

# 친환경자동차용 자연냉각방식 800V-48V, 3kW급 DC-DC 컨버터 모듈 개발에 관한 연구

김철진, 민주홍, 이용철  
HL만도

## Research on the development of a natural cooling 800V-48V, 3kW DC-DC Converter module for eco-friendly vehicles

Chuljin Kim, Juhong Min, Yongchul Lee  
HL Mando

### 2. 본 론

#### ABSTRACT

본 논문은 친환경자동차용 자연냉각방식 800V-48V, 3kW 급 DC-DC 컨버터 모듈에 대해 제안한다. 제안하는 DC-DC 컨버터 모듈은 384V~826V의 넓은 전압 제어 범위 및 48V 전원의 실사용 부하 영역에서 제어가 용이하고 소프트 스위칭을 기법을 적용하여 높은 효율을 달성할 수 있는 PSFB (Phase-Shift Full Bridge)방식을 사용하였고 본 논문에서는 자연 냉각방식의 3kW급 DC-DC 컨버터 모듈을 제작하고 컨버터의 성능을 검증하였다.

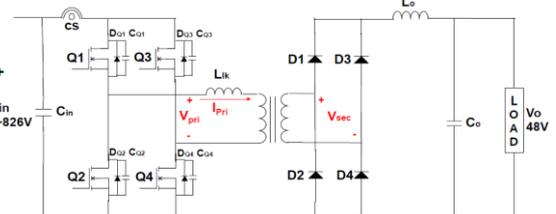
#### 1. 서 론

전기자동차 배터리의 효율성을 높이는 미래 열 관리 기술의 지속적인 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그 중 겨울철 난방 시 배터리로부터 공급받는 에너지를 최소화하고 열 효율을 높이기 위해 신규 발열체인 탄소 나노튜브(Carbon Nanotube) 필름을 활용한 신개념 난방 시스템이나 발열 유리 제상 시스템(Heated Glass Defrost System)이 현재 개발 중이며 이러한 전자장치 신규 개발과 적용에 따라 차량의 전류량을 줄이기 위해 차량의 Architecture를 12V 시스템에서 48V 시스템으로 전환하고 있는 추세이며 48V 시스템은 전력의 효율을 높여주고 차량 내 배선 단순화로 인한 차량 경량화에 따른 주행거리 향상에 도움을 준다. 따라서 차량의 48V 시스템의 변경과 환경 조건, 고전압 배터리 충전 조건에 맞춰 배터리로부터 48V 시스템에 안정적으로 전력을 공급할 대전력, 고밀도, 고효율 의 컨버터 모듈의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 환경조건을 고려한 384V~ 826V의 넓은 전압 범위의 자동차 고전압 배터리 조건에서도 실사용 부하 영역에 안정적으로 48V 전원을 공급하기 위해 PSFB 컨버터 방식으로 DC-DC 컨버터 모듈의 회로를 구성한다. 일반적으로 PSFB는 높은 입력전압 조건과 경부하 조건에서 소프트 스위칭을 실패할 수 있다는 단점이 있지만, 낮은 온도 조건에서 고전압 배터리의 넓은 범위의 전압 조건과 48V 전원의 실사용 부하 조건을 고려하였을 때 ZVS 턴 온을 동작으로 높은 효율을 달성하고, 자연냉각방식을 적용할 수 있도록 최적화 하였다.

#### 2.1 DC-DC 컨버터 모듈의 구성

DC-DC 컨버터 모듈의 일반적인 PSFB 회로는 그림 1과 같다. 48 V 전원의 실사용 부하 구간을 고려하여 MOSFET의 스위치 손실을 줄이기 위해 스위치가 ZVS동작을 하게 구성하였고 실제 회로에는 변압기 2차 측 정류 다이오드 뒷단에 간단한 RCD 스너버 회로를 적용하여 1차 측 변압기의 누설 인덕턴스(L<sub>lk</sub>)와 2차 측 환류 다이오드의 기생 커패시턴스에 대한 오실레이션 영향으로 발생하는 서지 전압을 저감하도록 설계하였다. 또한, PSFB 컨버터의 입력 단 전류 센싱을 통해 Peak Current Mode Control을 적용하여 빠른 응답 특성을 확보하였다. 또한, 낮은 입력 전압 조건에서 유효 시비율이 0.5이상 일 때 발생할 수 있는 인덕터 전류에 저주파 발진(Sub-harmonic oscillation) 현상을 방지하기 위해 경사 보상(Slope Compensation) 기법을 적용하였다.



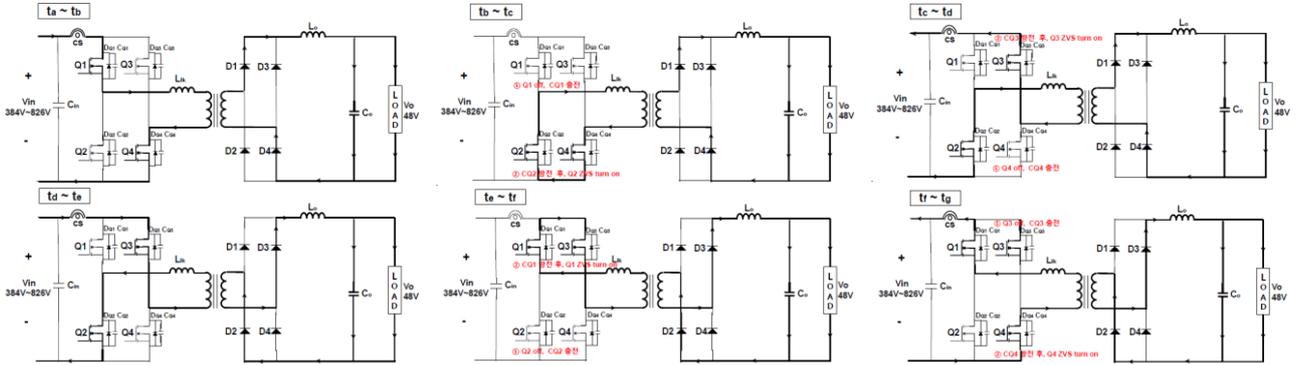
<그림 1> PSFB 회로

#### 2.2 PSFB 컨버터의 주요 동작

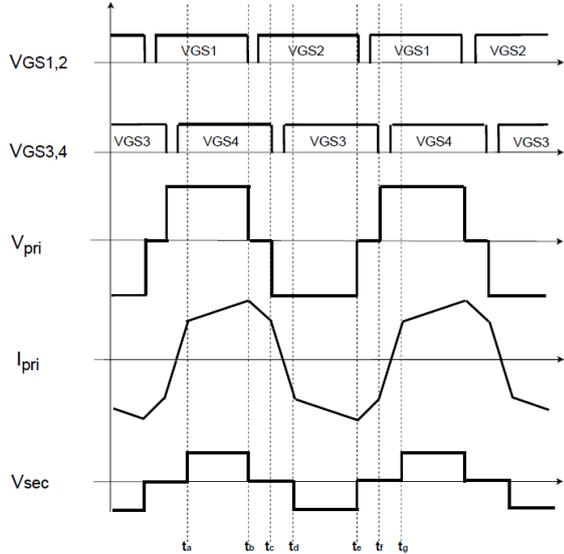
2.1에서 설명한 PSFB의 ZVS동작모드 및 동작파형은 그림 2-1, 2와 같다. 제안하는 DC-DC 컨버터는 스위치를 ZVS로 동작시키기 위하여 변압기의 누설 인덕턴스(L<sub>lk</sub>)를 이용하며, 아래 다항식(1)과 같이 누설 인덕턴스(L<sub>lk</sub>)에 저장된 에너지가 스위치의 출력 커패시턴스(C<sub>Q</sub>)와 변압기 권선의 기생 커패시턴스(C<sub>t</sub>)에 저장된 에너지의 합보다 커야 한다.

$$\frac{1}{2} L_{lk} I_{pri}^2 > \frac{4}{3} C_Q V_{in}^2 + \frac{1}{2} C_t V_{in}^2 \quad (1)$$

따라서, 384V~ 826V의 광범위한 입력 전압의 크기와 48V전원의 실사용 부하 영역에 따른 일차측 전류(I<sub>pri</sub>)의 변화 범위에 따라 스위치의 ZVS를 유지하기 위해 적절한 누설 인덕턴스(L<sub>lk</sub>)값을 선정하였다.



<그림 2-1> PSFB 동작 모드



<그림 2-2> PSFB 동작 파형

$$DT_{est} = A * V_{in}^4 + B * I_o^4 + C * V_{in}^3 + D * I_o^3 + E * V_{in}^2 + F * I_o^2 + G * V_{in} + H * I_o + I_o \quad (2)$$

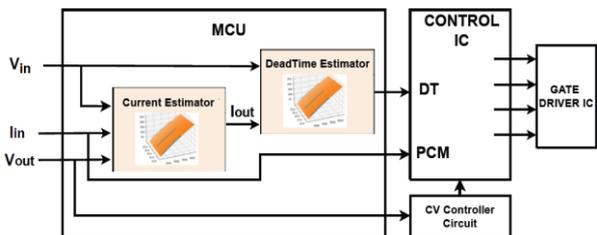
### 3. 실험 결과

제안하는 DC-DC 컨버터 모듈은 그림 4와 같다. 이 모듈의 성능을 평가하기 위하여 제작된 3kW급 DC-DC 컨버터 모듈은 전면에 단자를 통해 384V~826V의 DC전원을 입력받아 EMI 필터 통과하여 PSFB 컨버터 회로에 전달하게 된다. DC-DC 컨버터 모듈은 넓은 입력 전압 조건에서도 일정한 48V, 최대 전류 65A를 전면에 출력한다. DC-DC 컨버터 모듈의 변압기는 페라이트 재질의 PQ코어를 사용하며, 출력 인덕터는 분말 자성 재질의 코어를 사용한다. 이 때, PSFB의 스위칭 주파수는 약 100kHz이다.



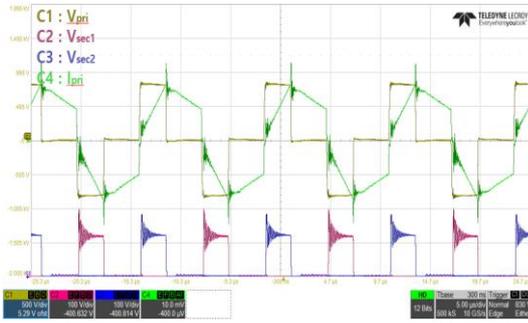
<그림 4> 3kW급 DC-DC 컨버터 모듈 사진

DC-DC 컨버터 모듈의 PSFB 컨버터 회로는 출력 부하량에 따라 누설 인덕턴스(L<sub>lk</sub>)에 저장된 에너지의 차이로 발생될 수 있는 다이오드 동통 손실과 듀티 손실을 최소화 하기 위하여 변압기의 1차측의 적절한 누설 인덕턴스(L<sub>lk</sub>)를 선정할 수 있다. 누설인덕턴스(L<sub>lk</sub>)와 스위치의 기생 커패시턴스(C<sub>0</sub>)로 결정되는 공진 주기(f<sub>ring</sub>)에 기반하여 선택한 단일 Dead-Time으로 실사용 부하 구간에서 효율을 확보할 수 있도록 설계하였다. 그러나, 단일 Dead-Time은 입력 전압이 커짐에 따라 스위치의 기생 커패시턴스(C<sub>0</sub>) 값의 감소하여 공진 주기(f<sub>ring</sub>)가 짧아져 ZVS가 실패 하는 현상이 발생한다. 따라서, 그림 3과 같이 전류 추정 알고리즘 통해 얻은 출력 전류 값과 입력전압 값으로 다중선형회귀 방식을 적용한 Dead-Time을 추정식(2)와 같이 유도하여 다음과 같이 가변 Dead-Time 시스템을 적용할 수 있다.

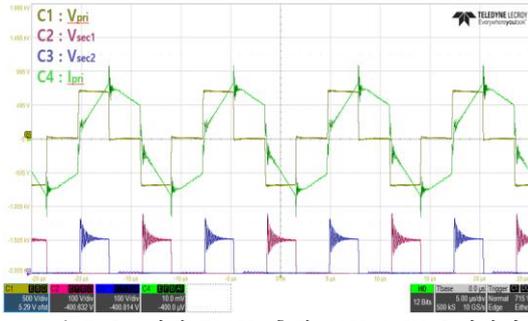


<그림 3> PSFB 컨버터 Dead-Time 가변 시스템

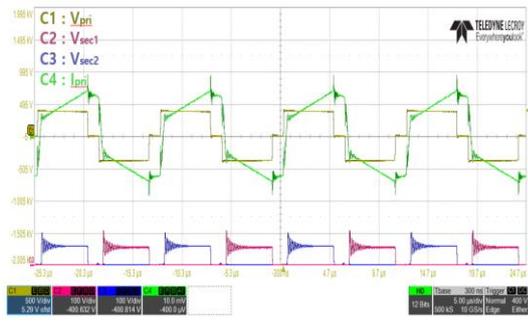
그림 5-1, 2, 3은 3kW급 DC-DC 컨버터 모듈의 입력 전압 조건에 따라 최대 출력 전류 조건의 동작 파형을 보여주고 있다. 변압기 설계 시, 적절한 자화 인덕턴스(L<sub>m</sub>)와 누설 인덕턴스(L<sub>lk</sub>)를 값을 선정하여 넓은 입력 전압 범위의 실사용 부하 영역에서 높은 효율을 만족하도록 설계하였다. 1차 측 변압기의 누설 인덕턴스와 2차 측 환류 다이오드의 기생 커패시턴스에 대한 오실레이션 영향으로 발생하는 서지 전압의 크기에 따라 적절한 RCD 스너버 회로를 구성하여 2차 측 정류 다이오드 사양에 만족하도록 설계하였다.



<그림 5-1> 입력 826V, 출력 48V, 3kW 동작파형

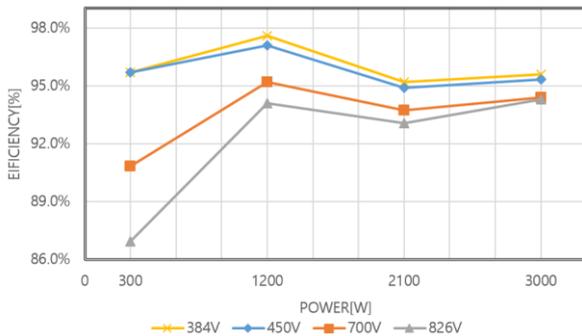


<그림 5-2> 입력 700V, 출력 48V, 3kW 동작파형

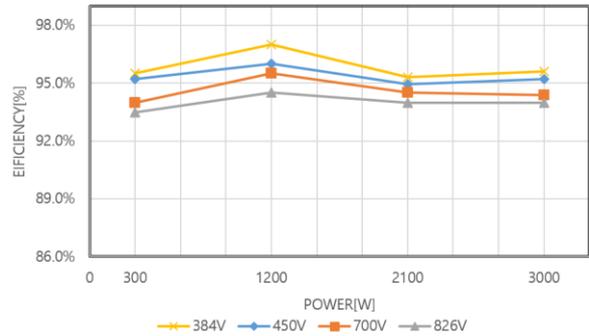


<그림 5-3> 입력 384V, 출력 48V, 3kW 동작파형

그림 6-1, 2는 단일 Dead Time 조건과 가변 Dead Time 시스템을 적용하여 입력 전압 조건에 따라 실사용 부하 조건에서 효율을 측정된 그래프이다. 시험의 결과와 같이 약 10%의 경부하조건에 입력 전압이 커짐에 효율이 저감되는 것을 확인할 수 있으며, 가변 Dead Time 시스템의 적용으로 ZVS에 필요한 누설인덕터의 에너지가 부족한 경부하조건에서 영 전압 혹은 최소 전압에 스위치가 턴-온 되도록 하여 효율이 개선되는 것을 확인할 수 있다.

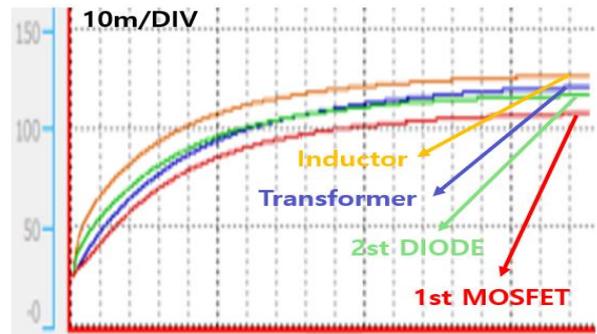


<그림 6-1> 단일 Dead Time 적용 실측 효율



<그림 6-2> 가변 Dead Time 적용 실측 효율

그림 7은 DC-DC 컨버터 모듈의 정격 입력전압(700V), 최대 출력 전류 조건인 3kW용량으로 상온조건에서 자연냉각방식으로 동작 주요 소자 온도 측정 결과이다. 자연냉각방식의 제품 안정성을 확보하기 위해 주요소자들의 관리기준 온도를 만족하도록 설계하였고 약 3시간의 온도 시험을 통해 설계의 신뢰성을 검증하였다.



<그림 7> 자연냉각방식 동작 주요 소자 온도 측정 결과

#### 4. 결 론

본 논문에서는 친환경자동차용 자연냉각방식 800V-48V, 3kW급 DC-DC 컨버터 모듈 개발에 관한 연구를 진행하였다. 제안하는 DC-DC 컨버터 모듈의 성능을 검증하기 위해 적절한 변압기의 누설인덕턴스(L<sub>lk</sub>)와 Dead-Time 가변 시스템을 적용하여 전 범위에서의 ZVS 성취를 확인하였고 넓은 입력 전압 범위와 실사용 부하 조건에서 평균 효율 94%를 만족하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Gang Youl Jeong. Improved Phase-shift Pulse-width Modulation Full-bridge Converter using a Blocking Capacitor. JIEIE 5 August 2011
- [2] Juhong Min, Yongchul Lee, Sunmin Hwang, Hyungtae Moon. Variable Dead time technique for improving power efficiency of wide-range PSFB Converter JPE 02 March 2016