

SiC MOSFET 게이트 드라이버용 초소형 무선전력 전원 공급 장치의 코일 설계

노중현*, 이재홍*, 김성민†, 이승환*

서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부*, 한양대학교 전자공학부†

Coil Design of A Wireless Power Supply of SiC MOSFET Gate-Drivers

Junghyeon Roh, Jaehong Lee, Sungmin Kim, Seung-Hwan Lee

Division of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul, S. Korea

Division of Electrical Engineering Hanyang University, ERICA Campus, S.Korea

ABSTRACT

SiC 기반의 전력용 반도체 소자들은 스위칭 속도가 빠르고 높은 차단 전압을 가져 dv/dt 가 크다. 중전압 이상에서 게이트 드라이버에 절연된 전원 공급을 하기 위해 소형 변압기가 사용된다. 하지만 변압기의 1, 2차 권선 사이에 수십 pF 이상의 기생 커패시턴스가 존재하며, 높은 전압을 고속으로 스위칭 하게 될 경우 기생 커패시턴스를 통해 제어부로 공통 모드 전류가 흘러 오작동을 야기할 수 있다. 본 연구에서는 변압기를 대체하여 무선전력전송 코일을 이용한 게이트 드라이버용 절연된 전원 공급 장치를 제안한다. 무선전력전송 코일 사이의 거리를 수 mm 이상 이격시켜 코일 사이의 기생 커패시턴스를 1 pF 이하로 줄이고 높은 절연 특성을 가질 수 있다. 무선전력 전송의 공진 토폴로지는 직렬-병렬을 선택했고, 2 MHz에서 높은 효율을 갖도록 I-core 코일을 $2.2\text{cm} \times 1.5\text{cm} \times 1.7\text{cm}$ 으로 제작해 검증했다.

1. 서론

최근 전력용 반도체 기술이 발달함에 따라 wide-bandgap 반도체 스위칭 소자의 상용화가 급격히 이루어지고 있다. 특히 SiC 반도체 스위칭 소자는 기존 Si 반도체 스위칭 소자에 비해 높은 내전압 및 낮은 스위칭 손실 특성을 가져, 전압변동률 (dv/dt)이 큰 환경에서 많이 사용된다^[1]. 하지만 SiC 반도체 스위칭 소자에 적용되는 높은 전압변동률로 인해 변압기 1, 2차 권선 사이에 존재하는 기생 커패시턴스가 2차 측에서 1차 측으로 공통 모드 전류가 흐르는 경로로 작용한다^[2]. 공통 모드 전류는 스위칭 제어 회로에서 신호의 왜곡을 발생시킬 수 있으며, 이 왜곡은 반도체 스위칭 소자의 오작동을 야기하게 된다. 최근 낮은 기생 커패시턴스 및 높은 절연 전압을 가지는 SiC 게이트 드라이버용 절연 전원 회로에 대한 연구가 많이 진행되고 있다^[3]. Srdjan Srdic은 토로이달 코어에 1, 2차 권선을 물리적으로 분리 설치해 기생 커패시턴스를 1~2 pF 정도로 줄였다. 하지만 이러한 방법은 절연형 변압기의 크기를 증가시키고, 누설 자속이 증가하는 결과를 초래하며, 이는 비용과 시스템 측면에서 불리하다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 기존의 절연형 변압기 대신, 1차 측 코일과 2차 측 코일 간에 수 mm 공극을 두고 무선전력전송 (Loosely coupled inductive wireless power transfer) 기술을 이용하여 1 pF 이하의 기생 커패시턴스 및 높은 내전압을 갖는 초소형 게이트 드라이버용 절연 전원 장치를

제안한다. 다음의 2 절에서는 제안한 절연 전원 공급 시스템에 대한 설명, 공진 회로 설계, 송수신 코일 설계 방법 및 시뮬레이션을 통한 검증 결과에 대해 기술하였다.

2. 제안하는 무선전력전송 시스템

2.1 게이트드라이버용 절연전원 시스템

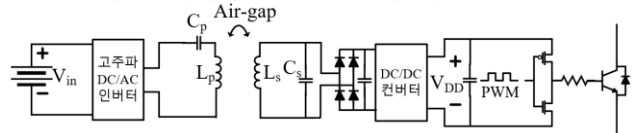


그림 1. 게이트 드라이버용 절연 전원 공급 회로
Fig. 1. Proposed Isolated power supply for gate-driver

본 논문에서 제안하는 게이트 드라이버용 절연 전원 공급 회로는 그림 1 과 같다. 입력 전압원으로부터 고주파 교류 전압으로 변환하는 고주파 DC/AC 인버터와 무선전력전송 송수신 코일, 그리고 정류회로 및 2차 측 DC/DC 컨버터로 구성된다. 송신 회로와 수신 회로 사이의 거리를 수 mm 이상 떨어뜨리면서 높은 전력 전달 효율을 갖는 코일을 이용해 1차 측 전원에서 2차 측으로 전력 전송이 이뤄진다.

2.2 공진 Topology 선정

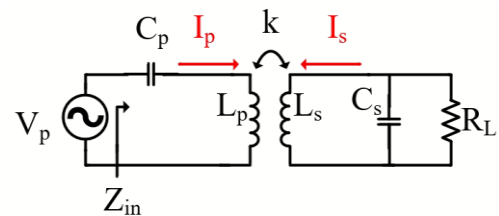


그림 2. 직렬-병렬 무선전력전송 시스템
Fig. 2. Series-Parallel wireless power transfer system

무선전력전송 시스템은 1차 코일과 2차 코일 간의 자기적 결합이 약하다. 따라서 커패시터를 통한 추가적인 공진 보상이 없으면 시스템의 효율은 0에 가깝다. 그림 2 처럼 직렬-병렬 공진 토폴로지를 사용했다. 직렬-병렬 공진 토폴로지는 부하가 커질 때 입력 임피던스도 같이 커지므로 1차 측에서 별도의 제어를 하지 않아도 된다는 장점이 있다^[4]. 따라서 직렬-병렬 공진

토폴로지를 사용하여 절연된 게이트 드라이버 전원 공급을 하였다.

2.3 송신 및 수신 코일 설계

초소형 게이트 드라이버용 절연 전원 공급을 위해서는 작은 면적으로 높은 효율, 높은 절연 내력, 낮은 기생 커패시턴스를 갖는 송, 수신 코일을 설계해야 한다. 그림 3 에는 설계된 I-core 코일이 나타나 있다. I-core 코일은 코일에 발생하는 와전류 손실을 줄여 2 MHz에서 높은 Q-factor를 가질 수 있다^[5]. 설계에 사용된 코어는 FERROXCUBE 사의 3F46 (MnZn계) 페라이트이며, 2 MHz에서 980 의 초기 투자율, 8 mW/cm³의 철손이 발생한다. 송신 코일은 6 턴에 단면적은 1.16 mm²이고 수신 코일은 3 턴에 단면적은 3.5 mm² 이다.

코일 사이의 air-gap은 절연 거리와 기생 커패시턴스를 고려하여 설계되었다. 미국 UL에 따르면^[6], 일반적으로 잘 알려진 절연체들은 2 MHz에서 약 3-10 kV/mm의 절연 전압을 가진다. 또한 스위치의 dv/dt 가 100 kV/μs 일 때, 공통 모드 전류로 인한 오작동 방지를 위해 5 pF 이하의 기생 커패시턴스를 가져야 한다^[7]. 시중의 일반적인 SiC MOSFET은 20~60 kV/μs의 dv/dt를 가지므로, 상기 2 개의 조건을 고려하여 1, 2 차 측 코일 사이를 4 mm로 설계하였다. 표 1 에 설계된 코일의 시뮬레이션 결과가 정리되어 있다.

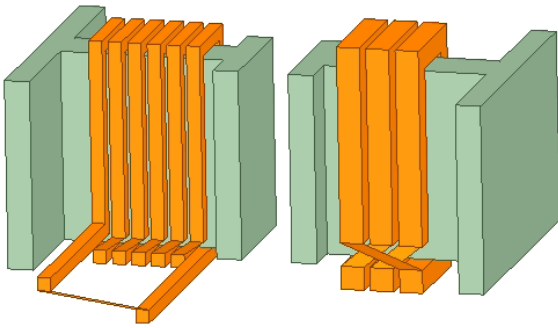


그림 3. 송신, 수신 코일 시뮬레이션 모델
Fig 3. Simulated transmitter and receiver coil

표 1. 송신, 수신 코일의 시뮬레이션 결과
Table 1. Simulated results of transmitter and receiver coils

송신코일 자기인덕턴스 [μH]	2.6	수신코일 자기인덕턴스 [μH]	0.64
송신코일 품질계수	353	수신코일 품질계수	314
결합계수	0.26	기생 커패시턴스 (pF)	1.27

그림 4 에는 시뮬레이션 모델을 기반으로 제작한 코일이 있다. 코어의 재질은 앞서 기술한 3F46 이며, 권선은 Litz-wire가 사용되었다. Litz-wire는 200 가닥에 각 가닥의 직경은 60 μm이다. 시뮬레이션과 동일하게 송신 코일은 6 턴, 수신 코일은 3 개의 권선을 병렬로 연결하여 3 턴으로 제작하였다. 표 2 에는 네트워크분석기 (E5061B, KEYSIGHT)로 측정된 코일의 파라미터들이 있다.



그림 4. 송신, 수신 코일
Fig 4. Transmitter, receiver coil

표 2. 측정된 송신, 수신 코일의 파라미터
Table 2. Measured parameters of transmitter and receiver coils

송신코일 자기인덕턴스 [μH]	2.8	수신코일 자기인덕턴스 [μH]	0.66
송신코일 품질계수	277	수신코일 품질계수	225
결합계수	0.25	기생 커패시턴스 (pF)	0.8

2.4 회로 시뮬레이션

설계한 회로를 검증하기 위해 LTspice를 이용하여 시뮬레이션을 진행했다. 그림 5 에 시뮬레이션 모델이 있으며 표 2 의 파라미터를 사용하였다. 이 때 부하 저항은 50 Ω이고 스위칭 주파수는 2 MHz이다. 그림 6 에 시뮬레이션으로 구한 전원의 전압과 전류, 그림 7 에는 부하의 전압과 전류가 있다. 전원전압의 크기는 15V이며 입력전력과 출력전력은 각각 14.54 W, 14.03 W로 효율은 96%이다.

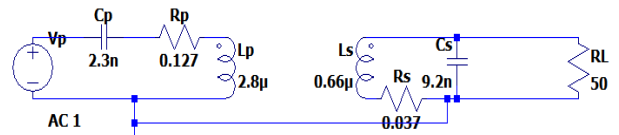


그림 5. LTspice 시뮬레이션 모델
Fig. 5. LTspice simulation model

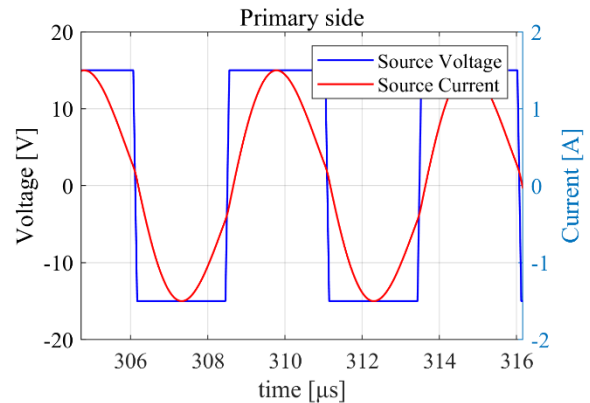


그림 6. 시뮬레이션 모델의 전원 전압과 전류
Fig. 6. Simulated source voltage and current

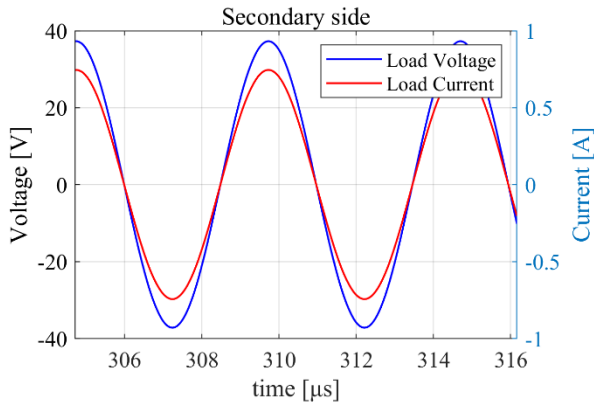


그림 7. 시뮬레이션 모델의 부하 전압과 전류
Fig. 7. Simulated load voltage and current

3. 결론

본 연구에서는 기존의 절연 게이트 드라이버에 사용되는 고주파 변압기를 대체할 수 있는 무선전력 전원 공급 코일을 제안했다. 별도의 제어없이 동작하기 위해 직렬-병렬 토폴로지가 선정되었고, 코일을 소형화하기 위해 2 MHz에서 높은 Q-factor를 가지는 I-core 송·수신 코일을 설계하였다. 송·수신 코일 사이의 기생 커패시턴스는 0.8 pF이었다. 회로 시뮬레이션을 통해 4 mm air-gap에서 96%의 효율을 얻을 수 있었다.

참고 문헌

- [1] M. R. Ahmed, R. Todd and A. J. Forsyth, "Predicting SiC MOSFET Behavior Under Hard-Switching, Soft-Switching, and False Turn-On Conditions," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 11, pp. 9001-9011, Nov. 2017
- [2] K. Mainali, S. Madhusoodhanan, A. Tripathi, K. Vechalapu, A. De and S. Bhattacharya, "Design and Evaluation of Isolated Gate Driver Power Supply for Medium Voltage Converter Applications," 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, 2016, pp. 1632-1639
- [3] S. Srdic, F. Teng and S. Lukic, "High-isolation Low-coupling-capacitance Standalone Gate Drive Power Supply for SiC-based Medium-Voltage Power Electronic Systems," 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 2019, pp. 3287-3291
- [4] X. Dai, Y. Huang and Y. Li, "Topology Comparison and Selection of Wireless Power Transfer System and Parameter Optimization for High Voltage Gain," 2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), Chongqing, 2017, pp. 1-5
- [5] 이재홍, 이승환, 김성민, 한동엽, 김명룡, "Loosely Coupled Dual Active Bridge Converter 용 무선 전력 전송 코일 개발", 2019 전력전자학회 학술대회 논문집, 31-33
- [6] F. Chiang, "Effects of High Frequency Voltage Stress on Air Insulation and Solid Insulation," 2010 IEEE Symposium

- on Product Compliance Engineering Proceedings, Boston, MA, 2010, pp. 1-10
- [7] S. Zeltner, "Insulating IGBT Driver with PCB Integrated Capacitive Coupling Elements," 2010 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, Nuremberg, 2010, pp. 1-6