

MVDC 반도체변압기의 다이오드 클램핑 과부하 보호기법의 고장제거 시간 성능 조사

곽지호, 박기범, 장인권
한국과학기술원 조천식모빌리티대학원

Fault Clearing Time Performance Investigation in Diode Clamping Overcurrent Protection Method of MVDC Solid-State Transformer

Jiho Kwak, Ki-Bum Park, In-Gwun Jang
Cho Chun Shik Graduate School of Mobility, KAIST

ABSTRACT

본 논문에서는 반도체 변압기(Solid-State Transformer, SST) 과부하 보호기법으로 사용될 수 있는 다이오드 클램핑 기법을 적용하여 고장제거시간의 변화를 조사하였다.

1. 서론

최근 탄소배출 문제에 대한 국제적 대응으로 인해 DC 전압을 사용하는 태양광발전을 포함한 신재생에너지원, 에너지 저장장치(Energy Storage System, ESS) 및 전기차의 수가 크게 증가하고 있다. 이는 분산전원이라는 지역발전 중심의 마이크로그리드(Microgrid)라는 개념을 가져왔다. 더불어 빅데이터와 인공지능의 등장으로 인해 데이터 센터와 고성능 컴퓨팅센터의 수도 증가해 이런 DC기기들과 함께 DC 전력망의 확장도 빨라지고 있다. 이러한 DC 전력망은 그림1과 같이 표현될 수 있는데, MVDC(Medium Voltage DC)가 그 핵심을 차지하는 것을 볼 수 있다. 이 MVDC에서 MVDC 반도체 변압기를 통해 최종 수요단인 LVDC(Low Voltage DC)로 전해지는 것을 볼 수 있다. 따라서, DC 전력망에서의 MVDC 반도체 변압기는 핵심적인 역할을 한다.

MVDC 반도체 변압기는 전력전자 기술을 적용해 통상적인 상용 AC 50Hz ~ 60Hz의 주파수보다 월등히 높은 kHz단위에서 변압해 변압기의 크기를 획기적으로 줄일 수 있다. 그림2a는 변압 주파수와 변압기의 크기에 대한 예시이다. 하지만, 고주파로 반도체 소자를 동작하게 되면 그림2b의 예시와 같이 반도체 소자의 스위칭 손실로 인해 큰 발열이 야기될 수 있다. 이런 이유로, 반도체 변압기는 공진 컨버터 구조를 자주 사용한다. 공진 컨버터는 Zero Voltage Switching (ZVS) 동작을 함으로서 스위칭 손실을 줄이며 낮은 발열특성을 갖는다. 그 중, 추가적인 인덕터 없이 변압기의 누설 인덕턴스와 자화 인덕턴스를 사용해 공진하는 LLC 컨버터 구조는 반도체 변압기의 장점인 작은 크기를 더욱 부각시킨다. LLC 컨버터 기반의 반도체 변압기는 그림3과 같이 나타낼 수 있다. 그림3과 같이 반도체 변압기는 모듈로 이루어져 있으며, 이 모듈은 입력을 직렬로 연결해 높은 MVDC를 견디고 출력은 병렬로 연결해 LVDC에 고전류를 흘려준다. 그림3에서는 Full-Bridge 인버터와 정류기를 예시로 사용하지만 Half-Bridge 구조를 사용해도 무방하다.

변압기는 전력계통에 사용되기 때문에 짧은 시간의 고장도 큰 경제적 손실을 야기할 수 있다. 반도체 변압기는 늘어나는 DC부하들에 대비해 과부하 고장에

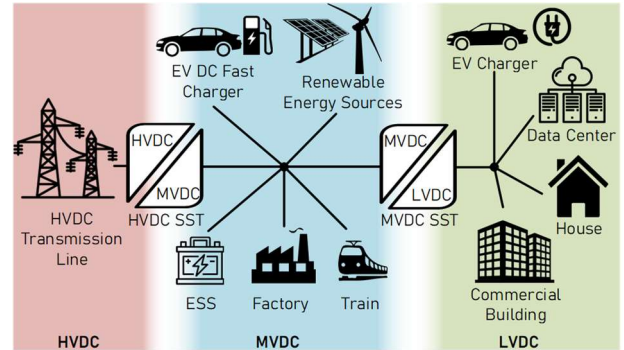


그림 1 DC 전력망의 예시

Fig.1 Example of DC power grid

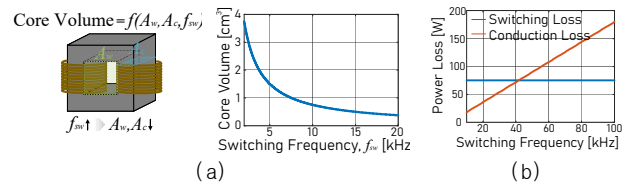


그림2 주파수별 (a) 변압기 크기, (b) 스위칭 손실

Fig.2 (a)Transformer size, (b) switching loss by frequency

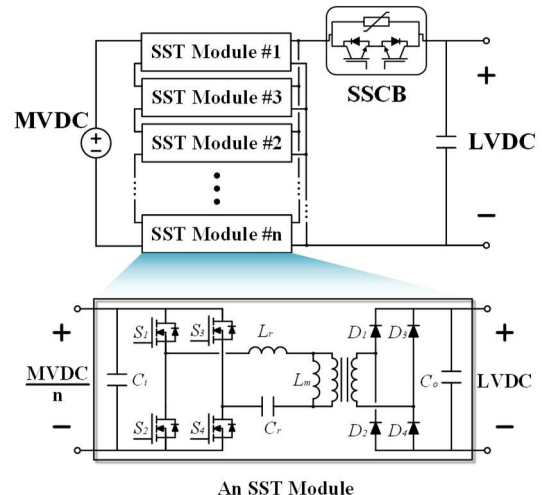


그림3 LLC 컨버터 기반 반도체 변압기

Fig.3 LLC converter based solid-state transformer

더욱 신경해야 한다. 고주파로 변압하는 반도체 변압기는 과부하시 기존 저주파 AC 전력망에 사용되는 기계적 차단기보다 더 빠른 속도의 차단기가 필요하다. 이를 해결하기 위해 반도체 소자를 사용해 빠른 속도로

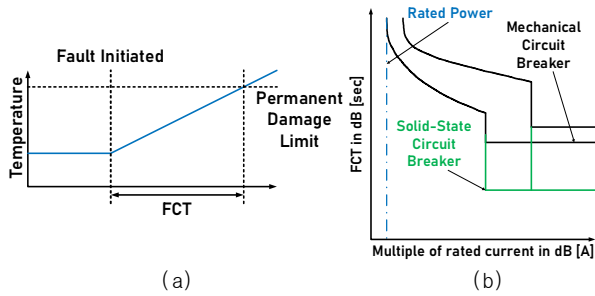


그림4 고장제거시간의 (a)에서, (b)차이^[2]
Fig. 4 Fault Clearing Time (a)example, (b)difference^[2]

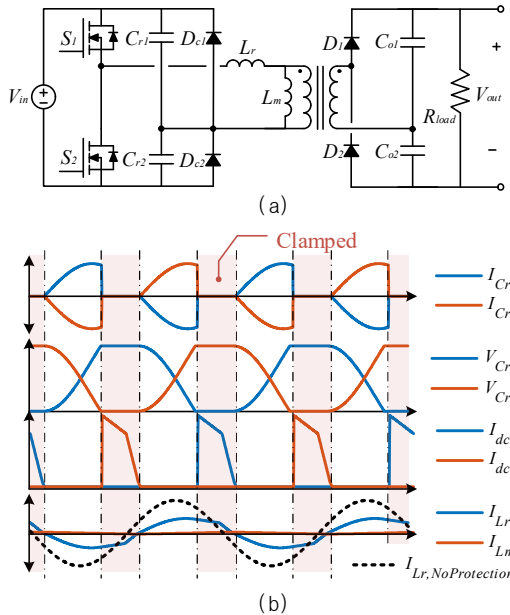


그림5 다이오드 클램핑 하프브릿지 인버터 반도체 변압기
(a)회로, (b)파형

Fig. 5 Diode clamping solid-state transformer with half-bridge inverter (a) topology, (b) waves

전류를 차단하는 반도체 차단기(Solid-State Circuit Breaker)가 사용되기도 한다^[1]. 반도체 차단기는 기존의 기계식 차단기보다 짧은 고장 제거 시간(Fault Clearing Time, FCT)에서도 작동할 수 있다. 고장 제거 시간이란 그림4a에서 보이는 것과 같이 고장이 진행되고 고장이 시스템에 손상을 가할 때 까지의 시간을 뜻한다. FCT는 차단기가 과부하를 인지하고 작동해 고장이 제거되어야 하는 중요한 시간지표이다. 하지만, 그림4b에서 보이는 바와 같이 과전류가 큰 구간에서는 반도체 차단기도 고장시간내에 작동하기 어렵다^[2].

이러한 문제를 해결하기 위해서 다이오드 클램핑 기법을 반도체 변압기에 적용시켜 FCT를 늘릴 수 있다. 다이오드 클램핑 기법은 공진 커패시터에 다이오드를 추가적으로 부착해 과부하시 공진 커패시터의 전압을 제한함으로써 반도체 변압기에 흐르는 전류를 제한할 수 있는 기법이다. 또한, 다른 차단기와 다르게 다이오드 클램핑 기법은 보호 기법이 회로 자체에 내장되어 있어 과부하 발생과 동시에 작동해 센서와 제어기 등의 시간에 제한되지 않는다. 본 논문에서는 다이오드 클램핑 기법을 활용해 LLC 컨버터 기반 반도체 변압기의 고장 제거 시간이 얼마나 증가되는지를

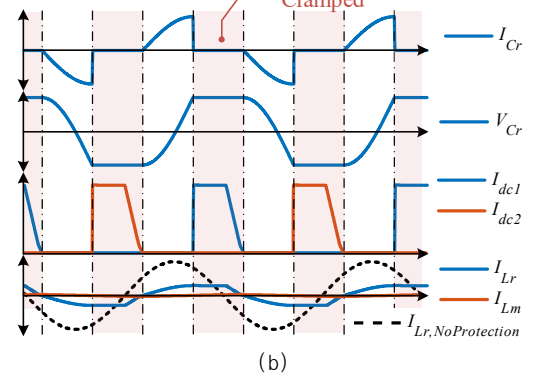
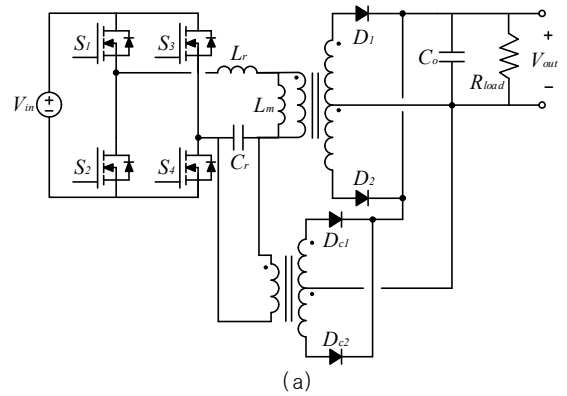


그림6 다이오드 클램핑 풀브릿지 인버터 반도체 변압기
(a)회로, (b)파형

Fig. 6 Diode clamping solid-state transformer with full-bridge inverter (a) topology, (b) waves

시뮬레이션을 통해 조사하였다. 고장 제거 시간의 기준은 반도체 변압기에 사용되는 IGBT의 접합온도(Junction Temperature)로 설정하였다. 이는 반도체 스위치 소자가 과부하시 온도에 제일 민감한 부품임과 동시에 반도체 변압기에서 비싼 부품 중 하나이기 때문이다. 시뮬레이션은 반도체 변압기의 한 개의 모듈을 가정해 진행하였다.

본 논문의 시뮬레이션에서 사용될 반도체 변압기 모듈의 회로와 과부하시 동작파형은 그림5와 그림6에 나타나 있다. 그림5에서는 C_{r1} 과 C_{r2} 로 나뉘어진 공진 커패시터에 클램핑 다이오드 D_{c1} 과 D_{c2} 가 부착된 Half-Bridge LLC 컨버터 구조를 하고 있다^[3]. 그림6에서는 변압기를 추가해 D_{c1} 과 D_{c2} 와 함께 Full-Bridge LLC 컨버터의 다이오드 클램핑을 하는 구조이다^[4].

2. 시뮬레이션

표1 시뮬레이션 파라미터

Table 1. Simulation Parameters

Full-Bridge, L_r	35.18 μ H	Rated Power	25kW
Full-Bridge, L_m	351.81 μ H	Input Voltage	400V
Half-Bridge, L_r	35.18 μ H	Output Voltage	400V
Half-Bridge, L_m	351.81 μ H	Switching frequency	20kHz
Full-Bridge, C_r	1.80 μ F	Resonant frequency	20kHz
Half-Bridge, C_{r1} & C_{r2}	0.90 μ F	$C_{D1}, C_{D2}, C_{D3}, C_{D4}$	3.3mF
Diode		Vishay EBU15006-F4	
Full-Bridge, IGBT		Mitsubishi CM100DY-13T	
Half-Bridge, IGBT		Infineon FF200R06KE3	
Full-Bridge, IGBT Junction Temperature at rated power, T_j		124.0°C	
Half-Bridge, IGBT Junction Temperature at rated power, T_j		131.6°C	
Set IGBT Junction Temperature Limit		150°C	

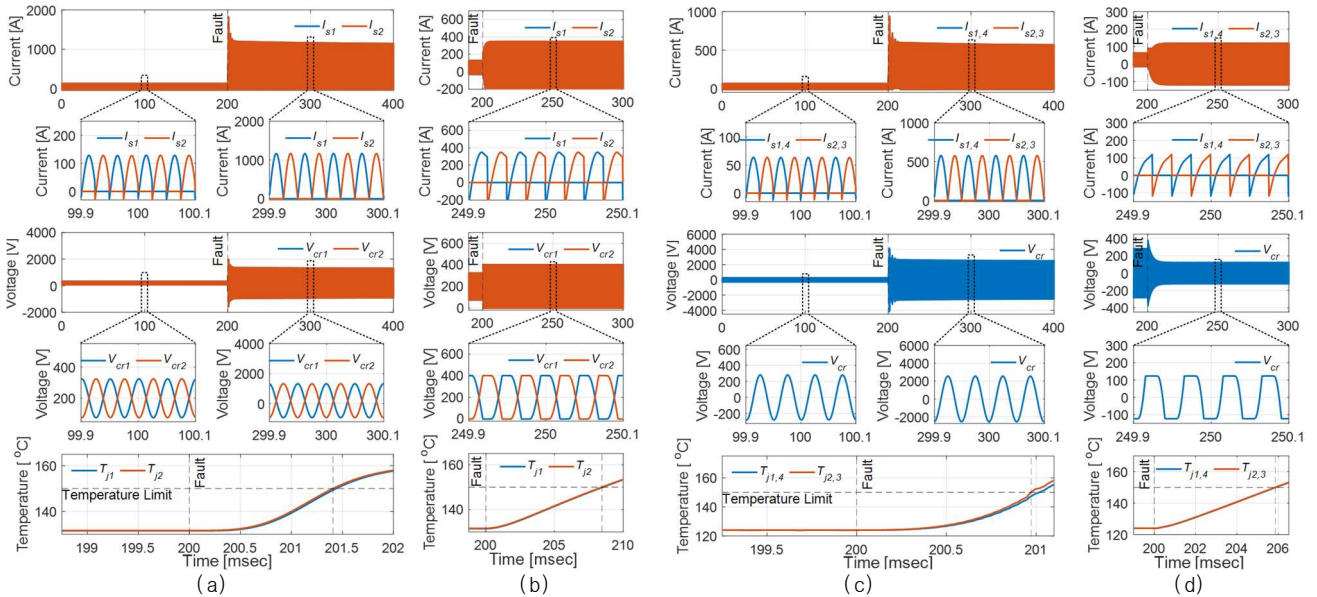


그림7 정격용량 10배의 전류가 흘렀을 때의 결과 (a)보호회로 없는 Half-Bridge, (b)다이오드 클램핑 Half-Bridge, (c)보호회로 없는 Full-Bridge, (d)다이오드 클램핑 Full-Bridge

Fig.7 Result when 10 times of rated power causes overcurrent (a) half-Bridge without protection, (b) half-Bridge with diode clamping, (c) full-Bridge without protection, (d) full-Bridge with diode clamping

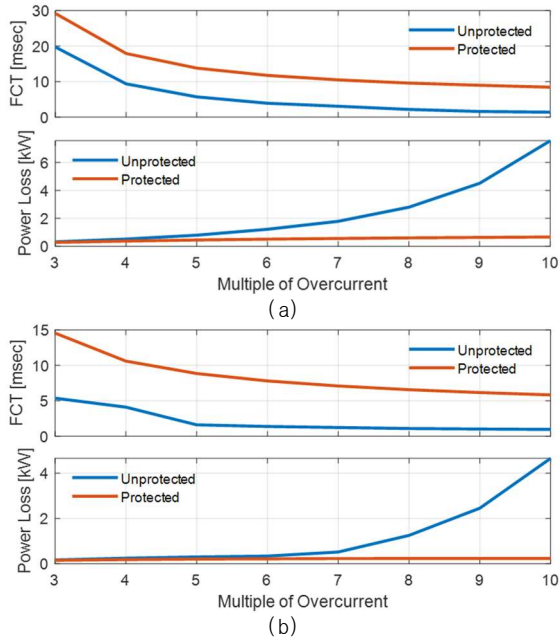


그림8 과부하 크기별 결과 (a) Half, (b) Full

Fig.8 Result by size of overcurrent (a) half and, (b) full Bridge

시뮬레이션에 사용되는 규격은 표1과 같다. 반도체 소자는 각 반도체 변압기에 맞는 전압, 전류를 고려해 선택했으며, 각 소자에는 적당한 냉각 시스템을 설계되어 시뮬레이션을 진행하였다. 공진 커패시터와 공진 인덕턴스값의 결정은 [4]와 [5]를 참고하였다.

그림7은 정격용량에 10배가 해당하는 과부하 고장이 일어났을 때의 결과를 보여준다. 그림7 (a)와 (c)에 보이는 것과 같이 다이오드 클램핑 보호가 없는 경우에는 스위치에 흐르는 전류 I_s 가 급격하게 늘며 반도체의 접합온도 T_j 가 빠르게 늘며 짧은 FCT를 남기는 것을 볼 수 있다. 이때, 커패시터의 전압 V_{cr} 은

그대로 상승하며 아무런 조절을 받지 못하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 그림7 (b)와 (d)의 다이오드 클램핑 보호회로가 있는 결과를 보게되면 커패시터 전압 V_{cr} 이 클램핑 다이오드에 의해 제한되고 반도체에 흐르는 전류 I_s 가 제한되는 모습을 볼 수 있다. 따라서, 반도체 접합온도 T_j 가 비교적 느리게 상승하는 모습을 확인할 수 있다.

그림8은 과부하의 크기에 따른 FCT와 반도체의 손실을 보여준다. 그림8에서 보이는 것과 같이 다이오드 클램핑은 스위칭 소자의 손실을 제한함으로써 FCT가 크게 늘어나는 모습을 보여준다.

3. 결 론

본 논문에서는 반도체 변압기에 다이오드 클램핑 과부하 보호회로를 삽입하였을 때 고장제거시간이 얼마나 증가하였는지를 조사해보았다. 다이오드 클램핑 과부하 보호기법은 센서없이 반도체 변압기내에서 과부하에 빠르게 반응해 고장제거시간을 늘려주었다. 이러한, 다이오드 클램핑 기법은 다가올 DC 전력망에서 과부하 방지에 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] R. Rodrigues, Y. Du, A. Antoniazzi and P. Cairoli, "A Review of Solid-State Circuit Breakers," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 1, pp. 364-377, Jan. 2021
- [2] R. Rodrigues, T. Jiang, Y. Du, P. Cairoli and H. Zheng, "Solid state circuit breakers for shipboard distribution systems," 2017 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), Arlington, VA, USA, 2017, pp. 406-413
- [3] B. Yang, F. C. Lee and M. Concannon, "Over current protection methods for LLC resonant converter," Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. APEC '03, Miami Beach, FL, USA, 2003, pp. 605-609 vol.2
- [4] X. Xie, J. Zhang, C. Zhao, Z. Zhao and Z. Qian, "Analysis and Optimization of LLC Resonant Converter With a Novel Over-Current Protection Circuit," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 2, pp. 435-443, March 2007
- [5] C. Zhao, X. Xie, X. Wu, J. Zhang and Z. Qian, "The Design Consideration Comparisons of Two Clamping Modes Over Current Protection for LLC Converter," INTELEC 06 - Twenty-Eighth International Telecommunications Energy Conference, Providence, RI, USA, 2006, pp. 1-5