

GaN 기반 배터리 활성화 공정용 DC/DC 컨버터의 게이트 턴-오프 시 역방향 도통 손실 저감을 위한 Dead Time 최적화 기법

김도현, 허고운, 임종현, 김동환, 이병국†
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Dead Time Optimization Scheme to Minimize Reverse Conduction Loss of GaN-based DC/DC Converter for Battery Formation System

Do Hyeon Kim, Go-woon Heo, Jong-Hun Lim, Dong Hwan Kim and Byoung Kuk Lee†
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 Gallium nitride (GaN) 기반 활성화 공정용 DC/DC 컨버터의 dead time 최적화 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 부하 전류의 크기에 따른 최적 dead time을 수식적으로 도출하여 게이트 턴-오프 시 스위치 역방향 도통 손실 감소를 통해 컨버터 효율을 증가시킨다. 제안된 기법의 타당성을 검증하기 위해 5V/100A GaN 기반 배터리 활성화 공정용 testbed를 구축하고 기존 시스템과 제안하는 방안의 효율을 비교한다.

1. 서론

배터리 활성화 공정 시스템에서 제한된 공간에 더 많은 배터리를 충·방전하기 위해 양방향 buck-boost 컨버터에 Gallium Nitride (GaN) 기반 스위칭 소자가 적용되고 있다. 하지만 dead time 구간에서 양방향 buck-boost 컨버터는 기존 Si 소자 대비 GaN 소자의 큰 전압강하가 발생한다. Dead time 구간에서 전압강하는 그림 1과 같이 나타나며 dead time 구간에서 컨버터의 스위치가 역방향 도통 되어 스위치 양단 전압이 입력 전압보다 역방향 도통 전압만큼 크게 나타나게 된다. 따라서 게이트에 턴-온/오프 신호 인가 시 발생하는 dead time을 최적화하여 손실을 최소화하는 방안이 필요하다.

이를 위하여 기존 연구에서는 역방향 전압강하에 의한 손실을 최소화하기 위해 스위치의 출력 커패시턴스 (C_{oss})의 방전 시간을 이용하여 dead time을 근사화하는 기법이 제안되었다.^[1] 제안된 기법은 기생 커패시턴스의 충·방전 동작을 분석하였지만, 근사화된 값을 사용하여 정확한 dead time 선정이 어렵다는 단점을 가진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 게이트 전압에 따른 입력 커패시턴스 (C_{iss})의 변화를 고려하여 dead time을 선정하는 기법이 제안되었다.^[2] 하지만 제안된 기법은 밀러 효과에 의해 나타나는 Miller plateau 전압과 같은 스위치의 동작 특성을 고려하지 않아 최적 dead time 선정 과정에서 오차가 발생할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 활성화 공정 시스템의 고효율 동작을 위해 스위치 동작 특성을 고려한 GaN 기반 DC/DC 컨버터 스위치의 dead time 선정 기법을 제안한다. 제안하는 방법은 양방향 DC/DC 컨버터의 buck 모드 동작에서 부하 전류의 크기에 따라 스위치 기생 커패시터의 충·방전 동작을 분석하여 최적의 dead time을 수식적으로 도출한다. 도출된 dead time의

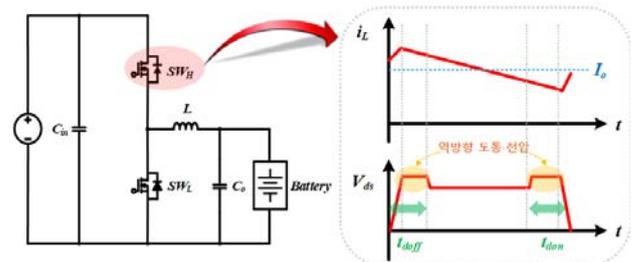


그림 1 양방향 Buck-Boost 컨버터의 상단 스위치 파형
 Fig. 1 High-side switch waveform of a bidirectional buck-boost converter

표 1 DC/DC 컨버터 testbed 사양

Table 1 Testbed specification of DC/DC converter

Parameter [unit]	Value
입력 전압 [V]	14
부하 전압 [V]	0.5-5
부하 전류 [A]	10-100
스위칭 주파수 [kHz]	500

타당성을 검증하기 위해 5V/100A GaN 기반 활성화 공정용 DC/DC 컨버터 testbed를 설계하여 시스템의 효율을 비교하였으며 testbed의 사양은 표 1과 같다.

2. Buck 모드 동작에서 dead time 선정 기법

2.1 턴-온 dead time 분석

그림 2(a)는 양방향 DC/DC 컨버터의 스위치 게이트 단자에 턴-오프 신호 인가 시 하단 스위치의 게이트-소스 전압 (V_{gs}), 드레인-소스 전압 (V_{ds}) 및 전류 (I_d) 파형을 나타낸다. 상단 스위치 턴-온 dead time 구간에서는 컨버터의 하단 스위치 게이트에 턴-오프 신호가 인가되며 각 구간별 그림 2(b), (c), 및 (d) 동작이 다음과 같이 나타난다. :

1. t_0-t_1 구간 : 그림 2(b)에서 게이트-소스 기생 커패시턴스 (C_{gs})의 방전이 시작되어 게이트 전압 (V_{gs})는 Miller 전압 (V_{Miller})까지 감소하며 V_{Miller} 는 (1)과 같이 표현 가능하다.

$$V_{Miller} = \frac{i_d}{g_m} + V_{th} \quad (1)$$

식 (1)에서 g_m 은 transconductance를 의미하고 V_{th} 는 문턱

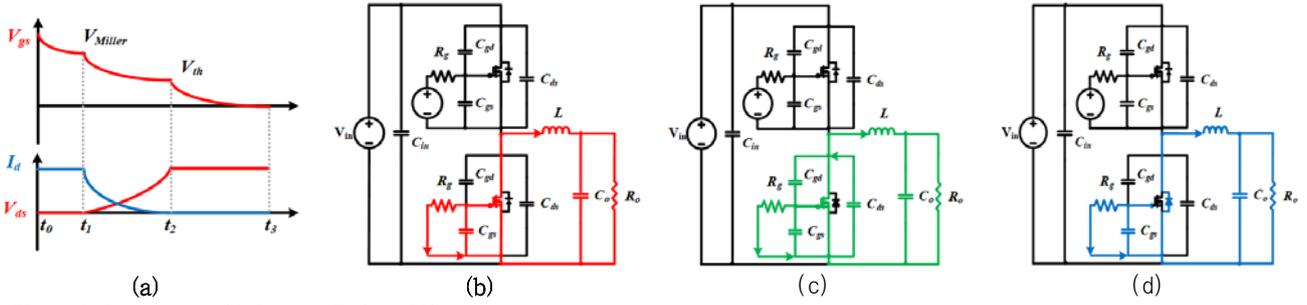


그림 2 턴-온 dead time 분석 : (a) 구간별 파형 (b) t_0-t_1 (c) t_1-t_2 (d) t_2-t_3
 Fig. 2 Analysis of turn-on dead time : (a) Waveform for each section (b) t_0-t_1 operation (c) t_1-t_2 operation (d) t_2-t_3 operation

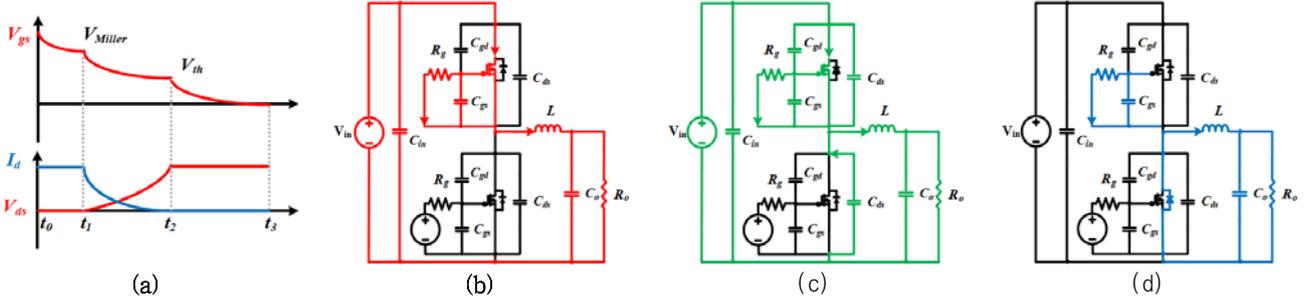


그림 3 턴-오프 dead time 분석 : (a) 구간별 파형 (b) t_0-t_1 동작 (c) t_1-t_2 동작 (d) t_2-t_3 동작
 Fig. 3 Analysis of turn-off dead time : (a) Waveform for each section (b) t_0-t_1 operation (c) t_1-t_2 operation (d) t_2-t_3 operation

전압을 의미한다. (1)에서 V_{Miller} 값은 i_d 값에 비례하며 i_d 는 부하 전류와 같으므로 V_{Miller} 는 부하 전류의 변화에 비례하는 것을 알 수 있다. 또한, C_{gs} 의 RC 전압 관계식을 통해 방전 시간을 도출할 수 있다.

2. t_1-t_2 구간 : 그림 2(c)에서 V_{Miller} 까지 감소된 게이트 전압은 V_{th} 까지 감소하며 V_{Miller} 는 (1)의 g_m 값이 V_{gs} 에 따라 변하기 때문에 값이 일정하게 유지되지 않고 감소하게 되며 게이트-드레인 기생 커패시턴스 (C_{gd}), 드레인-소스 기생 커패시턴스 (C_{ds})와 C_{gs} 가 방전된다. 이때 C_{gd} , C_{gs} 는 고정된 값을 가지지 않기 때문에 등가 커패시턴스 (C_{eq})를 통해 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$C_{eq} = \frac{Q_{(t_1-t_2)}}{(V_{Miller} - V_{th})} = \frac{Q_g - Q_{g(th)} - Q_{(t_0-t_1)}}{(V_{Miller} - V_{th})} \quad (2)$$

$Q_{(t_1-t_2)}$ 는 그림 2(c) 구간에서 게이트 전하량, Q_g 는 총 게이트 전하량, $Q_{g(th)}$ 는 문턱 전압에서 게이트 전하량, $Q_{(t_0-t_1)}$ 는 그림 2(b) 구간에서 게이트 전하량을 나타낸다. 게이트 전하량은 데이터 시트의 값을 통해 확인할 수 있으며 이를 바탕으로 그림 2(c) 구간에서 기생 커패시터의 방전 시간을 도출할 수 있다.

3. t_2-t_3 구간 : 그림 2(d)에서 게이트 전압은 문턱 전압에서 0으로 감소하며 하단 스위치가 턴-오프되어 역방향 도통된다. 이 구간에서 C_{gs} 의 RC 전압 관계식을 통해 방전 시간을 도출할 수 있다. 하지만 전압이 완전히 0이 되기 위해서는 무한한 시간이 필요하므로 전압의 크기를 0.018V로 사용하여 dead time을 도출하였다. 각 구간에서 기생 커패시터의 방전 시간을 바탕으로 턴-온 dead time을 도출하면 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{don} = t_{gH} - R_g \left(C_{gs} \ln \frac{V_{Miller}}{V_{gs}(t=t_0)} + C_{eq} \ln \frac{V_{th}}{V_{Miller}} + C_{gs} \ln \frac{0.018}{V_{th}} \right) \quad (3)$$

t_{gH} 는 하단 게이트 드라이버의 하강 시간을 의미하며 t_{gH} 과 구간별 방전 시간을 모두 더해 부하 전류에 따른 턴-온 dead time을 도출한다.

2.2 턴-오프 dead time 분석

턴-오프 구간은 턴-온 구간과 반대로 상단 스위치의 게이트에 턴-오프 신호가 인가된다. 따라서 그림 3(a)는 상단 스위치의 V_{gs} , V_{ds} 및 I_d 파형을 나타낸다. 턴-오프 dead time 분석의 경우 턴-온 dead time 분석 방법과 동일한 방법으로 그림 3(b), (c) 및 (d) 각 구간의 기생 커패시터의 방전 시간을 통해 턴-오프 dead time을 (4)와 같이 도출할 수 있다.

$$t_{doff} = t_{gH} - R_g \left(C_{gs} \ln \frac{V_{Miller}}{V_{gs}(t=t_0)} + C_{eq} \ln \frac{V_{th}}{V_{Miller}} + C_{gs} \ln \frac{0.018}{V_{th}} \right) \quad (4)$$

t_{gH} 는 상단 게이트 드라이버의 하강 시간을 의미하며 t_{gH} 와 구간별 방전 시간을 모두 더해 부하 전류에 따른 턴-오프 dead time을 도출 가능하다.

2.1절의 식 (3)과 2.2절의 식 (4)를 바탕으로 배터리 활성화 공정용 DC/DC 컨버터의 부하 전류에 따른 최적의 dead time을 도출하면 그림 4와 같이 나타난다. 그림 4에서 부하 전류의 크기가 증가하면 스위치 기생 커패시터의 방전 시간이 증가하게 되어 부하 전류에 따라 dead time이 감소한다. 또한, 턴-오프 dead time 구간에서 전류의 크기가 턴-온 dead time 구간보다 크기 때문에 스위치 t_{doff} 의 값이 t_{don} 보다 작은 값을 가지게 된다.

3. 제안하는 기법의 실험적 검증

제안하는 기법을 검증하기 위해 그림 5와 같이 5V/100A GaN 기반 활성화 공정용 양방향 buck-boost 컨버터 testbed를

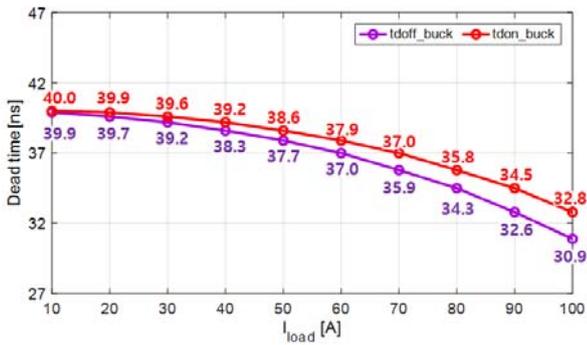
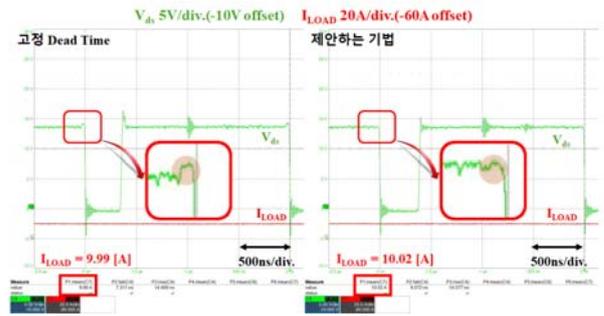


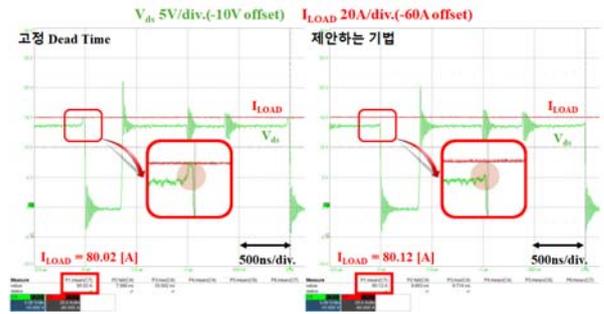
그림 4 부하 전류에 따른 on/off dead time
Fig. 4 Turn-on/off dead time based on load current



그림 5 배터리 활성화 공정용 GaN 기반 DC/DC 컨버터 testbed
Fig. 5 GaN-based DC/DC converter testbed for battery formation



(a)



(b)

그림 6 상단 스위치 V_{ds} 파형 비교 (a) $I_{out}=10A$ (b) $I_{out}=80A$
Fig. 6 Comparison of high-side V_{ds} waveforms (a) $I_{out}=10A$ (b) $I_{out}=80A$

설계하였다. 배터리 활성화 공정을 모사하기 위해 DC 전자 로드의 정전압 부하 모드를 사용하였고 배터리 충전 상황을 위해 양방향 buck-boost 컨버터는 buck 모드 동작을 수행하였다. Buck 모드 동작 시 부하 전류 10~100A 범위에서 제안하는 기법과 고정 dead time 기반 전류제어 시 상단 스위치 전압을 측정하였으며 전력 분석기를 이용하여 컨버터의 효율을 비교하였다.

그림 6은 제안하는 기법과 고정 dead time 기반 동작 시 상단 스위치의 V_{ds} 파형을 나타낸다. 그림 6(a)는 부하 전류 10A에서 상단 스위치의 파형을 나타내며 그림 6(b)는 부하 전류 80A에서 상단 스위치의 파형을 나타낸다. 제안하는 기법 적용 시 고정 dead time 기반 동작 대비 역방향 도통 전압강하가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 제안하는 기법과 고정 dead time 기반 동작 시 컨버터의 효율을 나타내며 부하 전류는 20A에서 100A의 범위를 가진다. 컨버터의 효율을 비교한 결과 부하 전류 범위 내에서 제안하는 기법의 효율이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 제안하는 기법의 효율이 부하 전류 40A 지점에서 95.3%로 최댓값을 가지며 이는 고정 dead time 기반 동작 시 효율 94.7%보다 0.6%p 더 높게 나타났다. 또한, 부하 전류 60A 지점에서 컨버터의 효율은 94.1%로 측정되었으며 고정 dead time 기반 동작 시 효율 93.9%보다 0.2%p 더 높게 나타나는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 활성화 공정용 GaN 기반 DC/DC 컨버터의 게이트 턴-오프 시 역방향 도통 손실 저감을 위해 스위치 기생 커패시터의 충전·방전 동작을 수식적으로 분석하여 최적의

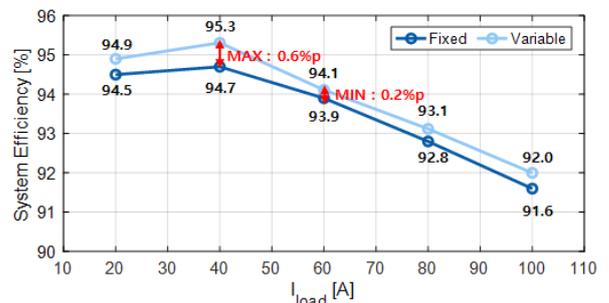


그림 7 부하 전류에 따른 DC/DC 컨버터 효율 비교
Fig. 7 Comparison of DC/DC converter efficiency

dead time을 도출한다. 제안된 기법을 검증하기 위해 GaN 기반 활성화 공정용 양방향 DC/DC 컨버터 testbed를 설계하여 확인한 결과 역방향 도통 전압강하가 감소하는 것을 확인할 수 있었으며 효율 비교 결과 부하 전류 40A 지점에서 효율이 최대 0.6%p 증가하여 제안하는 기법의 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] Williford, Paige, et al. "Optimal dead-time setting and loss analysis for GaN-based voltage source converter." *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. IEEE, 2018.
- [2] Zhou, Yimin, et al. "Dead time optimization for synchronous switching of SiC MOSFETs considering nonlinear gate capacitance." *IEEE Transactions on Power Electronics* 38.5 (2023): 5665-5669.