

부트스트랩 커패시터를 이용한 음전압 게이트 드라이버 회로 설계

정원효, 임규철, 하정익
 서울대학교 전기·정보공학부

Negative Voltage Gate Driver Circuit Design using Bootstrap Capacitor

Won Hyo Jeong, Gyu Cheol Lim, Jung-Ik Ha

Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

ABSTRACT

본 연구에서는 수동소자, 비전전형 DC-DC 컨버터를 이용한 음전압 드라이빙이 가능한 게이트 드라이버 구조를 제안한다. 한 레그(leg) 당 2개의 절연형 DC-DC 컨버터를 사용하는 기존의 방식과 비교해 드라이버 회로의 면적을 줄일 수 있는 이점이 있다. 제안하는 게이트 드라이버 회로에서 커패시터 충전에 위한 초기 충전 시퀀스를 도출하고 이를 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

하프 브릿지, 풀 브릿지와 같이 스위치가 위, 아래로 직렬한 구조에서는 스위치 턴-온을 위해 전압 시프팅이 필요하다. 가전 제품 및 산업계에서 사용되는 인버터에서는 게이트 구동을 위한 전압 공급을 위해 부트스트랩 구조가 많이 사용되고 있다. 해당 구조에서는 커패시터와 다이오드를 이용해 전압 시프팅을 구현한다. 다른 방법으로는 절연형 DC-DC 컨버터를 사용하는 것이며, 한 레그(leg)당 2개의 절연형 DC-DC 컨버터를 이용해 윗상을 턴-온 할 수 있다.

일반적으로 스위치 턴-온 시 양의 게이트 전압을 인가하고, 턴 오프 시 0 V를 인가하면 된다. 그러나 스위칭 소자의 발달로 스위칭 주파수가 높아지면서 안정적인 제어와 밀러 효과에 의해 아랫상이 턴-오프 된 상태에서 윗상을 턴-온 할 때 아랫상이 턴-온되어 arm-short이 발생하는 현상을 방지하고, 스위칭 속도 향상을 위해 스위치 턴-오프 시 음의 게이트 전압을 인가할 필요가 있다.^[1]

음전압 게이팅 구현을 위한 간단한 방법은 양, 음전압 모두 출력 가능한 절연형 DC-DC 컨버터를 사용하는 것이다. 그러나 절연형 DC-DC 컨버터는 비교적 가격이 비싸고 부피가 크다는 단점이 있다. 본 연구에서는 다이오드, 커패시터, 비절연형 DC-DC 컨버터를 이용해 절연형 DC-DC 컨버터를 대체하며 음전압 드라이빙도 가능한 게이트 드라이버 회로를 제안하고, 커패시터 충전을 위한 초기 충전 시퀀스를 도출한다.

2. 본론

2.1 기존 게이트 드라이버 회로 비교

스위치를 턴-온하기 위해서는 게이트-소스단에 문턱 전압 이상의 전압을 인가해야 한다. 스위치 2개가 직렬된 풀 구조에서 아랫상이 턴-온 된 경우 풀전압이 0 V이므로 문턱

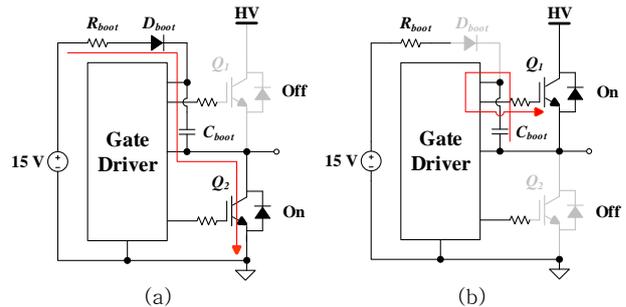


그림 1. 부트스트랩 커패시터 기반 게이트 드라이버: (a) 아랫상 스위치 턴-온, (b) 윗상 스위치 턴-온
 Fig. 1. Bootstrap capacitor-based gate driver: (a) Low-side switch turn on, (b) High-side switch turn on

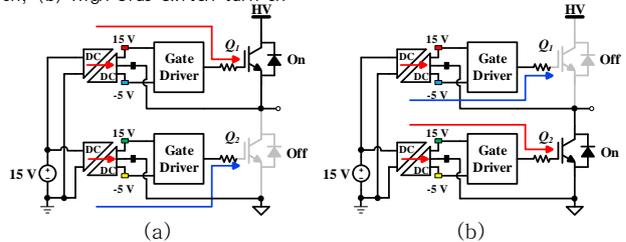


그림 2. 절연형 DC-DC 컨버터 기반 게이트 드라이버: (a) 아랫상 스위치 턴-온, (b) 윗상 스위치 턴-온
 Fig. 2. Isolated DC-DC converter-based gate driver: (a) Low-side switch turn on, (b) High-side switch turn on.

전압 이상의 전압을 게이트에 인가하면 되지만, 윗상이 턴-온 된 경우, 풀전압이 HV (High Voltage, DC-Link voltage)이므로 게이트에는 HV에 문턱전압이 더해진 전압을 인가해야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위해 그림 1, 2의 구조가 제안되었다. 그림 1의 구조는 다이오드와 커패시터(부트스트랩 커패시터)를 이용한다. 그림 1 (a)처럼 아랫상 스위치를 턴-온 하는 경우 다이오드가 도통되어 커패시터에 15 V가 인가되어 충전된다. 그림 1 (b)와 같이 윗상 스위치가 턴-온 되면 다이오드는 blocking되며, 게이트 전압이 풀전압 대비 레벨 시프팅이 되어 윗상 스위치의 게이트-소스단에는 15 V가 인가된다.

그림 2는 절연형 DC-DC 컨버터를 이용한 드라이버 구조다. 해당 경우에는 안정적인 스위칭 동작을 위해 음전압 게이트 드라이빙도 가능하다. 그림 2에서는 15 V를 입력 받아 -5 V, 15 V를 출력하는 절연형 DC-DC 컨버터를 예시로 사용한다. 절연형 DC-DC 컨버터는 스위치별로 하나씩 사용되며, 출력단의 기준점은 각 스위치의 소스단에 연결된다. 따라서 윗상 스위치의 경우 절연형 DC-DC 컨버터의 기준점이 스위칭 상태에 따라 0 V, HV로 교번 되어 스위칭 동작을 가능하게

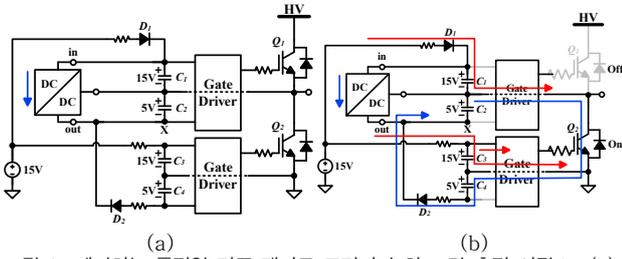


그림 3. 제안하는 폴전압 기준 게이트 드라이버 회로 및 충전 시퀀스: (a) 게이트 드라이버 회로, (b) 충전 시퀀스 I
 Fig. 3. Pole-voltage referenced gate driver circuit and charging sequence: (a) Gate driver circuit, (b) Charging sequence I.

해준다. 추가적인 절연형 DC-DC 컨버터만이 필요하므로 회로 구성이 간단하다는 장점이 있다. 하지만 절연 소자의 특성 상 소자의 부피가 커지며 3상 인버터의 경우 6개(아랫상을 위한 컨버터를 공유하는 경우에는 4개)가 필요해 회로에서 컨버터가 차지하는 면적, 부피 비중이 증가하는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 비절연형 DC-DC 컨버터와 수동 소자만을 이용해 음전압 드라이빙도 가능한 게이트 드라이버를 2.2절에서 설계한다.

2.2 제안하는 게이트 드라이버 회로 및 충전 시퀀스

본 논문에서는 커패시터, 다이오드, 비절연형 DC-DC 컨버터를 이용해 음전압 드라이빙도 가능한 게이트 드라이버를 제안한다. 회로 설계를 위해 그림 1의 부트스트랩 기반 게이트 드라이버 원리를 차용한다. 특정 시점에 다이오드를 도통, blocking함으로써 전압을 시프팅하고, 커패시터에 충전된 전하로 스위치를 구동 한다. 이후의 논의부터 스위치 턴-온에 15 V, 턴-오프에 -5 V를 사용하는 상황을 가정하며, 15 V를 입력 받아 -5 V를 출력하는 비절연형 DC-DC 컨버터를 사용한다. 컨버터 출력단 기준점이 폴전압, HV인 두 회로를 제안하며 커패시터를 15 V, 5 V로 충전하는 스위칭 시퀀스를 도출한다.

2.2.1 폴전압 기준 게이트 드라이버 회로

그림 3 (a)는 제안하는 폴전압 기준 게이트 드라이버 회로다. 비절연형 DC-DC 컨버터의 기준점이 폴의 출력단에 연결되어 있으며, C_1 , C_2 는 각각 윗상 스위치에 사용되는 15 V, 5 V로, C_3 , C_4 는 각각 아랫상 스위치에 사용되는 15 V, 5 V로 충전된다. 커패시터들을 특정 전압으로 충전하기 위해서는 그림 3 (b)와 같이 Q_2 를 턴-온하면 된다. Q_2 가 턴-온 되면 D_1 이 도통되어 C_1 에 15 V로 충전된다. C_1 의 15 V를 입력으로 받은 DC-DC 컨버터는 -5 V를 출력하여 C_2 가 5 V로 충전된다. 그리고 D_2 가 도통되어 C_4 에 5 V가 충전된다. C_3 는 항상 15 V 전원에 연결되어 있으므로 항상 충전되어 있다. 해당 구조의 경우 한 번의 스위칭으로 모든 커패시터가 충전된다. 그림 3 (a)의 노드 X(컨버터의 출력 노드)는 윗상이 턴-온 되면 (HV-5) V 전위를 가지고 아랫상이 턴-온되면 -5 V의 전위를 가진다. 따라서 3상 인버터, 풀브릿지의 경우 각 상에서의 스위칭 상태가 다르기 때문에 컨버터 출력을 공유할 수 없다. 따라서 각 폴마다 DC-DC 컨버터가 필요하다.

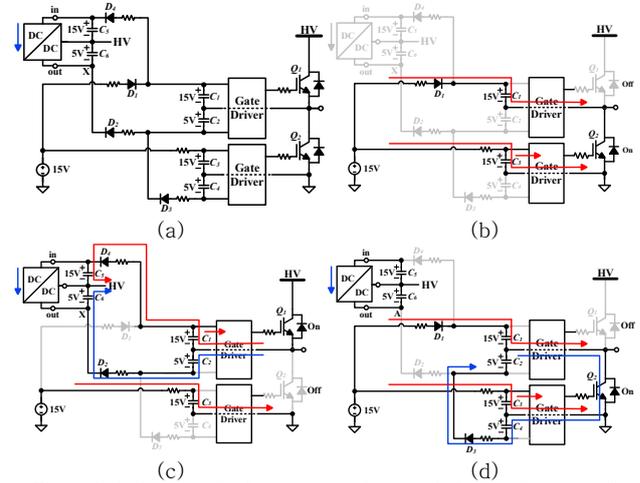


그림 4. 제안하는 HV 기준 게이트 드라이버 회로 및 충전 시퀀스: (a) 게이트 드라이버 회로, (b) 충전 시퀀스 I, (c) 충전 시퀀스 II, (d) 충전 시퀀스 III.
 Fig. 4. HV referenced gate driver circuit and charging sequence: (a) Gate driver circuit, (b) Charging sequence I, (c) Charging sequence II, (d) Charging sequence III.

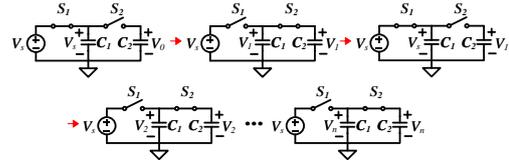


그림 5. 커패시터-커패시터를 통한 충전 과정.
 Fig. 5. The charging process through capacitor-to-capacitor transfer.

2.2.2 HV(High Voltage) 기준 게이트 드라이버 회로

그림 4 (a)는 제안하는 HV 기준 게이트 드라이버 회로이다. 해당 회로에서는 컨버터의 기준점이 HV에 연결되어 있으며, 초기 충전은 다음 3단계로 이루어진다. **충전 시퀀스 I:** C_3 가 항상 15 V로 충전되어 있으므로 아랫상 스위치를 턴-온 할 수 있다. 그림 4 (b)처럼 Q_2 를 턴-온하면 D_1 이 도통되어 C_1 이 충전된다.

충전 시퀀스 II: C_1 의 충전된 전하를 이용해 그림 4 (c)와 같이 Q_1 을 턴-온 할 수 있다. D_4 가 도통되어 C_5 가 충전되고 컨버터에 입력이 가해지게 되므로 출력단에 있는 C_6 가 충전된다. 그리고 D_2 가 도통되어 C_2 가 충전된다.

충전 시퀀스 III: 그림 4(d)와 같이 Q_2 를 턴-온하면 D_3 가 도통되어 C_2 의 충전 전하를 이용해 C_4 가 충전된다.

충전 시퀀스 II에서 C_1 으로 C_5 를 충전하는 경우와, 충전 시퀀스 III에서 C_2 로 C_4 를 충전하는 경우를 살펴보면 전압원으로 충전되지 않고 병렬 연결된 커패시터가 페루프가 형성해 한 커패시터에 충전된 전하가 다른 커패시터로 이동함으로써 충전이 이루어진다.

해당 상황을 회로도도로 표현하면 그림 5와 같다. C_2 의 초기 전압이 V_0 이고, S_1 과 S_2 가 스위칭 하는 경우이다. S_2 가 n번 턴-온 된 후 C_2 양단 전압을 V_n 이라 정의하면 식 (1)의 관계를 얻을 수 있고 이를 이용해

$$V_n = \frac{1}{2}(V_{n-1} + V_0) \quad (1)$$

$$V_n = \frac{1}{2^n}V_0 + \left(1 - \frac{1}{2^n}\right)V_0 \quad (2)$$

V_n 의 일반식 식 (2)를 얻는다. 식 (2)를 통해 n이

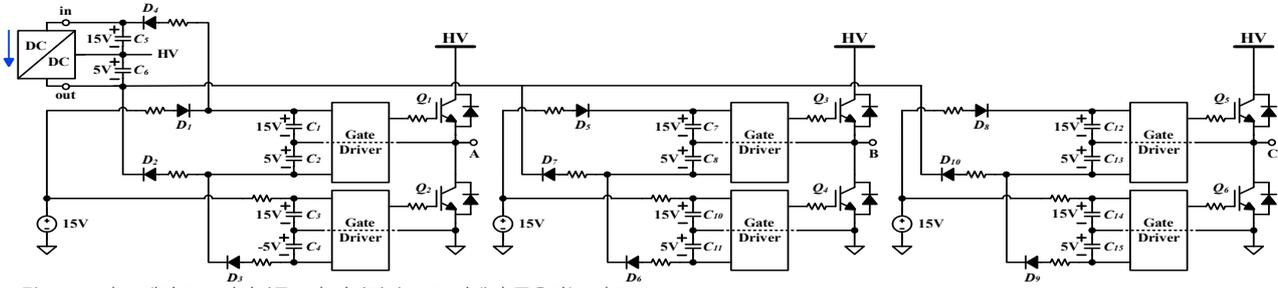


그림 6. HV 기준 게이트 드라이버를 3상 인버터의 모든 상에서 공유하는 회로도
 Fig. 6. A circuit diagram where an HV-referenced gate driver is shared across all phases of a 3-phase inverter.

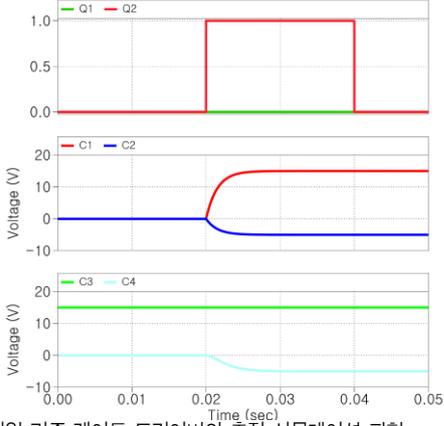


그림 7. 폴전압 기준 게이트 드라이버의 충전 시뮬레이션 파형
 Fig. 7. Charging simulation waveforms of a pole-voltage referenced gate driver.

충분히 커지면 V_{in} 이 V_s 에 수렴함을 알 수 있다. 따라서 그림 4 (a) 회로의 모든 커패시터를 특정 전압 레벨로 충전하기 위해서는 그림 4 (c)~(d)의 충전 시퀀스를 정해진 횟수만큼 반복해야 하므로 Q_1 , Q_2 를 반복적으로 턴-온하는 충전 시퀀스를 채택한다. 폴전압 기준 게이트 드라이버와 비교하면 DC-DC 컨버터의 출력 노드(그림 4의 노드 X)는 스위칭 상태에 상관없이 동일한 전압을 가진다. 따라서 다른 폴에서 컨버터의 출력을 공유할 수 있다. 예를 들어 2레벨 3상 인버터에서 하나의 비절연형 DC-DC 컨버터의 출력을 나머지 두 폴에서 공유하는 구조를 그림 6에 보인다. 절연형 컨버터를 사용할 경우 컨버터가 6개(아랫상을 위한 컨버터를 공유하는 경우에는 4개) 필요하지만 해당 경우에는 오직 1개의 컨버터로도 동작이 가능하다는 장점이 있다. 다이오드를 통해 충전되므로 on-drop로 인해 게이팅 전압이 줄어들고, 하나의 컨버터에서 게이팅을 위한 파워를 전달해야 하므로 컨버터 용량이 증가한다는 trade-off가 있다.

2.3 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에는 이상적인 다이오드, $15\ \Omega$ 저항, $100\ \mu\text{F}$ 커패시터를 사용하였고, DC-DC 컨버터는 입력 전압에 비례하는 출력을 내도록 모델링하였다. 그림 7은 폴전압 기준 게이트 드라이버의 충전 시 커패시터 전압에 대한 시뮬레이션 파형이다. 커패시터 양단의 전압은 소스단을 기준으로 측정하여 턴-오프 전압이 음의 값을 나타내었다. Q_2 를 턴온함으로써 $C_1 \sim C_4$ 에 $15\ \text{V}$, $-5\ \text{V}$ 가 충전됨을 확인할 수

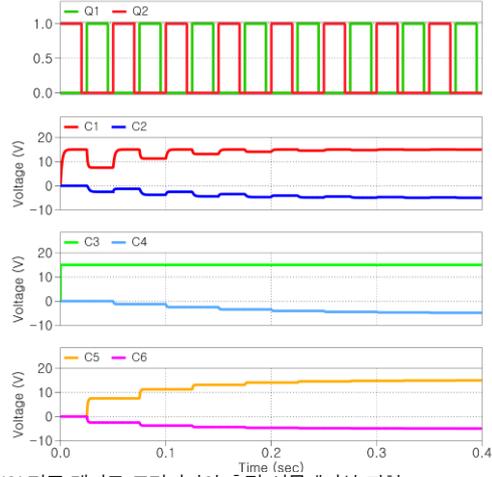


그림 8. HV 기준 게이트 드라이버의 충전 시뮬레이션 파형
 Fig. 8. Charging simulation waveforms of a HV referenced gate.

있다. 그림 8은 HV 기준 게이트 드라이버 충전 시 커패시터 시뮬레이션 파형이다. Q_1 , Q_2 를 교번하여 턴-온함으로써 $C_1 \sim C_4$ 이 게이팅 전압으로 수렴한다. C_5 , C_6 는 게이팅 전압을 만들기 위한 전압이며 마찬가지로 $15\ \text{V}$, $-5\ \text{V}$ 로 수렴한다.

3. 결론

본 연구를 통해 절연형 DC-DC 컨버터를 수동소자와 비절연형 DC-DC 컨버터로 대체해 음전압 드라이빙도 가능한 게이트 드라이버 회로 두 가지를 제안하였다.

두 회로에 대해 초기 충전 시퀀스를 도출하였고 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

이 논문은 서울대학교 전력 연구소의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

[1] J. Zhao, L. Wu, Z. Li, Z. Chen and G. Chen, "Analysis and Suppression for Crosstalk in SiC MOSFET Turn-off Transient," 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEM2020-ECCE Asia), Nanjing, China, 2020