

양방향 절연형 컨버터의 2차측 브리지 Leg Fault 특성 분석

오창열, 성원용, 조남진, 김윤성, 이병국*
성균관대학교 정보통신대학

Analysis of Leg Fault in Secondary Bridge of Bi-directional Isolated DC-DC Converters

Chang Yeol Oh, Won Yong Sung, Nam Jin Cho, Yun Sung Kim, and Byoung Kuk Lee*
College of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 MOSFET 바디 다이오드 특성에 의해 양방향 절연형 컨버터의 2차 측 브리지 구조에서 나타나는 Leg Fault 현상을 분석한다. 중/고용량 양방향 절연형 컨버터의 동작에 있어 MOSFET 바디 다이오드로 구성된 정류기가 가지는 특성이 미치는 영향을 분석하고, 특성의 변화를 제시한다. 또한 분석 및 비교 시험의 결과를 통하여 바디 다이오드로 인한 Leg Fault 발생 조건을 보이고, 이를 토대로 양방향 절연형 컨버터의 안정적인 동작을 위해 바디 다이오드 특성을 고려한 MOSFET 선정 방향을 제시한다.

1. 서론

최근 다양한 신재생 에너지원 및 에너지 저장 시스템에 대한 연구의 확산으로 다양한 형태의 중/고용량 양방향 컨버터에 대한 연구가 증가하고 있다. 이러한 컨버터들은 시스템의 안정성 및 신뢰성을 위하여 그림 1과 같은 풀 브리지 구조를 주로 가지며, 양방향 동작을 위해 일반적인 풀 브리지 컨버터와 달리 2차 측을 스위치로 구성한다^[1].

또한 이러한 컨버터에서 전력밀도 향상을 위한 고주파 스위칭의 사용이 일반적이다. 하지만 스위칭 주파수의 증가 및 MOSFET의 바디 다이오드를 이용한 2차 측 정류기 구성으로 인하여 MOSFET의 스트레스 증가 및 소손이 발생할 수 있다. 이러한 현상들로 인하여 양방향 컨버터 구조에서 신뢰성 증가를 위해서는 MOSFET의 특성을 고려한 설계가 필요로 한다^[2].

그러므로 본 논문에서는 MOSFET를 이용한 중/고용량 양방향 풀 브리지 컨버터에서 바디 다이오드로 구성된 정류기가 가지는 특성이 미치는 영향과 이로 인하여 발생하는 Leg Fault를 분석한다. 또한 분석한 결과와 비교 시험을 토대로 시스템의 안정성을 위한 MOSFET 선정 및 설계방향을 제시한다.

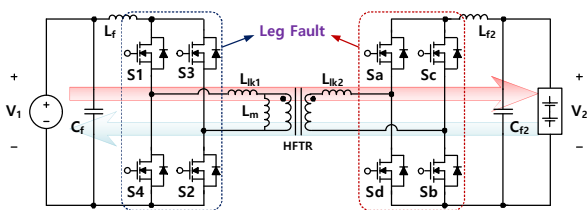


그림 1. 양방향 풀-브리지 컨버터.
Fig. 1. Circuit diagram of bi-directional full-bridge converter.

2. Leg Fault 특성 분석

2.1 Leg Fault 발생원리

양방향 컨버터에서 MOSFET 바디 다이오드로 구성된 정류기의 Leg Fault 발생 원인은 그림 2와 같은 바디 다이오드의 역회복 특성에 기인한다. 역회복 현상은 다이오드가 도통에서 역방향 차단으로 전환되는 스위칭 과정에서 발생하는 과도현상으로 도통 시 P-N접합에 저장된 전하가 다이오드 양단에 역전압이 인가되면서 차단 영역으로 가기 위하여 제거되는 과정에서 발생하는 큰 역전류의 흐름과 전자와 전공의 재결합을 경유하여 발생한다.^[2]

이러한 큰 역전류가 MOSFET의 드레인으로 인가되면 내부적으로 그림 3 (a)와 같은 경로로 흐르게 된다. 그림 3 (a)와 (b)에서 나타난 것과 같이 MOSFET는 접합구조로 인하여 등가적으로 바디 다이오드뿐만 아니라 기생 BJT를 갖는다.^[2, 3]

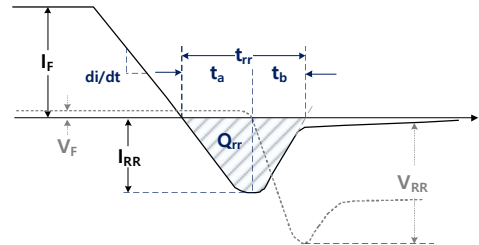


그림 2. 바디 다이오드의 역회복 현상.
Fig. 2. Reverse-recovery phenomena of body diode.

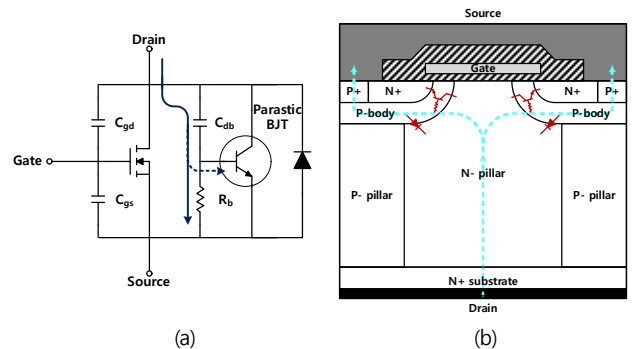


그림 3. MOSFET의 (a) 등가회로 및 (b) Super junction 구조.
Fig. 3. (a) Equivalent circuit and (b) Super junction structure of MOSFET.

기본적으로 기생 BJT의 베이스와 에미터는 서로 소스 메탈에 의해 단락되어 있지만, 실제에서는 P body층의 길이로 인하여 작은 기생 저항이 존재하고 한다. 특히 Power MOSFET의 도통 손실을 줄이기 위해 그림 3 (b)와 같은 Super Junction 구조에서 이러한 기생 저항이 좀 더 뚜렷이 나타나며, 이 저항이 BJT 베이스 저항과 같은 역할을 수행한다.^[3] 브리지 구조에서 역회복 특성에 의해 드레인을 통하여 인가되는 큰 전류가 기생 BJT에 인가되면 베이스 에미터 간 순방향 바이어스와 같이 동작하여 BJT를 도통시키는 역할을 하게 된다. 도통된 BJT로 인하여 단일 Leg 내에서 순간적으로 단락이 발생하게 되며 이로 인하여 발생된 큰 전류가 Leg Fault의 주된 원인이 된다.

2.2 MOSFET 특성비교

Leg Fault의 원인이 되는 바디 다이오드의 역회복 특성은 MOSFET 제조사에서 제공하는 데이터 시트 상의 t_{rr} , Q_{rr} 및 di/dt 등을 통해 그 특성을 알 수 있다. 이러한 파라미터들을 토대로 그림 2 및 식 (1)~(2)를 통해 최대 역회복 전류 I_{RR} 를 계산할 수 있다.^[2, 3]

$$t_{rr} \cong \sqrt{\frac{2Q_{rr}}{di/dt}} \quad (1)$$

$$I_{RR} \cong \sqrt{2Q_{rr} di/dt} \quad (2)$$

바디 다이오드의 역회복 특성과 달리 MOSFET의 기생 BJT에 대한 특성에 관한 파라미터는 주어지지 않는다. 특히 기생 BJT에서 베이스 저항의 역할을 하는 R_b 의 값은 반도체 공정에서 달라지는 요소이며 내부 기생 성분이기 때문에 정확한 측정은 사실상 불가능하다.^[3]

그러므로 바디 다이오드를 포함한 다양한 MOSFET에 대하여 파라미터 분석 및 비교 시험을 통하여 적합성 여부를 판단한다. 이를 통하여 각각의 MOSFET의 바디 다이오드의 역회복 특성을 확인하고, Leg Fault가 발생하는 조건을 확인한다.

비교 시험을 위하여 동급 사양의 MOSFET를 4개를 선정하였으며, 각각의 주요 파라미터는 표 1에서 나타난 바와 같다. 일반적인 Super junction MOSFET들은 표 1의 FET D와 같이 내부 접합을 통과하는 전하의 양을 증가시킴으로 $R_{ds(on)}$ 감소가 가능한 반면 도통 시 P N접합에 저장되는 전하가 증가하므로 상대적으로 바디 다이오드의 역회복 특성 및 기생 성분에 취약하다. 반면 일반적인 Super junction 구조에서 개선을 통해 $R_{ds(on)}$ 저감 효과는 상대적으로 작지만 바디 다이오드의 역회복 특성을 개선한 FET A C의 경우 그 구조에 따라 기생성분의 크기가 달라진다. 선정된 4가지의 MOSFET을 그림 4와 같이 동일한 조건에서 시험을 진행하였다. 그림 4 (a) (c)의 파형들과 같이 FET A C는 앞서 진행한 파라미터 분석과 같이 달라지는 기생 파라미터로 인한 공진으로 전류 및 전압 스트레스의 변화와 함께 역회복 특성에 차이를 보인다.

표 1 비교시험용 MOSFET의 파라미터.

Table 1 Parameters of MOSFET for experimental comparison.

	t_{rr}	Q_{rr}	$R_{ds(on)}$	C_{oss}
FET A	165ns	1.15 μ C	72m Ω	110pF
FET B	200ns	1.5 μ C	68m Ω	350pF
FET C	250ns	1.8 μ C	65m Ω	300pF
FET D	590ns	19 μ C	58m Ω	160pF

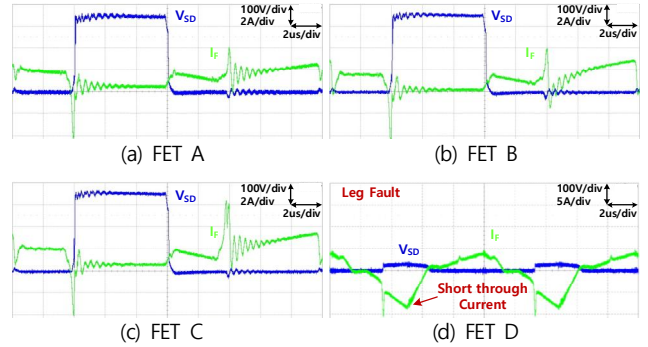


그림 4. MOSFET 바디 다이오드의 역회복 특성 비교.

Fig. 4. Characteristic comparison of reverse-recovery with body diode of MOSFETs.

그림 4(a)와 같이 FET A는 바디 다이오드의 역회복 특성 및 기생 파라미터의 개선을 통하여 상대적으로 안정적인 동작이 가능하다. 또한 그림 4(b)의 FET B는 FET A와 비교하여 역회복 특성의 차이와 동시에 기생 파라미터에 의한 공진 전류의 크기가 증가함을 알 수 있다. FET C의 경우 역회복 에너지 증가 및 기생 성분에 의해 도통 시 발생하는 과도 전류가 크게 발생하며, 이러한 스트레스로 인하여 2차적인 소손이 발생할 우려가 있다. 반면 FET D의 경우 취약한 역회복 특성으로 인하여 Leg Fault가 발생하였으며, 그림 4(d)는 입력전류의 제한을 통하여 소손 직전의 전압/전류 양상을 확인한 파형이다. 큰 역회복 전류로 인하여 기생 BJT가 턴 온 되고, 그로 인하여 차단되지 못한 큰 전류가 급격히 흐른다. 결국 이러한 이유로 인하여 Leg Fault로 인한 소손이 발생함을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 MOSFET로 구성된 양방향 풀 브리지 컨버터에서 바디 다이오드 특성이 미치는 영향과 이로 인하여 발생하는 Leg Fault를 분석하였다. 이를 토대로 파라미터에 기반을 둔 특성 분석 및 비교 시험을 통하여 양방향 절연형 컨버터의 안정적인 동작을 위하여 MOSFET 선정 시 고려해야 할 바디 다이오드의 특성에 대하여 비교하였다. 제시한 과정 및 다양한 비교를 통하여 양방향 풀 브리지 컨버터의 안정적인 동작을 위한 구체적인 파라미터 범위 제시가 가능하다.

Acknowledgment

본 연구는 지식경제부의 재원으로 수행된 산업원천기술 개발사업 (No. 10039318 2012 12)의 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] G. Ma, W. Qu, G. Yu, Y. Liu, N. Liang, and W. Li, "A zero voltage switching bidirectional dc dc converter with state analysis and soft switching oriented design consideration", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 6, pp. 2174-2184, Jun. 2009.
- [2] L. V. Karadzinov and D. C. Hamill, "Analysis of the influence of diode reverse recovery on the operation and design of high frequency rectifiers", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, no. 2, pp. 386-398, Mar. 2000.
- [3] S. Huang, G. A. J. Amaratunga, and F. Udrea, "Analysis of SEB and SEGR in super junction MOSFETs", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 47, no. 6, pp. 2640-2647, Dec. 2000.