

하이브리드 자동차 보조전원 공급용 DC-DC 컨버터 개발

김종철[†], 최덕관, 박해우
카트로닉스연구소 현대모비스

Development of DC-DC Converter for Ancillary Power Supply in Hybrid Electric Vehicle

Jong-Cheol Kim, Deok-Kwan Choi, Hae-Woo Park
Hyundai MOBIS

요 약

본 논문에서는 하이브리드 자동차용 보조전원 공급이 목적인 DC-DC Converter에 대하여 기술하였다. DC-DC Converter는 차량 내의 헤드램프, 오디오, 각종 ECU등 전기/전자 부하에 전력을 공급하며 또한 12V 보조 배터리를 충전하는데 사용된다. 고주파 동작 조건하에서 유기되는 전자파 노이즈와 스위칭 손실을 저감하기 위하여 컨버터 토폴로지로서 위상천이 영전압 풀브리지 방식을 적용하였으며 제어기의 용이한 보상 및 안정된 시스템 응답 특성을 위하여 슬로프 보상이 포함된 전류 모드 제어 방식을 사용하였다. 정전압/정전류 충전 제어 방식은 전기부하에 안정적인 전원공급과 보조 배터리의 안정적인 충전을 보장한다. 초기의 회로 파라메타 설정 및 하드웨어 디버깅을 위하여 시뮬레이션 툴로 PSIM 6.0을 사용하였으며, DC-DC Converter에서 스위칭 소자의 발열 문제는 Thermo Tracer 장비를 사용하여 개선하였다.

ABSTRACT

This paper describes the DC-DC Converter for Ancillary Power Supply in Hybrid Electric Vehicle. DC-DC Converter is used for charging 12V auxiliary battery supplying electric power to head ramp, audio, ECU etc in automobiles. used DC-DC Converter Topology is PS-ZVS FB(Phase Shifted Zero Voltage Switching Full-Bridge) to reduce switching loss and EMI noise induced by high frequency operating condition. And For easy compensation and stable system response characteristic, current mode control method including slope compensation is employed. Constant current / constant voltage charging control method guarantee stable electric charging of auxiliary battery. Simulation tool PSIM6.0 is used for initial circuit parameter settings and H/W debugging. Thermal

problems of Switching components in DC-DC Converter is improved by using Thermo Tracer.

Key Words : DC-DC Converter, HEV(Hybrid Electric Vehicle), Full Bridge, Phase shift, ZVS(Zero Voltage Switching)

1. 서 론

최근 전 세계적으로 자동차 배기가스에 의한 지구 온난화 및 석유에너지 고갈에 대한 대책으로 저공해, 고효율 자동차에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 전세계 자동차 메이커들은 대체에너지 개발, 대기오염을 일으키는 질소산화물 배출규제 대응 및 지구온난화 방지 관점에서 이산화탄소 배출량을 줄일 수 있는 새로운 개념의 고효율 저공해 자동차 개발에 박차를 가하고 있다. 연료전지자동차(Fuel-Cell Electric Vehicle, FCEV)와 하이브리드 전기 자동차(Hybrid Electric Vehicle, HEV)가 그 대표적인 예이다.

하이브리드 전기자동차에서 기존 내연기관 자동차와 마찬가지로 저전압(12V) 보조배터리가 헤드라이트 및 오디오, ECU 등의 차량 전기장치 전력 공급을 위해 사용된다. 일반적으로 알터네이터(Alternator)를 사용하여 보조 배터리를 충전하는 방식은 알터네이터가 엔진에 맞물려 운행하기 때문에 엔진의 부하를 증가시킬 뿐만 아니라, 구조적으로 낮은 효율과 알터네이터의 기계적인 마모로 인해 주기적으로 교환해야 하는 유지·보수 문제를 야기한다. 알터네이터에 의한 보조 배터리 충전방식에 대한 대안으로 고효율, 고용량의 DC-DC 컨버터가 하이브리드 전기 자동차에서 사용된다. 당사가 개발한 하이브리드 전기자동차용 DC-DC 컨버터(이하, HEV DC-DC Converter)는 절연형으로 1kW급에서 많이 사용되는 풀-브릿지(Full-Bridge)

방식을 사용하였다. 컨버터의 소형화를 위해선 스위칭 주파수를 높여 변압기 및 인덕터의 크기를 줄여야 한다. 고주파 스위칭은 전력반도체의 스위칭 손실 및 노이즈 발생 원인이 된다. 이에 대한 대책으로 소프트 스위칭(Soft Switching)방식인 ZVS(Zero Voltage Switching), ZCS(Zero Current Switching) 등이 주로 사용되는데, 이 중 위상천이 영전압 스위칭(Phase Shifted Zero Voltage Switching)방식이 1kW급 풀-브릿지 컨버터에 많이 사용된다. 이 방식은 스위칭 손실 저감, 노이즈 감소 효과 뿐만 아니라, 소자의 기생성분을 활용할 수 있다는 장점이 있다.

HEV DC-DC 컨버터의 기본 사양 및 성능은 표1과 같다.

표 1 HEV DC-DC 컨버터 개발 사양
Table 1 HEV DC-DC Converter Specifications

항 목		사 양 및 성 능
입력 전압		Nominal 144V 100V~200V
출력	전압	12V~16V, 듀티제어 가변형
	전력	1.3kW (최대 90A)
효율		90% (10~50% 부하) 89% (30~70% 부하)
보호기능		과전압, 저전압, 과전류, 과온도 등

2. 본 론

2.1 동작원리

위상천이 방식에 의한 영전압 스위칭 풀브리지 컨버터(PS-ZVS FB Converter)의 ZVS 동작은 공진인덕터(Lr)와 공진커패시터(Cr)에 의해 이루어지는데, Lr은 변압기 기생 인덕턴스(Llk)와 변압기에 직렬로 추가한 인덕터(Lshim)의 합으로 나타내고, Cr은 스위치 2개의 기생 커패시턴스(Coss, 4/3 : 드레인 전압 변동 고려)와 변압기 기생 커패시턴스(Cxfmr)의 합으로 나타낸다.

$$L_r = L_{lk} + L_{shim} \quad (1)$$

$$C_r = 2 \times \frac{4}{3} C_{oss} + C_{xfmr} \quad (2)$$

그림 1은 각 구간별 DC-DC Converter의 동작 상태이며 그림 2는 시간에 따른 각 스위치의 게이트 파형과 이에 따른 변압기 1차측 전압과 전류 파형을 나타낸다. PS-ZVS FB 컨버터의 동작은 크게 선형천이 구간, 프리휠링 구간, 공진천이 구간, 전

력전달 구간의 4단계로 나눌 수 있는데, 이 동작의 반복을 통해 영전압 스위칭을 가능하게 한다. 그림 2에서 t0는 Qa와 Qd의 도통으로 인한 전력전달 구간 직후의 시간으로 그때의 전류를 Ip(t0)라 가정한다.

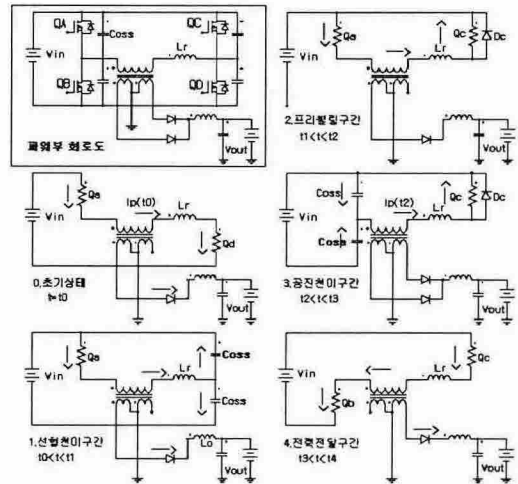


그림 1 DC-DC Converter 동작 설명 회로

Fig. 1 A schematics of operation in DC-DC Converter

2.1.1 선형천이(Linear Transition)구간(t0<t<t1)

t0에서 t1구간은 선형천이 구간으로 Qc의 영전압 스위칭을 가능케 한다. 1차측 전류 Ip(t0)는 공진 인덕터(Lr)와 출력 인덕터(Lo)의 에너지에 의해 이 구간동안 가상의 고정 전류원이 된다. t0에서 Qd가 턴오프 되면서 이 전류원이 Qd의 Coss를 입력전압까지 충전시키고, Qc의 Coss를 방전시키면서 Qc양단이 영전압이 되면서 ZVS동작을 하게 된다. 선형천이 구간의 시간은 고정 전류원 Ip(t0)가 회로의 기생 커패시턴스 Cr을 충전하는데 걸리는 시간으로 구할 수 있다.

$$d(t_1 - t_0) = C_r \times \frac{V_{in_{max}}}{I_p(t_0)} \quad (3)$$

2.1.2 프리휠링(Clamped Freewheeling)구간(t1<t<t2)

선형천이 완료후 1차측 전류는 Qa와 Dc(Qc의 Body diode), Qc에 의해 프리휠링하게 되는데 이 동작은 공진천이 구간의 ZVS 동작을 위해 Lr의 에너지를 유지시켜 주는 역할을 한다. Qc는 양단전압이 영전압인 상태로 t1이후 도통되고 프리휠링 전류는 Qc의 온저항(Rds_on)과 다이오드 Dc에 분산되어 흐르게 된다. 이 프리휠링 구간은 위상천이 방식에만 나타나는 구간으로 전통적인 풀-브리지 컨버터에는 없는 도통손실이 발생한다. PS-ZVS 컨버터의 스위칭 손실 및 노이즈 감소의 대가라 할 수 있다.

2.1.3 공진천이(Resonant Transition)구간 ($t_2 < t < t_3$)

이 구간동안 L_r 과 C_r 의 공진에 의해 Q_b 의 영전압 스위칭을 가능케 한다. t_2 에서 Q_a 가 오프되면서 1차측 전류는 Q_a 의 C_{oss} 를 충전하고 Q_b 의 C_{oss} 를 방전시키면서 Q_b 의 양단전압을 영전압으로 만들어 ZVS 동작을 보장해 준다. 이 공진천이 구간은 선형천이 구간에서 출력인덕터 L_o 와 L_r 의 에너지가 작용했던 것과 달리, L_o 가 사라지고 L_r 과 C_r 의 직렬공진에 의해 동작하게 되는데, L_r 의 에너지가 C_r 을 충전하는 에너지보다 커야 한다.

$$W(L_r) > W(C_r) \quad (4)$$

$$W(L_r) = \frac{1}{2} L_r I_{pri}^2, W(C_r) = \frac{1}{2} C_r V_{pri}^2$$

L_r 의 에너지는 출력부하에 비례하므로 출력부하에 따른 ZVS 동작을 위해 적절한 L_r 값을 설정해 줘야 한다. 1차측 전류는 t_2 에서 최대값을 갖는 사인파 형태이고, 이 구간 시간은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d(\beta - \theta) = \frac{1}{\omega_r} \times \sin^{-1} \left(\frac{V_{in} \times Z_r}{I_p(\theta)} \right) \quad (5)$$

$$Z_r = \sqrt{L_r / C_r} \quad \omega_r = \sqrt{\frac{1}{L_r C_r}}$$

2.1.4 전력전달(Power Transfer) 구간($t_3 < t < t_4$)

t_3 에서 Q_b 가 턴온 되면서 변압기 1차측에 전과는 역으로 입력전압이 걸린다. 이 구간 동안 1차측 전류는 방향이 바뀌고, 공진인덕터 L_r 을 충전시키면서 상승하고, 공진인덕터 L_r 충전후에 2차측에 전력을 전달한다. 2차측 전력전달은 L_r 의 충전시간동안의 듀티손실(ΔD)로 인해 인가듀티(D)가 감소된 실효듀티($Deff$)구간 동안 이뤄진다.

$$Deff = D - \Delta D \quad (6)$$

듀티손실(ΔD)는 L_r 에 의한 전류상승률(di/dt)을 고려하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta D = \frac{I + I_r}{\frac{V_{in}}{L_r} \times \frac{T}{2}} \quad (7)$$

V_{in} : 입력전압, T : 변압기주파수

출력전압은 변압기 턴비(N_s/N_p)와 실효듀티와 관계하여 다음과 같다.

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{N_s}{N_p} \times Deff \quad (8)$$

L_r 값을 증가시키면 ZVS 동작범위를 넓힐 수 있으나 듀티손실이 증가하여 허용 출력전압이 감소한다. 따라서 설계시 ZVS 동작범위와 출력전압을 고려한 적절한 L_r 값 및 변압기 턴비, 동작주파수를 선정해야 한다.

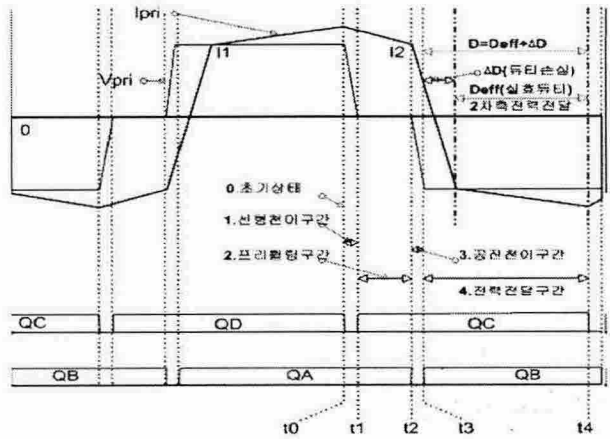


그림 2 MOSFET 게이트 구동파형에 따른 변압기 1차측 전압 및 전류 파형

Fig. 2 Primary voltage and current waveforms in transformer according to FET gate signal

2.2 HEV DC-DC 컨버터 운전

HEV DC-DC 컨버터는 전류 모드 제어 방식을 채택하였고 안정적인 배터리 충전과 부하공급을 위하여 정전압/정전류 제어 기능이 포함되어 있다.

2.2.1 전류 모드 제어

전류 모드 제어 방식은 외부 전압 루프 및 내부 전류 루프의 이중 루프를 통하여 출력 전압을 제어하는 방법으로, 내부 전류 루프는 스위치 앞단의 전류 센서를 통해 검출된 전류 신호를 이용하여 펄스 바이 펄스 제어를 하며 외부 전압 루프를 통해 출력 전압을 안정화 시킨다. 한 펄스에서 검출된 전류 신호는 오차증폭기 출력과 비교되어 듀티를 생성하므로 부하변동에 보다 안정적인 응답특성을 보인다.

전류 제어 방식은 전압 제어 방식과 비교해 내부 전류 루프가 출력 인덕터의 전류를 제어하기 때문에 전달함수가 1차 시스템이 된다. 따라서 전압 제어 방식에 비해 보상이 용이하고, 제어 응답이 스위칭 한주기 내에 이뤄지므로 시스템 전체의 과도 응답이 크게 개선된다.

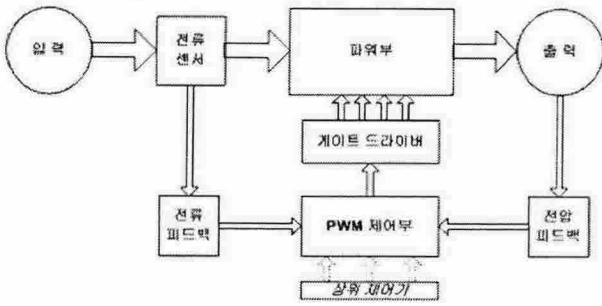


그림 3 컨버터 제어 블록 다이어그램
Fig. 3 Converter control block diagram

2.2.2 정전류/정전압 제어

정전압 방식은 배터리의 공칭전압보다 일정비 높은 정전압 전원을 연결하여 계속 충전할 수 있는 방식으로, 비교적 구현이 단순한 장점이 있지만 충전초기 과전류가 흐르기 때문에 컨버터 및 배터리에 무리를 주는 단점이 있다. 당사가 개발한 DC-DC 컨버터는 아날로그 제어를 통하여 배터리 충전초기 과전류 및 부하가 기준 전류 이상으로 증가시 정전류 모드로 동작하고, 부하 전류가 기준이하로 떨어지면 정전압 모드로 복귀한다. 이러한 기능은 컨버터 보호 및 배터리와 부하에 안정적인 전원 공급을 가능케 한다.

3. 실험 결과

3.1 부하 시험

3.1.1 ZVS 동작 시험

그림 4와 5를 통해 부하증가에 따른 ZVS 동작을 확인할 수 있다. 그림 4의 트랜스포머 1차측 전압을 관찰해 보면 전압상승 시점인 공진전이구간에 파형의 공진현상이 발생함을 알 수 있다. 부하가 증가할수록 공진 인덕터의 에너지가 증가하여, 이 구간의 공진전압은 증가하고, 완벽한 ZVS 동작을 하게 된다. HEV DC-DC 컨버터는 30%이상 부하에서 100% ZVS 동작을 할 수 있게 설정하였으나, 이러한 동작은 30%이하 부하에서도 스위칭 손실을 저감시킨다.

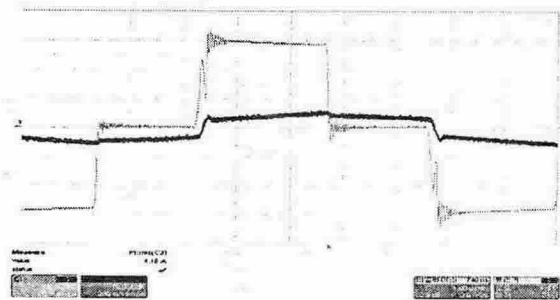


그림 4 변압기 1차측 입력전압 및 전류[부하 : 25%]
Fig. 4 Primary input voltage and current waveform in transformer[at 25% load]

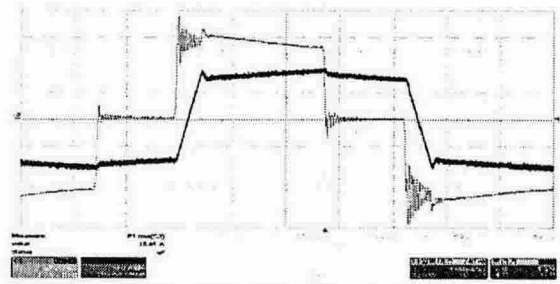


그림 5 변압기 1차측 입력전압 및 전류[부하 : 100%]
Fig. 5 Primary input voltage and current waveform in transformer[at 100% load]

3.1.2 컨버터 효율

그림 6은 컨버터 효율 곡선이다. 효율 곡선을 살펴보면 10~50% 부하에서 90%이상의 효율을 나타내고, 자동차 전장 부하의 주 사용영역이라 할 수 있는 30~70%에서는 89%이상의 효율을 나타내고 있다.

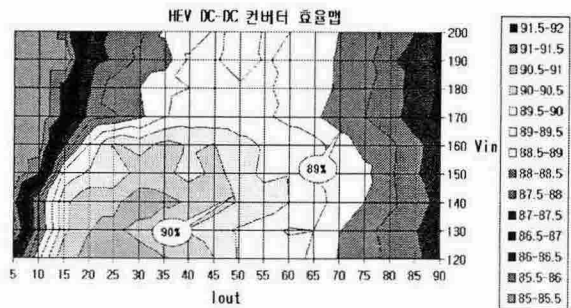


그림 6 DC-DC 컨버터 효율 맵
Fig. 6 DC-DC Converter efficiency map

3.1.3 컨버터 열해석

전력변환장치에 있어서 부품의 발열은 제품 수명 및 안정화 측면에서 매우 중요한 요소이다. 당사는 주요 발열소자를 제어보드와 분리시켜 방열판(Heat sink)에 체결, 방열특성을 개선하였으며 열분석 장비를 이용하여 부품 배치 및 방열판 재설계를 통해 최적화 작업을 진행하였다. 그림 7은 상온(25°C)에서 입력 144V, 출력 14V/90A 최대부하 동작 시험시 열화상 장비를 사용하여 측정된 컨버터 부품별 발열 온도 사진이다.

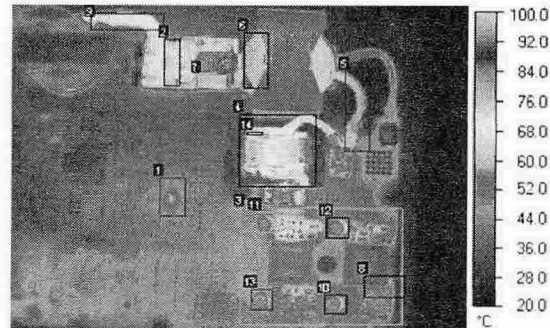


그림 7 컨버터 발열시험
Fig. 7 Converter thermal test

그림 8은 개발된 DC-DC 컨버터 시제품 사진이다.

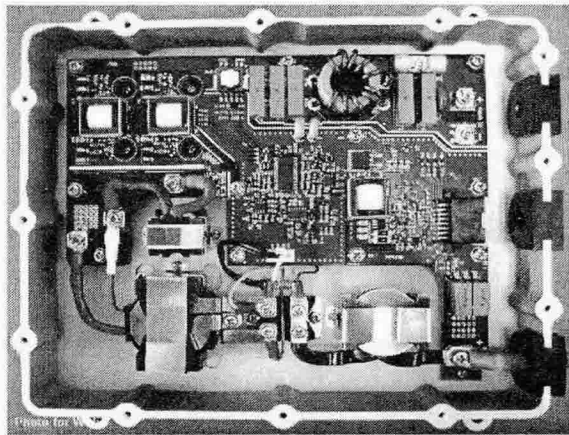


그림 8 개발된 DC-DC 컨버터
Fig. 8 Developed DC-DC Converter

4. 결 론

본 논문에서는 하이브리드 자동차의 보조전원 공급과 보조배터리 충전에 사용되는 DC-DC Converter에 대하여 기술하였다. 하이브리드 자동차에 사용되는 전장품은 높은 출력밀도 및 효율과 가혹한 자동차 동작환경(온도, 습도, 진동 및 전자파 등)에서의 정상동작을 유지할 수 있는 높은 신뢰성이 매우 중요한 요소가 된다. 이러한 환경에 대응하고자 자동차용 DC-DC 컨버터의 설계에서도 소자의 스위칭 손실을 최소화하여 효율을 증대시킬 수 있는 방식이 주로 사용된다. 당사가 개발한 DC-DC Converter는 효율 증대를 위하여 위상천이 영진압 스위칭 방식을 사용하였다. 개발 초기 단계에서 시뮬레이션을 통하여 전력회로에 대한 기본특성 검토를 진행하였으며 시제품 개발 과정에서 스위칭 소자 및 자성 부품의 발열문제 해결을 위하여 열분석 장비를 사용, 발열 부품의 온도저감 및 효율을 개선하였다.

참 고 문 헌

- [1] W. Chen, F. C. Lee, M. M. Jovanovic and J. A. Sabate, "A Comparative Study of a Class of Full Bridge Zero-Voltage-Switched PWM Converters" in Applied Power Electronics Conference Proceedings, Vol. 2, 1995, pp. 893~899.
- [2] K. Aitaka, M. Hosoda, T. Nomura, "Development of Intelligent Power Unit for Hybrid Four-Door Sedan", International Journal of Automotive Technology, Vol. 4, No. 2, 2003, pp. 57-64.
- [3] G. Hsieh, J. Li, H M. Liaw, J. Wang and T. Hung, "A Study on Full-Bridge Zero-Voltage-Switched PWM Converter: Design and Experimentation," Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, IECON 1993,

- pp. 1281 - 1285.
- [4] R. Redl, L. Balogh, and D. W. Edwards, "Optimum ZVS full-bridge dc/dc converter with PWM phase-shift control: Analysis, design considerations, and experimental results," in Proc.IEEE Appl. Power Electron .Conf.(APEC),1994, pp.159 - 165.
- [5] M. Marx and D. Schroder, "Analysis of a Zero-Voltage-Transition DC-DC Full-Bridge Converter," Power Electronics Specialist Conference, 1995, pp. 298 - 303.
- [6] R. Redl, L. Balogh, and D. Edwards, "Switch Transitions in the Soft-Switching Full-Bridge PWM Phase-Shift DC/DC Converter: Analysis and Improvements," Telecommunications Energy Conference, INTELEC 1993, pp. 350 - 357.
- [7] M. Kheraluwala, D. Novotny, D. Divan, "Design Considerations for High Power High Frequency Transformers," Power Electronics Specialist Conference, 1990, pp. 734 - 742.
- [8] D. Van de Sype, A. Van den Bossche, J. Melkebeek, and J. Maes, "Gate Drive Circuit for Zero-Voltage-Switching Half- and Full-Bridge Converters," Industrial Applications Conference, 2001, pp. 2151 - 2158.