

직렬 연결된 스위칭 소자의 전압 평형을 위한 새로운 능동 게이트 구동 기법

손명수, 조영훈

건국대학교 전기전자공학부

A new active-gate-drive (AGD) technique for voltage balancing in series-connected switching devices

Myeong-su Son, Younghoon Cho

Department of Electrical and Electronics Engineering, Konkuk University

ABSTRACT

본 논문에서는 직렬 연결된 스위칭 소자에서 발생할 수 있는 전압 불평형의 원인을 분석하고 이를 제거할 수 있는 능동 게이트 구동 기법을 제안한다. 제안하는 방법은 스위치의 턴 오프 경로에 트랜지스터를 추가하여 전압 불평형 정도에 따라 각 소자의 스위칭 속도를 조절함으로써 전압 불평형을 제거한다. 제안하는 방법의 확인을 위하여 SiC MOSFET을 이용한 전력변환회로를 대상으로 모의실험을 실시하였고, 제안하는 방법이 전압 불평형의 제거에 효과적임을 검증하였다.

그라운드 사이의 기생 커패시턴스를 고려하여 시뮬레이션을 진행하였을 때, 상단 스위치 게이트 단에 인가되는 전압이 하단 스위치에 비하여 상대적으로 높기 때문에 식 1에 의하여 상단 스위치의 턴 오프가 하단 스위치의 턴 오프에 비하여 빠르게 진행된다. 이로 인하여 상·하단 스위치의 전압 불 평형이 발생하는 것을 그림 2를 통하여 확인 할 수 있다.

$$i_{ci} = c_{Gi} \frac{dv_{Gi}}{dt} \tag{1}$$

1. 서론

Si 반도체 기반의 스위칭 소자들이 최근 10년간 SiC 반도체의 발전으로 확대됨에 따라서, 스위칭 속도와 전압 정격 등이 급속도로 발전하였다^[1]. Si 소자에 비하여 큰 Band-Gap을 지니는 SiC 반도체는 Si 소자와 동일하게 수직형의 반도체 구조로 제작이 가능하므로 GaN 소자에 비하여 큰 전압 정격을 지닐 수 있다. 최근 상용화 되고 있는 SiC 기반의 MOSFET은 최대 1.7 kV까지 증가하였으며, 이러한 전압 정격의 증가는 고전압 토폴로지 발전을 가속화 하였다.

최근의 고전압 DC 배전을 비롯한 다양한 고전압 토폴로지가 이슈가 되는 가운데^[2-11], 다양한 고전압 토폴로지는 기존의 Power Conversion System(PCS, 전력 변환 시스템)을 스택형으로 층을 이루어 연구되어 왔다. 스택형 구조의 토폴로지는 각 스위치가 부담하는 전압이 작다는 장점을 가지고 있지만, 상대적으로 시스템 동작 구현이 어렵다는 단점을 지닌다. 이에 반하여 직렬 연결된 스위칭 소자로 구성된 고전압 토폴로지의 경우, 기존에 연구된 토폴로지의 제어 및 구현 방법을 동일하게 이용할 수 있다는 장점을 지닌다.

직렬 연결된 스위칭 소자를 동작하는 것에 있어 가장 큰 이슈는 전압 불 평형이다. 게이트 드라이버를 통하여 인가되는 게이트 전하가 상·하단 스위치에 동일하게 인가되지 않으므로 스위칭 소자의 동시 턴 오프를 보장할 수 없으며, 이와 같은 이유로 각 스위칭 소자에 걸리는 전압에 불평형이 발생한다. 이러한 전압 불평형은 상·하단 스위칭 소자의 게이트 드라이버의 구조를 최대한 동일하게 설계하여도 스위칭 소자에 존재하는 기생 커패시턴스 성분으로 인하여 반드시 발생하게 된다.

그림 1은 CREE 社의 SiC MOSFET을 이용하여 Pulse Train을 구현한 도식도이다. 실제 시스템에 존재하는 게이트와

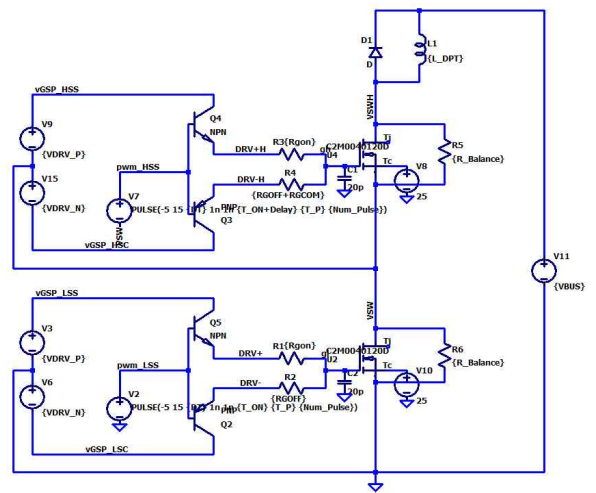


그림 1 직렬 연결된 스위칭 소자 Pulse Train 시뮬레이션
Fig. 1 Series-connected switching device pulse train simulation schematic

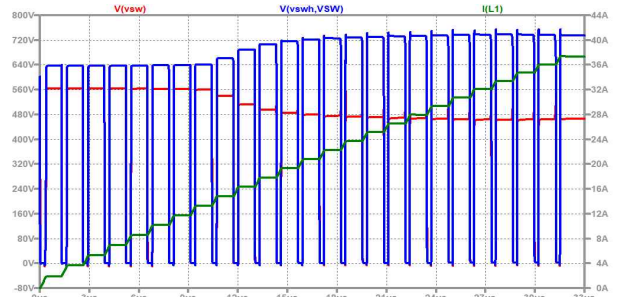


그림 2 직렬 연결된 스위칭 소자 Pulse Train 파형
Fig. 2 Series-connected switching device pulse train waveform

실제 시스템에서 존재하는 스위치 오프 상태의 전압 불 평형을 완화하기 위하여 적절한 게이트 드라이버 설계가 필요하다. 본 논문에서는 게이트 오프 저항을 PI 제어와 BJT를 통하여 제어함으로써, 전압 불 평형을 완화하는 기법을 제안한다.

2. 게이트 드라이버 설계 및 시뮬레이션

1.1 게이트 드라이버 설계

전압 불 평형을 완화하기 위하여 본 논문에서는 게이트 드라이버 오프 패스에 BJT를 추가함으로써, 게이트 오프 저항을 스위치 양단 전압에 따라 변경할 수 있는 구조를 제안한다. BJT는 활성 영역에서 베이스에 인가되는 전류에 따라 콜렉터에 흐르는 전류의 크기가 결정된다. 한편 BJT에 인가되는 전압의 크기와 베이스에 인가되는 전류의 크기에 따라서 BJT의 모델을 가변하는 저항으로 모델링 할 수 있다. 이를 그림 3에 나타내었다. 이는 BJT를 게이트 오프패스에 추가함으로써 게이트 오프 전류를 조절 가능하며, 스위치의 턴 오프 속도를 조절 할 수 있음을 의미한다. 이러한 점을 고려하였을 때, 그림 4와 같은 구조로 게이트 오프패스를 구성하여 베이스에 인가되는 전압을 PI 제어기를 통하여 제어한다면, 스위치에 인가되는 오프 전압의 불 평형을 완화할 수 있다.

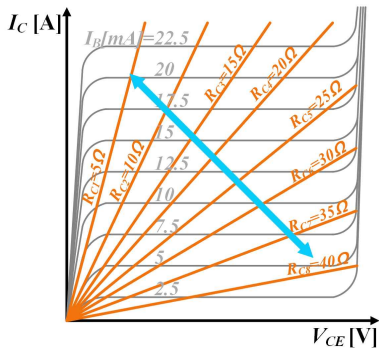


그림 3 BJT 출력 특성
Fig. 3 BJT output characteristic



그림 4 게이트 드라이버 오프 패스 구조
Fig. 4 Gate Driver OFF-path structure

게이트 BJT를 제어하기 위하여 스위치 양단에 걸리는 전압을 센싱 할 필요가 있다. 하지만 V_{DS} 는 스위칭 상태에 따라 변동하므로, 스위치가 오프 되어 있을 때의 전압을 센싱 해야 한다. 이는 S/H 소자와 트리거 소자를 이용하여 구현 할 수 있으며, 게이트 신호를 300 ns 딜레이한 신호를 이용하여 트리거 소자에 입력하면, 그림 5와 같이 게이트가 오프 된 이후 300ns 뒤에 S/H에 트리거 신호를 인가하게 된다. 이를 통하여 V_{DS} 전압은 300 ns 뒤에 샘플링 되어 제어기 측으로 넘어가게 된다. 이때 V_{DS} 전압은 그림 6의 전압 센싱 회로에 의하여 1/300 배로 축소되며, 본 논문에서 원하는 밸런싱 되는 V_{DS} 전압은 900V이므로 제어기 측에서 3V 전압을 지령으로 입력하게 된

다.

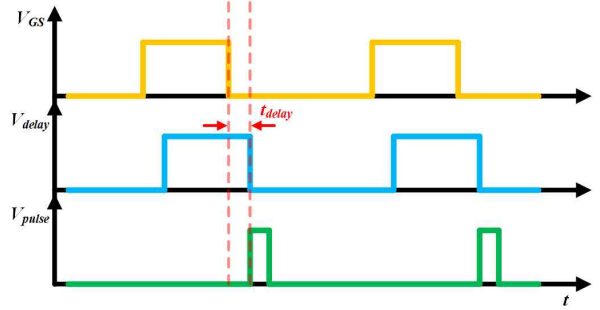


그림 5 샘플 앤 홀드 트리거 펄스
Fig. 5 Sample and Hold Pulse Trigger

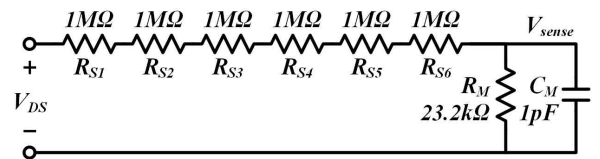


그림 6 V_{DS} 센싱 회로
Fig. 6 V_{DS} Sensing Circuit

S/H 회로에 의하여 센싱된 V_{DS} 전압은 절연형 OP-AMP를 통하여 BJT 에미터를 기준으로한 전압 영역으로 신호가 전달 된다. BJT 전압 측에서 전압형 OP-AMP를 이용하여 PI제어기를 구성하며, 해당 PI 제어기는 센싱된 V_{DS} 전압이 3V 보다 낮으면, 베이스 인가 전압을 증가하고, 3V 보다 높을 시 베이스 인가 전압을 감소 시킨다. 이를 통하여 V_{DS} 전압 상태에 따라 오프 패스의 BJT 저항이 제어되며, 전압 밸런싱을 일정 영역 이내로 유지하게 된다.

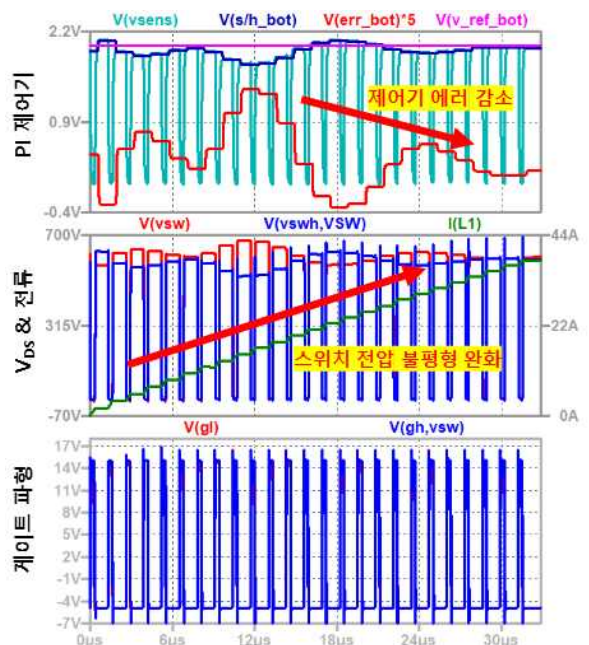


그림 7 AGD 시뮬레이션 동작 파형
Fig. 4 AGD Simulation waveform

1.2 제안된 게이트 드라이버를 이용한 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 방식의 게이트 드라이버를 LTspice로 구현하여 시뮬레이션을 진행하였다. 본 시뮬레이션에서는 이상적인 S/H 소자와 절연 전원 구현을 위하여 증속 전압원 소자를 이용하였다. 그림 7은 시뮬레이션의 동작 파형이다. Pulse Train을 통하여 제어기의 동작 여부를 확인하였으며, 시간이 지남에 따라 PI 제어에 의해 BJT 베이스 단의 전압이 제어됨과 동시에 스위치의 전압 불평형이 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 직렬 연결된 스위칭 소자에서 필연적으로 발생하는 전압 불평형을 완화하는 기법을 제안하였다. 게이트 드라이버의 오프 패스에 BJT를 추가하여 게이트 오프 전류를 조절함으로써, 스위치의 턴 오프 전압을 제어하였으며, 이를 시뮬레이션을 통하여 구현 가능함을 보였다.

본 연구는 2019년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20194030202370)

참 고 문 헌

- [1] J. Millán, P. Godignon, X. Perpiñà, A. Pérez-Tomás and J. Rebollo, "A Survey of Wide Bandgap Power Semiconductor Devices," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 5, pp. 2155-2163, May 2014.
- [2] X. She, A. Q. Huang and R. Burgos, "Review of Solid-State Transformer Technologies and Their Application in Power Distribution Systems," in , vol. 1, no. 3, pp. 186-198, Sept. 2013.
- [3] T. Zhao, G. Wang, S. Bhattacharya and A. Q. Huang, "Voltage and Power Balance Control for a Cascaded H-Bridge Converter-Based Solid-State Transformer," in , vol. 28, no. 4, pp. 1523-1532, April 2013.
- [4] J. Shi, W. Gou, H. Yuan, T. Zhao and A. Q. Huang, "Research on voltage and power balance control for cascaded modular solid-state transformer," in , vol. 26, no. 4, pp. 1154-1166, April 2011.
- [5] H. Fan and H. Li, "High-Frequency Transformer Isolated Bidirectional DC-DC Converter Modules With High Efficiency Over Wide Load Range for 20 kVA Solid-State Transformer," in , vol. 26, no. 12, pp. 3599-3608, Dec. 2011.
- [6] B. Singh, S. Singh, A. Chandra and K. Al-Haddad, "Comprehensive Study of Single-Phase AC-DC Power Factor Corrected Converters With High-Frequency Isolation," in , vol. 7, no. 4, pp. 540-556, Nov. 2011.
- [7] S. Falcones, R. Ayyanar and X. Mao, "A DC-DC Multiport-Converter-Based Solid-State Transformer Integrating Distributed Generation and Storage," in , vol. 28, no. 5, pp. 2192-2203, May 2013.
- [8] X. She, A. Q. Huang, S. Lukic and M. E. Baran, "On

Integration of Solid-State Transformer With Zonal DC Microgrid," in , vol. 3, no. 2, pp. 975-985, June 2012.

- [9] X. She, X. Yu, F. Wang and A. Q. Huang, "Design and Demonstration of a 3.6-kV-120-V/10-kVA Solid-State Transformer for Smart Grid Application," in , vol. 29, no. 8, pp. 3982-3996, Aug. 2014.
- [10] H. Qin and J. W. Kimball, "Solid-State Transformer Architecture Using AC-AC Dual-Active-Bridge Converter," in , vol. 60, no. 9, pp. 3720-3730, Sept. 2013.
- [11] S. Madhusoodhanan, A. Tripathi, D. Patel, K. Mainali, A. Kadavelugu, S. Hazra, S. Bhattacharya and K. Hatua, "Solid-State Transformer and MV Grid Tie Applications Enabled by 15 kV SiC IGBTs and 10 kV SiC MOSFETs Based Multilevel Converters," in , vol. 51, no. 4, pp. 3343-3360, July-Aug. 2015.