

## SRM 구동을 위한 향상된 C-Dump 컨버터

김중철, 이동윤, 허진, 현동석  
 한양대학교 전기공학과, 전자부품연구원

### An Improved C-Dump Converter for Switched Reluctance Motors

Chong-Chul Kim, Dong-Yun Lee, Jin Hur, Dong-Seok Hyun  
 Dept. of Electrical Eng. Hanyang University, Korea Electronics Technology Institute.

**Abstract** - This paper presents an improved C-Dump converter system for switched reluctance motors (SRM). The proposed C-Dump converter derived from the conventional converter for SRM. The proposed converter could overcome the limitation of the conventional C-Dump converter, and could reduce the whole cost of the SRM system since the voltage stress of the dump switch  $T_d$  is reduced to  $V_{dc}$  when compared with  $2V_{dc}$  for the conventional C-Dump converter. The attractive features of the proposed converters are; high-efficient and low-cost, elimination of dump inductor, simple control strategy, smaller size and light weight. The proposed converter is able to be fast magnetization by  $2V_{dc}$ , which is sum of the input voltage and charging voltage of the dump capacitor. Also, this topology has many advantages such as freewheeling of phase winding without complex control, reduction of current ripple, reduction of torque ripple, and reduction of switching frequency. Simulation demonstrates the good performance of the converter.

#### 1. 서론

일반적으로 산업응용분야에서 모터와 드라이브의 선택에 있어 가장 중요한 것은 그 분야에 적합한 고효율 저비용의 시스템이다. 이러한 관점에서 Switched Reluctance Motor(SRM)은 가변-속도 뿐만 아니라 서보 모터 형태의 적절한 응용을 위해 간단하고 저비용이며 강한 모터로 현재 이에 대한 많은 연구가 활발히 진행중에 있다. SRM은 이중 돌극 구조로 릴럭턴스 토오크를 이용하여 구동하므로 비교적 큰 토오크 리플을 갖게 된다[1]-[2]. 따라서 토오크 리플 감소를 위한 SRM의 효과적인 구동을 위해서는 적절한 스위칭이 요구된다. 뿐만 아니라 전체 시스템의 고효율 및 저비용의 구현을 위해서는 SRM의 제어를 위한 컨버터 연구가 매우 중요하다. 따라서 SRM의 구동을 위한 여러 종류의 컨버터 회로가 제안되어 왔다[3]-[6]. 이들 회로 중에서 SRM의 구동용 컨버터로는 각 상을 독립적으로 제어할 수 있는 제어성능 및 효율이 가장 우수한 비대칭 브리지 컨버터 회로가 널리 사용되고 있다[3]. 그러나 이 회로는 다음과 같은 단점이 있다. 컨버터 시스템의 구성은 한 상당 2개의 스위치와 2개의 다이오드가 사용되므로 컨버터 시스템의 비용이 증가하게 되는 문제점을 가지게 되고 저전압 응용에 있어서는 2개의 전력용 반도체 소자를 동시에 도통하게 되는 것은 스위칭 소자의 도통손실 및 효율을 감소하게 되는 심각한 문제점을 가지게 된다. 앞의 회로를 보완하여 제안된 기존의 C-Dump 컨버터는 상 수보다 하나 더 많은 스위치 및 다이오드를 지니고 부가적으로 dump 커패시터와 인덕터를 추가하는 구조로서 에너지를 dump 커패시터에 저장하였다가 인덕터를 통하여 직류전원으로 환원하는

방식이다[5]. 이러한 방식은 빠른 상의 감자를 이루기 위해 dump 커패시터의 전압( $2V_{dc}$ )을 증가시켜야만 한다. 따라서 부가된 회로의 전압 정격이 증가하게 되며 이로 인한 보조 회로의 신뢰성이 감소하게 되는 문제점을 가지고 있다. 이 문제점을 해결하고자 최근 Energy-Efficient C-Dump 컨버터가 제안되어 활발히 연구 되어지고 있다[6]. Energy-Efficient C-Dump 컨버터는 기존의 C-Dump 컨버터의 단점인 dump 커패시터의 전압( $2V_{dc}$ )을 입력전원과 같은 전압( $V_{dc}$ )으로 감소시켜 dump 스위치의 전압정격도 감소시킬 뿐만 아니라 dump 인덕터를 제거하는 장점을 가지고 있다. 하지만 dump 다이오드 및 blocking 다이오드의 증가로 컨버터 시스템의 비용을 증가시킬 뿐만 아니라 도통손실이 증가하게 되는 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 새로운 향상된 고효율 C-Dump 컨버터를 제안하였다. 본 논문에서 제안한 고효율 C-Dump 컨버터는 시스템의 효율의 증가 및 이를 통한 컨버터 시스템의 소형·경량화를 추구하고 dump 커패시터의 전압 정격을 감소시켜 저 비용의 컨버터 시스템을 구현하며 저전압 응용을 위한 전력용 반도체 소자의 순방향 전압강하를 감소되는 특징을 가지고 있다. 제안한 향상된 고효율 C-Dump 컨버터의 그 타당성을 검증시키기 위해 시뮬레이션을 통하여 증명하였다.

#### 2. 본론

##### 2.1 기존 컨버터들의 비교

###### 2.1.1 비대칭 컨버터

그림 1은 비대칭 컨버터를 나타내었다. 이 컨버터는 상당 2개의 스위치와 다이오드를 사용하는 구조로서 상 독립과 완전재생능력이 뛰어난 컨버터로 보편적으로 가장 많이 사용되고 있다. 하지만 한 상당 전력용 소자의 수가 증가하여 비용이 증가하고 도통시 전력용 소자(2개)에 걸리는 switch의 순방향 전압강하가 생기는 단점이 있다.

###### 2.1.2 기존의 C-Dump 컨버터

그림 2는 기존의 C-dump 컨버터를 나타내었다. 상수보다 하나 더 많은 스위치와 다이오드, dump 커패시터와 dump 인덕터로 구성되어 있다. 상권선의 에너지를 dump 커패시터에 저장하였다가 인덕터를 통하여 직류전원으로 환원하는 방식이다. 하지만 이 방식은 빠른 상권선의 감자를 위해 dump 커패시터의 전압이 직류입력전압의 두 배가 되어야하

로 추가된 회로의 전압정격이 올라가는 문제를 발

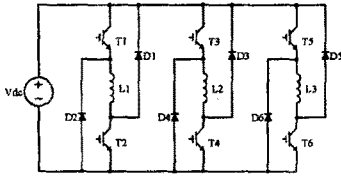


그림 1. 비대칭 컨버터  
Fig. 1 The Classic Bridge Converter

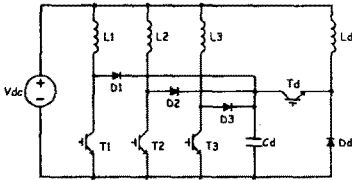


그림 2. 기존의 C-Dump 컨버터  
Fig. 2 The Conventional C-Dump Converter

생할 뿐만 아니라 이로 인한 회로의 신뢰성을 감소시키는 문제점을 가지고 있다.

### 2.1.3 기존의 Energy-Efficient C-Dump 컨버터

그림 3은 기존의 Energy-Efficient C-Dump 컨버터를 나타내었다. 회로의 구성은 상수보다 하나 더 많은 4개의 전력용 반도체 스위치와 3개의 주 다이오드, dump 커패시터 그리고 3개의 다이오드로 구성되어 있으며 여기서  $D_b$ 는 직류전원으로서의 energy 환원을 막기 위한 blocking 다이오드로서의 역할을 수행하고 있다. Dump 커패시터의 전압은 빠른 감자와 dump 스위치의 전압정격을 감소시키기 위해 입력 전압과 동일한 전압으로 제어되어 거의 일정하게 유지된다. 이 컨버터는 제어의 용이함 및 입력전압과 동일한 dump 커패시터의 전압, 이로 인한 dump 스위치가 낮은 전압정격을 갖는다는 등의 좋은 특성을 가지고 있다. 그러나 추가적인 다이오드의 증가로 인한 전체 컨버터의 비용이 증가하는 문제점이 있다. 이러한 문제점으로 위의 장점에도 불구하고 많은 산업응용분야에 이용되지 못하는 이유가 된다.

### 2.2. 제안한 향상된 C-Dump 컨버터

그림 4는 본 논문에서 새롭게 제안한 C-Dump 컨버터 회로를 나타내고 있다. 회로의 구성은 상수보다 하나 더 많은 4개의 전력용 반도체 스위치와 3개의 주 다이오드, dump 커패시터 그리고 1개의 다이오드로 구성되어 있으며 기존의 컨버터보다 다이오드가 현저히 감소됨을 알 수 있다. 상권선의 energy는 주 다이오드를 통해 dump 커패시터  $C_d$ 로 직접 dump되며, 입력전원측은 blocking 다이오드  $D_b$ 에 의해 감자시 경로에 포함되지 않으므로 dump 커패시터  $C_d$ 의 전압을  $V_{dc}$ 로 제어하려고 할지라도 상권선의 빠른 감자를 이룰 수 있다. Dump 스위치  $T_d$ 의 전압정격을 dump 커패시터의 전압( $V_{dc}$ )과 동일한 전압정격으로 사용가능하며 기존의 C-Dump 컨버터보다 낮은 전압정격을 갖게 된다. 제안된 컨버터는

입력 전원측의 전압( $V_{dc}$ )과 dump 커패시터에 충전된 전압( $V_{dc}$ )의 합, 즉  $2V_{dc}$ 로 빠르게 상권선의 여자가 가능하고 초평모드 동안 복잡한 제어없이 dump 스위치를 이용하여 상권선의 freewheeling이 가능하며 또한 전류 리플의 감소, 토오크 리플 저감 및 스위칭 주파수가 감소되는 장점이 있다. 그림5는 제안된 컨버터의 4가지 동작 모드를 보여주며 각 모드별 세부 동작 설명과 방정식은 다음과 같다.

$$S_1 = \frac{R}{2L_1} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L_1}\right)^2 - \frac{1}{L_1 C_d}} \quad (1)$$

$$S_2 = \frac{R}{2L_1} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L_1}\right)^2 - \frac{1}{L_1 C_d}} \quad (2)$$

(a) 여자 모드 :  $T_1$ 과  $T_d$ 를 동시에 턴-온 시켜 직류전원과 dump 커패시터  $C_d$ 에 충전된 에너지( $2V_{dc}$ )가  $L_1$ 상 권선을 여자 시킨다. 직류 전원측의 전압( $V_{dc}$ )과 dump 커패시터에 충전된 전압( $V_{dc}$ )의 합, 즉  $2V_{dc}$ 로 빠르게 상 권선을 여자 시킨다.

$$i_a(t_1) = Ae^{S_1 t_1} + Be^{S_2 t_1} \quad (3)$$

$$A = \frac{2V_{dc} - S_1 I_0}{S_1 - S_2} \quad B = \frac{2V_{dc} - S_2 I_0}{S_2 - S_1} \quad (4)$$

(b) 초평 모드 : 이 모드에서는  $T_1$ 을 턴-오프 하고  $T_d$ 를 턴-온 상태를 유지하여 freewheeling시킨다. 이 때 상전류는  $T_1$ 의 턴-온과 턴-오프로 일정레벨을 유지한다.

(c) 구동 모드 :  $T_1$ 과  $T_d$ 는 모두 턴-오프 상태이다. 이 모드에서는  $L_1$  상권선에 여자된 에너지를 dump 커패시터  $C_d$ 로 충전시키는 동작이 이루어진다. 이 때 dump 커패시터 전압은 직류입력전압과 거의 동일하다.

$$i_a(t_3) = Ae^{S_1 t_3} + Be^{S_2 t_3} \quad (5)$$

$$A = \frac{S_1 I_0}{S_1 - S_2} \quad B = \frac{S_2 I_0}{S_2 - S_1} \quad (6)$$

(d) 감자 모드 :  $T_d$ 는 초기값인  $V_{dc}$ 가 될 때까지 턴-오프 상태를 유지하고  $T_2$ 를 턴-온 시켜서 다음상인  $L_2$  상권선을 여자시킨다. 이것은 상전류가 증첩됨을 알 수 있다.

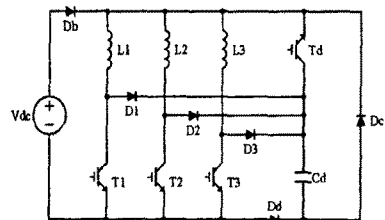
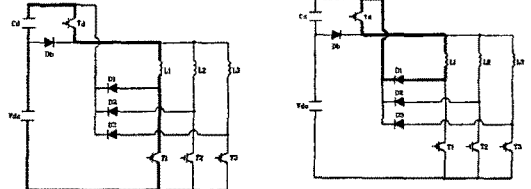


그림 3. 기존의 Energy-Efficient C-Dump 컨버터  
Fig. 3 The Conventional Energy-Efficient



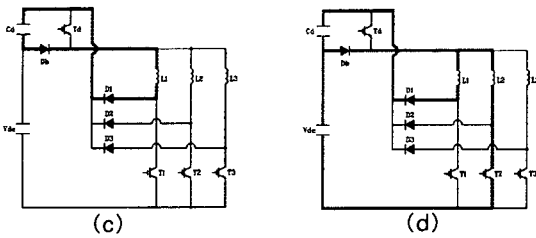
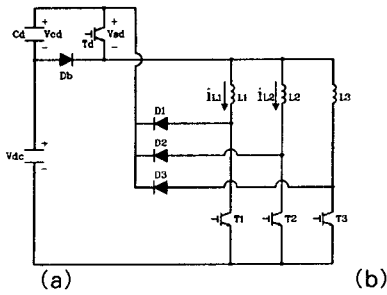


그림 5 제안된 C-Dump 컨버터의 동작  
Fig. 5 Operation of the proposed C-Dump Converter

(a) 여자 모드 (b) 초핑 모드  
(c) 구동 모드 (d) 감자 모드

### 3. 시뮬레이션 결과

그림 6은 시스템 구성도를 나타내었다. 그림 7에 제안된 향상된 컨버터의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 그림 7(a)는 상권선에 흐르는 전류 파형을 나타내고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 빠른 감자와 우수한 제어특성을 보여주고 있다. 그림 7(b)에 dump 커패시터  $C_d$ 의 전압 파형을 나타내었다. 커패시터 전압이 직류전원의 전압과 거의 일치함을 알 수 있다. 그림 7(c)는 dump 스위치  $T_d$ 의 전압파형을 나타낸 것이다. Dump 커패시터  $C_d$ 의 전압 파형과 동일함을 알 수 있으며  $V_{dc}$ 로 제어가 됨을 확인할 수 있다. 따라서 제안된 컨버터의 부가적인 dump 스위치 및 다이오드의 정격이 입력전압과 동일함을 알 수 있다.

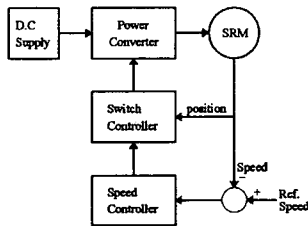
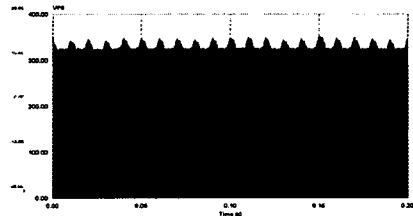


그림 6 제안된 C-Dump 컨버터 시뮬레이션 구성도  
Fig. 6 The proposed C-Dump Converter block diagram

(a)  
(b)  
(c)

그림 7. 제안된 C-Dump 컨버터의 상전류, dump 스위치 전압, dump 커패시터 전압



### 4. 결 론

본 논문에서는 SRM 구동을 위한 새로운 저가의 향상된 컨버터를 제안하였으며 그 타당성을 시뮬레이션 결과를 통하여 검증하였다. SRM 구동을 위한 새로운 컨버터는 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- 빠른 상권선의 여자
- Dump 스위치를 이용한 상권선의 Freewheeling 가능
- 전체 시스템 비용의 절감
- 시스템 효율의 증가
- 컨버터 시스템의 소형, 경량화

따라서 새롭게 제안된 컨버터 시스템은 저 비용, 고효율 시스템이 요구되는 응용분야에 유용할 것으로 사료된다.

### 〔참 고 문 헌〕

- [1] Miller, T.J.E. "Switched reluctance Motors and Their Control," Clarendon Press, Oxford, 1993
- [2] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications," CRC Press, 2001
- [3] R.M. Davis, W.F. Ray, and R.J. Blake, "Inverter drive for Switched Reluctance Motor: circuits and component ratings," proc. Inst. Elec. Eng., vol 128, pt. B, no.2, Mar. 1981, pp. 126-136.
- [4] C. Pollock and B. W. Williams, "Power converter circuits for switched reluctance motors with the minimum number of switches," proc. Inst. Elec. Eng., vol. 137, pt. B, no. 6, Nov. 1990, pp. 373-384.
- [5] J.T. Bass, M. Ehsani, T. J. E. Miller, and R. L. Steigerwald, "Development of the unipolar converter for variable reluctance motor drives," Transactions on, Volume: IA-23, May-June. 1987 Page(s): 545- 553.
- [6] Mir, S., Husain, I., Elbuluk, M.E., "Energy-efficient C-dump converters for switched reluctance motors," Power Electronics, IEEE Transactions on, Volume: 12 Issue: 5, Sept. 1997, Page(s): 912 -921.