

# Totem-pole Bridgeless PFC Boost 컨버터를 위한 GaN FET

Silicon(Si) 기반의 반도체 소자는 오랫동안 가전 및 산업용 기기들에 적용되어 왔으며, MOSFET과 IGBT의 두 Si 반도체가 전력용 스위칭 반도체 시장을 양분하고 있다. 최근 Wide-Band-Gap(WBG) 반도체 소자가 빠르게 발전하고 있으며, SiC(Silicon Carbide) FET(Field-Effect-Transistor)는 대량 생산 및 안정화 단계에 접어들어 대용량 및 고전압 분야에 널리 적용되고 있다. 또한, GaN(Gallium Nitride) FET은 양산화 검증 단계로 시장에서의 검증이 필요하지만, Totem-pole Bridgeless(TPB) PFC Boost 컨버터 및 고주파 LLC 공진형 컨버터 등에 적용 검토 중이다. 특히, TPB PFC Boost 컨버터는 기존 Si 반도체 소자로는 구현할 수 없는, SiC FET 또는 GaN FET의 적용이 필수적인 전력변환 토폴로지이며, 단상 교류 입력 전압을 사용하는 중·소용량의 전자전기기기의 경우에는 GaN FET의 적용을 통하여 고효율의 TPB PFC Boost 컨버터를 구현할 수 있다.

## 1. 반도체 소자의 특성 비교

Si/SiC/GaN 반도체를 전기 물성적으로 비교할 경우, WBG 반도체인 SiC 및 GaN 반도체는 Si 반도체에 비하여 월등한 특성을 갖는다. Electric Bandgap 및 Electric Field 특성이 우수하여 높은 정격 전압을 위한 스위칭 반도체 소자에 적합하며, SiC 반도체는 우수한 Thermal Conductivity 특성으로 발열에 의한 성능 저하가 적으며, GaN 반도체는 우수한 Electron Velocity 특성으로 빠른 스위칭이 가능하다. 뿐만 아니라, WBG 반도체 소자는 Si 반도체가 갖는 내부 기생 다이오드의

역회복 특성이 없는 장점을 갖는 반면, 역방향 전류 도통에 의한 전압 강하가 큰 단점을 가진다.

따라서, 반도체 소자 자체의 특성에 따른 최적의 적용 분야 및 적용 토폴로지가 존재하게 되며, GaN FET의 경우에는 기생 입력 커패시터  $C_{iss}$ 가 작으므로 높은 주파수로 동작하는 LLC 공진형 컨버터, 그리고 역회복 특성이 없으므로 TPB PFC Boost 컨버터에 적합하다.

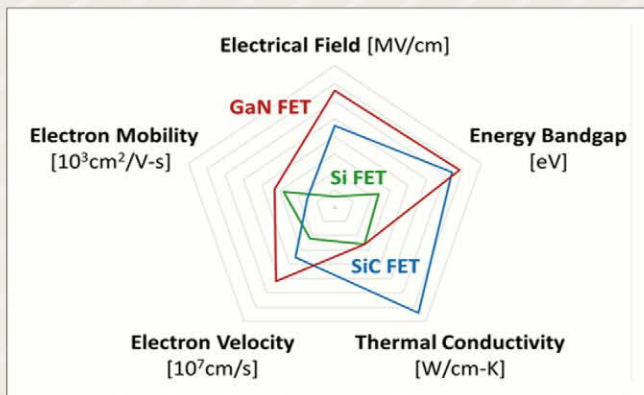


그림 1 Si/SiC/GaN 반도체의 전기 물성적 특성

## 2. Si FET 기반의 PFC Boost 컨버터

Boost 컨버터는 출력 전압이 교류 입력 전압의 첨두치보다 높은 단점에도 불구하고, 입력 전류가 연속적인 장점으로 PFC 정류단에 가장 적합한 토폴로지이다. 그러나, 그림 3과 같이  $Q_B$ 가 OFF된 상태에서 다이오드  $D_F$ 를 통하여 출력이 전달되다가,  $Q_B$ 가 도통되면  $D_F$ 의 역회복 전류가  $Q_B$ 를 통해서 흐르게 된다. 따라서 출력 부하가 증가할수록, 그리고  $Q_B$ 의 Turn-on이 빨라질수록  $D_F$ 의 역회복 전류가 증가하고  $Q_B$ 의 전류 스트레스 및 전력 손실이 증가하게 된다. 이러한 문제점을

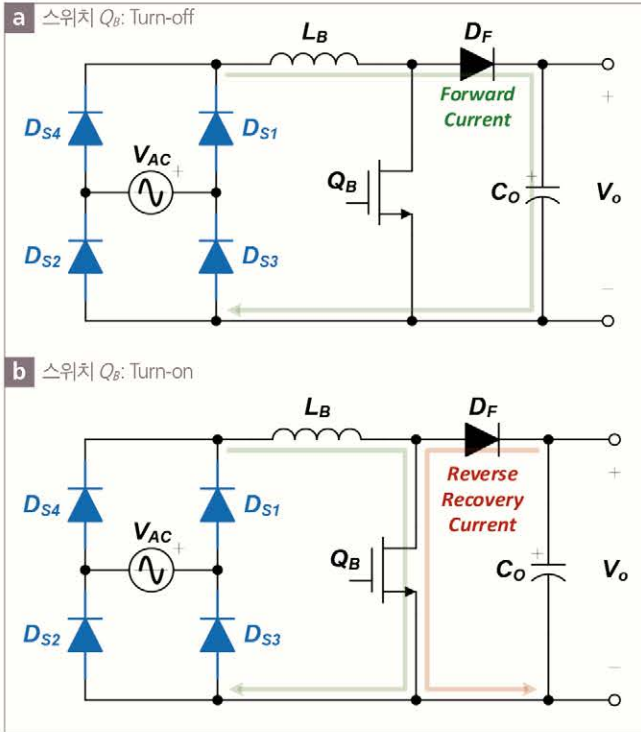


그림 2 Boost 컨버터:  $Q_B$  ON 시 역회복 현상

극복하기 위해서, 과거에는 다양한 무손실 스너버 및 소프트 스위칭 등의 부가 회로들이 사용되었다.

다행히 SiC 반도체 기반의 역회복 특성이 없는 다이오드가 출시되어, 최근에는 부가 회로 없이 SiC Diode를 적용함으로써 전류 스트레스 저감 및 효율 향상이 가능하다.

그러나 그림 3과 같이 입력단에 4개의 다이오드를 갖는 브

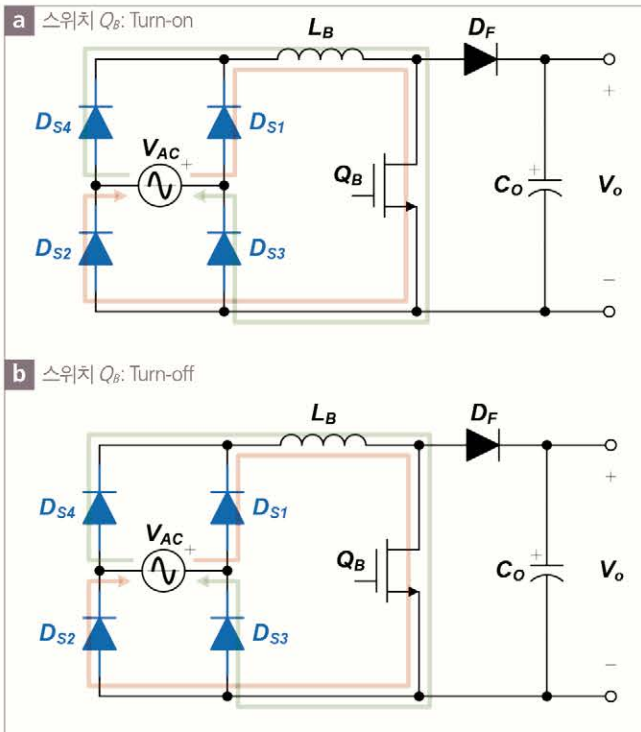


그림 3 Boost 컨버터:  $Q_B$ 의 ON/OFF 상태에 따른 전류 도통 경로

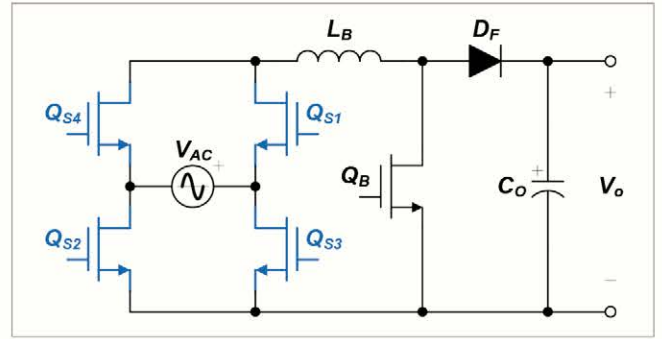


그림 4 Boost 컨버터: MOSFET 적용된 정류단

리지 정류기를 포함하므로, 스위치  $Q_B$ 가 ON 상태일 경우 정류 다이오드 2개와 함께 스위치  $Q_B$ 를 통하는 전류 경로를, 그리고 스위치  $Q_B$ 가 OFF 상태일 경우 정류 다이오드 2개와 함께 다이오드  $D_F$ 를 통하는 전류 경로를 가진다. 따라서 전류 도통 경로 내에 3개의 반도체 소자가 항상 존재하게 되며, 필연적인 전력 손실 및 효율 저하를 수반하게 된다.

Boost 컨버터의 효율 개선 노력으로 그림 4와 같이 입력단의 정류 다이오드를  $R_{ds(on)}$ 이 낮은 MOSFET으로 교체함으로써, 큰  $I \times V$  손실을 작은  $I^2 \times R$  손실로 저감할 수 있다. 그러나, 반도체 소자 수의 증가와 추가 구동 회로 구성으로 인한 회로의 복잡성 및 가격경쟁력 악화 등의 단점이 존재한다.

### 3. GaN FET 기반의 TPB PFC Boost 컨버터

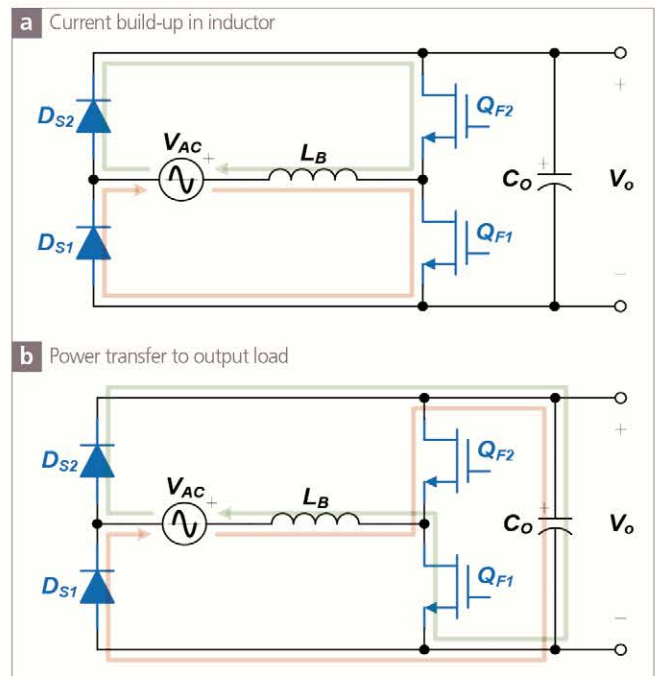


그림 5 TPB PFC Boost 컨버터:  $Q_{F1}$  및  $Q_{F2}$ 의 ON/OFF 상태에 따른 전류 도통 경로

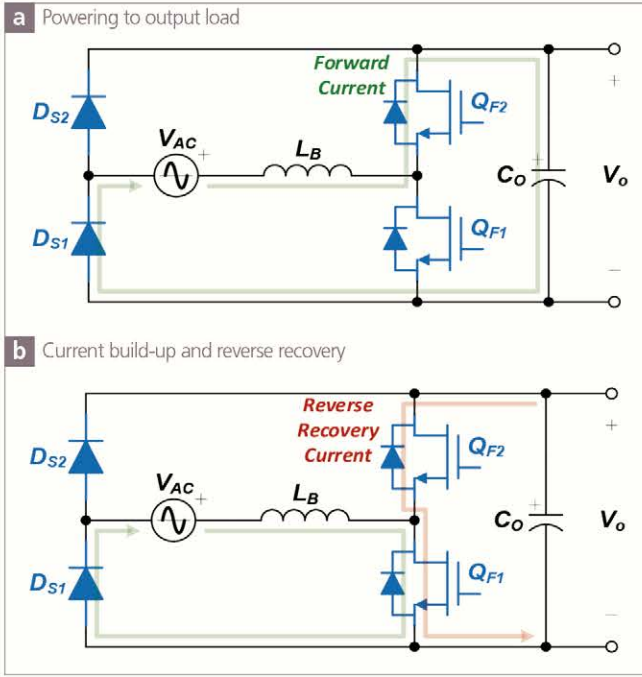


그림 6 TPB PFC Boost 컨버터의 역회복 현상

일반적으로, 그림 8과 같이, 데이터시트에 포함되는 Eoss 는 Flyback 컨버터와 같이 단일 스위칭 소자로 사용되는 경우의 스위칭 시의 Coss 충전/방전 손실을 나타낸다. 그러나 LLC 공진형 컨버터를 비롯하여 그림 9와 전력변환시스템의 효율 향상에 기여할 수 있다. 한편 그림 5과 같이 Low Vds 인가 시, P+ Body와 N- Epi의 접합면을 따라 Depletion 영역이 형성됨에 따라 High Vds 대비 단위 Cell의 Coss 값은 비선형적으로 증가하는 특성을 갖는다. 그림에도 불구하고 최신 SJ MOSFET은(High Vds 조건에서) GaN FET보다 작은 Coss를 가지며, 기존 세대 대비 57% 수준의 Eoss를 갖는다. 스위칭 구조를 갖는 경우에는 Eoss 특성이 다른 양상을 갖게 된다.

#### 4. TPB PFC Boost 컨버터의 구현

TPB PFC Boost 컨버터의 적용 이유는 효율 극대화이며, 그림 5의 좌측에 위치하는 입력 AC 주파수로 스위칭하는 다이오드를 그림 4와 같이 MOSFET으로 대체하여 사용하게 되며, 발열 저감 효과도 동시에 얻을 수 있다. 따라서 입력 AC 전압 극성에 따라 두 GaN FET과 두 MOSFET의 게이트 생성 및 구동이 필요하다. 또한 입력 전류 모양과 출력 전압 레벨을 제어하기 위하여 입력 전압/전류와 출력 전압을 센싱해야 한다. 특히 입력 전류를 센싱할 수 있는 위치가 Floating 되어 있으므로, 주로 Hall Sensor IC를 사용하게 되며, IC의 출력에서 Bias 전압을 제거한 다음 센싱 이득을 나누어 줌으로써 교류 파형의 입력 전류를 센싱할 수 있다. 따라서 그림 7에 나타난 바와 같이 TPB PFC Boost 컨버터 구현을 위한 센싱/제어/구동 회로의 설계가 복잡하여, Analog 회로보다는 Digital Control IC(Digital-Signal-Processor, DSP)를 적용하게 된다.

GaN FET는 역회복 특성이 우수하고 매우 빠른 스위칭이 가능하여, TPB PFC Boost 컨버터에 최적 스위칭 반도체 소자임에도 불구하고 Drain과 Source 간의 기생 출력 커패시턴스가 - MOSFET에 비하여 - 작지 않다. 그러므로 GaN FET가 적용된 TPB PFC Boost 컨버터의 스위칭 주파수는 효율 극대화가 가장 중요한 목표인 경우 50-65kHz의 범위에서 설정하게 되고, 전력밀도를 높이고자 할 때에는 100-130kHz 부근의 주파수가 선정될 수 있다

한편 GaN FET는 반도체 물성에 의한 Body Diode가 없으므로 역방향 전류 도통 시의 전압 강하가 3-5V로 다소 높은 단점이 있다. 효율 향상을 위해서는  $Q_{F1}$  및  $Q_{F2}$ 의 간의 Dead-time을 최소화할 필요가 있다. 그림 8과 같이 Powering 구간 직전에 인덕터 전류에 의한 Coss 방전이 일어나게 되고, Coss의 방전 시간에 맞추어 Dead-time을 가변함으로써 역방향 전압 강하에 의한 전력 손실을 최소화할 수 있게 된다.

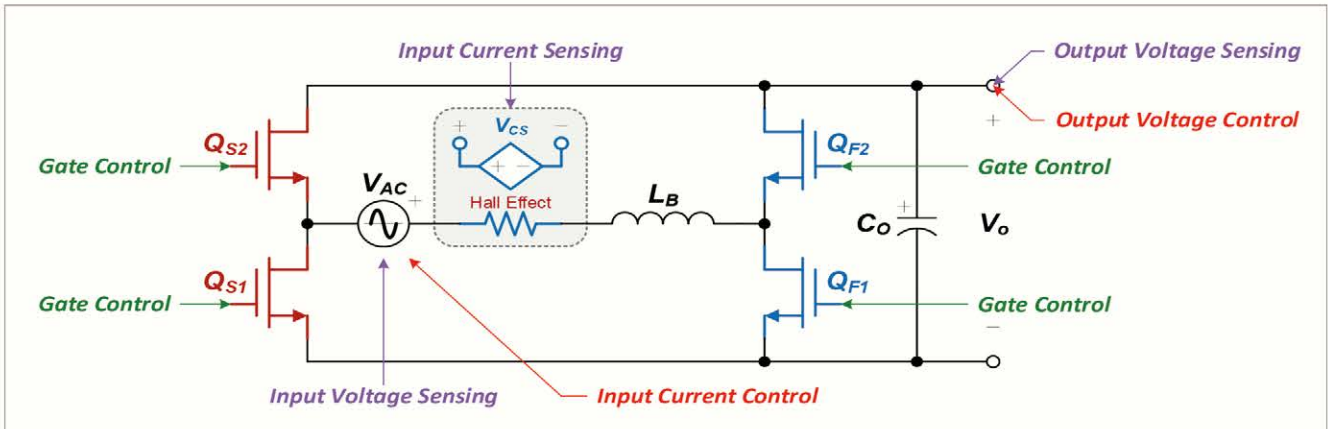


그림 7 TPB PFC Boost 컨버터의 센싱/제어/구동의 복잡성

## 5. GaN FET의 종류

GaN은 반도체 물성적으로 Normally-on 소자이므로, 전력변환회로의 적용에 용이하도록 Normally-off 특성을 갖도록 GaN FET 제조사에 따라 다양한 구조를 갖게 된다. Transphorm사의 Cascode 구조, GaN System사의 전압 구동형 HEMT 구조, Panasonic/Infineon사의 전류 구동형 HEMT 구조, TI사의 Cascode 기반의 구동 회로 통합형 구조 중 적합한 소자를 선택해야 한다.

## 6. 결론

GaN FET의 개발 및 상용화와 함께, GaN FET가 적용된 TPB PFC Boost 컨버터의 제품화에 대한 기대감도 커지고 있다. 기존 PFC Boost 컨버터에 비하여 최대 1.0%의 효율 향상 및 발열 저감 등의 효과를 가지게 되며, 전력밀도 향상에 주안점을 두고 설계할 수도 있다. GaN FET의 시장 안정성 검증, Digital Control 적용 검증, GaN FET의 빠른 스위칭 및  $dv/dt$ 에 의한 EMC 향상 등 다양한 과제들이 산재하지만, 고효율을 통한 에너지 소모 저감에 필수적인 기술일 것이다. 📡

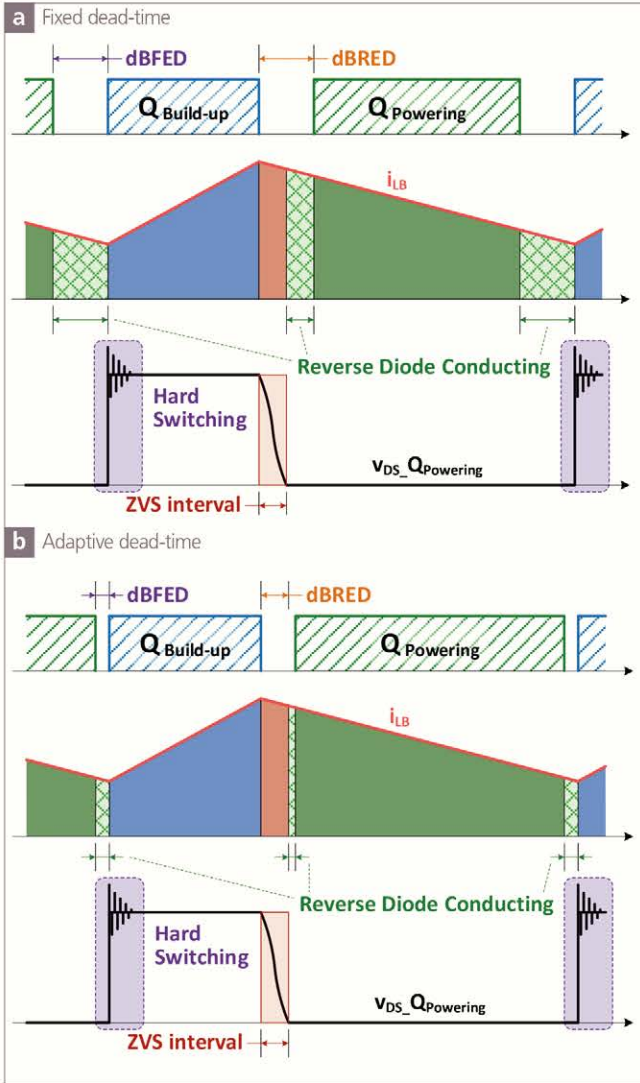


그림 8 GaN FET 간의 dead-time

### 김정은 경상대 제어계측공학과 조교수

2001년 경북대 전자전기공학부 졸업. 2003년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사).  
2008년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 2008년 삼성전기 Power개발팀 근무. 2015년 ㈜솔루엠 서버파워개발그룹 근무.  
2019년~현재 경상대 제어계측공학과 조교수. 당 학회 편집위원.

