

GaN 기반 배터리 활성화 공정용 DC/DC 컨버터 시스템의 스위칭 노이즈 커플링 개선을 위한 RC 스너버 회로 설계방안

허고운, 임중현, 임제영, 김동환, 이병국[†]
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Optimizing RC Snubber Circuit Design to Improve Switching Noise Coupling of DC/DC Converter for GaN-based Battery Formation Processes

Go-woon Heo, Jong-Hun Lim, Je Yeong Lim, Dong Hwan Kim and Byoung Kuk Lee[†]
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 배터리 활성화 공정용 DC/DC 컨버터 시스템에 적용되는 GaN 기반 2상 인터리브 양방향 벡-부스트 회로에서 스위칭 노이즈 커플링을 줄이기 위한 RC 스너버 회로의 설계방안을 제안한다. 제안하는 방안은 스위칭 시 발생하는 공진 주파수를 통해 기생 성분을 분석하여 전압 스파이크 및 링잉을 최소화하기 위한 RC 스너버를 수식적으로 설계한다. 제안하는 설계방안의 유효성을 검증하기 위하여 5V/100A 2상 인터리브 양방향 벡-부스트 컨버터 테스트베드를 기반으로 스위칭 노이즈 개선 효과를 확인한다.

1. 서 론

최근 고효율 및 전력 밀도에 대한 요구가 증가함에 따라 빠른 스위칭특성 및 도통 손실 측면에서 유리한 질화 갈륨 (Gallium nitride, GaN) 소자가 고주파 전력변환 시스템에 널리 적용된다. 하지만 GaN 기반 시스템의 고주파수 동작 시, 회로와 스위치 내 기생 성분 영향이 커지기 때문에 회로 내 공진 현상이 발생하게 되어 스위치 드레인-소스 전압의 링잉 현상 및 전압 스파이크가 발생한다. 이러한 스위칭 시 발생하는 노이즈 성분은 시스템의 과열 및 전자기 간섭 문제를 일으키며 시스템 성능 및 전력변환 효율을 감소시킬 수 있다.

기존 연구에서는 스위칭 과도현상 시 발생하는 링잉 현상 및 잡음을 줄이기 위해 절연 전원 공급 장치의 구동 방식 및 잡음 필터를 통한 회로가 제안되었다^[1]. 제안된 회로는 스위치 온 상태 전압 감지 회로와 노이즈 필터 회로로 구성되어 스위칭 노이즈를 저감할 수 있지만, 추가적인 회로 구성이 요구된다. 따라서 간단한 회로 구성으로 전압 스파이크 및 게이트 드라이브 링잉을 저감하기 위해 PCB 레이아웃을 최적화하여 기생 성분을 저감하는 방안이 제안되었다^[2]. 하지만 게이트 드라이브 회로 설계 및 PCB 최적화 방법은 회로 크기에 따라 달라지므로 회로 변경 시, 최적화하는 데 한계점이 존재한다.

따라서 본 논문에서는 GaN 기반 배터리 활성화 공정용 DC/DC 컨버터 시스템의 스위칭 노이즈 커플링을 줄이기 위한 최적의 RC 스너버 회로의 설계방안을 제안한다. 제안하는 방안은 2상 인터리브 구조에서 각 상의 GaN 스위치의 노이즈 증폭으로 인한 영향을 최소화하기 위한 최적의 RC 스너버를 수식적으로 설계한다. 제안하는 설계방안은 회로 내 존재하는 기생 성분 간 공진 주파수를 기반으로 전압 스파이크를 스위치

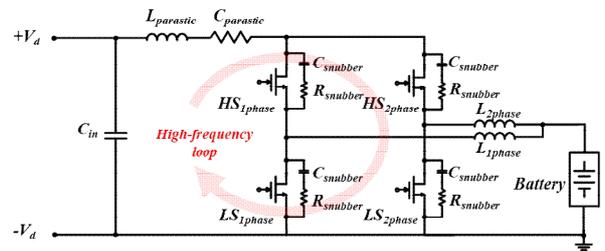


그림 1 GaN 기반 2상 인터리브 양방향 벡-부스트 회로도
 Fig. 1 GaN-based two-phase interleave bi-directional buck-boost circuit diagram

정격 이내로 저감할 수 있으며, 공진 감쇠비를 최적화하여 회로 안정성을 높일 수 있다. 제안하는 RC 스너버 설계방안의 유효성 검증을 위하여 5V/100A 2상 인터리브 양방향 벡-부스트 컨버터 테스트베드를 기반으로 스위칭 노이즈 개선 효과를 확인한다.

2. 제안하는 RC 스너버 회로 설계방안

2.1 스위칭 노이즈 커플링 분석

그림 1에 나타난 GaN 기반 2상 인터리브 양방향 벡-부스트 회로에서 전압 스파이크 커플링은 주로 상단 스위치 중 한 스위치가 꺼지면서 다른 상의 상단 스위치가 도통되기 시작하는 시점에 발생한다. 각 상단 스위치에서 턴오프 스위치의 di/dt와 턴온 스위치의 di/dt는 공통 소스 기생 인덕턴스로 인해 링잉 전압을 발생시킨다. 두 전압의 링잉 성분은 높은 드레인-소스 전압 펄스를 형성하여 전압 스파이크의 주원인이 된다.

각 상의 상단 스위치가 턴온/턴오프 되는 조건은 인터리브 위상 상수 (N_{phase})에 따라 달라지며, 2상 회로 기준 0.5 듀티비에 인접할 때 발생한다. 따라서 스위칭 노이즈 커플링이 나타나는 듀티 ($DUTY_{coupling}$)를 이론적으로 도출하면 (1)과 같다.

$$DUTY_{coupling} = 1/N_{phase} \quad (1)$$

하지만 실제 컨버터 작동 시 스위치 노이즈 커플링은 스파이크가 정상상태로 돌아오는 정착 시간과 스위칭 테드 타임 동안 발생하는 전압 강하로 인해 발생 구간이 확장될 수 있다. 이를 고려하면 스위칭 노이즈 커플링 발생 구간은 (2)와 같이

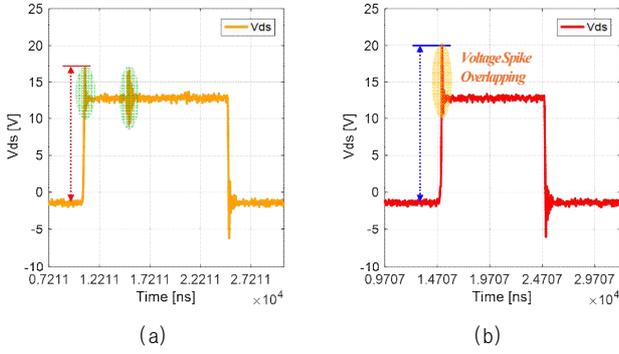


그림 2 상단 스위치 인터리브 노이즈 커플링 조건 : (a) 듀티 0.5 이내 동작 구간 (b) 듀티 0.5 부근 동작 구간
 Fig. 2 Interleaved noise coupling condition for high-side switch : (a) Operating range within duty cycle 0.5 (b) Operating range near duty cycle 0.5

나타낼 수 있다.

$$-T_{\text{settling,off}} < T/2 - DUTY_{\text{coupling}} T < T_{\text{dead}} + T_{\text{settling,on}} \quad (2)$$

이때 $T_{\text{settling,off}}$ 및 $T_{\text{settling,on}}$ 은 스위치의 턴오프 및 턴온 시 스위칭 노이즈의 정착 시간을 나타내며, T_{dead} 는 하프 브리지 스위칭 데드타임이다. 그림 2(a)는 듀티 0.5 이내 동작 시 스위치 양단 전압 파형을 나타내며, 그림 2(b)는 부하변동으로 인해 듀티 0.5 부근일 때 스위칭 노이즈 커플링 발생 구간에서 발생하는 스파이크 전압이 중첩되어 나타나는 파형을 나타내며 낸다. 이러한 스위칭 시 중첩되는 전압 스파이크 크기를 줄여 회로 안정성을 확보하기 위한 RC 스너버 회로 설계의 자세한 설계는 2.2 절에서 다룬다.

2.2 스위칭 노이즈 저감용 RC 스너버 회로 설계

스위칭 노이즈 커플링을 저감하기 위해 제안하는 최적의 RC 스너버 설계는 5V/100A 2상 인터리브 양방향 벅-부스트 회로를 기반으로 한다. 그림 3은 스위칭 시 전위가 급격히 변하는 시점의 스위치의 등가회로를 나타낸다. 고주파 루프에서 동작 시, 스위칭 노이즈 커플링을 일으키는 기생 성분의 영향을 분석하기 위해 스위칭 시 발생하는 공진 파형 주파수 (f_r)와 GaN 스위치의 드레인-소스 양단 기생 커패시턴스 ($C_{\text{parasitic}}$)를 기반으로 기생 인덕턴스 ($L_{\text{parasitic}}$) 값을 도출한다. 스위칭 시 기생 성분은 노이즈 커플링 구간에서 에너지를 주고받으며 공진 현상을 일으켜 스위치 드레인-소스 전압 스파이크 및 링잉 현상이 발생한다. 이러한 노이즈에 의해 스위칭 시 GaN 정격 전압을 초과하여 회로 안전성에 영향 미칠 수 있어 전압 스파이크 크기를 감소시키기 위해 스너버 커패시터 (C_{snubber})를 적용한다. 공진 중 $C_{\text{parasitic}}$ 가 전달하는 에너지는 식 (3)과 같으며 커패시턴스 성분이 증가함에 따라 전압 변화량, 즉 전압 스파이크를 줄일 수 있다.

$$C_{\text{energy}} = \frac{1}{2} C_{\text{eq}} V_{\text{DS}}^2 \quad (3)$$

회로 내 커패시턴스 성분이 증가함에 따라 스위칭 전압 스파이크는 저감될 수 있지만, 공진 주기가 길어지게 되어 시스

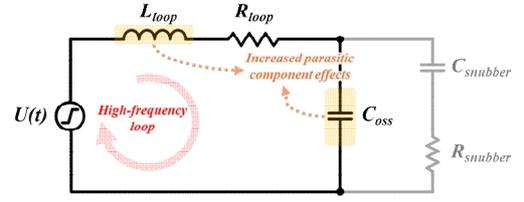


그림 3 스위칭 과도 상태 시 스위치 등가 회로
 Fig. 3 Equivalent circuit of the switch on transients

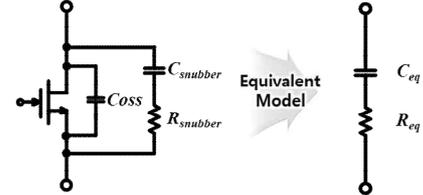


그림 4 GaN 스위치 RC 스너버 적용 후 등가 회로
 Fig. 4 GaN Switch RC equivalent circuit with snubber

템 안정성과 응답특성 측면에서 한계점이 존재한다. 따라서 저항 스너버 (R_{snubber})를 통해 스위칭 노이즈 성분의 감쇠비를 최적화하여 정상상태 도달 시간을 줄일 수 있다. 스위칭 시 기생 성분에 의한 고유 진동수 ω_0 는 식 (4)과 같으며, 이때 감쇠비 D_0 는 식 (5)와 같이 나타난다.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{loop}} C_{\text{oss}}}} \quad (4)$$

$$D_0 = \frac{R_{\text{loop}}}{2} \sqrt{\frac{C_{\text{oss}}}{L_{\text{loop}}}} \quad (5)$$

스위칭 노이즈를 저감하기 위한 RC 스너버를 적용한 스위치는 그림 4와 같이 등가할 수 있다. 따라서 스너버가 적용된 회로의 감쇠비 D_{sn} 는 식 (6)과 같으며, 최적의 감쇠비 도출을 위해 R_{eq} 에 대하여 미분하여 나타내면 R_{snubber} 는 식 (7)과 같다.

$$D_{\text{snubber}} = \frac{R_{\text{eq}}(\omega_{\text{snubber}})}{2} \sqrt{\frac{C_{\text{eq}}(\omega_{\text{snubber}})}{L_{\text{loop}}}} \quad (6)$$

$$R_{\text{snubber}} = \frac{1}{\omega_{\text{snubber}} C_{\text{snubber}}} \sqrt{\frac{C_{\text{oss}} + C_{\text{snubber}}}{C_{\text{oss}}}} \quad (7)$$

이때 L_{loop} 은 과도 상태에서 스위치 기생 인덕턴스 성분을 나타내고 ω_{snubber} 은 스너버 적용 후 고유진동수를 의미한다. R_{snubber} 를 통해 링잉 현상을 저감할 수 있지만, 큰 값으로 과설계 시 스위치 RC 스너버가 스위치 등가회로에서 분리되어 링잉 전류가 스너버가 아닌 스위치 기생 커패시터를 통해 흐르게 되어 스너버 효과가 감소하며, R_{snubber} 에 의한 회로 손실이 발생하므로 적절한 스너버 값 설계가 필수적이다.

3. 검증

제안하는 RC 스너버 설계방안의 유효성을 검증하기 위해 그림 5와 같이 GaN 기반 배터리 활성화 공정에 적용되는 5V/100A 2상 인터리브 양방향 벅-부스트 테스트베드를 구성

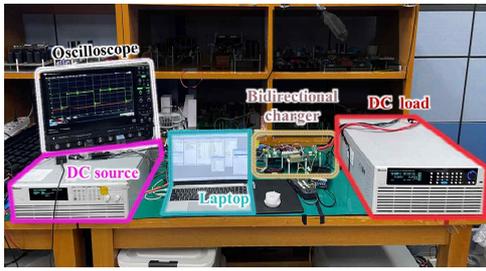


그림 5 GaN 기반 배터리 활성화 공정용 시스템 테스트베드
Fig. 5 GaN-based battery formation processes system testbed

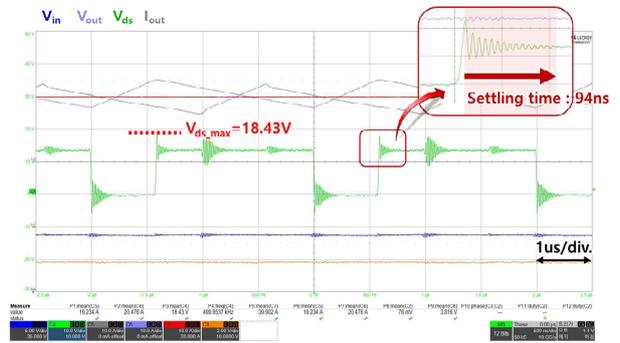


그림 6 RC 스너버 적용 전 실험 결과 파형
Fig. 6 Waveform of experimental results before applying RC snubber

표 1 RC snubber 설계 파라미터 별 노이즈 저감 결과
Table 1 Result of noise reduction for RC snubber parameters

R [Ω] / C [nF]	$V_{DS,max}$ [V]	Settling time [ns]	Voltage Spike reduction [%]
None	18.43	94	-
4.7 [Ω] / 2.2 [nF]	17.84	58	13.3
1.5 [Ω] / 10 [nF]	16.54	27	42.7
1.5 [Ω] / 6.6 [nF]	16.45	25	44.7

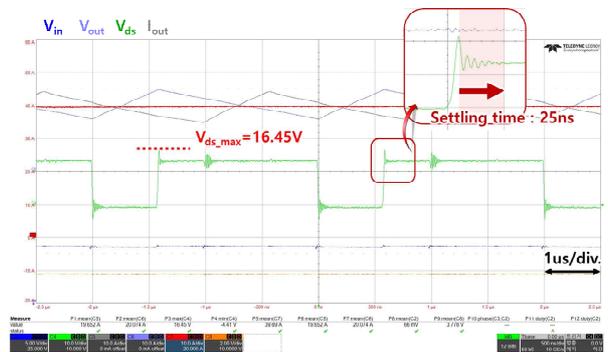


그림 7 설계된 RC 스너버 1.5Ω/6.6nF 적용 후 실험 결과 파형
Fig. 7 Waveform of experimental results after applying 1.5Ω/6.6nF RC snubber

하여 스위칭 노이즈 커플링 개선 효과를 확인한다. 실험 조건은 스위칭 주파수 500kHz, 입력 14V, 출력 40A이며 RC 스너버를 통한 노이즈 저감 성능을 확인한다. 우선 스너버 회로가 적용되지 않은 회로의 각 상단 스위치의 노이즈 성분이 커플링되는 구간에서 최대 스위치 드레인-소스 전압과 정상상태까지의 정착 시간을 측정하고 파형은 그림 6과 같다. 스너버 적용 전 회로 내 기생 성분의 영향으로 인해 발생하는 공진 주파수 측정 결과는 73.53MHz로 나타났으며, 최대 드레인-소스 전압 스파이크는 18.43V이다. 또한, 정상상태의 95%까지 정착 시간은 94ns임을 확인하였다. 스너버를 적용하지 않은 회로는 듀티 0.5 부근에서 동작 시, 각 상 스위치의 전압 스파이크 성분이 중첩되어 스위치 정격인 30V를 초과할 위험이 있다. 따라서 GaN 스위치의 RC 스너버 회로를 통해 최대 전압 스파이크 값을 낮추고 감쇠비를 최적화해야 한다. 따라서 표 1과 같이 3가지 RC 스너버를 적용하여 스위칭 노이즈 저감효과를 확인하였다. 경험적인 RC 스너버 값인 2.2nF, 4.7Ω 적용 결과 V_{ds} 전압 스파이크 최대값은 17.84V, 정착시간은 94ns이며 6.6nF, 1.5Ω 스너버 적용 시 V_{ds} 최대값 16.54V, 정착시간 27ns로 각각 스너버 적용 전 대비 13.3%, 42.7%의 전압 스파이크 저감효과를 나타냈다. 본 논문에서 제안하는 설계방안을 기반으로 RC 스너버 값을 선정할 결과, $C_{snubber}$ 의 값은 V_{ds} 전압 변화량을 2배 저감할 수 있는 값으로 선정하여 기생 커패시턴스 값의 3배, 즉 6.6nF를 적용하였으며, (7)에 따라 $R_{snubber}$ 값은 1.5Ω을 적용하였으며 실험 결과는 그림 7과 같다. 스너버 적용 후 공진 주파수는 64.10MHz로 나타나며, 최대 전압 스파이크는 16.45V로 스너버 적용 전 대비 44.7%의 스파이크 저감율로 가장 큰 저감 효과를 확인하였다. 또한, 감쇠비 최적화로 정착 시간은 25ns로 공진 주기를 줄여 시스템의 안정성을 높였다. 설계한 방안은 공진 주파수를 기반으로 회로 내 기생 성분의 영향을 분석하여 시스템 동작의 안정성을 높일 수 있는 RC 스너버 값을 기반으로 GaN 스위치의 전압 스파이크 및 정착 시간 감소 효과를 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 배터리 활성화 공정용 DC/DC 컨버터 시스템에 적용되는 GaN 기반 2상 인터리브 양방향 벡-부스트 회로에서 스위칭 시 발생하는 공진 주파수를 통해 기생 성분을 분석하여 전압 스파이크 및 링잉을 최소화하기 위한 RC 스너버를 수식적으로 설계한다. 따라서 전압 스파이크를 2배 저감할 수 있고 최적의 감쇠비를 가지는 RC 스너버 값인 1.5Ω, 6.6nF로 설계하였다. 제안하는 설계방안을 검증하기 위해 5V/100A 2상 인터리브 양방향 벡-부스트 테스트베드를 기반으로 스위칭 노이즈 감소 효과를 확인하였으며, 스너버 적용 전 대비 44.7%의 전압 스파이크가 저감되는 것을 확인하였다.

참고 문헌

[1] Xue, Lingxiao, Dushan Boroyevich, and Paolo Mattavelli. "Driving and sensing design of an enhancement-mode-GaN phaseleg as a building block." *2015 IEEE 3rd Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*. IEEE, 2015.

[2] Lu, Juncheng, et al. "Design consideration of gate driver circuits and PCB parasitic parameters of paralleled E-mode GaN HEMTs in zero-voltage-switching applications." *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. IEEE, 2016.