

자동차 이중전원 시스템을 위한 새로운 ZVS 양방향 CUK DC/DC 컨버터

이성룡, 이수원, 고성훈, 문제민
 군산대학교 전자정보공학부

A New ZVS Bi-directional CUK DC/DC Converter for a Car Dual Power Supply System.

S.R. Lee, S.W. Lee, S.H. Ko and J.M. Mun

School of Electronic and Information Engineering, Kunsan National University

ABSTRACT

Currently, to overcome the limit of a 14V power supply system and to enhance the stability of this system high and to make the fuel efficiency better, a research development of a 42V power supply system is actively the progress. As an intermediate step to change into an unity power supply system, a 42V/14V dual power supply system uses a DC/DC Converter as one of structure elements. Considering the main electric power sources in the next generation of the car is a 42V system, a 14V power supply system has advantages as follows : to be managed efficiently and to increase the redundancy at start, to jump start with any vehicles, etc. We need the introduction of a bi-directional converter that can flow the energy each other in a dual 42V-12V system. This paper proposed the ZVS bi-directional CUK DC/DC converter which decrease the weight with the size of the DC/DC Converter and minimize the loss when the switching happen. In this paper, a circuit design method and an action principle of the circuit was proposed. To verify the proposed circuit, a comprehensive evaluation with theoretical analysis, simulation results is presented.

1. 서 론

산업화가 고도로 발전한 지금 자동차는 이동의 자유를 제공하는 하나의 도구에서 점차 운전자들의 기대수준이 향상되고 양질의 문화적서비스를 요구하는 현대인들에게 교통수단인 동시에 생활이라고 할 수 있다. 이러한 요구에 따라 보다 안정적이고 편리성이 강조되는 자동차에서 사용되는 전력 소비량은 매년 증가하고 있어 기존의 14[V]전원시스템으로는 급증하는 전력 수요의 욕구에 대응하기 어

렵게 되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근 자동차에 42[V]전원 시스템을 적용하는 방안이 검토되기 시작했다. 42[V]전원 시스템은 크게 42[V]단일 전원 시스템 방식과 기존의 14[V]전원시스템과 42[V]전원시스템을 연계하여 사용할 수 있는 이중전원 시스템 방식으로 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존의 차량 전원 체계가 14[V] 전원 시스템인 걸 고려하면 일시에 42[V]단일 전원 시스템으로의 변경이 현실적으로 매우 어렵다. 따라서, 기존의 14[V]전원 시스템과 42[V]전원 시스템을 병행하여 사용할 수 있는 42/14[V] 이중전원 시스템 구조에 대한 연구가 더욱 활발히 진행되고 있다. 차량용 42/14[V] 이중전원 시스템의 구조도 전기를 발전하는 알터네이터(Alternator)를 전압에 따라 각각 별도로 사용하는 방식과 알터네이터 하나만을 사용하는 방식으로 구분되어지는데 대부분 하나의 알터네이터만을 사용하는 방식으로 개발이 진행되고 있다^[1].

이러한 방식은 하나의 알터네이터에서 발생하는 전력을 42/14[V] 시스템에 맞게 전력을 변환할 수 있는 양방향 DC/DC 컨버터가 필수적으로 있어야 하며 차량에서 사용하는 전력요구량이 3-7[kW]인 걸 감안하면 컨버터의 효율향상 및 전력용 반도체 소자의 스트레스를 감소시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 매우 중요하다.

그림 1은 승·강압형 DC/DC 컨버터인 CUK 컨버터의 회로도이다.

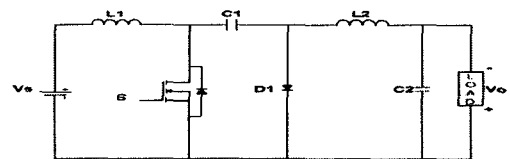


그림 1 CUK 컨버터

Fig. 1 CUK converter

그림 1의 CUK 컨버터는 캐패시터 C1을 중심으로

인덕터 L1과 L2가 상호 대칭인 구조로 기존의 컨버터와는 달리 캐패시터 C1을 통해 에너지를 전달한다. CUK 컨버터의 승·강압형 컨버터로 스위칭 소자 S의 듀티비를 통해 출력전압을 입력전압보다 높게 또는 낮게 제어할 수 있는 장점을 가진다^[2-4].

그러므로, 본 연구에서는 이러한 CUK 컨버터의 상호대칭성과 출력전압을 자유롭게 제어할 수 있는 장점을 이용하여 CUK 컨버터를 이용한 새로운 양방향 DC/DC 컨버터를 제안하며 또한, 차량용 이중전원시스템에 적용하기 위하여 컨버터의 효율 향상 및 전력용 반도체 소자의 스트레스를 저감하는 방안으로 소프트-스위칭 되는 새로운 ZVS 양방향 DC/DC 컨버터를 제안하고자 한다.

본 논문에서는 제안한 새로운 ZVS 양방향 컨버터의 회로설계 및 동작원리를 이론적으로 해석하였으며, 시뮬레이션을 통하여 제안된 컨버터가 양방향으로 동작함을 확인하였고 스위칭 소자가 ZVS로 운전되고 있음을 보임으로써 제안된 ZVS 양방향 DC/DC 컨버터의 유용성을 입증하였다.

2. ZVS 양방향 CUK DC/DC 컨버터

2.1 양방향 CUK DC/DC 컨버터

그림 2는 본 연구에서 제안한 양방향 CUK 컨버터로 그림 1의 기존의 CUK 컨버터에 전력용 반도체 소자를 상호 대칭으로 하나만을 추가한 구조이다.

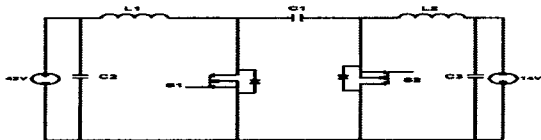


그림 2 제안된 양방향 CUK 컨버터

Fig. 2 Proposed bi-directional CUK converter

그림 2의 제안된 컨버터는 캐패시터 C1을 중심으로 인덕터(L1, L2)와 스위칭 소자(S1, S2)가 상호 대칭인 구조로 42[V] 전원에서 14[V]로 강압형 컨버터 기능과 14[V] 전원에서 42[V]로 승압형 컨버터 기능을 할 수 있는 양방향으로 동작이 가능한 컨버터이다.

그림 3은 제안된 컨버터가 강압형 모드로 동작할 때의 회로도로서 그림 (a)는 스위치가 턴-온 상태로 인덕터 L1은 전원전압에 의해 충전되고 캐패시터 C1을 통해 흐르는 전류는 식(1)과 같다.

$$(i_{C1})_{closed} = -I_{L2} \quad (1)$$

그림 (b)는 스위치가 턴-오프 상태로 스위칭 소자 S2의 역병렬 다이오드를 통해 전류패스가 이루어지며 캐패시터 C1을 통해 흐르는 전류는 식(2)와 같다.

$$(i_{C1})_{open} = I_{L1} \quad (2)$$

부하에서 소모되는 전력은 전원이 공급한 전력과 같으므로 식(3)과 같이 표현된다.

$$-V_O I_{L2} = V_S I_{L1} \quad (3)$$

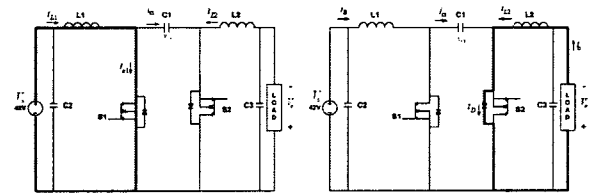
주기적인 동작에서 커패시터 전류의 평균값은 0이므로 식(4)와 같이 표현되며 식(4)에 식(1)과(2)를 대입하여 정리하면 식(5)로 표현된다.

$$[(i_{C1})_{closed}]DT + [(i_{C1})_{open}](1 - D)T = 0 \quad (4)$$

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{D}{1 - D} \quad (5)$$

식(3)과 식(5)에서 스위칭 듀티비에 따른 입력전압과 출력전압의 관계식 (6)을 구할 수 있다.

$$\frac{V_O}{V_S} = -\left(\frac{D}{1 - D}\right) \quad (6)$$



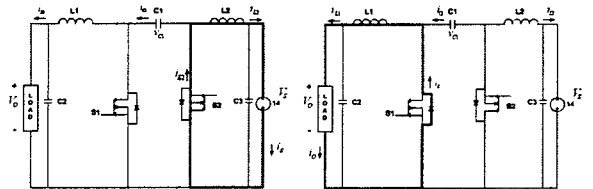
(a) 턴-온 모드

(b) 턴-오프 모드

그림 3 강압형 모드 동작회로도

Fig. 3 operation circuit diagram of step-down mode

그림 4는 제안된 컨버터가 승압형 모드로 동작할 때의 회로도이다.



(a) 턴-온 모드

(b) 턴-오프 모드

그림 4 승압형 모드 동작회로도

Fig. 4 operation circuit diagram of step-up mode

그림 4에서 (a)는 스위치가 턴-온 상태이며 (b)는 턴-오프 상태 일때의 각 소자의 전류 도통 경로를 나타내고 있다. 제안된 컨버터는 캐패시터 C1을 중심으로 상호 대칭형 이므로 강압형 모드로 동작 할때와 같이 회로를 해석할 수 있으며 다만 인덕터 L1과 L2의 충·방전의 전류방향만이 반대이다. 따라서, 스위칭 듀티비에 따른 입력전압과 출력전압의 관계식은 식(6)과 같다. 본 연구에서 제안한 양방향 컨버터는 강압형으로 동작할 때는 스위칭 소자로 S1만을 사용하고 S2는 턴-오프 상태로 역병렬 다이오드만을 사용하며, 승압형으로 동작할 때는 스위칭 소자로 S2를 사용하고 S1은 턴-오프 상태로 역병렬 다이오드만을 사용한다.

2.2 ZVS 양방향 CUK 컨버터

소프트 스위칭 기법은 스위칭 소자가 턴-온 및 턴-오프시 발생하는 스트레스 및 스위칭 손실을 저감하는 방법으로 큰 성과를 이루어 냈다. 본 연구에서 적용하고자 하는 자동차 이중전원시스템의 전력요구량은 3-7[kW]으로 비교적 대용량이며 특성상 시스템을 소형경량화하기 위하여 높은 스위칭 주파수를 요구한다. 따라서, 자동차 이중전원시스템의 양방향 컨버터에 소프트-스위칭 기법을 적용하는 연구는 매우 중요하다.

그림 6은 본 연구에서 제안하고자 하는 ZVS 양방향 컨버터이다.

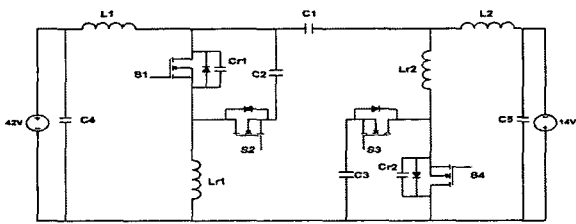


그림 6 제안된 ZVS 양방향 컨버터

Fig. 6 proposed ZVS bi-directional converter

그림 6의 제안된 ZVS 토폴로지는 그림 2의 양방향 컨버터에 공진 보조회로를 첨가한 형태로 하나의 주전력 스위치에 공진을 위한 보조 스위치를 병렬로 연결한 구조이다. 제안된 ZVS 토폴로지는 주전력 스위치가 턴-온 하기 전에 보조 스위치를 먼저 턴-온 시켜 주전력 스위치의 양단에 병렬로 연결된 스너버 캐패시터의 전압을 방전시켜 스위칭 소자의 전압을 "0"[V] 상태의 조건을 만족한 후 주전력 스위치를 턴-온 시킨다. ZVS 스위칭 동작은 그림 7의 모드별 동작회로도 및 그림 8의 스위칭 시퀀스에 따른 전압 및 전류파형과 관련하여 자세히 설명한다.

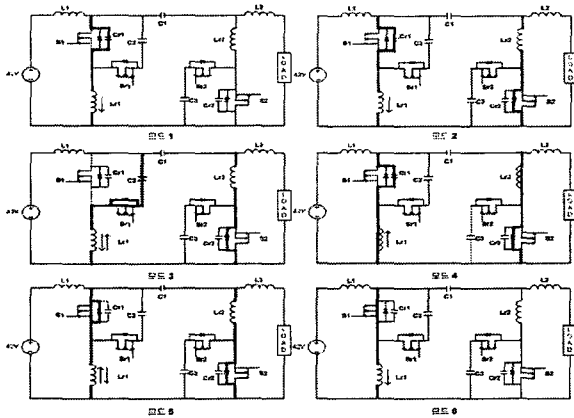


그림 7 제안된 ZVS 컨버터의 동작 모드

Fig. 7 Operation mode of the Proposed ZVS converter

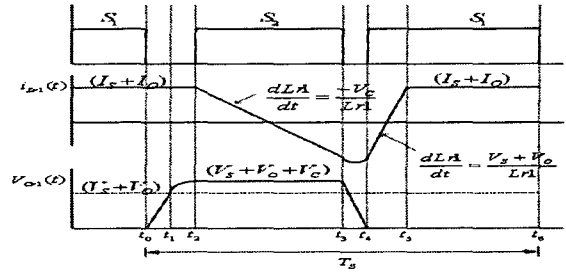


그림 8 주 전력 스위치 S1의 ZVS 동작파형

Fig. 8 ZVS operation waveforms of the main switch S1

모드 1($t_0 \sim t_1$): 주 스위치 S1과 보조 스위치 Sr1은 턴-오프 상태이며 그림 7의 전류 도통 경로를 통해 스너버 캐패시터 Cr1의 전압 Vcr1은 V_s+V_o 가 될 때 까지 선형적으로 충전된다.

모드 2($t_1 \sim t_2$): 공진 인덕터 Lr1과 스너버 캐패시터 Cr1이 공진하여 스너버 캐패시터 Cr1의 전압 Vcr1이 $V_s+V_o+V_c$ 가 될 때까지 충전된다.

모드 3($t_2 \sim t_3$): 보조 스위치 Sr1이 턴-온 되는 구간으로 그림 7과 같은 전류 패스를 통해 공진 인덕터 Lr1에 흐르는 전류가 "0"[A]가 될 때까지 감소하다가 다시 음의 방향으로 증가한다. 또한, S2의 역병렬 다이오드를 통해 C1의 에너지를 부하에 공급한다.

모드 4($t_3 \sim t_4$): 보조 스위치 S2가 턴-오프 하면 공진 인덕터 Lr1과 스너버 캐패시터 Cr1이 공진하여 Cr1의 전압 Vcr1은 "0"으로 감소되어 주 스위치 S1의 양단간의 전압도 "0"이 되어 ZVS 조건을 만족한다.

모드 5($t_4 \sim t_5$): 모드 4에 의해 ZVS 조건인 상태에서 주 스위치 S1은 턴-온 된다. 그러나, 그림 8에서처럼 공진 인덕터 전류 ILr1의 전류가 음의 방향이므로 ILr1이 "0"[A]가 될 때까지 S1의 역병렬 다이오드를 통해 전류패스가 이루어진다. 따라서, 주 스위치 S1은 완벽하게 ZVS 조건을 만족하며 턴-온하게 된다.

모드 6($t_5 \sim t_6$): 그림 7과 같이 주 스위치 S1에 의하여 전류 패스가 이루어지며 이 때 흐르는 전류는 I_s+I_o 이다.

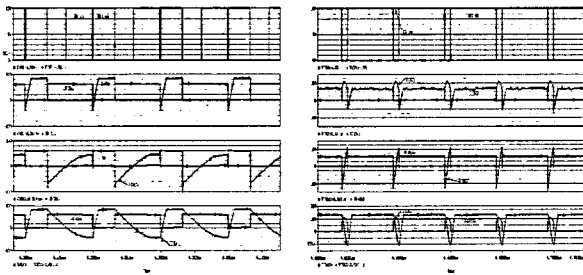
3. 시뮬레이션 및 고찰

본 연구에서 제안된 ZVS 양방향 컨버터의 유용성을 확인하기 위하여 PSpice를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고 시뮬레이션 조건은 표 1에 나타내었다. 그림 9는 제안된 컨버터의 스위칭 모드별 전압 및 전류 파형을 나타내고 있다. 그림 (a)는 컨버터가 강압형으로 동작할 때 파형이고 그림 (b)는 승압형으로 동작할 때의 파형이다.

표 1 시뮬레이션 조건

Table 1 The simulation condition

회로 정수	강압 모드	승압 모드
입력전압	DC 42V	DC 12V
스위칭 주파수	100 kHz	50 kHz
출력전압	DC 14V	DC 42V
출력전류	71 A	25 A

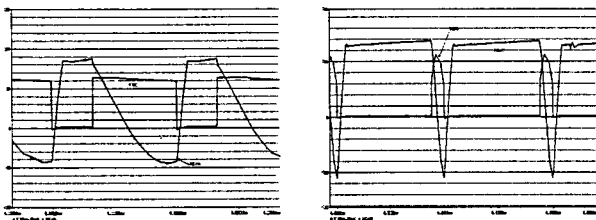


(a) 강압형 모드 (b) 승압형 모드

그림 9 제안된 ZVS 컨버터의 전압 및 전류 파형

Fig. 9 Voltage and current waveforms of the proposed ZVS converter

그림 9에서 위로부터 순서대로 스위칭 시퀀스(S, Sr), 주 전력 스위치 S의 전압 및 전류 파형, 보조 공진 스위치 Sr의 전압 및 전류 파형 그리고 공진 인덕터 Lr과 스너버 캐패시터 Cr의 전류 및 전압 파형을 나타낸다. 주 전력 스위치 S가 턴-온 되기 전에 보조 공진 스위치 Sr을 턴-온 시켜 공진을 통해 주 전력 스위치 양단간의 전압을 “0” 상태인 ZVS 스위칭 되고 있음을 알 수 있다. 그림 10은 제안된 컨버터의 주 전력 스위치 S의 전압 파형과 공진 인덕터 Lr의 전류 파형을 나타내고 있다.



(a) 강압형 모드 (b) 승압형 모드

그림 10 제안된 컨버터의 ZVS 동작 파형

Fig. 10 ZVS waveforms of proposed converter

2.2절에서 설명한 것처럼 주 전력 스위치 S가 턴-온 되면 스위치를 통해 전류가 바로 흐르지 않고 공진 인덕터 Lr의 전류가 양의 방향으로 될 때까지 역병렬 다이오드를 통해 흐름을 알 수 있다.

따라서, 제안된 ZVS 양방향 컨버터는 승·강압형 모드 양방향으로 완벽하게 ZVS 조건으로 스위칭 되고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 자동차 이중전원 시스템에 적합한 양방향 CUK DC/DC 컨버터를 제안하였고 동작원리에 대하여 설명하였다. 또한, 스위칭 손실 및 스트레스를 감소하기 위하여 ZVS 양방향 CUK DC/DC 컨버터를 제안하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 제안된 컨버터가 양방향으로 동작하며 주 전력 스위치가 ZVS로 스위칭 하고 있음을 보임으로써 제안된 컨버터의 유용성을 확인하였다.

이상의 결과로 본 연구에서 제안한 컨버터는 기존의 CUK 컨버터에 스위칭 소자 하나만을 추가하여 양방향으로 동작할 수 있으며, 보조 공진회로를 추가하여 ZVS 조건으로 스위칭 할 수 있어 스위칭 손실 및 스트레스를 저감할 수 있다고 생각된다. 향후 실험을 통하여 제안된 컨버터의 실제 효율개선 효과 및 스트레스 감소 등을 검증하는 연구가 계속되어야 할 것이다.

이 논문은 군산대학교 “BK21 사업단”의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] Paul Nicastrì, Wolf-Dieter Blauensteiner, Jarvis Carter, Philippe Desroches, Alfons Graf, Tom Keim, Peter Miller, "Jump Starting and Charging Batteries with the New 42V PowerNet",
- [2] D. Middlebrook and S. Cuk, "A new Optimum Topology Switching dc-to-dc Converter," IEEE Power Electronics Specialists Conference(PESC) Record, 1997.
- [3] D. Middlebrook and S. Cuk, Advances in Switched-Mode Power Conversion, Vols. I and II, TESLACO, 490 S. Rosemead Blvd., Suite 6, Pasadena, CA 91107, 1981.
- [4] Douglas Braz Costa and Claudio Manoel C. Duarte, Member, IEEE "The ZVS_PWM Active-Clamping CUK Converter." IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 51, NO. 1, February 2004