폴로지가 널리 사용되고 있지만 한 상당 2개의 스위치와 2개의 다이오드가 필요한 상대적으로 가장 많은 소자를 필요로 하여 비용이 많이 드는 단점이 있다. 이에 반해 C-dump 컨버터는 상대적으로 효율이 높으면서 경제적인 구동회로로 알려져 있다.^{[1],[2]}

그림 1의 C-dump 회로는 상수보다 하나 더 많은 스위치 및 다이오드를 지니고, 부가적으로 덤프 커패시터와 인덕터를 추가하는 구조로서 에너지를 덤프커패시터에 저장하였다가 인덕터를 통하여 직류전원으로 환원하는 방식이다. 특히 상의 감자시 빠른 전류의 하강으로 인해 역토크의 발생을 최소화하는 특징을 가지고 있다. 그러나 덤프 커패시터에 흐르는 전류로 인하여 상대적으로 높은 전압 정격의 소자가 필요하며 제어가 복잡하고 부가된 보조회로에 의해 신뢰성이 낮아지는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존의 C-dump 컨버터에서의 장점을 살리고 단점을 보완한 modified C-dump 컨버터와 Energy efficient C-dump 컨버터를 시뮬레이션과 실험을 통하여 비교·분석하였다.

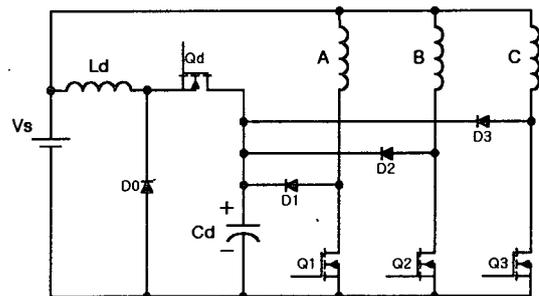


그림 1 기존의 C-dump 컨버터
 Fig. 1 The conventional C-dump converter

2. 본 론

2.1 보완된 C-dump 컨버터

그림 2는 기존의 C-dump 컨버터를 보완한 modified C-dump 컨버터이다. 그림에서 보는 바와 같이 상수보다 하나 더 많은 스위치 및 다이오드를 가지고 부가적으로 커패시터가 추가되는 구조로 기존의 인덕터를 제거하여 에너지를 커패시터에 저장하였다가 바로 다음상의 여자시에 전달하는 방식의 컨버터로서 제어의 복잡성을 개선시켰다.

전류확립시 인가전압의 2배의 덤프 커패시터 전압을 이용하므로 빠른 전류의 확립을 가져올 수 있는 장점을 가진 반면 한 상의 전류가 완전히 소호된 후 다음 스위치를 여자시켜야 되므로 상전류의 중첩을 시킬 수 없어 토오크 발생영역을 충분히 활용하지 못하고 공통스위치의 높은 정격과 발열문제를 안고 있다.

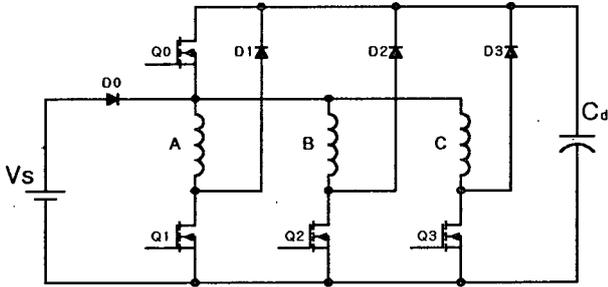


그림 2 보완된 C-dump 컨버터
Fig. 2 Modified C-dump converter

1) 동작모드 :

그림 3의 (a) 모드에서 Q1을 턴온시켜 상권선을 여자시킨다. 전원전압이 초기 커패시터 충전전압보다 큰 경우(①)와 작은 경우(②)의 두 가지로 나눌 수 있다. (b) 모드에서는 Q1을 턴 오프하여 전류를 환류하는 단계이다. (c) 모드에서는 Q1과 Q0 모두 턴 오프된 경우로서 권선에 저장되어 있던 에너지와 전원 에너지가 덤프 커패시터에 저장된다.

(d) 모드에서 다음 여자 될 상은 덤프 커패시터 에너지에 의해 공급되다가(①) 공급전압 레벨까지 감소하게 되면 블러킹 다이오드 D0가 정방향 바이어스 되어 공급전압 에너지가 상으로 공급되기 시작한다.(②)

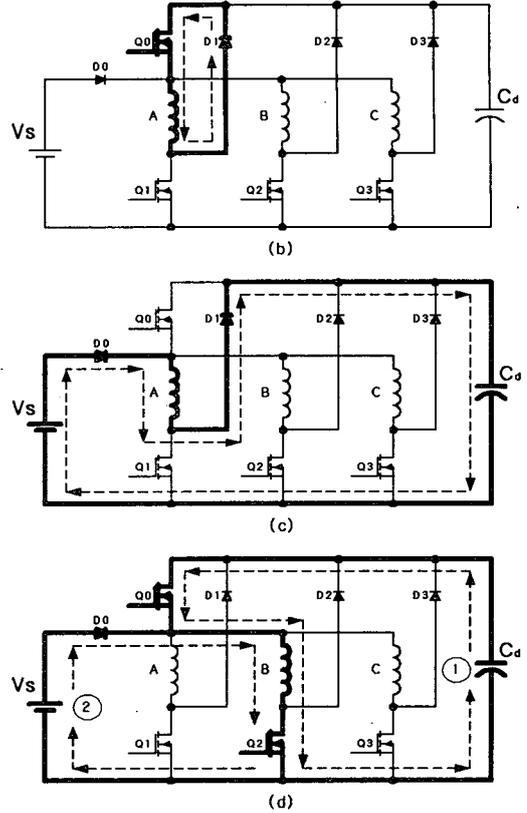
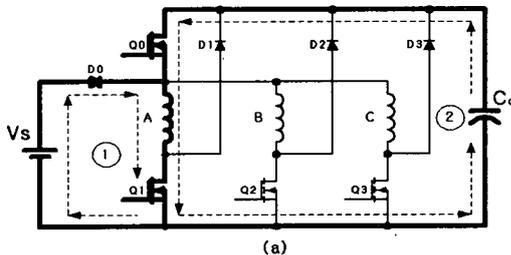


그림 3 보완된 C-dump 컨버터의 각 모드

2.2 Energy efficient C-dump 컨버터

그림 4에서 Energy efficient C-dump 컨버터를 나타내었다. 상수보다 하나 더 많은 스위치와 다이오드, 덤프커패시터 그리고 전원측에 직렬로 블러킹 다이오드가 추가되는 구조이다. 모터의 초평모드 동안에 어떤 복잡한 제어없이 상전류의 환류가 가능하므로 제어의 단순함을 가져오고 스위칭 디바이스의 전압정격은 기존의 C-dump 컨버터나 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.

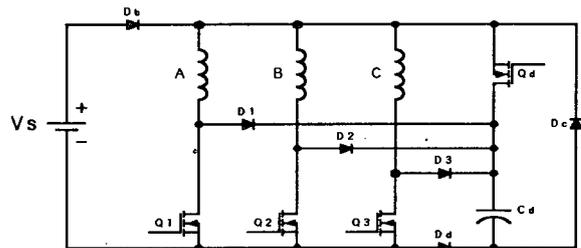
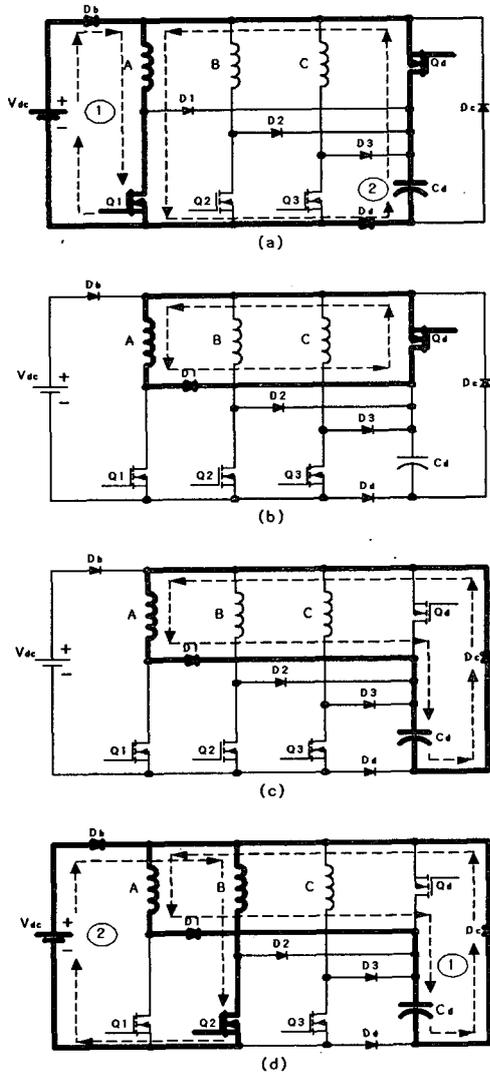


그림 4 Energy efficient C-dump 컨버터
Fig. 4 Energy efficient C-dump converter

1) 동작모드 :

그림 5의 모드 (a)에서 Q1과 Qd를 턴온시켜 A 상을 여자한다. 상은 덤프커패시터 Cd의 에너지에 의해 공급되다가(②) 공급전압레벨까지 감소하게 되면 블러킹다이오드 Db가 정방향 바이어스 되어 공급전압의 에너지가 상으로 공급하게 된다(①). 이때의 상전류는 스위치 Q1이 온과 오프를 스위칭함으로써 일정한 레벨을 유지하게 된다. 모드 (b)에서 보는 바와 같이 Q1이 오프될 때 상전류는 스위치 D1과 Qd를 통해 환류한다. 모드 (c)에서 Q1과 Qd 모두 오프일 때 상권선의 에너지는 커패시터로 충전하게 된다. 커패시터의 전압은 공급전압 Vdc 보다 약간 위에서 유지된다. 다이오드 Dd는 상의 감자시에 전류가 공급측으로 흐르는 것을 막아준다. 모드 (d)에서 상 A가 감자되는 동안에 Q2를 턴온함으로써 상 B가 여자될 수 있음을 보여준다. 이것은 상전류가 중첩이 될 수 있음을 의미한다.



· 그림 5 Energy efficient C-dump 컨버터의 모드
 (a) 전도모드 (b) 환류모드
 (c) 전류모드-I (d) 전류모드-II

2) 덤프커패시터 Cd의 선정^[2]

그림 5의 모드 (c)에서 상저항을 무시하고 미분 방정식을 세우면 식 (1)과 같다.

$$\frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_d} \int i_1 dt + V_{ci} = 0 \quad (1)$$

Vci는 초기 커패시터전압이다. 식 (1)을 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 \omega \frac{dL_1}{d\theta} + \frac{1}{C_d} \int i_1 dt + V_{ci} = 0 \quad (2)$$

여기서 역기전력항은 정렬위치에서 회전자 위치각에 대한 L의 변화율이 영이므로 역기력은 영으로 빠르게 감소한다. 따라서 식 (2)에서 역기전력항을 무시하고 식 (3)으로 표현된다.

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_d} \int i_1 dt + V_{ci} = 0 \quad (3)$$

$$i_1(t) = V_{ci} \frac{C_d}{\sqrt{L_1 C_d}} \sin \frac{t}{\sqrt{L_1 C_d}} + I_o \cos \frac{t}{\sqrt{L_1 C_d}} \quad (4)$$

상권선의 에너지가 덤프 커패시터로 완전히 방전되기 위한 시정수 Td는 식 (4)에서 유도되며 식 (5)로 주어진다.

$$T_d = \sqrt{L_1 C_d} \tan^{-1} \left(\frac{I_o \sqrt{\frac{L_1}{C_d}}}{V_{ci}} \right) \quad (5)$$

$$\Delta V_c = \frac{1}{C_d} \int_0^{T_d} i_1 dt \quad (6)$$

$$C_d = \frac{I_o^2 L_1}{(\Delta V_c + V_{ci})^2 - V_{ci}^2} \quad (7)$$

식 (6)은 덤프커패시터의 변화율을 나타내며 식 (7)을 통해 커패시터의 용량을 선정할 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 실험

3.1 시뮬레이션

시뮬레이션은 PSIM 4.1 버전을 사용하였으며 그림 6에 시스템 구성도를 나타내었다. 그림 7과 8에 연구된 두 컨버터의 상전류와 덤프커패시터 양단전압 파형이다.

Modified C-dump 컨버터의 커패시터 양단전압이 공급전압의 2배가 걸리는 것에 비해 Energy C-dump 컨버터는 1배가 됨을 확인할 수 있고 상전류의 중첩이 Energy C-dump 컨버터에만 이루어짐을 볼 수 있다

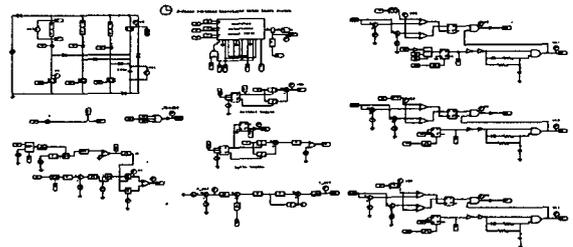


그림 6 Energy efficient C-dump 컨버터의 시뮬레이션 구성도

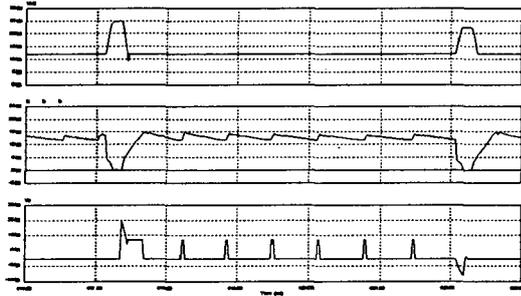


그림 7 Modified C-dump 컨버터의 덤프커패시터 양단전압, 상전류, 상전압 파형 (1000rpm)

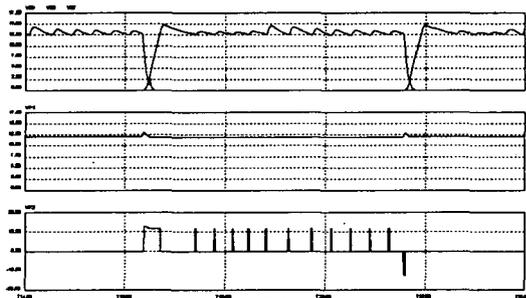


그림 8 Energy efficient C-dump 컨버터의 상전류와 덤프커패시터 양단전압 파형 (1000rpm)

3.2 실험

본 논문의 실험은 12V, 250W, 6/4pole SRM을 이용하였다. 시스템 구성은 80c196kc를 사용하여 증분형 엔코더에서 나온 펄스로 속도를 계산하고, 엔코더 신호와 EPROM에 저장된 데이터를 이용해 회전자 위치를 알아낼 수 있도록 하였으며 히스테리시스 전류제어를 하였다.

그림 9, 10에 두 컨버터의 상전류와 덤프커패시터, 상권선전압 파형이 보여진다. 시뮬레이션 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있음을 볼 수 있다.



그림 9 Modified C-dump 컨버터의 각부 파형(1000rpm)
A : 덤프 커패시터 양단전압(10V/div) (1ms)
B : 상전류(10A/div) C : 상권선전압(10V/div)

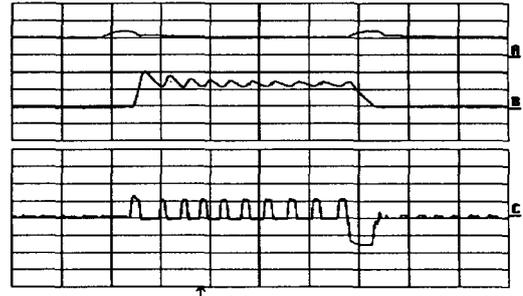


그림 10 Energy efficient C-dump 컨버터의 각부 파형 (1000rpm) (1ms)

A : 덤프 커패시터 양단전압(10V/div)
B : 상전류(5A/div) C : 상권선전압(10V/div)

4. 결 론

본 논문에서는 스위치드 릴럭턴스 모터 구동을 위해 기존의 C-dump 컨버터로부터 유도된 Modified C-dump 컨버터와 Energy efficient C-dump 컨버터 토폴로지 두가지를 비교·분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 연구된 컨버터 토폴로지는 기존의 C-dump 컨버터에 비해 저비용이며 제어가 단순해진다.
- 2) Energy efficient C-dump 컨버터의 스위칭 디바이스의 전압정격은 기존의 C-dump 컨버터에서 공급전압의 2배($2V_{dc}$)가 걸리는 것에 비해 1배로(V_{dc})가 걸리므로 파워소자의 비용을 줄이는 장점을 가진다.
- 3) 상전류의 중첩을 가능하게 함으로써 더욱 우수한 성능을 나타내었다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-00306) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] Sayeed Mir, "Energy efficient C-dump Converters for Switched reluctance Motors," *IEEE Transaction on Power Electronics* vol. 12, No. 5 1997. pp. 912 ~ 921
- [3] 김기운, "스위치드 릴럭턴스 전동기의 경제적인 구동 시스템에 관한 연구", 성균관대 석사학위논문, 1995.
- [4] 안영주, 안진우, 조철제, 황영문, "SRM 구동을 위한 새로운 C-dump 인버터 개발", 대한전기학회 논문지, 제43권 9호, pp. 1472~1477, 1994. 9.