

넓은 범위의 PSFB 컨버터 효율 향상을 위한 데드-타임 가변 기술

민주홍, 이용철, 황선민, 문형태
HL만도

Variable Dead time technique for improving power efficiency of wide-range PSFB Converter

Juhong Min, Yongchul Lee, Sunmin Hwang, Hyungtae Moon
HL Mando

ABSTRACT

본 논문에서는 넓은 범위의 PSFB 컨버터의 효율을 향상시키기 위해 입력전압, 부하에 따라 데드-타임 가변 기술을 제안한다. 동작 구간에 따라 최적의 데드-타임을 구한 뒤 다항선형회귀 모델을 통해 입력전압, 부하 전류에 대한 계산식을 산출하였다. 또한 계산식을 프로토타입의 2.58kW PSFB 컨버터(LDC)에 적용하여 단일 데드-타임에 비해 모든 동작 구간에서 효율이 향상됨을 확인하였다.

1. 서 론

PSFB 컨버터는 1차측 스위치의 영 전압 스위치(ZVS)를 달성할 수 있기 때문에 xEV 컨버터로 널리 사용되어 왔다. LDC(Low DC/DC Converter)에 주로 PSFB 토폴로지가 사용되며, 고전압 배터리 전압을 12V로 변환하여 보조배터리 충전 및 전장 부하 전력을 공급하는 역할을 수행한다. 컨버터 정격 출력은 차량에 따라 1.8kW~2.4kW이며, 전장 장치가 늘어남에 따라 용량은 커지고 있는 추세이다. 이에 따라 PSFB 컨버터가 동작하는 넓은 범위에서 효율이 중요시 되고 있다. 또한 차량 주행 시 주 사용 부하는 정격의 10~15% 이므로 정격 효율만 아니라 낮은 부하 효율의 중요성이 강조된다. 따라서 PSFB 컨버터 설계 시, 10~15%부하에서 ZVS가 가능하도록 변압기의 누설인덕턴스를 선정하게 된다. 그리고 1차측 누설인덕터와 스위치의 기생 캐패시터(C_{oss})의 공진 주기에 기반하여 선택된 데드-타임으로 주 사용 부하 구간의 효율을 향상시킨다.

하지만 단일 데드-타임은 넓은 동작 범위를 가지는 PSFB 컨버터의 효율을 저하시킬 수 있다. 컨버터 부하가 클 수록 누설인덕터에 저장된 에너지가 커져 스위치 전압의 방전 시간은 줄어들게 된다. 따라서 다른 측 스위치가 켜질 때까지 바디 다이오드 도통 손실을 일으키고 듀티 손실이 증가해 동작 범위가 줄어든다. 또한 입력전압이 커지면서 스위치의 기생 캐패시터 값이 감소한다(그림2). 이로 인해 누설인덕터와 공진 주기가 짧아져 기생 캐패시터를 다시 충전시켜 ZVS가 실패할 수 있다. 따라서 단일 데드-타임은 특정 동작 구간의 효율은 확보할 수 있으나, 모든 동작

범위의 효율을 향상시키는 것은 어렵다.

최근 PSFB 컨버터의 기생성분들을 모델링하고 해석하여 동작 범위에 따라 데드-타임을 계산하여 가변 하는 연구가 진행되고 있다^{[1][2]}. 하지만 PWM 지연, 필터, 스위치 기생 성분의 변화 등으로 데드-타임을 정확한 계산이 어렵고 모델링을 수정하여 보정하기 어려운 한계를 가지고 있다.

본 논문에서는 컨버터의 입력전압, 부하에 따라 최적의 데드-타임을 가변하는 기술을 제안한다. 넓은 동작 범위에서 구간 별로 Lagging leg 전압을 측정하여 최적의 데드-타임을 찾아 데이터 셋을 확보했다. 이를 기반으로 Python 다중 선형 회귀 모델을 사용하여 입력전압, 출력전압, 부하에 대한 데드-타임 추정식을 산출했다. 이를 프로토타입의 2.58kW PSFB 컨버터에 적용하여 모든 입력전압 범위에서 10% 이상 부하에서 검증하여 전 동작 범위에서의 효율 이 향상됨을 확인하였다.

2. 데드-타임 가변 기술

2.1 동작 구간별 데드-타임

PSFB 컨버터 동작 범위를 변경시켜가며 스위치(Si MOSFET)의 V_{d-s} 파형 측정을 통해 최적의 데드-타임을 찾아내었다. 정확한 측정을 위해 그림1과 같이 컨버터의 데드-타임을 1us로 길게 설정하여 입력전압과 부하를 변화시키며 Lagging leg 전압 파형을 확인하였다.

그림1의 (a)와 같이 낮은 부하에서 DCM으로 동작하는 경우 L_m 의 에너지로 스위치의 전압을 방전 시키므로 최적 데드-타임은 전반적으로 큰 것을 확인할 수 있다. (b)는 CCM 동작하지만, ZVS를 위한 누설인덕터의 에너지가 부족한 경우이다. 이 지점에서 부하가 증가하면 (c)와 같이 ZVS에 도달하게 되며 영 전압 도달까지 시간은 공진 주기의 1/4 지점이다. 이 지점으로부터 부하가 증가하게 되면 누설인덕터의 에너지가 커져 (d)와 같이 스위치가 영 전압에 도달하는 시간이 점점 줄어들게 된다. 부하 구간마다 동작 모드가 다르지만, 부하가 커짐에 따라 최적 데드-타임은 점점 감소하게 된다.

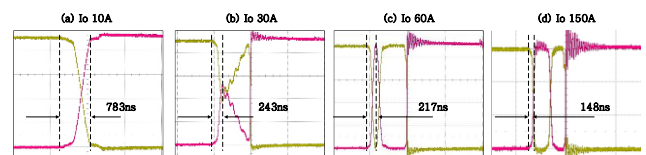


그림1 Lagging leg V_{d-s} ($V_{in}=450V$)

Fig.1 V_{d-s} of Lagging leg ($V_{in}=450V$)

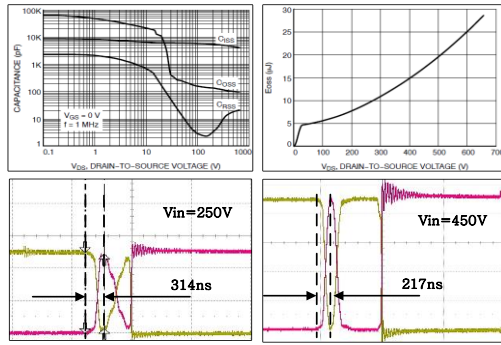


그림2 V_{ds} 에 따른 FET 기생 캐패시턴스

Fig.2 Parasitic capacitance of FET by V_{ds}

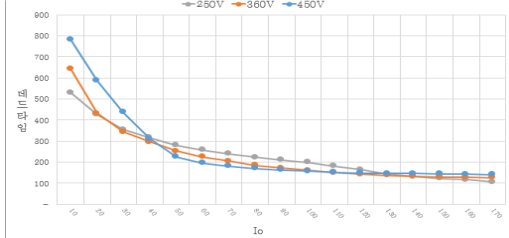


그림3 입력전압, 부하에 따른 최적 데드-타임

Fig.3 Best dead-time by input voltage and load

그림2와 같이 입력 전압에 따라 스위치 기생 캐패시터 값이 감소하므로 누설인덕터와 스위치 캐패시터 공진 주기가 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 ZVS 영역에서 입력 전압이 클수록 영 전압에 도달하는 시간이 짧아진다. 하지만 기생 캐패시터 값의 감소함에도 저장된 에너지는 커져 DCM 구간에서 영 전압 도달 시간은 길어지게 된다.

2.2 데드-타임 추정식 산출

스위칭 손실을 최소화 하기 위한 데드-타임은 입력전압, 부하에 대해 비선형성을 가지기에, 이를 다항식 형태로 만들기 위해 다중선형회귀 방식을 적용하였다. 다중선형회귀 과정은 Obtaining Stage, Training Stage로 나뉜다. Obtaining Stage는 데이터 셋 확보를 위한 단계이다. 데이터 셋은 그림3과 같이 입력전압, 부하 조건에 따라 시험을 통해 측정한 데드-타임으로 구성된다. 다음으로 Training Stage에서는 다중 입력 변수에 대한 선형 출력 모델을 적용한다. 또한 경사하강법을 사용하여 Training Set에 대한 손실 값을 최소화하는 최적 함수 식(1)을 산출했다. 수식에 표현된 A~I는 다항선형회귀를 통해 얻은 다항식 계수이며 해당 함수를 통해 동작 조건에 따른 최적의 데드-타임을 추정할 수 있다.

$$DT_{est} = A * V_{in}^4 + B * I_o^4 + C * V_{in}^3 + D * I_o^3 + E * V_{in}^2 + F * I_o^2 + G * V_{in} + H * I_o + I \quad (1)$$

2.3 시험 결과

다중선형회귀를 통해 완성된 데드-타임 추정식을 그림4와 같이 프로토 타입 컨버터 MCU에 이식하여 동작에 따라 PWM의 데드-타임이 가변 되도록 하였다. 시스템 구성 시, 고장 상황을 고려해 데드-타임 상/하한치를 800ns/100ns로 하는 리미터를 추가하였다. 그리고 5% 이하 부하에서 전류 감지 정확도가 낮은 점을 고려해, 데드-타임이 800ns 고정되어 출력되도록 설정하였다. 컨버터 사양은 그림5와 같다.

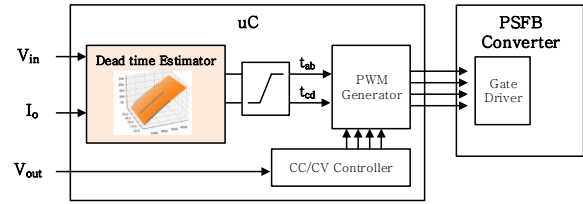


그림4 PSFB 컨버터 데드-타임 가변 시스템

Fig.4 Variable dead-time system for PSFB Converter

Parameter	Value
Output power (Po)	Max.2580W
Output current (Io)	Max.170A
Output voltage	13.9V
Input voltage	250~450V
Turn ratio of Transformer	12:1:1
Lm / Lk	220uH / 6uH

그림5 2.58kW xEV PSFB 컨버터 사양

Fig.5 Specification of 2.58kW xEV PSFB converter

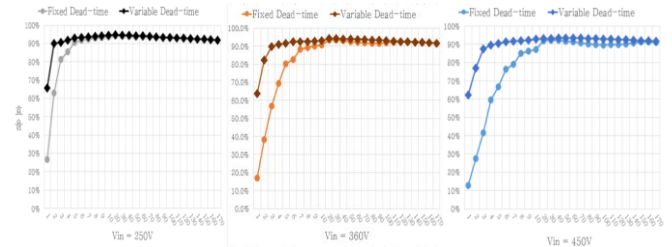


그림6 데드-타임 가변 PSFB 컨버터 효율

Fig.6 Efficiency of variable dead-time PSFB converter

시험 결과는 그림6과 같으며 제안한 컨버터와 입력전압 360V, 부하10% 기준으로 데드-타임을 고정시킨 컨버터를 비교하였다. 제안된 기술이 적용되어 컨버터의 스위칭 손실을 최소화하여 모든 구간 효율이 상승된 것을 확인할 수 있다. 특히 ZVS에 필요한 누설인덕터의 에너지가 부족한 낮은 부하에서 영 전압 혹은 최소 전압에 스위치가 턴-온 되도록 하여 효율이 더욱 향상되었다.

3. 결 론

본 논문에서는 PSFB 컨버터의 넓은 범위에서 효율 향상을 위해 동작 구간별로 데드-타임을 가변 하는 기술을 제안했다. 스위칭 손실을 최소화하는 데드-타임을 추정하여 기존 단일 데드-타임 컨버터 대비 모든 범위에서 효율을 향상시켰다. xEV 주행거리와 전장 부하가 증가됨에 따라 컨버터의 동작 범위는 점차 넓어지고 있다. 따라서 제안하는 데드-타임 가변 기술은 xEV 어플리케이션에서 유용한 선택지가 될 수 있다. 또한 PSFB 컨버터 뿐만 아니라 다양한 토폴로지의 적용이 충분히 가능한 구조이기 때문에, 추가적인 연구 가능성을 제시한다.

참 고 문 헌

- [1] Lei Zhao, Haoyu Li, Yue Hou, Yanxue Yu. Operation analysis of a phase-shifted full-bridge converter during the dead-time interval. IET 01 July 2016
- [2] Taizhi Zhang. Dead-Time for Zero-Voltage-Switching in Battery Chargers with the Phase-Shifted Full-Bridge Topology: Comprehensive Theoretical Analysis and Experimental Verification. JPE 02 March 2016