

양방향 Buck 컨버터 DCM 구동 시 전류링잉현상 분석에 따른 스위치 및 다이오드 선정

이영달, 최규영, 신승민, 이병국
성균관대학교 정보통신공학부

Selection of Switch and Diode by Analyzing Current Ringing on DCM Bi-directional Buck Converter

Young Dal Lee, Gyu Yeong Choe, Seung Min Shin, Byung Kuk Lee
School of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문은 양방향 Buck 컨버터 DCM 구동 시 사용되는 스위치의 전류링잉현상을 상세히 분석하고 이에 따른 스위치 효율과 시스템 전력 효율 차이를 실험을 통해 검증한다. 분석을 통해 얻은 결과를 바탕으로 양방향 Buck 컨버터 설계 시 전력 효율을 높이는 스위치 및 다이오드를 선정하였다.

1. 서 론

전력전자 회로에서의 스위칭 주파수의 고속화에 따라 손실 최소화에 대한 연구가 날로 증가하고 있다. 이러한 스위칭 손실의 주된 요인으로는 스위치의 물리적 구조에 의한 기생 용량과 스위치 내부의 역병렬 다이오드에서 급격하게 역바이어스가 걸릴 때 저항이 거의 없는 것처럼 보이는 상태에서 본래의 고저항상태로 바뀌게 되는 역회복 특성으로 기인한다.^[1] 특히 이러한 특성으로 인해 양방향 Buck 컨버터 DCM 구동시 전류링잉현상이 발생하게 된다. 이 전류링잉현상은 전력 손실의 원인이 되므로 손실을 억제하고 시스템 효율을 높이기 위한 노력이 대두되고 있다. 본 논문에서는 양방향 Buck 컨버터 구동 시 기생용량과 역회복특성에 의한 전류링잉현상 원인을 상세히 분석하였다. 이를 바탕으로 PSIM을 활용한 시뮬레이션을 통해 현상 원인의 타당성을 보였다. 또한 실제 실험을 바탕으로 산출된 결과값과 시뮬레이션 결과값을 비교 분석하여 실험의 타당성을 검증하고 양방향 Buck 컨버터 DCM 구동 시 적합한 스위치와 다이오드를 선정하였다.

2. 기생용량과 역회복 특성

2.1 기생용량

기생 커패시터로 인해 발생되는 기생 커패시턴스 중 특히 출력 커패시턴스인 C_{oss} 는 드레인 소스 간 등가 커패시턴스이다. 이 용량은 물리적 구조상 V_{ds} 에 적용된 것과 같은 전압이기 때문에 전력 손실의 원인이 되고 이 손실은 스위칭 주파수와 V_{ds} 에 비례적이다. 그 이유는 Buck 컨버터 회로에서 스위치 턴 오프 구간에서 다이오드 역회복 이후 구간부터 다음 주기의 스위치 턴 온 구간 직전까지 에너지흐름과 관련이 있다. 에너지 전달 매개체인 L과 에너지 저장원인 C의 전위차에 의한 에너지를 주고 받는 성질을 통해 스위치 내부 역병렬 다이오드로 전류가 흐르게 된다. 이로 인해 역병렬 다이오드와 병렬로 연결된 출력커패시턴스 C_{oss} 가 에너지를 주고 받는 과정에서 출력

커패시턴스의 충전이 스위칭 다음 주기 턴 온 직전까지 일어나기 때문이다. 이 출력커패시턴스의 충전 전 특성은 스위치 턴 오프 동작 시 전류링잉의 직접적인 원인이 된다. 이러한 특성을 통해 기생커패시턴스로 인한 손실 식은 다음과 같이 에너지와 관련된 식과 유사 형태로 산출된다.

$$P_{Loss \cdot parasitic} = \frac{1}{2} \times C_{oss} \times V_{DS}^2 \times f_{sw} \quad (1)$$

2.2 역회복 특성

다이오드가 순 바이어스 된 상태에서 갑작스럽게 역 바이어스가 걸리게 되면 내부 저항이 거의 0에 가까운 값을 따라가다가 본래의 고저항 상태가 된다. 이러한 과도 상태의 기간을 역회복 시간이라고 하며 스위칭 시간으로도 볼 수 있다. 일반 정류 다이오드에서는 μsec 이고 고속 다이오드인 FRD는 nsec단위로 동작한다. 특히 다이오드는 2단자 소자이므로 트랜지스터처럼 베이스나 게이트단자로 스위칭 시간을 제어할 수 없기 때문에 동작주파수가 높은 시스템에서 스위칭 손실을 줄이기 위해 FRD나 SIC와 같은 고속다이오드는 필수불가결하다.

역회복시 스위칭 손실 P_{sw} 는 다이오드에 인가되는 역전압을 V_r , 스위칭 주파수를 f_{sw} 라고 하면 역회복시 스위칭 손실 P_{sw} 는 다음과 같다.

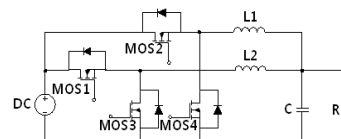
$$P_{sw} = \frac{V_r \times I_{rr}}{2} \times t_{rr} \times f_{sw} [W] \quad (2)$$

집합용량의 축적되는 전하 Q_{rr} 를 알고 있는 경우 다음과 같은 식 (3)을 사용한다.

$$P_{sw} = V_r \times Q_{rr} \times f_{sw} [W] \quad (3)$$

위의 두 기생용량과 역회복 특성을 통한 전류링잉현상을 분석한 결과를 토대로 전류링잉현상에 따른 손실을 줄이기 위해 서 적은 C_{oss} 용량을 가지고 빠른 t_{rr} 특성을 가지는 스위치와 다이오드를 선정하는 것이 효율적임을 알 수 있다.

3. 실험 및 결과



(a) 양방향 Buck 컨버터회로 (b) 실제구현 시스템

그림 1 실험용 양방향 Buck 컨버터

F g 1 B d e c o a Buck Co ve e

표 1 양방향 Buck 컨버터 시스템 파라메타

Table 1 Parameters of Bidirectional Buck Converter

| Parameters | Value | [Unit] |
|------------|-------|--------|
| 입력전압 | 400 | [V] |
| 출력전압 | 250 | [V] |
| 정격용량 | 350 | [W] |
| 스위칭 주파수 | 20 | [kHz] |

그림 1 (a),(b)는 스위치와 다이오드의 각각의 경우로 인한 역회복 시간과 기생용량에 의한 출력 전류 파형의 추이를 얻고, 식 (1),(2),(3)을 활용하여 손실을 분석하기 위해 실제 구현한 양방향 Buck 컨버터와 회로도를 나타낸다. 표 1은 시스템의 파라메타값을 보여준다. 양방향 Buck 컨버터 DCM 구동 시 전류링잉현상에 따른 전력 손실을 줄이는 것을 목적으로 스위치 및 다이오드를 선정하기 위해 사용된 스위치와 다이오드의 각각의 경우는 다음과 같다. CoolMOS C6와 FRD병렬, CoolMOS E6와 SIC병렬, IGBT와 FRD병렬, IGBT와 SIC병렬이며 조합에 따른 각각의 손실을 도출하였다. 그림 1 (b)와 표 1의 시스템 파라메타를 토대로 PSIM으로 시뮬레이션한 회로의 인덕터에서 출력 상전류 파형은 그림 2와 같다.

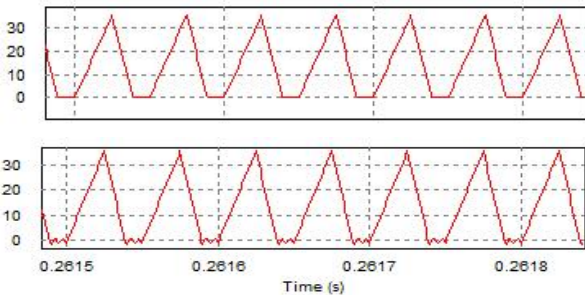


그림 2 양방향 Buck 컨버터 상전류 파형

Figure 2 Output Current Waveform of Bidirectional Buck Converter

그림 2는 그림 1 (b)의 회로에 기생커패시턴스를 추가했을 때 상전류의 출력파형에 전류링잉이 발생한다는 것을 보여주고 있다. 이를 바탕으로 그림 1 (a) 회로의 출력파형을 통해 실험의 타당성을 검증하기 위해 다음과 같이 구성하였다. 실험에 사용된 스위치는 양방향 Buck 컨버터 시스템 사양에 적합한 정격과 내부 역병렬 다이오드의 역회복 시간이 빠르고 스위치 턴온 시의 저항 손실을 고려하여 $R_{ds(on)}$ 이 적은 소자를 선정하였다. IGBT는 IGW20N60H3, CoolMOS C3, CP모델이 내부 게이트 저항 값 차이로 게이트 오실레이션을 통해 오작동을 야기시킬 수 있기 때문에 이런 문제를 어느 정도 해결한 CoolMOS E6는 IPW60R190E6, CoolMOS C6는 IPW60R099C6를 선정하였다. 다이오드의 경우 식 (2)를 통해 유추할 수 있듯이 스위칭 손실에 영향을 주는 t_{rr} 특성이 상대적으로 빠르고 시스템 정격에 적합한 FRD와 SIC계열을 선정하였다. FRD의 경우 RHRG5060를 SIC는 STPSC1206을 각각 선정하였다.

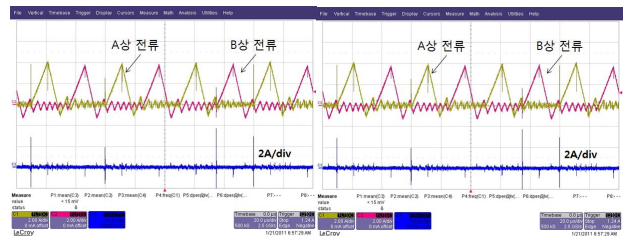
표 2는 PSIM을 통한 시뮬레이션과 실제 구현한 회로의 출력 파형을 확인할 수 있는 전류링잉에 의한 스위치와 다이오드의 조합별 손실을 나타낸다. 사용된 식은 식 (1)을 이용한 기생용량에 의한 손실과 식 (2),(3)을 통해 산

출한 역회복에 의한 손실을 나타낸다. 표를 통해 시뮬레이션 계산결과와 실제 측정값이 근사함을 알 수 있다.

표 2 스위치 다이오드의 각각의 경우 정량적 손실 [U W]

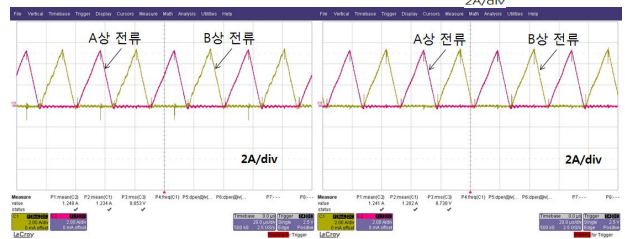
Table 2 Power Loss of Each Parameter Combination [U W]

| 조합 | 기생용량 손실 | | 역회복 손실 | |
|-----|---------|---------|---------|---------|
| | 시뮬레이션 | 실험 | 시뮬레이션 | 실험 |
| (a) | 0.62112 | 0.65065 | 0.18125 | 0.19183 |
| (b) | 0.42187 | 0.44095 | 0.14379 | 0.15962 |
| (c) | 0.10297 | 0.10368 | 0.18125 | 0.19183 |
| (d) | 0.10297 | 0.10368 | 0.14379 | 0.15962 |



(a) CoolMOS C6와 FRD병렬

(b) CoolMOS E6와 SIC병렬



(c) IGBT와 FRD병렬

(d) IGBT와 SIC병렬

그림 3 실험 결과 상전류 파형

Figure 3 Output Current Waveform

기생용량 손실과 스위칭손실은 IGBT와 SIC의 경우가 가장 효율적인 낮은 손실을 보이고 CoolMOS C6와 FRD가 손실이 상대적으로 크음을 확인할 수 있다. 그림 3은 각각의 경우의 출력 상전류를 나타낸다. CoolMOS조합의 경우 역회복 전류가 1A이지만 상대적으로 IGBT조합은 0.15 0.2A로 현저히 줄어들음을 볼 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 DC DC 전력변환에서 양방향 Buck 컨버터 DCM구동 시 상전류에서 확인할 수 있는 전류링잉현상의 원인을 분석하였다. 스위치와 다이오드의 물리적 특성으로 인한 기생용량과 역회복시간에 따른 출력 상전류를 각각의 병렬 조합으로 비교분석하여 연구의 타당성을 검증하였다. 이에 따라서 양방향 Buck 컨버터의 DCM구동 시 전류링잉 현상을 감소시키고 그로 인한 손실을 줄이는 스위치 및 다이오드 선정하였다.

참고 문헌

[1] 이기복, 장훈, 강용진, 유지운, "IPM에서 다이오드의 환류전류 측정 및 역회복 특성에 관한 연구", 전력전자학회, 전력전자학회 창립 10주년 기념 추계학술대회 논문집 2006.11, pp. 155~157(3pages)