

제어 신뢰성 향상을 위한 Z-Source 양방향 DC 반도체 차단기 최적화 설계

김유진*, 정종윤*, 송성근*, 박성준†
한국전자기술연구원*, 전남대학교†

Design Optimization of Z-Source Bidirectional DC Circuit Breaker for Control Reliability Improvement

Yu-Jin Kim*, Jong-Yun Jeong*, Sung-Geun Song*, and Sung-Jun Park†
Korea Electronics Technology Institute*, and Chonnam National University†

ABSTRACT

본 논문에서는 고속 고장 전류 차단이 가능한 Z-Source 양방향 DC 차단기를 단순화하는 구조의 토폴로지를 새롭게 제안하였다. 기존 차단기의 구조는 다수의 사이리스터(SCR)를 사용하고 있어 유지보수가 어렵고, 전류 방향에 따라 SCR을 별도의 제어가 필요하다는 단점이 존재한다. 따라서 기존 DC 차단기의 개선방안으로 단일 SCR을 사용하여 회로를 단순화하고, 전류의 방향과 관계없이 동작이 가능한 양방향 차단기를 제안하였다. 또한, PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통해 제안하는 차단기의 설계 방법과 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

최근 AC 계통과 비교하여 전력 손실이 적은 DC 계통에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 재생에너지, ESS 및 전기차 충전기 등의 보급 확대에 의해 DC 배전망용 고속 고장 전류 차단을 위해 전력반도체를 이용한 고속 양방향 반도체 차단기에 대한 중요도가 증가하고 있다.

DC 계통에서 사용되고 있는 차단 방식은 크게 기계식 차단기, 반도체 차단기, 기계식과 반도체 방식을 합친 차단기 등 다양하다. 이 가운데 SCR을 적용한 Z-Source 구조의 차단기는 양방향 제어가 가능하고 높은 안정성과 신뢰성, 그리고 고효율 등의 장점으로 널리 쓰이고 있다. 하지만 기존의 Z-Source 구조를 가지는 양방향 반도체 차단기의 경우 여러 가지 원인에 의한 오동작이 발생하여 신뢰성이 떨어진다는 문제가 있다^{[1][2]}.

본 논문에서는 기존의 차단기의 문제점에 대해 분석하였고, SCR의 구동 스위칭 간소화를 통해 최적화된 DC 반도체 차단기 회로를 제안하였다. 최종적으로 시뮬레이션을 통해 제안한 회로의 타당성을 검증하였다.

2. 기존 Z-Source 양방향 차단기의 문제점

기존의 Z-Source 방식의 DC 배전용 양방향 반도체 차단기의 구조는 정상 동작 시 부하 전류의 방향에 따라 그림 1과 같이 정방향, 역방향의 전류 경로를 따른다. 정방향 부하 전류 I_a 의 경로는 직류전원 V_{dc} 의 정극성 단자, SCR₁, 커플드 인덕터의 L_{11} , L_{12} 그리고 D_1 을 통해 부하단 R_L 로 형성된다. 역방향 부하 전류 I_b 는 R_L 의 정극성 단자, SCR₂, 커플드 인덕터의 L_{11} , L_{12} , 그리고 D_2 를 통해 V_{dc} 의 정극성 단자로 경로가 형성된다.

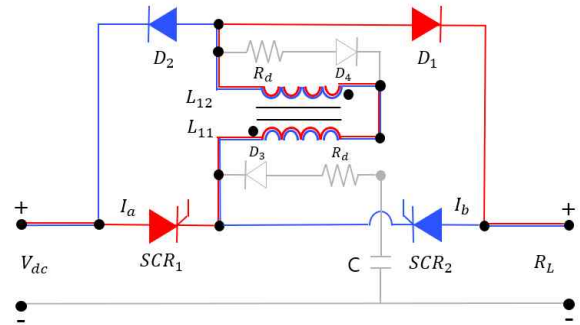
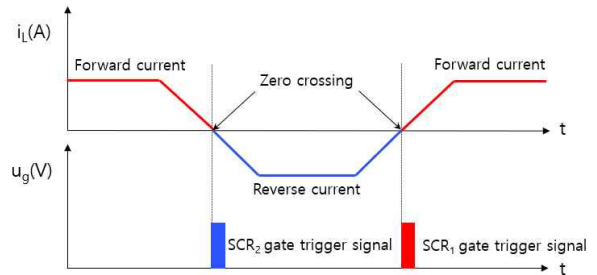
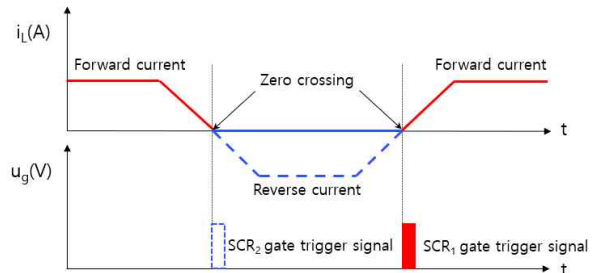


그림 1 기존 DC 차단기 회로 및 전류 경로
Fig. 1 Existing DC Circuit Breaker Circuit and Current Path



(a) 정상 작동 시



(b) 오작동 시

그림 2 정상 작동 및 오작동 비교 파형
Fig. 2 Normal Operation and Malfunction Comparison Waveform

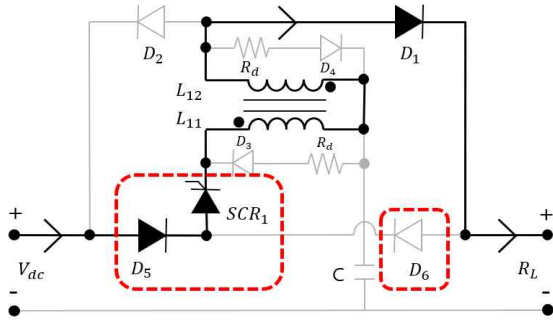


그림 3 제안하는 DC 차단기의 정방향 전류 경로
Fig. 3 Proposed DC Circuit Breaker Forward Current Path

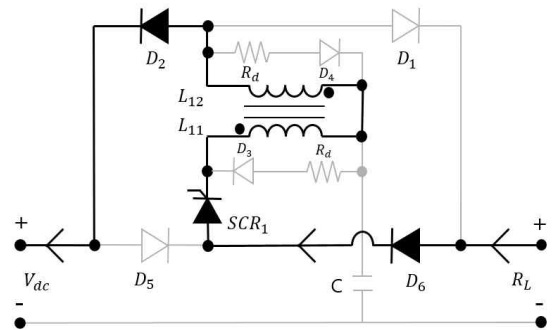


그림 4 제안하는 DC 차단기의 역방향 전류 경로
Fig. 4 Proposed DC Circuit Breaker Reverse Current Path

그림 1과 같은 양방향 차단기의 경우, 전류의 방향 전환에 따라 다수의 스위칭 소자를 사용되기에 부하 전류의 Zero crossing 지점에서의 정확한 스위칭 동작이 매우 중요하다.

그림 2는 기존 Z-Source 기반 차단기의 정상 작동과 오작동 시의 구동 타이밍을 비교하여 도식화한 것이다. 그림 2 (a)에서 전류가 정방향으로 흐르는 경우 SCR₁을 구동하고 역방향으로 전류가 흐르는 경우 SCR₂를 전류 '0'점에서 스위칭해줌으로써 정상 구동된다. 반면 그림 2 (b)에서는 전류 '0'점에서 발생할 수 있는 SCR의 동작 오류에 의해 역방향 전류가 형성되지 못하는 오작동 현상이 확인되었다.

이처럼 기존의 차단기의 경우 전류 방향에 따라 SCR을 구동시켜주어야 하므로 고가의 SCR이 다수 사용되고, 부하 전류 방향에 따라 Zero crossing 지점에서 별도의 스위칭 동작이 정확히 구현되는 데에 어려움이 있다.

3. Z-Source 양방향 차단기의 최적화 회로 설계

기존 차단기 제어의 신뢰성 향상을 위하여 본 논문에서는 최적화된 Z-Source 양방향 DC 반도체 차단기를 그림 3, 4와 같이 제안하였다. 제안하는 차단기는 기존 차단기의 회로에서 1개의 SCR을 제거하고 하나의 SCR 양단에 각각 D₅와 D₆을 추가하였다. 정방향 전류는 그림 3과 같이 D₁과 D₅, SCR₁을 통해 전력이 공급되며 역방향 전류의 경우 그림 4와 같이 D₂와 D₆, SCR₁을 통해서 전력이 공급되어 추가 회로 없이 양방향 제어를 가능하도록 하였다.

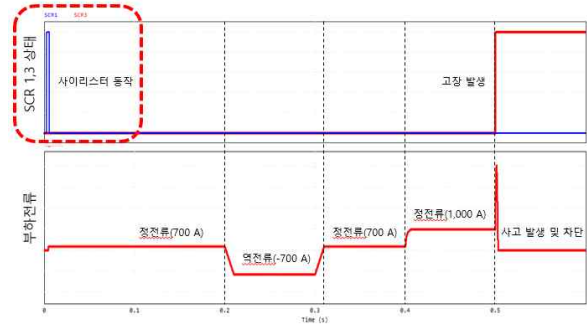


그림 5 시뮬레이션 결과 파형
Fig. 5 Simulation Result Waveform

그림 5는 제안하는 Z-Source 양방향 DC 반도체 차단기 회로의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 5에서 사이리스터 게이팅 파형을 보면 한 번의 SCR 초기 구동만으로 정방향에서 역방향, 역방향에서 정방향으로의 전류 방향 전환 시에도 별도의 게이팅이 필요치 않아 SCR의 동작 오류에 따른 차단기의 오작동이 발생하지 않아 차단기를 상시 감시하고 있어야 하는 문제점을 해소할 수 있었다. 또한, 회로 차단 조건 이상의 사고 전류 발생 시 차단기가 정상적으로 동작하여 사고전류를 차단하는 것을 확인하였다.

4. 결 론

기존의 Z-Source 구조를 가지는 양방향 DC 반도체 차단기는 전류 방향에 따라 사이리스터를 각각 구동시켜주어야 하는 번거로움의 단점을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 회로의 간소화와 신뢰성 향상을 위해 2개의 사이리스터를 1개로 줄이고 다이오드 2개를 추가한 회로를 제안하였으며, 시뮬레이션을 통해 제안하는 차단기의 성능을 검증하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20225500000120)

참 고 문 헌

- [1] Vibha Surwade, Swati Savaliya, B. B. Pimple, "A Modified Z-Source DC Circuit Breaker for Power Electronic Converter Load Application", IEEE International Conference on Power Electronics, Drivers and Energy System (PEDES), 2020 IEEE
- [2] Yachao Yang, Chun Huang, Zhunxing Zhao, Qianming Xu, Member, IEEE, and Yaquin Jiang, "A New Bidirectional DC Circuit Breaker With Fault Decision-Making Capability for DC Microgrid", IEEE JOURNAL OF EMERGING AND SELECTED TOPICS IN POWER ELECTRONICS, VOL. 9. NO. 3, pp. 2476-2488, JUNE 2021