전기자동차용 고효율 승압형 DC/DC 컨버터 개발

崔美善*, 宋成根[†], 朴星濬**, 金大慶***, 金容求****

Development Of High Efficiency Boost DC/DC Converter For EV

Mi-Seon Choi, Sung-Geun Song, Sung-Jun Park, Dae-Kyong Kim, and Yong-Gu Kim

요 약

본 논문에서는 전기자동차용 리액터리스 고효율 승압형 DC/DC컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터는 1차측 Full Bridge의 모든 스위치에서 영전류 스위칭을 적용하여 턴 온/턴 오프시 스위칭 소자에 생기는 전력 손실을 감소시키므로써 효율을 개선한다. 그리고 ZCS(Zero Current Switching)를 위한 L-C공진 회로 중 리액턴스 성분을 1, 2차 절연을 위한 고조파 변압기의 누설인덕턴스 성분으로 대체함으로써 별도의 리액터를 추가하지 않기에 시스템 사이즈 및 비용을 줄일 수 있다. 제안된 컨버터의 타당성 검증에 위하여 본 논문에서는 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 실제 5[KW]급 DC/DC컨버터를 제작하여 실험을 수행하였다. 실험결과 제안된 컨버터의 효율이 매우 우수함을 확인하였다.

ABSTRACT

In the paper, reactorless high efficiency boost DC/DC converter for EV is proposed. In proposed converter, improves efficiency because decrease power loss when the switches are turned on/off using zero current switching (ZCS) at all switch of primary full bridge. By replacing reactance ingredients of L-C resonance circuit for ZCS with leakage inductance ingredients of high frequency transformer, it reduces system size and expense because of not add special reactor. For validity verification of proposed converter, in the paper implements simulation using PSIM and perform experiment by making 5KW DC/DC converter. In experimental results, efficiency of proposed converter conformed superiority.

Key Words : DC/DC converter, ZCS, Full-bridge, EV, Resonance circuit

1. 서 론

오늘날 산업의 발달로 전기의 사용량이 증가하고 있으며 이동의 편의성 때문에 내연기관 자동차의 보급이 급속도로 확산되고 있는 실정이다. 이와 같이 전기의 생산 및 내연기관 구동을 위해서는 화석연료를 사용하

야 하며 이로 인한 환경문제는 더욱 심각해지고 있는 실정이다. 근래 세계적으로 이와 같은 환경문제를 조금이나마 해소하기 위해 지구환경 파괴의 주범인 CO_2 저감을 위한 노력이 진행 중에 있으며 특히 자동차의 경우 전체 CO_2 배출량의 50[%]이상을 차지하고 있어 이를 줄이고자 하는 노력이 전 세계적으로 활발히 진행 중이다. 이와 같은 노력으로는 크게 자동차의 연비 개선 및 전기자동차의 도입이 있으며 근래에는 내연기관 및 전기모터를 모두 사용하는 하이브리드 형태의 자동차 개발이 이루어져 연비개선을 효과적으로 이루고 있다. 향후에는 내연기관의 비중이 점차 줄어들어 중국에는 전기만으로 구동되는 순수 전기자동차나 연료전지를 이용하는 Fuel-Cell 자동차의 개발이

[†]교신저자 : 정회원, 전자부품연구원 디지털컨버전스연구팀 책임연구원

E-mail : sgsong@keti.re.kr

*학생회원 : 전남대 전기공학과 석사과정

**정회원, 전남대 전기공학과 부교수

***정회원, 전자부품연구원 디지털컨버전스연구팀 센터장

****정회원, 한국폴리텍V대학 전기계측제어과 조교수

접수일자 : 2010. 1. 14

1차 심사 : 2010. 1. 22

심사완료 : 2010. 3. 8

이루어질 것으로 예상된다^[1-2]. 이와 같이 전기모터의 구동비율이 증가함에 따라 손실 및 모터설계의 이점을 고려하여 트랙션모터에 사용되는 전압은 300[V] 이상의 고압위주로 사용되고 있다. 그러나 이와 같은 고압전원 시스템은 인체 감전 등의 문제가 있으므로 NEV (Neighborhood Electric Vehicle) 와 같은 시스템에서는 전원으로 최대 70[V]대의 낮은 배터리를 사용한다. 이와 같은 안전과 효율적인 측면으로 인하여 배터리는 낮은 전압을, 모터는 높은 전압을 사용하고 있으며 이는 최소 4배 이상의 승압형 DC/DC 컨버터의 개발이 필수적이라 할 수 있다^[3-4]. 또한 전기 안전의 문제상 절연형의 변환기 기술개발이 이루어져야 한다.

이에 본 논문에서는 고승압을 위해 출력단에 다이오드와 콘덴서의 배압회로를 이용하는 절연형 DC/DC 컨버터를 제안하며 4배의 승압을 위해 2개의 배압회로를 직렬연결한 형태의 새로운 방식의 절연형 DC/DC 컨버터를 제안한다. 제안한 방식의 경우 향후 자동차의 회생제동을 고려해 컨버터의 입출력 특성을 갖게 하기 위해 변압기의 비를 1:1로 유지하였다. 또한 제안된 컨버터는 직렬 L-C 공진을 이용하여 전력스위치의 스위칭 손실을 줄였으며 L-C 공진회로에서 필요한 리액턴스 성분은 변압기 누설리액턴스로 대체함으로써 전체 시스템 사이즈 및 비용을 감소시킬 수 있다^[5].

제안된 배압회로를 이용한 절연형 DC/DC 컨버터의 타당성 검증을 위해 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 수행하였으며 실제 제작하여 별도의 제어 없이 배압회로와 직렬회로만으로 최대 4배의 승압이 가능함을 확인하였으며 컨버터 최대 효율이 약 97[%]로 매우 우수함을 확인하였다.

2. 전기자동차용 전력 변환기

2.1 시스템 구성

그림 1은 제안된 전체 시스템의 블록다이어그램으로서 2개의 독립된 절연형 DC/DC 컨버터로 구성되어 있으며 컨버터 1차 측은 배터리에 병렬로 연결되어 있고 출력측은 직렬로 연결하는 구조로 되어 있어 기본적으로 2배 승압이 가능한 형태로 구성하였다. 그림 2는 1개의 절연형 컨버터 구조를 도식화한 것으로 고주파 변압기를 이용하여 1, 2차 절연을 하였으며, 2차측에는 다이오드와 콘덴서를 이용하여 배압회로를 구성하였다. 이와 같이 제안된 절연형 DC/DC 컨버터는 배압회로와 2차측 직렬연결을 통하여 총 4배의 승압이 가능하므로 고조파 변압기의 변압비는 1:1로 유지가능하다.

그림 1 제안된 시스템 블록다이어그램

Fig. 1 Proposed System Block Diagram

그림 2 제안된 DC/DC 컨버터 시스템 블록다이어그램

Fig. 2 Proposed DC/DC Converter System Block Diagram

또한 컨버터의 효율 개선 및 고조파 노이즈 감소를 위해서는 L-C 공진을 이용한 영진류 스위칭 방식을 사용하여야 하며 이를 위해 본 변환기에서는 절연변압기의 누설 리액턴스와 배압회로의 콘덴서를 사용하였다. 이로 인하여 별도의 공진을 위한 리액터 및 콘덴서를 배제할 수 있으므로 구조가 간단하며 별도의 추가 비용이 들지 않는 장점이 있다.

이상의 제안된 절연형 DC/DC 컨버터는 절연을 위한 고주파 변압기의 변압비를 1:1로 유지할 수 있는 장점이 있으므로 향후 양방향 전력수수를 고려하는 경우 1차측 및 2차측에서 바라보는 특성 임피던스가 같

(a) Mode 1

(b) Mode 2

그림 3 제안된 DC/DC컨버터 동작모드

Fig. 3 Proposed DC/DC Converter Operation Mode

아 전력 수수의 동특성이 우수하며 배터리 충방전 모든 방향의 스위치에 공진을 이용한 영전류 스위칭이 가능하다는 장점이 있다.

그림 3은 제안된 DC/DC컨버터의 무부하에 있어서 동작모드 천이를 나타낸 것으로 동작원리를 설명하면 다음과 같다.

Mode 1은 SW_1 과 SW_4 가 ON이 되고 SW_2 와 SW_3 이 OFF되는 시점으로 입력전류는 SW_1 과 SW_4 를 통해 고조파 변압기를 거쳐 2차측에 전달된다. 그리고 다이오드 D_1 을 도통시켜 입력전원으로부터 C_{s1} 가 충전이 되어 충전전류는 L_a 와 C_{s1} 을 통한 직렬 공진 형태가 되어 충전전류는 입력측의 전력을 부하측으로 공급하게 된다. 이와 마찬가지로 Mode 2는 SW_2 와 SW_3 이 ON이 되고 SW_1 과 SW_4 가 OFF되는 시점으로 입력전류는 SW_2 와 SW_3 을 통해 고조파 변압기를 거쳐 2차측에 전달된다. 그리고 다이오드 D_2 를 도통시켜 입력전원으로부터 C_{s2} 이 충전이 되어 충전전류는 L_a 과 C_{s2} 를 통한 직렬 공진 형태가 되며 Mode 1과 같이 입력측의 전력을 부하측으로 공급하게 된다. 이 때 Mode 1과 Mode 2의 직렬 공진 형태가 된 전류 파형은 사인파의 형태로 스위칭 손실을 저감시킬 수 있으며 스위칭시 발생하는 서지를 저감시킬 수 있다. SW_1 , SW_4 쌍과 SW_2 , SW_3 쌍은 교대로 ON, OFF되며 출력전압은 다이오드와 콘덴서 조합을 통한 배압 회로에 의해 입력전압의 2배가 된다.

그림 4 LC 직렬공진 등가회로

Fig. 4 LC Serial Resonance Equivalent Circuit

그림 5 Experimental Waveforms Of Proposed DC/DC Converter

Fig. 5 제안된 DC/DC컨버터의 주요 동작 파형

2.2 ZCS 공진 원리

그림 4는 누설인덕턴스 성분 L_a 와 2차측의 공진커패시터 성분 C_{s1} 를 변압기 1차측으로 환원한 그림 3의 Mode 1의 등가회로로 고주파 변압기가 이상적이라고 가정하면 그 값은 다음과 같다.

$$C_s = C_{s1} \quad (1)$$

$$V_s = V_{s2} \quad (2)$$

식 (1), (2)의 등가화된 회로의 전압, 전류식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$i_L = C_s \frac{dv_s}{dt} + I_o \quad (3)$$

$$v_s = V_{in} - L_a \frac{di_L}{dt} \quad (4)$$

단, 초기조건 $i_L(T_o) = 0$, $V_s(T_o) = V_{s0}$

Mode 1 [$T_o < t < T_1$] : 누설인덕턴스 L_a 는 $t = T_o$ 일 때 스위치가 턴온되고 L_a 와 C_s 는 공진을 시작한다. 위의 (3), (4) 식과 초기조건으로 공진시 누설인덕턴스전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \omega_r^2 (i_L - I_o) = 0 \quad (5)$$

$$\text{단, } \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_a C_s}}$$

윗식을 보면 알 수 있듯이 공진 주파수는 인덕터와 콘덴서에 의해 결정되며 콘덴서는 부하전류를 담당할 수 있는 용량으로 결정되어야 한다. 위의 방정식 해는 다음과 같다.

$$i_L(t) = I_o + I_o \cos(\omega_r t) + \frac{V_{in} - V_{So}}{Z_n} \sin(\omega_r t) \quad (6)$$

$$v_s(t) = V_{in} - (V_{in} - V_{So}) \cos(\omega_r t) - Z_n I_o \sin(\omega_r t) \quad (7)$$

$$\text{단, } Z_n = \sqrt{\frac{L_a}{C_s}} \text{ (Characteristic Impedance)}$$

위 식들을 이용하여 계산되는 공진주파수는 다음과 같다.

$$f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_a C_s}} \quad (8)$$

Mode 1은 공진주기의 절반이 되는 시간에서 끝나므로 만일 공진 주파수가 스위칭 주파수보다 크다면 인덕터에 흐르는 전류는 불연속이 되며 이 조건을 만족하는 인덕터 값은 아래와 같다.

$$L_l \leq \frac{1}{(2\pi)^2 C_s (f_0)^2} \quad (9)$$

Mode 2 [$T_1 < t < T_2$] : $t = T_1$ 일 때 공진상태는 끝나고 공진 커패시터 C_s 는 전류 I_o 에 의해 방전되어 공진커패시터 전압 V_s 는 감소한다. 이 전압 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_s(t) &= V_s(T_1) + \frac{1}{C_s} \int_{T_1}^t (-I_o) dt \\ &= V_s(T_1) - \frac{I_o}{C_s} (t - T_1) \end{aligned} \quad (10)$$

3. 시뮬레이션 및 실험

3.1 시뮬레이션

그림 6 PSIM을 이용한 시뮬레이션 회로
Fig. 6 Simulation Circuit Using PSIM

본 논문에서 제안한 DC/DC컨버터의 타당성 입증을 위해 PSIM을 이용한 시뮬레이션 회로를 그림 6와 같이 구성하였다.

위의 서론에서도 언급했던 것과 같이 2차측 배압회로를 직렬로 연결하여 출력전압은 입력전압의 4배가 나오도록 구성하였다. 각각 변압비를 1대1로 구성하였고 누설인덕턴스 성분을 따로 지정해주었다. PSIM 시뮬레이션을 하기 위해 사용된 회로정수식은 표 1에 나타내었다.

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation Parameters

입력전압 Vin	72[V]
출력전압 Vo	288[V]
입력 커패시터	100[uF]
공진 커패시터	7.5[uF]
누설 인덕턴스	2[uH]
스위칭 주파수	40[kHz]
공진 주파수	41.093[kHz]
부하저항	100[Ω]
변압비	1:1

그림 7 PSIM을 이용한 시뮬레이션 주요 동작 파형
Fig. 7 Simulation Experimental Waveforms Using PSIM

그림 8 PSIM을 이용한 시뮬레이션 커패시터 파형
Fig. 8 Simulation Capacitors Waveforms Using PSIM

그림 9 제안된 DC/DC컨버터 사진
Fig. 9 Photograph Of Proposed DC/DC Converter

그림 7에서 보아도 알 수 있듯이 SW1의 스위치가 OFF 되었을 때 누설 인덕턴스에서 흐르는 전류가 0이 되는 것으로 ZCS (Zero Current Switching)가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 또한 공진 커패시터 양단에 걸리는 평균전압은 72V임을 확인할 수 있고 총 출력평균전압은 입력전압의 4배인 288V임을 확인할 수 있다.

또한 그림 8에서 교번적인 스위칭 신호로 인해 배압 회로 각각에 걸린 커패시터 전압은 72V의 평균전압을 기준으로 충방전 리플전압이 생기는 것을 볼 수 있다.

3.2 실험

그림 9은 타당성 검증을 위해 실험에 적용한 제안된 DC/DC컨버터의 구조이다. PWM제어기로 Texas Instrument사의 UC3825를 사용하였고 1차측 MOSFET으로는 IXYS사의 IXFN360N10T, 2차측 정류다이오드로 DSEI 2x121-02A를 사용하여 승압 하는데 있어 각각 전류와 전압의 용량을 확대시켰다. 실험을 하기 위해 사용된 회로정수는 표 2와 같다.

표 2 실험 파라미터

Table 2 Experiment Parameters

입력전압 V_{in}	72[V]
출력전압 V_o	288[V]
입력 커패시터	100[μ F]
공진 커패시터	5[μ F]
누설 인덕턴스	2[μ H]
스위칭 주파수	50[kHz]
공진 주파수	50.329[kHz]
변압비	1:1

(a) 1[kW]부하시 동작 파형

(b) 3[kW]부하시 동작 파형

(c) 5[kW]부하시 동작 파형

그림 10 ZCS DC/DC컨버터의 동작 파형

Fig. 10 Operational Waveforms Of ZCS DC/DC Converter

그림 11 DC/DC컨버터의 커패시터 전압 파형
Fig. 11 Capacitors Voltage Waveforms Of DC/DC Converter

(a) 200[W]부하시 SW_1 전압과 전류파형

(b) 1[KW]부하시 SW_1 전압과 전류파형

그림 12 ZCS DC/DC컨버터의 동작 파형
Fig. 12 Operational Waveforms Of ZCS DC/DC Converter

그림 10은 DC/DC컨버터의 부하별 스위치에 걸리는 전압파형과 누설인덕턴스를 가지고 있는 변압기 1차측 전류 파형, 커패시터 전압 파형을 각각 나타내는데 교번적인 스위칭 신호로 인해 변압기 1차측 전류 파형은 Sine그래프 형태가 된다. 실제 5KW DC-DC 컨버터를 이용한 실험결과 시뮬레이션 결과와 같이 모든 영역에서 ZCS에 의한 소프트 스위칭이 되고 있음을 확인할 수 있다.

그림 11은 공진 커패시터 4개에 대한 각각의 전압파형으로 모든 커패시터에서 충방전에 의해 리플전압이 발생함을 확인할 수 있으며, 최종 출력전압의 각 커패시터 전압의 합으로 표현된다.

그림 12는 200[W]일 때와 1[KW]일 때의 스위치에 걸리는 전압과 변압기 입력 전류를 나타낸 그림으로 변압기의 여자인덕턴스에 의해 변압기 입력전류에 Sine파형 전류 이외에 일정한 기울기를 가지는 전류가 더해져 있음을 확인할 수 있다. 그러나 이와 같은 여자인덕턴스에 의한 전류는 부하에 무관하므로 부하량이 증가하면 그 영향이 작아짐을 확인할 수 있다.

그림 13 DC/DC 컨버터 연결실험 사진
Fig. 13 Photograph of DC/DC Converter Linking Experiment

그림 14 제안된 DC/DC컨버터의 주요 동작 파형
Fig. 14 Experimental Waveforms Of Proposed DC/DC Converter

그림 13는 제안된 DC/DC컨버터와 가변저항을 연결하여 실험한 사진이고 5[KW]때의 입출력 전압과 전류의 값을 그림 14와 같이 나타내었다. 5KW일 경우 입력전압 70.76[V], 출력전압 271.38[V]로 4배 승압이 됨으로서 값이 양호하게 나오는 것을 알 수 있다.

그림 15 출력전력 대비 효율

Fig 15 Efficiency Of Output Power Comparison

그림 15는 부하에 대한 컨버터의 효율의 측정된 것으로 2[KW]에서 최고 효율 96.967[%]로 측정되었으며, Euro효율 또한 96.103[%]로 매우 우수함을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 전기자동차 구동을 위한 승압형 5[KW]급 고효율 절연형 DC/DC컨버터를 제안하였다. 제안된 방식은 ZCS를 이용한 소프트 스위칭으로 스위치 과도손실을 최소화하였으며 L-C 공진을 위한 리액터와 커패시터를 절연형 변압기의 누설리액터와 배압회로의 커패시터로 대체함으로써 그 구조가 간단하다. 제안된 컨버터에 대해 이론적 설계를 위하여 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 수행하였으며 실제 5KW급 변환기를 제작하여 제안된 방식의 컨버터 타당성을 검증하였다. 실제 제작을 통한 실험결과 모든 부하영역에서 ZCS에 의한 소프트 스위칭이 가능함을 확인하였으며 전 부하 영역에서 안정적으로 동작함을 확인하였다. 효율 측정 결과 최고 효율 약 97[%] 및, Euro효율 약 96[%]로 매우 우수함을 확인하였으며 이상의 실험 결과를 바탕으로 제안된 절연형 고효율 승압 컨버터는 소형 및 경량화로 전력변환 기술개발에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

이 연구는 지식경제부 지역전략기획기술개발사업에 의해 연구된 것입니다

참 고 문 헌

- [1] Toyota Environmental Technology Report "Toyota Hybrid System THS II".
- [2] I.A. Khan, "DC-to-DC Converters for Electric and

Hybrid Vehicles", *Power Electronics in Transportation*, 20-22, pp. 113-122, 1994, Oct.

- [3] 박성식, 최세완, 최우진, 이교범, "고승압비와 넓은 ZVS 영역을 갖는 비절연 DC-DC컨버터", *전력전자학회 논문지*, 제14권 제4호, pp. 315-322, 2009. 8.
- [4] 김표수, 박성식, 최세완, "고 배전압을 위한 비절연형 DC-DC컨버터", *2009년도 전력전자학술대회 논문집*, pp. 387-389, 2009. 7.
- [5] 손경중, 송성근, 최준호, 문채주, 김광현, 임영철 "영전압 영전류 스위칭을 이용한 연료전지용 전력변환시스템", *전력전자학회 논문지*, 제11권 제4호, pp.385-394, 2006. 8.

최미선(崔美善)

1984년 11월 7일생. 2008년 전남대 공과대학 전기공학과 졸업. 현재 전남대 전기공학과 석사과정 및 전자부품연구원 디지털컨버전스연구센터 연구원.

송성근(宋成根)

1975년 9월 16일생. 1998년 전남대 공과대학 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2001년~2004년 (주)프로컴 시스템 연구원. 2004년~2005년 (주) 세오전자 연구원. 현재 전자부품연구원 디지털컨버전스연구센터 책임연구원.

박성준(朴星濬)

1965년 3월 20일생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2002년 동 대학원 지능 기계공학과 졸업(공학박). 1996년 3월~2000년 2월 거제대학 전기과 조교수. 2000년 3월~2003년 8월 동명대학 전기공학과 조교수. 2003년 8월~현재 전남대 전기공학과 부교수.

김대경(金大慶)

1972년 9월 27일생. 2001년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전자전기제어계측공학과 졸업(공학박). 2001년~2005년 삼성전자 가전연구소 선임연구원. 현재 전자부품연구원 디지털컨버전스연구센터 센터장. 당 학회 학술위원.

김용구(金容求)

1969년 12월 29일 생. 1995년 전남대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2004년~현재 한국폴리텍V대학 전기계측제어과 조교수.