



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사학위심사논문

직류배전시스템의 단락사고 보호를 위한
컨버터 회로 및 제어기 설계

Topology and Control Design of Converters for Short-circuit Fault Protection in DC Distribution System

2013 년 2 월

서울대학교 대학원

전기 컴퓨터 공학부

최 우 인

↑
2 cm
↓

직
류
배
전
시
스
템
의

단
락
사
고

보
호
를

위
한

컨
버
터

회
로

및

제
어
기

설
계

공학석사학위심사논문

직류배전시스템의 단락사고 보호를 위한
컨버터 회로 및 제어기 설계

Topology and Control Design of Converters for Short-circuit Fault Protection in DC Distribution System

2013 년 2 월

서울대학교 대학원

전기 컴퓨터 공학부

최 우 인

직류배전시스템의 단락사고 보호를 위한 컨버터 회로 및 제어기 설계

Topology and Control Design of Converters for Short-circuit Fault Protection in DC Distribution System

지도교수 조 보 형

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2013 년 2 월

서울대학교 대학원

전기 컴퓨터 공학부

최 우 인

최우인의 공학석사 학위논문을 인준함

2013 년 2 월

위 원 장 : 정 현 교
부위원장 : 조 보 형
위 원 : 윤 용 태

초록

직류배전시스템의 단락사고 보호를 위한 컨버터 회로 및 제어기 설계

전력전자기술의 발전에 의해 직류배전시스템의 실효성 및 타당성에 대한 연구가 이루어지고 있다. 직류배전시스템은 교류시스템에 비해 전력 변환 단계가 줄어들고 전력 품질이 개선된다는 장점이 있다. 직류 배전에 관한 관심에도 불구하고 직류 배전의 보호 시스템에 관한 연구의 미흡함에 의해서 실제적인 적용이 지연되고 있다.

직류 배전의 보호 시스템에서 시스템의 빌딩 블록인 전력전자기술이 능동적으로 이용되고 있다. 교류 시스템과 달리 직류 배전 시스템은 대부분의 전력원이 PE (Power electronics) 인터페이스에 의해서 시스템에 연결된다. PE 인터페이스 역할을 하는 전력 컨버터는 적절한 제어 설계를 통해서 단락 사고 상황에서 출력 전류를 제한함으로써 보호 시스템에 적극적으로 협조하고, 컨버터는 보호 시스템과 협조하여 시스템의 사고 상황의 감지, 고립, 차단을 수행하여 차단기의 기능을 대체할 수 있다. 이러한 협조 방식을 통해서 보호 시스템의 속도와 안정성을 확보할 수 있다.

본 논문에서는 직류배전시스템에서 발생하는 단락사고에 대한 보호를 위하여 전력전자 요소를 이용하는 방법에 대하여 제안한다. AC-DC

컨버터와 DC-DC 컨버터의 토폴로지 별 단락 사고 특성 및 보호 기능을 비교하였다. 보호 기능의 적합성을 기준으로 AC-DC 컨버터로서는 VSC+벽 컨버터, DC-DC 컨버터로서는 브리지형 컨버터를 선정하였다. 직류 측에서 발생할 수 있는 단락사고에 대해서 사고 전류를 제한하는 제어 방식을 설계하였다. 컨버터 제어기 설계를 통해 정상 동작 모드와 단락사고 시 전류제한 모드 때의 의도한 제어 성능을 획득하였다. 제안한 방법은 모의 실험과 실험을 통해서 검증하였다.

주요어 : 직류배전시스템, 단락사고, 보호시스템, 컨버터 제어

학 번 : 2011-20942

목차

초록	i
목차	iii
그림 목차	v
표 목차	viii
제 1 장 서론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 연구의 목적	3
1.3 논문의 구성	4
제 2 장 직류 단락사고에 대한 컨버터 회로	5
2.1 전력전자 요소의 단락사고 보호 기능	5
2.2 AC-DC 컨버터의 회로 비교	6
2.2.1 VSC와 기존 ACCB	10
2.2.2 역병렬 스위치 VSC	13
2.2.3 VSC+벽 컨버터	17
2.2.4 비교 정리	21
2.3 DC-DC 컨버터의 회로 비교	21
2.3.1 컨버터 회로 비교	22
2.3.2 DC-DC 컨버터의 단락 전류 특성	25

제 3 장 단락보호를 위한 컨버터 제어기 설계	2 9
3.1 단락보호를 위한 컨버터 제어	2 9
3.2 DC-DC 컨버터 제어기 설계	3 0
3.2.1 기본 제어기 설계	3 1
3.2.2 전류제한 COT 제어	3 6
3.2.3 보호 설정 설계	3 9
3.3 AC-DC 컨버터 제어기 설계	4 1
3.3.1 기본 제어기 설계	4 2
3.3.2 피드포워드 제어	4 3
제 4 장 모의 실험 및 실험 결과	4 5
4.1 컨버터 동작 모의 실험	4 5
4.1.1 DC-DC 컨버터 동작 모의 실험	4 5
4.1.2 AC-DC 컨버터 동작 모의 실험	4 8
4.2 직류배전 단락사고 모의 실험	5 1
4.2.1 버스 단락사고 모의 실험	5 2
4.2.2 지선 단락사고 모의 실험	5 3
4.3 DC-DC 컨버터 단락사고 실험 결과	5 6
제 5 장 결론 및 향후 연구	6 1
참고문헌	6 3
ABSTRACT	6 7
감사의 글	6 9

그림 목차

그림 2.1	단상 전압형컨버터(VSC)의 회로도.....	7
그림 2.2	직류 측 단락 사고에 대한 VSC의 등가회로.....	8
그림 2.3	AC-DC 정류기의 환류로를 통한 단락 전류의 계산 및 모의 실험 결과.....	8
그림 2.4	VSC와 ACCB의 회로도.....	1 0
그림 2.5	VSC+ACCB의 모의 실험 결과: (a) I_{ac} ; (b) V_{dc}	1 2
그림 2.6	역병렬 스위치를 이용한 스위치 셀.....	1 3
그림 2.7	역병렬 스위치를 이용한 VSC의 회로도.....	1 4
그림 2.8	역병렬 스위치를 이용한 VSC의 모의 실험 결과: (a) I_{ac} ; (b) V_{dc}	1 6
그림 2.9	VSC+벽 컨버터의 회로도.....	1 7
그림 2.10	VSC+벽 컨버터의 직류 측 단락 사고 파형: (a) I_{ac} ; (b) I_{dc} ; (c) V_{link} ; (d) V_{dc}	1 8
그림 2.11	VSC+벽 컨버터의 단락 사고 확대 파형: (a) I_{dc} ; (b) V_{link} ; (c) V_{dc}	1 9
그림 2.12	DC-DC 컨버터의 단락 사고 제어.....	2 2
그림 2.13	DC-DC 컨버터 회로도: (a) 부스트; (b) 벽-부스트; (c) 하프브리지 컨버터.....	2 5
그림 2.14	부스트 컨버터의 단락사고 등가 회로.....	2 6
그림 2.15	부스트 컨버터의 단락 전류의 예.....	2 6
그림 2.16	전압 제어된 하프브리지 컨버터의 단락사고 파형: (a)	

출력전류; (b) 출력전압.....	2 8
그림 3.1 전류제어 DC-DC 컨버터의 소신호 블록도.....	3 2
그림 3.2 부하에 따른 전달함수 G_{id} : (a)벽-컨버터; (b)부스트-컨버터. 3 4	
그림 3.3 전류 루프 이득: (a)벽-컨버터; (b)부스트-컨버터.....	3 5
그림 3.4 DC-DC 컨버터 제어기 블록도.....	3 6
그림 3.5 벽 컨버터의 동작구간 별 등가회로.....	3 7
그림 3.6 인덕터 전류의 시뮬레이션 파형: (a) 사고 시; (b) 부하 증가 시.....	4 0
그림 3.7 VSC+벽 컨버터 회로 구조.....	4 1
그림 3.8 AC-DC 컨버터 전체 제어기 블록도.....	4 2
그림 4.1 모의 실험된 DC-DC 컨버터의 회로도.....	4 5
그림 4.2 DC-DC 컨버터의 단락사고 모의 실험 결과: (a) 출력전압 v_{dc} ; (b) 출력전류 i_{dc}	4 6
그림 4.3 COT 제어와 PWM 제어의 전류제한 제어 비교 결과: (a) 출력전류 i_{dc} ; (b) 주 스위치 구동 신호.....	4 7
그림 4.4 모의 실험된 AC-DC 컨버터의 회로도.....	4 8
그림 4.5 AC-DC 컨버터의 단락사고 모의 실험 결과 (a) 출력전류 i_{dc} ; (b) 교류 입력전류 i_{ac} ; (c) 링크 전압 V_{link}	4 9
그림 4.6 피드포워드를 적용한 VSC의 시뮬레이션 파형: (a) VSC 입력전류; (b) 링크 전압 (파란색과 초록색 파형은 각각 피드포워드를 적용하지 않았을 때, 적용했을 때의 파형).....	5 0
그림 4.7 직류배전 단락사고 모의 실험 개요.....	5 1
그림 4.8 버스 단락사고 모의 실험 결과: (a) 버스 전압 v_{dc1} ; (b) DC-DC 컨버터1의 출력전류 i_{dc1} ; (c) AC-DC 컨버터의 출력전	

류 i_{ac} ; (d) 지선 전압 v_{dc2} ; (e) 부하2의 전류 i_{load2}	5 4
그림 4.9 버스 단락사고 모의 실험 결과: (a) 버스 전압 v_{dc1} ; (b) AC-DC 컨버터의 출력전류 i_{ac} ; (c) DC-DC 컨버터1의 출력전류 i_{dc1} ; (d) 지선 전압 v_{dc2} ; (e) DC-DC 컨버터2의 출력전류 i_{dc2}	5 5
그림 4.10 실험용 DC-DC 컨버터의 회로도	5 7
그림 4.11 DC-DC 컨버터 단락사고 결과: (a) 실험 결과 (b) 모의 실험 결과	5 8
그림 4.12 단락사고 실험의 듀티 확대 파형: (a) 정상 동작 모드 (b) 전류제한 모드	5 9

표 목차

표 2.1	비교 VSC의 설계 제원	9
표 2.2	AC-DC 컨버터의 토폴로지 비교.....	2 1
표 2.3	부스트, 벡-부스트, 브리지형 컨버터의 특성 비교.....	2 4
표 3.1	부하에 따른 루프 이득 위상 마진	3 3
표 4.1	정상 동작 모드에서의 컨버터와 부하 제원.....	5 2
표 4.2	실험용 DC-DC 컨버터 제원	5 6

제 1 장 서론

1.1 연구의 배경

전력전자기술의 발전으로 인해 직류 배전 시스템은 기존의 교류 배전 시스템을 대체할 수 있는 시스템으로 재각광받고 있다. 직류 배전을 통해서 새로운 자원과 부하 환경에서 경제성 측면에서 시스템 효율이 증진되며 [1], [2], 신뢰성과 전력품질 측면에서 계통 교란이 줄어들고 시스템이 보다 안정적으로 동작한다는 것이 연구되었다 [3-5]. 태양광, 연료전지, 풍력 등의 신재생 에너지원(Renewable Energy Sources, RES)들은 호환성 및 연결성 측면에서도 직류 배전에 더 적합하다. 그 외의 다양한 연구들을 통해서 직류 배전의 실현 가능성이 연구되었다.

한편 직류 배전에 관한 관심에도 불구하고 직류 배전의 보호 시스템에 관한 연구의 미흡함에 의해서 실제적인 적용이 지연되고 있다. 보호 시스템은 전력 시스템의 기획과 운용이 있어서 가장 중요한 요소 중 하나이다 [6]. 직류 배전의 보호 시스템에 대한 연구의 방향으로서 직류 배전의 차단 장치에 관한 연구가 이루어지고 있지만 교류 시스템 차단기 기술의 성숙도와 달리 직류 배전의 차단 장치 기술은 아직 상용화 단계까지는 이르지 못했다 [7]. 더불어 직류 배전의 주된 응용 사례 중 하나인 마이크로그리드에서는 전력원의 분산성으로 인해서 시스템 보호가 더욱 어려워진 상황이다 [8].

이를 해결하기 위한 방법으로 ACCB (AC Circuit Breaker) 기반의 차단기와 솔리드 스테이트(solid-state) 기반의 차단기에 대한 연구가 있지만, 이 또한 실제적인 적용을 위해서는 앞으로 많은 시간이 필요할 것으로 보인다 [9], [10]. 또 지역적 제어의 상위 계층으로 시스템 레벨의 제어가 추가되어서 각 차단기와 전력전자요소를 조직화하여 운용하는 방법들이 제안되었다 [11-13]. 각 차단 장치 간 오버레이(overlay) 형식의 통신을 통해서 보호 시스템을 구성하는 방법들 또한 제안되었다 [14].

직류 배전의 보호 시스템에 관한 많은 문헌들은 시스템의 빌딩 블록인 전력전자기술(Power Electronics, PE)을 능동적으로 이용하고 있다 [13], [15-19]. 교류 시스템과 달리 직류 배전 시스템은 대부분의 전력원이 PE 인터페이스에 의해서 시스템에 연결된다. PE 는 크게 두 가지 방법을 통해서 직류 배전의 보호 시스템에 기여할 수 있다. 1) PE 인터페이스 역할을 하는 전력 컨버터는 적절한 제어 설계를 통해서 단락 사고 상황에서 출력 전류를 제한함으로써 보호 시스템에 적극적으로 협조할 수 있다 [13], [15], [16]. 출력 전류의 제한은 사고 상황에서의 시스템의 위험 요소를 근본적으로 감소시키며 차단기의 차단 정격 전류의 크기를 낮출 수 있다. 2) 컨버터는 보호 시스템과 협조하여 시스템의 사고 상황의 감지, 고립, 차단을 수행하여 차단기의 기능을 대체할 수 있다. 이러한 협조 방식을 통해서 보호 시스템의 속도와 안정성을 확보할 수 있다 [17-19]. 추가적으로, 통신 기술을 이용한다면 보호 시스템의 안정성과 속도를 더욱 증진시킬 수 있다.

1.2 연구의 목적

본 논문은 앞서 설명한 방법 중 PE 인터페이스를 활용하여 직류 배전의 보호 시스템의 안정성을 높이는 방법에 대해 연구한다. 우선 보호 시스템 설계의 올바른 설계를 위해서 직류 배전 시스템의 사고 시의 전기적 특성을 연구한다. 시스템 사고 특성은 보호 시스템의 전반적 설계와 차단기의 차단 용량 선정과 릴레이 선정에 중요한 변수이다. 컨버터는 토폴로지(topology)에 따라서 단락 사고에 대한 특성은 다르게 나타나며 이를 고려한 토폴로지 선정 및 단락 사고 전류 예측을 연구한다.

본 논문이 제안하는 보호 시스템에 활용되는 컨버터는 단락사고에 대해 전류 제한 제어를 수행해야 한다. 토폴로지 연구를 통해 AC-DC 컨버터로서 VSC+벽, DC-DC 컨버터로서 브리지형 컨버터를 선정하였고 이들 컨버터의 전달 함수를 기반으로 평소 시와 사고 시 모두의 경우에서 안정적인 동작을 할 수 있는 제어기의 설계를 제안한다. 또한 사고 과도 응답과 사고 정상 응답을 개선하기 위한 제어 방식을 설계한다.

마지막으로, 제안된 단락사고 보호를 위한 컨버터 제어기의 동작은 모의 실험과 실험을 통해서 검증한다. 모의 실험에서는 우선 개별 컨버터의 동작을 확인하여 기본 제어 및 사고 시 제어를 구현한다. 이를 기반으로 대상 직류배전시스템에 대해서 버스와 지선에서 발생하는 단락사고를 모의하여 결과를 알아본다. 단락사고에 대한 컨버터의 제어전략을 실험용 DC-DC 컨버터를 통해 검증한다.

1.3 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 1 장에서는 본 논문의 이론적 배경과 동기를 설명하고 본 논문이 얻고자 하는 목적을 분명히 한다. 제 2 장에서는 직류 배전 시스템의 사고 특성에 대한 분석을 위한 장이다. 직류 배전 시스템에 적용된 컨버터들이 각 토폴로지에 따라 보이는 사고 특성을 살펴보고 이를 기반으로 토폴로지 별 단락보호 특성을 비교한다. 제 3 장에서는 제 2 장에서 토폴로지 비교를 통해 선정한 컨버터에 대해서 본 논문이 제안하는 단락사고 보호를 위한 제어기 설계에 대해 설명한다. 제안한 방식의 시뮬레이션과 실험을 통한 검증은 제 4 장에 나타나 있다. 5 장에서는 내용을 요약 정리하고 추후 과제에 대한 언급과 함께 결론을 맺는다.

제 2 장 직류 단락사고에 대한 컨버터 회로

2.1 전력전자 요소의 단락사고 보호 기능

직류배전시스템은 대부분의 전력원이 컨버터를 통해서 연결된다. 에너지 저장 시스템(Energy Storage System, ESS)과 RES를 포함한 분산발전 시스템은 주로 DC-DC 컨버터를 통해서 연결되며, 계통 전력은 AC-DC 컨버터를 통해서 연결된다. 또한, 직류 380V를 부하가 사용 가능하기 위한 저전압으로 변환하는 역할 또한 DC-DC 컨버터가 수행한다. 직류배전시스템 내에 필수적으로 요구되는 컨버터를 이용하면 단락사고를 안전하게 처리할 수 있다. 전기적으로 분리된 컨버터는 단락사고를 완벽히 분리할 수 있다. 일반적인 컨버터의 스위칭 주파수는 수 kHz에서 수백kHz이기 때문에 단락사고에 대해 빠르게 대응할 수 있다. 또한 보통의 경우 단락사고에 대해서 높은 전류가 사고 지점으로 흐르는 것과 달리 컨버터 전류 제어기를 이용하여 단락사고 시에도 사고 전류를 제한하여 잠재적인 발열과 손실을 최소화할 수 있다.

한편, 직류배전시스템에서의 단락사고를 안전하게 보호하기 위해서는 단락사고에 대한 컨버터의 특성을 알아볼 필요가 있다. 직류배전의 단락사고 특성을 다루는 국제 표준 IEC 61660-1은 직류 보조 시스템에서의 단락 전류 특성을 분석 방법을 제안하지만 최신 전력전자 기술이 반영이 되어 있지 않다 [20]. 본 장에서는 다양한 AC-DC 컨버터와 DC-DC 컨버터

의 단락사고에 대한 특성을 비교하고 단락사고 보호를 위해 이용할 수 있는 컨버터를 선정한다.

2.2 AC-DC 컨버터의 회로 비교

직류 배전 시스템에서 사용되는 전력전자빌딩블록(Power electronics building block, PEBB) 중 가장 중요한 요소 중 하나는 계통과 직류 배전 시스템을 연결하는 계통 연결 AC-DC 컨버터이다. 계통연결 컨버터는 교류 형태의 계통 전력을 직류 형태로 변환하여 배전 시스템에 공급하는 역할을 한다. 보조 직류 시스템에 사용된 컨버터는 관습적으로 다이오드 브리지를 이용하였다. 타려식컨버터(Line-commutated converter, LCC)는 사이리스터(thyrisor)가 스위치 레그를 형성한다. 사이리스터는 정격이 높다는 장점이 있으나, 단방향 제어만 가능하며, 전류 프로그램 제어가 불가능하다는 단점이 있다.

차세대 직류 배전 시스템에서는 분산 발전의 도입 증가로 인하여 양방향 전력 제어가 가능해야 하며 계통의 전력 품질을 교란하지 않기 위해서 PFC(Power factor correction) 기능을 갖추어야 한다. 다음 그림 2.1은 가장 보편적으로 쓰이는 계통연결 컨버터 중 하나인 전압형컨버터(Voltag source converter, VSC)의 단상 회로도이다.

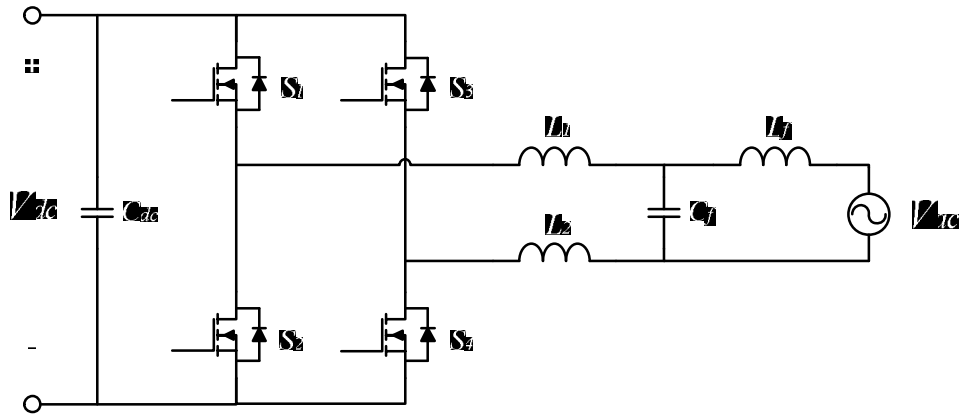


그림 2.1 단상 전압형컨버터(VSC)의 회로도.

그림 2.1에는 네 개의 게이트 제어식 스위치(S_{1-4})가 브리지를 이루며 LCL 필터(L_1, L_2, L_f, C_f)가 교류단에, 캐패시터(C_{dc})가 직류단에 연결되어 있는 형태를 띤다. PWM 방식의 제어를 통해서 인덕터 전류를 초평하여 양방향 전력 제어 및 PFC 기능이 가능하다.

한편, VSC는 직류 측 단락 사고가 발생했을 때 각 스위치의 역병렬 바디 다이오드(anti-parallel body diode)가 환류(freewheeling) 브리지를 형성한다. 그림 2.2는 직류 측 단락 사고에 따른 VSC의 등가회로이다. 그림의 빨간선은 단락전류가 유입될 수 있는 환류로를 의미한다. 단락 전류의 크기는 입력 필터와 직류 리액턴스에 의해서 제한되기는 하지만 보통의 경우 단락 전류는 정격 전류의 수~수십 배로 증가하기 때문에 추가적인 회로나 제어방식 없이 VSC를 단락사고로부터 보호하는 것은 불가능하다.

그림 2.3은 국제표준 IEC 61660-1에서 제안한 AC-DC 정류기의 단락 전류 계산과 모의 실험 결과를 비교한 그래프이다. 그림 2.3에서 볼 수 있는

것처럼 VSC는 직류 측 단락 사고에 대해서 취약하며, 이를 보호하기 위해서는 추가적인 회로가 구성되어야 한다. 이번 절에서는 직류 단락 사고에 대해 보호 기능을 수행할 수 있는 다양한 AC-DC 컨버터 토폴로지에 대한 비교를 하며 전력전자기술을 이용한 단락 사고 보호의 타당성을 검토한다.

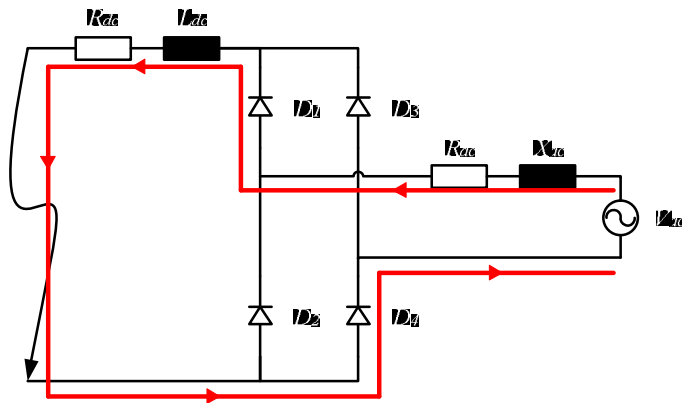


그림 2.2 직류 측 단락 사고에 대한 VSC의 등가회로.

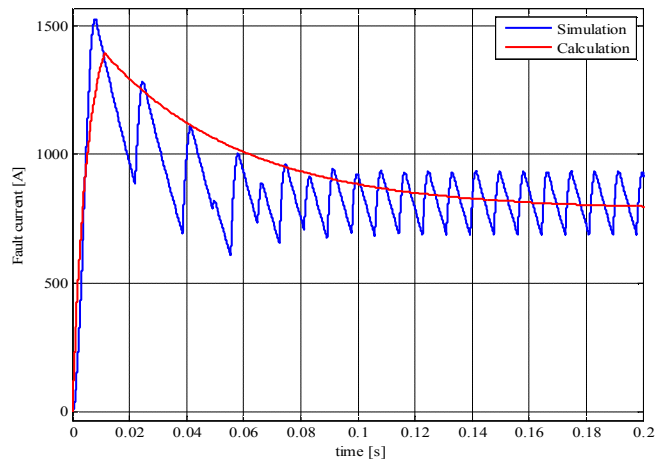


그림 2.3 AC-DC 정류기의 환류로를 통한 단락 전류의 계산 및 모의 실험 결과.

단락 사고에 대한 VSC 보호 기능을 하는 방법들을 비교한다. 동일한 비교를 위해서 기존의 VSC를 기반으로 하여 교류220V에서 직류380V 변환을 하는 컨버터 중 단락 사고에 대응 가능한 것으로 한정한다. 또한 본 논문에서는 연구 및 개발이 미흡한 직류차단기(DCCB)의 대안을 연구하는 것에 목적이 있기 때문에 직류차단기가 포함된 회로는 제외하도록 한다.

표 2.1 비교 VSC 의 설계 제원

항목	사양
최대 전력	10kW
출력 전압 리플	±5V
입력 전류	±10A

표 2.1은 비교를 위해서 임의로 설정한 계통 연결 컨버터의 제원을 나타내었다. 비교 기준은 다음과 같다.

- 추가적 생산 비용: 제안된 방법의 구현을 위해 기본적인 VSC 에 비해 추가적으로 발생하는 비용을 고려한다.
- 효율: 컨버터의 전력 변환 효율을 고려한다.
- 차단 시간, 한류(let-through current) 특성: 차단 시간은 사고발생 시부터 차단까지의 시간을 말하며, 빠를수록 시스템에 적은 영향을 미친다. 한류 특성은 사고발생 이후로 유입된 전류의 총 I^2t 의 계산 값으로서 사고로 인해 소모되는 에너지의 양을 의미한다.

- 소자 스트레스: 사고로 인해 발생하는 과전압, 과전류를 고려하여 스위치를 포함한 컨버터가 안정적으로 동작하는 것이 바람직하다.

2.2.1 VSC 와 기존 ACCB

직류 단락 사고에 대해서 VSC를 보호하기 위한 기존의 방법은 VSC의 교류 측 단자에 교류차단기를 이용하는 방법이다. 직류차단기의 미흡한 개발에 비해서 교류차단기의 기술 성숙도는 매우 높다. ACCB는 아크 전압 발생을 줄이기 위해서 교류 전류의 영점교차(zero-crossing) 시에 차단기를 동작시킨다고 가정하였다. 이 토폴로지는 기존의 방법을 이용하기 때문에 가장 상용화되어 있으며 기능이 보장되어 있다는 점에서 선호된다. 입력 필터가 생략된 회로도 는 그림 2.4에 나타나 있다.

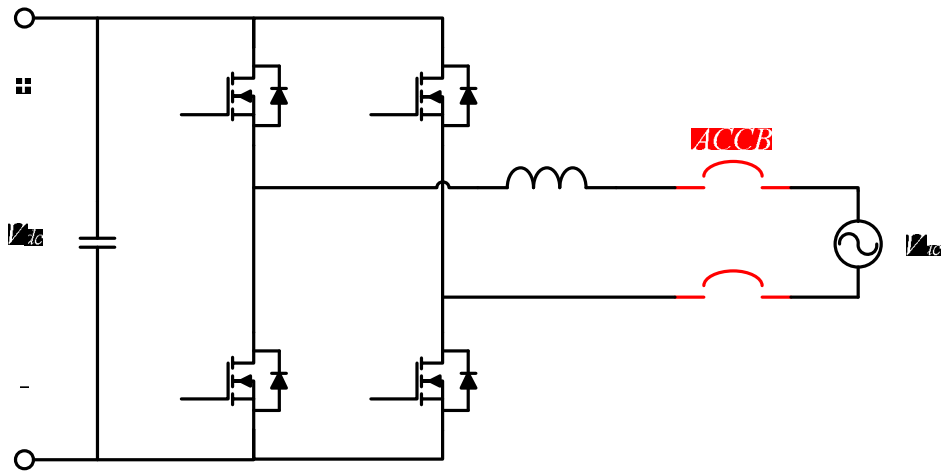


그림 2.4 VSC 와 ACCB 의 회로도.

ACCB는 전류의 rms 값이 일정 값 이상이 되었을 때 교류 전류가 영점을 지나는 순간 동작한다고 가정하였다. 따라서 단락 전류가 검지된 이후 최악의 경우에는 반-주기 (8.3ms)의 지연 후에 차단기 동작 신호가 발생한다. 모의 실험은 ACCB가 아크 전압 없이 이상적이라는 가정하게 수행되었으며, 그림 2.5는 모의 실험 결과를 보여준다. 빗금 표시된 파형은 사고가 발생하지 않았을 때의 전류, 전압 파형이다.

- $t < T_{fault}$: 컨버터 정상 동작
- $T_{fault} < t < T_{trip}$: 직류 측 단락 사고가 발생했을 때, 직류 측 캐패시터가 방전하며 직류전압(V_{ac})이 크게 감소하는 동시에 교류 측 전류(I_{ac})는 크게 증가한다. ACCB가 동작하는 I_{ac} 의 영점교차 시까지 컨버터의 다이오드 환류로를 통해서 전류가 흐른다.
- $T_{trip} < t$: I_{ac} 의 영점교차 시, 차단기가 동작하며 단락 지점으로부터 교류 전원을 분리한다. 차단 시간은 총 9.5ms이며 차단 시까지의 한류량은 1313J이다.

ACCB를 이용한 회로는 VSC에 ACCB의 비용만이 추가적으로 발생한다. 정상동작 시에는 VSC와 동일하게 동작하므로 변환효율은 기본적인 VSC와 크게 다르지 않다. 그러나, 차단시간이 수-수십 ms로 길다는 점 때문에 한류량도 크며 소자의 전류 스트레스도 커지게 된다.

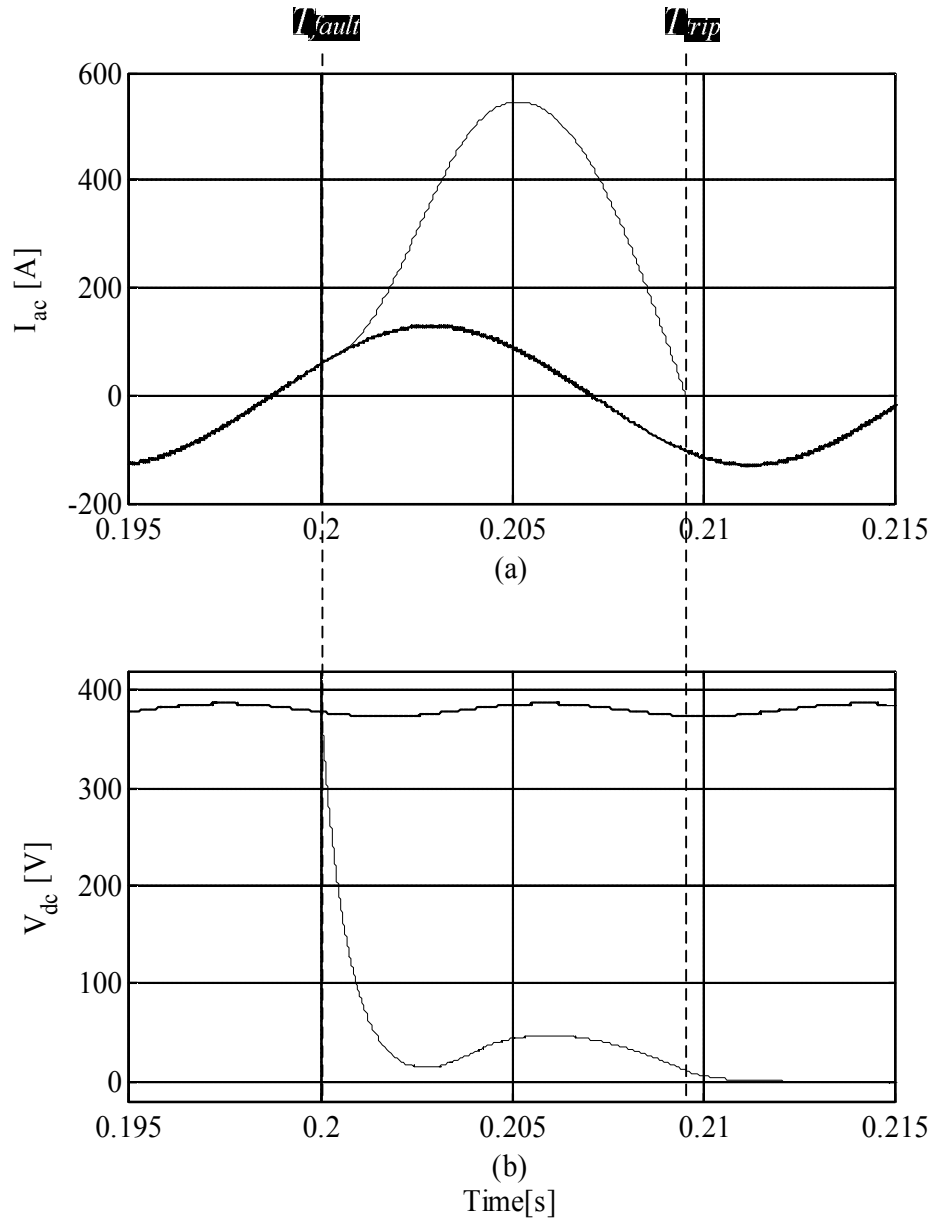


그림 2.5 VSC+ACCB 의 모의 실험 결과: (a) I_{ac} ; (b) V_{dc} .

2.2.2 역병렬 스위치 VSC

단락 사고에 대해서 환류로를 형성하지 않게 하기 위해서 스위치 소자를 수정하여 회로를 보완하는 방법이 있다 [21]. IGBT 혹은 MOSFET를 기반으로 제작된 VSC 회로는 앞서 살펴보았던 것과 같이 직류 측 단락 사고 시 스위치의 역병렬 바디 다이오드를 통해서 환류로를 형성한다. 따라서 그림 2.6과 같이 역병렬 다이오드의 기능을 수행하는 게이트-제어 스위치를 이용하여 스위치 셀을 구성하면 역병렬 스위치의 게이트 신호를 제어함으로써 직류 측 단락 사고로부터 VSC를 보호할 수 있다. 이 방법을 이용한 VSC의 전체 회로도에는 그림 2.7에 나타나 있다.

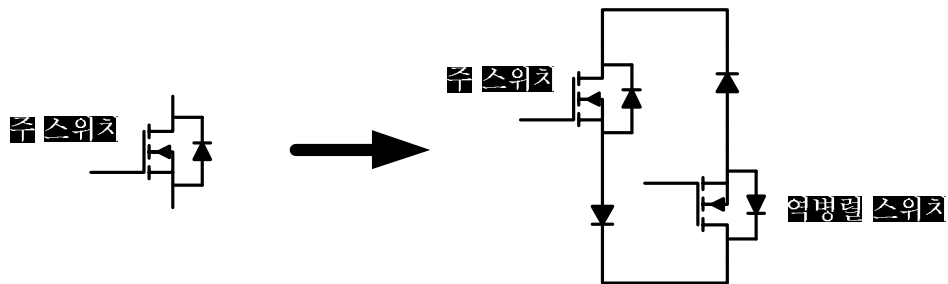


그림 2.6 역병렬 스위치를 이용한 스위치 셀.

그림 2.6에 나타난 것과 같이 보조 스위치와 다이오드를 이용하여 역병렬 스위치를 구성하는 방법 외에도 비교적 새로 개발된 소자인 ETO(Emitter Turn-Off device)를 이용할 수 있다. GTO와 MOSFET의 조합으로 구성된 ETO는 다른 소자에 비해서 내구성이 좋고 전압과 전류 정격이

높다는 장점이 있다. 반면, 기술 상용화가 낮으며 제작 비용이 높다는 것이 단점으로 작용한다.

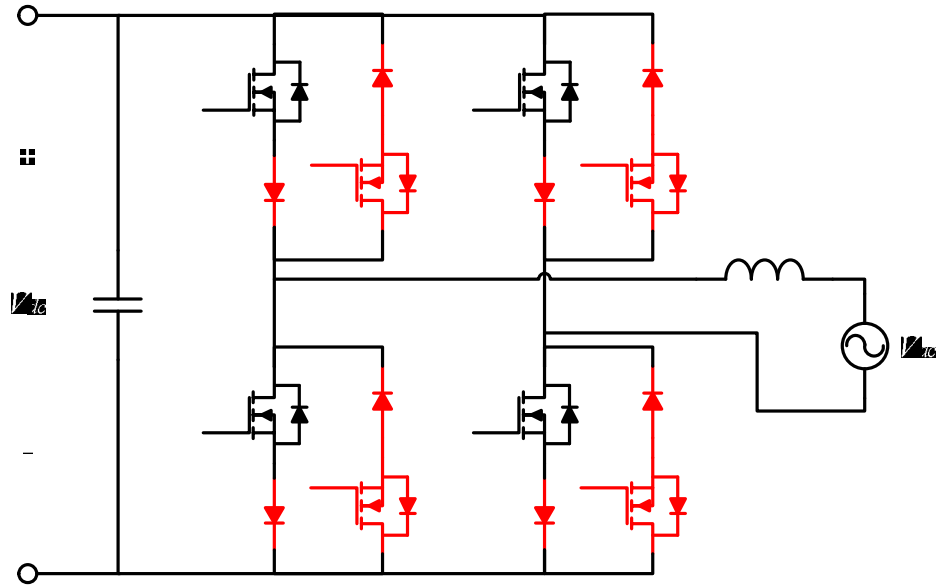


그림 2.7 역병렬 스위치를 이용한 VSC의 회로도.

컨버터의 정상 동작 모드일 때에는 주 스위치는 PWM 제어되며, 역병렬 스위치의 게이트 신호는 양(+)으로 유지된다. 이후 직류 측 단락사고 발생에 의해 도통 전류가 상승하면 주 스위치는 동작을 멈추고 이후 사고가 일정시간 이상 지속될 경우 역병렬 스위치 또한 정지한다. 역병렬 스위치의 정지는 스위치의 $L \frac{di}{dt}$ 로 인한 전압 스트레스를 완화하기 위하여 소프트 정지를 해야한다. 모의 실험은 설명한 제어 방식에 따라서 진행되었으며 그림 2.8은 모의 실험 결과를 보여준다. 빗금 표시된 파형은

ACCB를 이용했을 경우의 전류, 전압 파형이다.

- $t < T_{fault}$: 컨버터 정상 동작
- $T_{fault} < t < T_{trip}$: 직류 측 단락 사고가 발생했을 때, 직류 측 캐패시터가 방전하며 직류전압(V_{ac})이 크게 감소하는 동시에 교류 측 전류(I_{ac})는 크게 증가한다. VSC의 주 스위치는 동작을 멈추며 사고 전류는 역병렬 스위치를 통해서 흐른다.
- $T_{trip} < t$: I_{ac} 가 미리 설정한 값이 300A가 되었을 때 역병렬 스위치에 off 신호가 가해져 단락 지점으로부터 교류 전원을 분리한다. 차단 시간은 총 2.5ms이며 차단 시까지의 한류량은 68J이다.

역병렬 타입 VSC의 장점은 기존의 VSC와 거의 비슷한 동작을 수행하며 ACCB에 비해서 빠르게 동작한다는 점이다. 단점은 사고 시에 역병렬 스위치의 게이트 신호가 제어되어야 한다는 점이다. 역병렬 스위치가 하드스위칭할 경우에는 $L \frac{di}{dt}$ 에 의해서 스위치 양단에 걸리는 전압이 크게 증가할 수 있다. 추가적인 제작 비용으로 한 스위치 셀 당 세 개의 추가 스위치와 그리고 각 스위치를 구동하기 위한 구동 회로의 비용이 필요하다. 컨버터의 효율은 추가 스위치로 흐르는 도통 손실로 인하여 기본적인 VSC에 감소하지만 큰 차이가 없다. 차단 시간은 차단 설정에 따라 임의적으로 설정 가능하지만 차단 전까지의 한류량 증가는 앞선 방법과 동일하다.

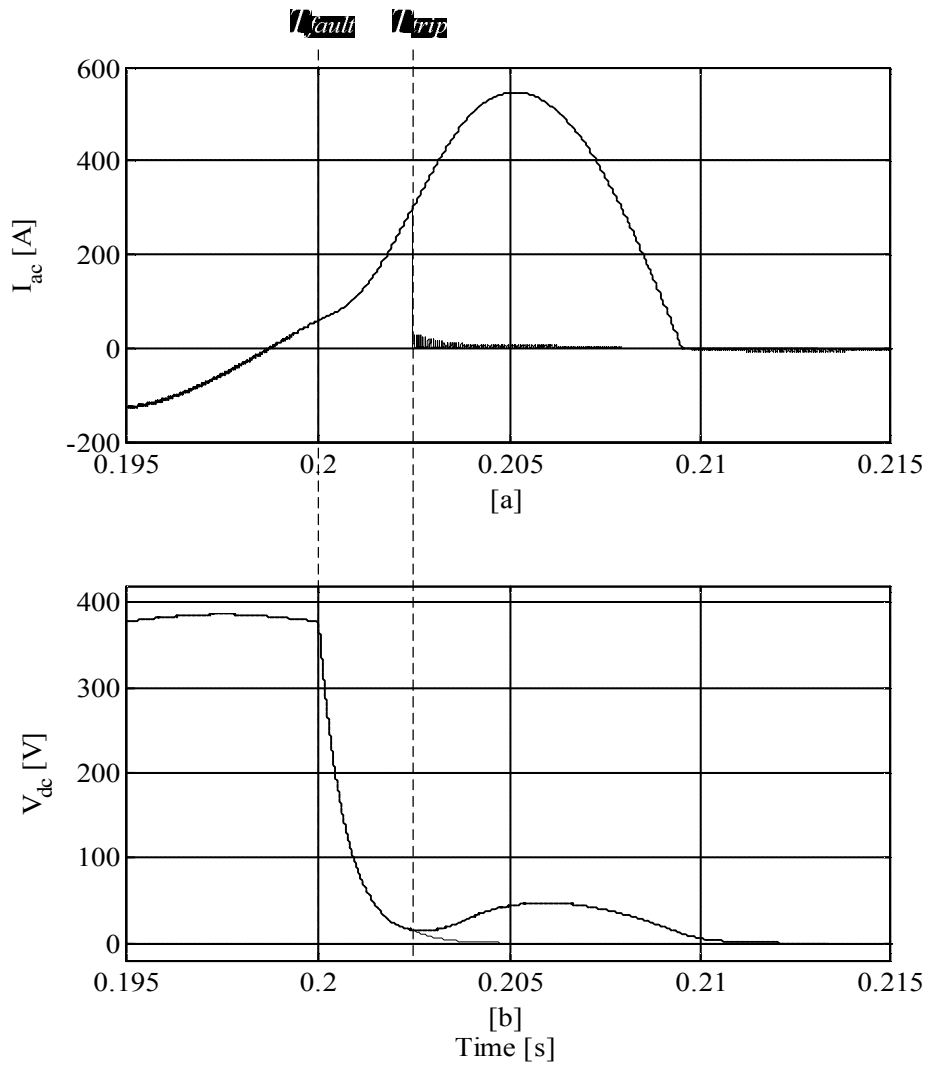


그림 2.8 역병렬 스위치를 이용한 VSC의 모의 실험 결과: (a) I_{ac} ; (b) V_{dc} .

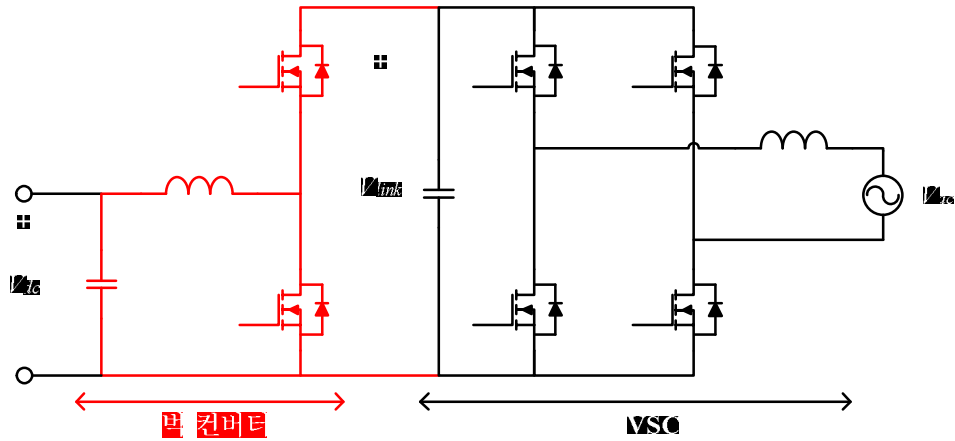


그림 2.9 VSC+벅 컨버터의 회로도.

2.2.3 VSC+벅 컨버터

입력에서 출력으로의 환류로가 있는 부스트 컨버터를 제외한, 벅, 벅-부스트, 브리지형 DC-DC 컨버터는 출력 측 단락에 대해서 환류로를 형성하지 않으며 단락 사고 시의 낮은 출력 전압에도 제어가 가능하다. 그림 2.9는 VSC의 후단에 벅 DC-DC 컨버터를 연결한 2단(two-stage) 구성의 AC-DC 컨버터를 나타낸 회로도이다 [22], [23]. 벅 컨버터는 두 개의 스위치 모두 능동 스위치를 사용하여 양방향 전력 제어가 가능한 동기형 회로를 이용한다. 회로3은 직류 측 단락 사고가 발생하였을 때 앞서 살펴본 두 가지 토폴로지와 마찬가지로 사고를 차단할 수 있다. 본 논문에서는 DC-DC 컨버터로서 벅-컨버터를 이용했지만 앞서 설명한 벅-부스트와 브리지형 컨버터로 대체할 수 있다. 모의 실험 결과를 그림 2.10와 2.11에 나타내었다.

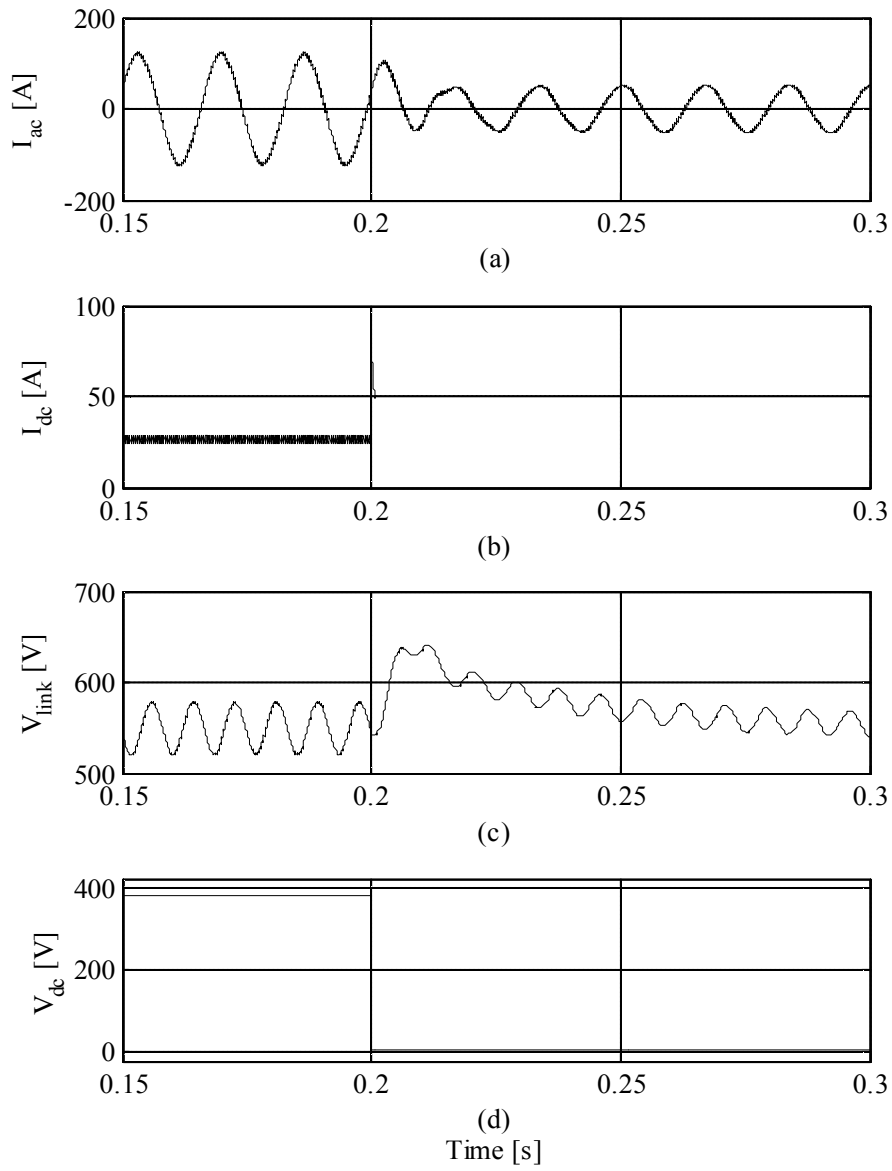


그림 2.10 VSC+벽 컨버터의 직류 측 단락 사고 파형: (a) I_{ac} ; (b) I_{dc} ; (c) V_{link} ; (d) V_{dc} .

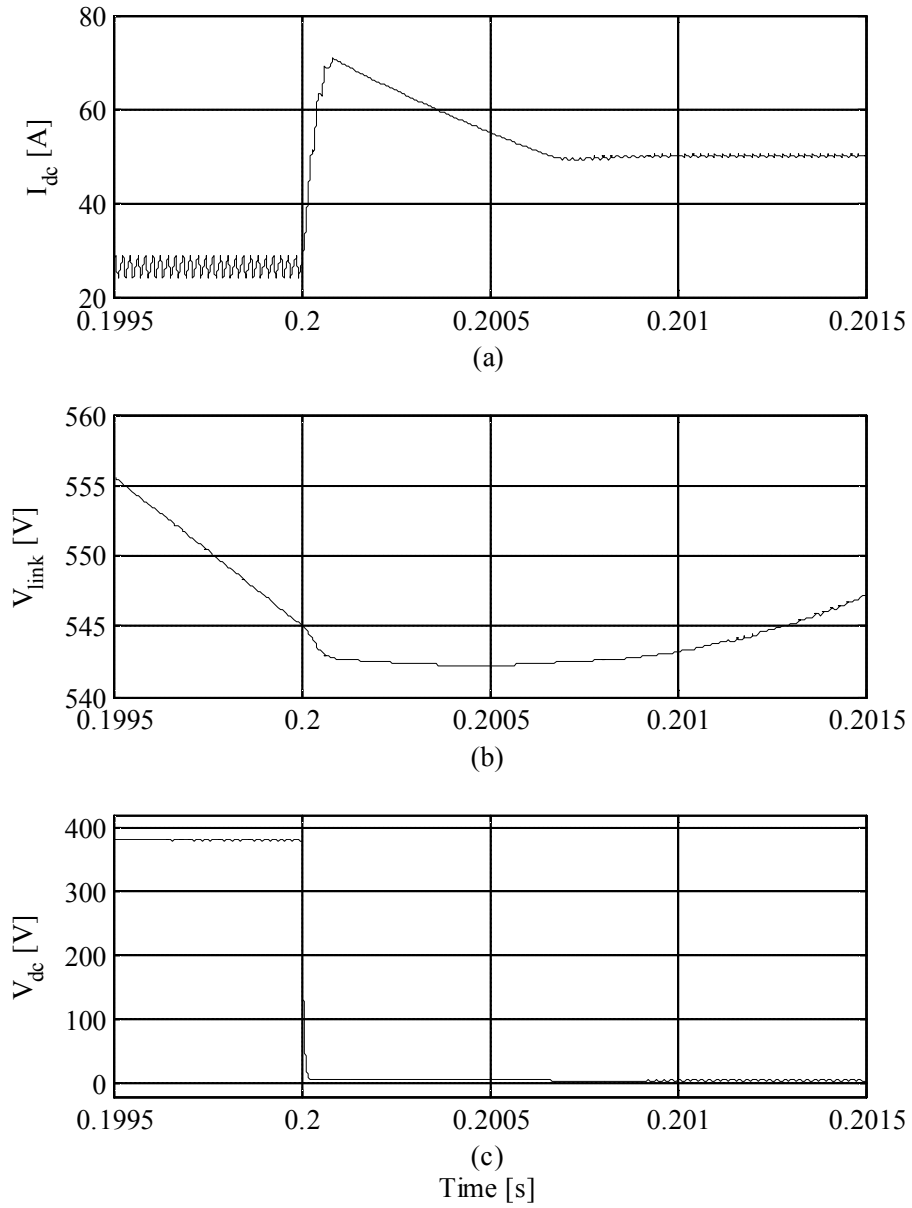


그림 2.11 VSC+벽 컨버터의 단락 사고 확대 파형: (a) I_{dc} ; (b) V_{link} ; (c) V_{dc} .

그림 2.10은 직류 측 단락 사고 시 I_{ac} , I_{dc} , V_{link} , V_{dc} 의 파형을 나타낸다. 정상 동작 시 출력 인덕터의 평균 전류는 26A이며 전류 제어를 통해 최대전류를 50A로 제한하였다. 그림 2.11은 그림 2.10와 같은 조건의 모의 실험에서 사고 시점인 0.2s를 주변으로 확대한 그래프이다. 출력 인덕터의 전류는 단락 사고 이후 70.9A까지 상승한 이후에 설정 제한값인 50A로 제어된다는 것을 확인할 수 있다.

사고 시 출력 전류가 최대값으로 제어되기 때문에 이 회로의 차단 시간은 보호 목적에 따라서 임의로 설정할 수 있다. 차단 시간은 앞선 역병렬 스위치 VSC 방법과 크게 다르지 않지만- VSC+벽 컨버터의 경우 차단 시점까지의 전류 증가가 제한되기 때문에 회로 한류 특성은 앞선 역병렬 스위치 VSC 방법보다 완화된다.

DC-DC 컨버터가 전류 제어된다는 가정 하에, 단락 사고 시에도 출력 전류가 제어될 수 있다. 따라서 단락 사고 시 전류는 사고 정상상태 특성을 따라 크게 증가하는 것이 아닌 설계된 최대 전류값 이상을 넘어서지 않기 때문에 소자 스트레스가 크게 줄어들게 된다. 앞선 두 토폴로지가 단락 사고에 대해서 수동적으로 대응하는 데에 비해서 세 번째 토폴로지는 전력전자를 이용한 능동적인 대응이 가능하게 된다.

추가적인 장점으로는 VSC에서는 DC단 전압 리플을 제한하기 위해서 큰 캐패시터 값이 요구되는데, 이 회로에서는 직렬 연결된 벽 컨버터가 직류 배전망의 전압을 2단으로 제어하기 때문에 캐패시터 값이 크게 줄어들게 된다. VSC는 V_{link} 를 $550\pm 30V$ 로 제어하며, 벽 컨버터가 이를 다시 380V로 제어하도록 설계하였다.

VSC+벽의 단점은 VSC의 비용에 추가적으로 벽-컨버터의 비용이 더해진다는 것이다. 또한, 두 개의 전력전자 블록이 직렬 연결되어 있기 때문에 컨버터의 변환 효율이 감소한다.

2.2.4 비교 정리

다음 표 2.2는 위의 세가지 토폴로지의 특성을 비교한 표이다. VSC+벽 컨버터는 비용과 효율면에서는 불리하다. 그러나 차단 속도가 빠르고 한류량이 적으며 소자 스트레스가 완화되는 등 보호기능의 측면에서는 유리하여 시스템의 안정성을 향상시킬 수 있다. 따라서 본 논문이 제안하는 보호 시스템은 VSC+벽 컨버터를 이용한다.

표 2.2 AC-DC 컨버터의 토폴로지 비교

토폴로지	비용	효율	차단 속도	한류량	소자 스트레스
VSC와 ACCB	낮음	높음	느림	높음	높음
역병렬 스위치 VSC	보통	보통	빠름	보통	보통
VSC+벽	높음	낮음	빠름	낮음	낮음

2.3 DC-DC 컨버터의 회로 비교

직류배전시스템에서는 대다수의 전력원과 부하가 DC-DC 컨버터를 통해서 전력을 주고 받는다. 태양광 발전, 연료전지, 배터리 등의 직류 전력을 생산하는 전력원은 DC-DC 컨버터를 통하여 배전망에 연결된다. 풍력

발전, 소형디젤 발전 등의 교류 전력을 생산하는 전력원도 주로 AC-DC + DC-DC의 2단 컨버터를 통하여 배전망에 연결된다. 또한 주 전력 버스인 380V의 직류 전원을 다양한 레벨의 전압으로 변환하여 하부 버스 및 부하에 공급하기 위해서 DC-DC 컨버터가 이용되기도 한다. 그림 2.12의 DC-DC 컨버터는 컨버터의 용도와 동작 모드에 따라서 전력을 직류배전망에 공급하기도 직류배전망으로부터 전력을 공급 받기도 한다.

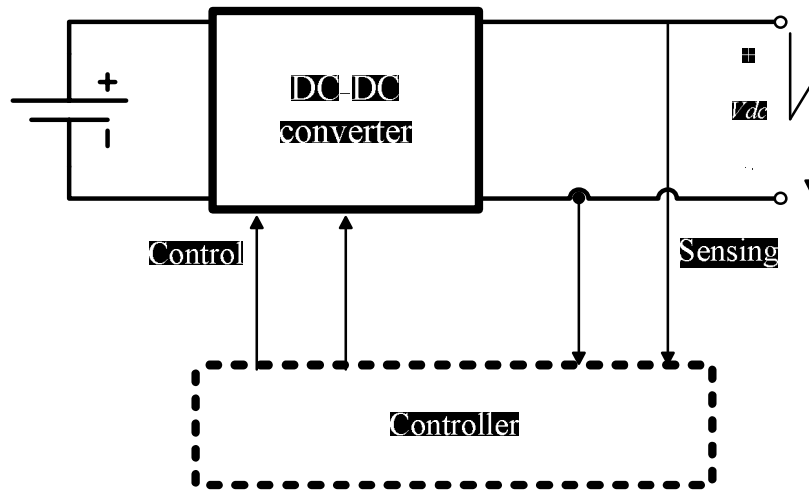


그림 2.12 DC-DC 컨버터의 단락 사고 제어.

2.3.1 컨버터 회로 비교

본 논문의 연구 목적은 직류 배전 시스템에서 발생하는 단락 사고에 대하여 전력전자기술을 이용하여 단락 전류를 제어하고 차단하는 것이다. 따라서 직류배전시스템에서 사용되는 DC-DC 컨버터 또한 별도의 보호 장치 없이 단락 사고에 대한 제어가 가능해야 한다. 이러한 목적을 수행하기 위한 DC-DC 컨버터는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

- 전압이득 범위

출력 측 단락 사고 시, 배전망의 양극과 음극은 매우 낮은 임피던스, R_f 로 연결된다. DC-DC 컨버터의 출력 전류가 I_{o_max} 로 제한된다는 가정하에, 출력 전압 V_{dc} 는 다음과 같이 결정된다.

$$V_{dc} = \min(V_{dc_ref}, I_{o_max} R_f) \quad (2.1)$$

일반적으로 사고 저항 R_f 의 값은 매우 작기 때문에, 단락 사고 이후 출력 캐패시터의 빠른 방전과 함께 출력 V_{dc} 는 0V에 근접한 값으로 떨어지게 된다. 따라서 컨버터는 이러한 낮은 출력 전압에서도 제어가 가능해야 한다. 정상 동작 시에도 출력전압을 380V로 제어할 수 있어야 한다는 점을 고려하여 컨버터의 전압이득의 범위를 설계해야 한다.

- 환류로

출력 측 단락사고에 대해서 환류로를 형성하는 컨버터는 본 논문의 목적인 전류제한 기능을 수행할 수 없다. 컨버터의 입력 측의 전원으로부턴 출력 측의 단락사고 지점까지 다이오드 혹은 바디-다이오드를 포함한 도통 회로가 형성되지 않아야 한다.

- 전기적 분리

시스템 안전을 위하여 컨버터의 입출력이 전기적으로 분리되어 있는 것이 중요하다. DC-DC 컨버터 중 브리지형 컨버터, 플라이백 컨버터 등은 트랜스포머를 이용한 전기적 분리를 제공한다.

표 2.3은 그림 2.13에 나타난 부스트, 벡-부스트, 브리지형 컨버터의 특성을 정리한 표이다. 브리지형 컨버터로는 하프브리지를 비교하였다. 벡 컨버터는 전압이득이 최대 1이기 때문에 응용이 제한되어 제외하였고, 포

위드와 플라이백 컨버터는 주로 소용량으로 쓰인다는 점에서 비교대상에서 제외하였다.

부스트 컨버터는 비교적 간단한 회로의 컨버터이지만, 전압이득 범위가 1 이상으로 제한되어 사고 시의 낮은 전압에서 제어할 수 없으며 사고에 대하여 환류로를 제공한다는 단점이 있다. 벡-부스트 컨버터는 전압이득 범위가 $0 < M < \infty$ 로 넓다는 장점이 있지만 출력 전압이 반전되며 브리지형 컨버터와 달리 전기적 분리를 제공하지 않는다는 단점이 있다. 브리지형 컨버터는 전압이득 범위를 트랜스포머의 권선비 설계 값을 통해서 조정할 수 있으며 전기적 분리를 제공한다는 장점이 있다. 또한, 벡 컨버터를 기반으로 한 토폴로지여서 제어가 비교적 쉽다는 장점이 있다.

표 2.3 부스트, 벡-부스트, 브리지형 컨버터의 특성 비교

토폴로지	DC 전압 이득 범위	전기적 분리	환류로
부스트	$M = \frac{1}{1-D} \quad (1 < M < \infty)$	X	O
벡-부스트	$M = \frac{D}{1-D} \quad (0 < M < \infty)$	X	X
하프브리지	$M = \frac{D}{n} \quad (0 < M < \frac{1}{2n})$	O	X

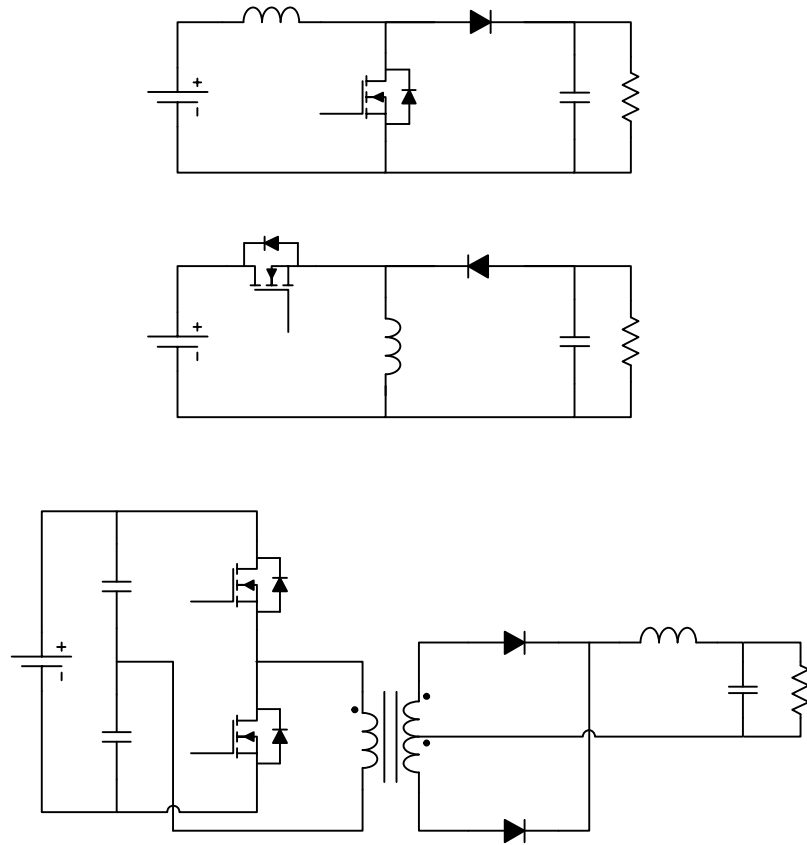


그림 2.13 DC-DC 컨버터 회로도: (a) 부스트; (b) 벡-부스트; (c) 하프브리지 컨버터.

2.3.2 DC-DC 컨버터의 단락 전류 특성

직류 측 단락 사고에 대하여 컨버터의 토폴로지와 제어 방식에 따라서 단락 전류는 다양한 방식으로 나타난다. 우선 직류 단락 사고에 대하여 환류로를 형성하는 부스트 컨버터의 경우를 먼저 살펴보자. 단락 사고가 발생했을 때의 부스트 컨버터의 등가 회로는 그림 2.14와 같으며 부하 측에서의 단락 사고에 따른 전원에서 부하로 흐르는 환류로를 나타내고 있

다. 사고 시 전류는 환류 다이오드를 통해서 흐르게 되며 직류원을 이상적 전압원으로 가정했을 때 등가 회로는 단순한 일차 직렬 RL 회로로서 출력전류는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$i_{DC}(t) = \frac{V_{dc}}{R_{dc}} \left(1 - e^{-\frac{R_{dc}t}{L_{dc}}} \right) \quad (2.2)$$

위 식에서 V_{dc} 는 dc 전압, R_{dc} 와 L_{dc} 는 각각 환류로의 등가 저항과 인덕턴스를 나타내고 있다. 식 (2.2)에 따르면 계산 결과는 그림 2.15와 같이 나타난다.

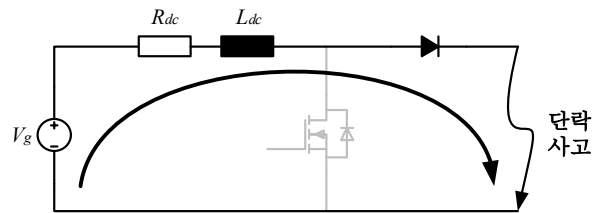


그림 2.14 부스트 컨버터의 단락사고 등가 회로.

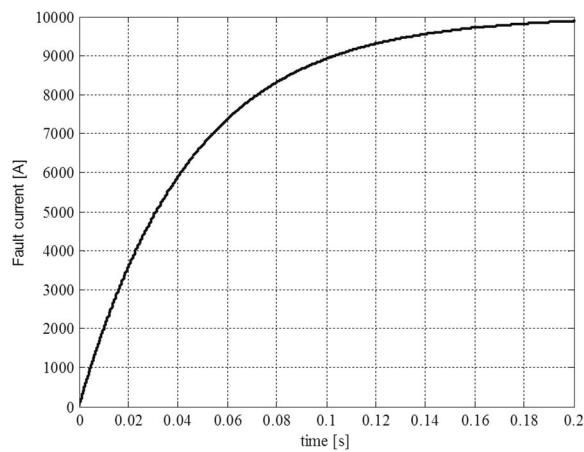


그림 2.15 부스트 컨버터의 단락 전류의 예.

다음은 그림 2.13 (c)의 하프브리지 DC-DC 컨버터가 단일 전압 제어로 제어된 경우 그림 2.16과 같이 컨버터의 출력전류는 150us 사이에 1A에서 7.8A로 상승한다. 다음은 컨버터의 정상상태 단락전류를 계산한 과정이다. 우선, 출력 인덕터가 정상상태의 전류가 흐르는 이상적 전류원이라는 가정 하에 가정트랜스포머의 누설 인덕턴스 L_r 의 상태 방정식을 세우면, 다음과 같다.

$$i_r = \begin{cases} -I_0 + \frac{1}{L_r} \int_0^{T_1} \frac{V_i}{2} dt, & 0 < t < T_1 \\ nI_L, & T_1 < t < T_2 \\ nI_L - \frac{1}{L_r} \int_{T_2}^{\frac{1}{2}T_s} \frac{V_i}{2} dt, & T_2 < t < T_s \end{cases} \quad (2.3)$$

위 식에서 n 은 트랜스포머의 승압비, i_r 은 누설 인덕턴스에 흐르는 전류, V_i 는 입력 전압, I_L 은 출력 전류를 나타낸다. 식 (2.3)를 이용하여, 각 모드의 구간인 T_1 와 T_2 에 관한 식을 구한 후 이를 통해서 출력 인덕턴스의 방전 구간 T_d 를 계산할 수 있다.

$$T_d = \frac{4nL_r I_L}{V_i} \quad (2.4)$$

식 (2.4)를 출력 인덕턴스의 전압-시간 균형 식에 대입하면 출력 전류의 정상 상태 값은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$I_L = \frac{V_i}{\frac{8nL_r}{T_s} + \frac{2R_f}{n}} \quad (2.2)$$

식 (2.5)에서 나타나는 것과 같이 전류 제어 방식의 하프브리지의 정상 상태 사고 전류는 누설 인덕턴스 L_r 과 사고 저항 R_f 에 따라 달라지기 때문에 사고 전류를 예측하는 것이 어려워진다.

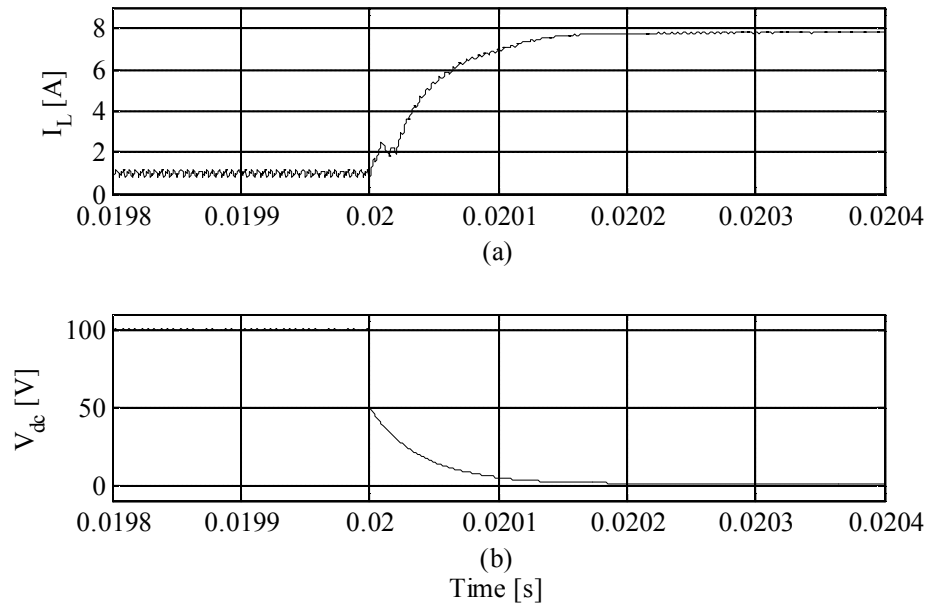


그림 2.16 전압 제어된 하프브리지 컨버터의 단락사고 파형: (a) 출력전류; (b) 출력전압.

컨버터의 출력 캐패시터는 단락 사고 발생과 함께 방전되며 출력 전압은 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$v_o(t) = V_{o2} + (V_{o1} - V_{o2})e^{-\frac{1}{R_f C_o}t} \quad (2.4)$$

위 식에서 v_o 는 출력 전압, V_{o1} 과 V_{o2} 는 출력 전압의 보통 동작 때, 사고 동작 때의 정상 상태 값, R_f 는 사고 저항값, C_o 는 출력 캐패시터 값을 의미한다.

제 3 장 단락보호를 위한 컨버터 제어기 설계

3.1 단락보호를 위한 컨버터 제어

2장에서는 본 논문에서 제안하는 직류배전시스템의 보호기능을 위한 전력전자 기술을 적용하기 위해서 다양한 AC-DC 컨버터와 DC-DC 컨버터의 토폴로지를 비교하였다. AC-DC 컨버터는 VSC와 DC-DC 컨버터가 직렬 연결된 구조를 갖고 있으며 이는 양방향 전력제어와 PFC 제어는 물론 직류 측 단락 사고에 대하여 전류제한 제어가 가능하다. 한편, DC-DC 컨버터는 브리지형 컨버터를 선택하였다. 브리지형 컨버터를 포함한 벽-컨버터 기반의 컨버터는 동기형 구조를 적용하여 쉽게 양방향 전력 제어를 구현할 수 있다. 위 토폴로지의 컨버터를 이용할 경우 별도의 차단 장치 없이 사고를 실질적으로 차단할 수 있다.

이번 3장에서는 직류배전시스템에서 단락사고 보호를 위한 컨버터의 제어기 설계 방법을 제안한다. 직류 배전망에 연결된 각 컨버터는 단락사고가 발생했을 때, 컨버터의 제어 전략을 통해서 출력전류를 제한하여 과도한 사고전류로 인해서 발생할 수 있는 2차 사고를 방지한다. 또한, 단락사고가 일정 시간 이상 지속될 경우 컨버터를 정지함으로써 사고를 차단한다.

컨버터 제어기는 우선적으로 정상동작 시의 안정적인 동작을 도모할 수 있어야 한다. 컨버터 모델링을 이용하여 전달함수를 구하고 제어기를 설

계하였다. 컨버터의 제어기는 모두 이중 루프 제어 방식을 이용하여 DC-DC 컨버터는 빠르고 안정적인 동작, AC-DC 컨버터는 전류 프로그램을 통한 PFC 를 수행하도록 하였다.

직류 측 단락사고를 일차적으로 경험하는 DC-DC 컨버터에 대해 단락 사고로 인한 출력전압 감소에도 안정적인 전류제한 제어를 달성하기 위하여 PWM 제어 방식 대신에 이력 COT(hysteretic Constant On-Time) 제어를 이용하였다. 사고 시 PWM 제어는 스위치의 온-타임(on-time)이 지나치게 짧아져 컨버터의 오동작을 야기할 가능성을 갖는 반면 COT 제어는 최소 온-타임을 보장하여 이러한 문제점을 해결할 수 있다.

또한 AC-DC 컨버터에서 VSC의 느린 제어 속도로 인해 사고 발생 직후 링크 전압이 상승하는 것을 방지하기 위하여 피드포워드(feed-forward)를 적용하였다. 직렬 연결된 벡-컨버터의 출력 전력을 VSC 제어기의 피드포워드 항으로 삽입하여 단락사고에 대한 링크 전압의 과도 응답을 완화하였다.

AC-DC 컨버터의 구조는 DC-DC 컨버터를 포함하고 있기 때문에, 본 장에서는 DC-DC 컨버터의 제어기 설계를 우선적으로 설명하고, 뒤이어 AC-DC 컨버터의 제어기 설계에 대한 설명이 이어진다.

3.2 DC-DC 컨버터 제어기 설계

앞선 2장에서 설명한 것처럼 보호기능을 위한 DC-DC 컨버터로서 브리지형 컨버터를 대상으로 한다. 하프브리지와 풀브리지 등의 브리지형 컨

버터는 벽-기반의 컨버터로서 컨버터의 모델링 및 제어도 벽-컨버터와 거의 동일하다. 따라서 이번 3.2에서는 이를 일반화하여 벽-컨버터의 예를 들어 제어를 설계한다.

3.2.1 기본 제어기 설계

직류 측 단락사고가 발생했을 때 지정 범위 내에서 컨버터의 출력전류를 제한하기 위해서 전류모드 제어를 한다. 그림 3.1은 전류모드 제어 하에서 동작하는 컨버터의 소신호 블록도를 나타낸다. 그림에서 v_g, v_o, i_L, v_c, d 는 각각 입력전압, 출력전압, 출력전류, 커패시터 전압, 듀티비의 소신호 변수를 의미한다. G_{vg} 와 G_{vd} 는 각각 입력전압과 듀티로부터의 출력 전압, G_{ig} 와 G_{id} 는 각각 입력전압과 듀티로부터의 출력전류의 개방루프 전달함수를 나타낸다. K 는 센싱 이득, G 는 보상기의 전달함수를 의미한다.

정상동작과 사고동작 때의 제어기 성능의 토폴로지 별 특성 비교를 위하여 벽-컨버터와 부스트-컨버터의 소신호 특성 및 제어기 성능을 비교하였다. 벽-컨버터와 부스트 컨버터의 duty-to-current 전달함수 $G_{id}(s)$ 는 식 (3.1)으로 나타낼 수 있다.

$$G_{id}(s) = \frac{nV_{out}}{D} \frac{\frac{1}{R} + RCs}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (3.1)$$

$$G_{id}(s) = \frac{V_{out}}{1-D} \left(1 - \frac{Ls}{(1-D)^2 R} \right) \frac{\frac{1}{R} + RCs}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1}$$

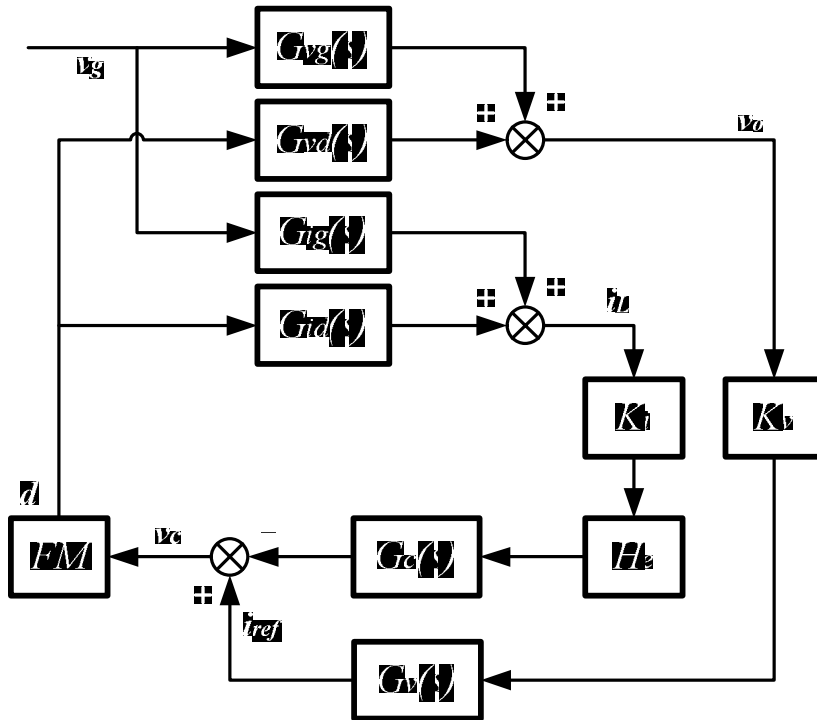


그림 3.1 전류제어 DC-DC 컨버터의 소신호 블록도.

식 (3.1)에서 확인할 수 있는 것처럼 벡-컨버터의 G_{id} 는 설계 변수에 의해서 결정되는 단순한 형태를 갖추고 있는 반면, 부스트 컨버터의 전달함수의 제로항은 컨버터의 동작 조건인 출력전압 V_o 와 부하 R_L 에 의존한다. 직류 측 단락사고는 출력단에 연결된 등가저항 R_f 로 나타낼 수 있는데, 이는 정상 동작 부하의 1% 이하인 것이 일반적이다. 그림 3.2 (a)와 (b)는 R_L 이 정상동작 부하에서 사고부하인 R_f 까지 변화할 때의 전달함수를 나타내었다. 내부 제어루프의 루프 이득은 식 (3.2)와 같다.

$$T_i = G_{id}(s)K_iH_eG_c(s)FM \quad (3.2)$$

두 컨버터의 최악 조건을 고려하여 PI 제어기로 구성된 전류 루프 보상

기를 설계하였다. 최악 조건은 부하저항이 최소일 때로 이 경우에는 사고 저항이다. 그림 3.3에서 볼 수 있는 것처럼 벡-컨버터의 G_{id} 는 부하저항에 크게 영향을 받지 않기 때문에 설계된 보상기를 적용한 루프 이득은 차단 주파수 (cut-off frequency) 이상에서는 부하의 크기에 상관없이 동일하다. 따라서 표 3.1과 같이 부하 조건이 바뀐다고 해도 위상 여유(phase-margin)가 크게 변하지 않아 제어기의 안정적인 동작을 보장한다. 반면 부스트-컨버터의 이동성 (moving) 제로항은 부하 조건에 크게 변하기 때문에 차단 주파수 이상에서도 루프 이득이 부하에 따라 상이하게 나타나며 위상 여유 또한 벡-컨버터에 비해서 불규칙하다. 결과적으로 벡-컨버터는 사고 차단 기능뿐만 아니라, 사고 시 전류 제한 기능에 있어서도 부스트-컨버터보다 유리하다.

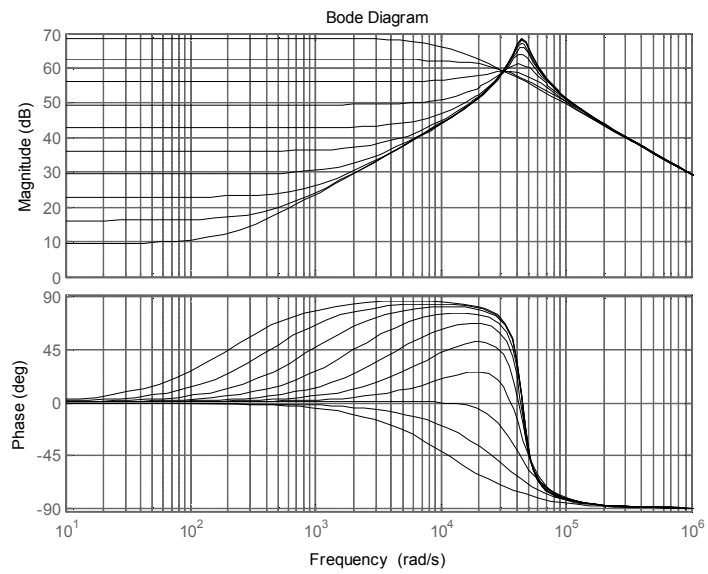
표 3.1 부하에 따른 루프 이득 위상 마진

	← (부하)									
하프-브리지	82.7	82.7	82.7	82.7	82.7	82.6	82.6	82.5	82.3	82.1
부스트	69.9	52.5	54.4	43.4	105.3	91.3	89.4	89.2	89.4	89.7

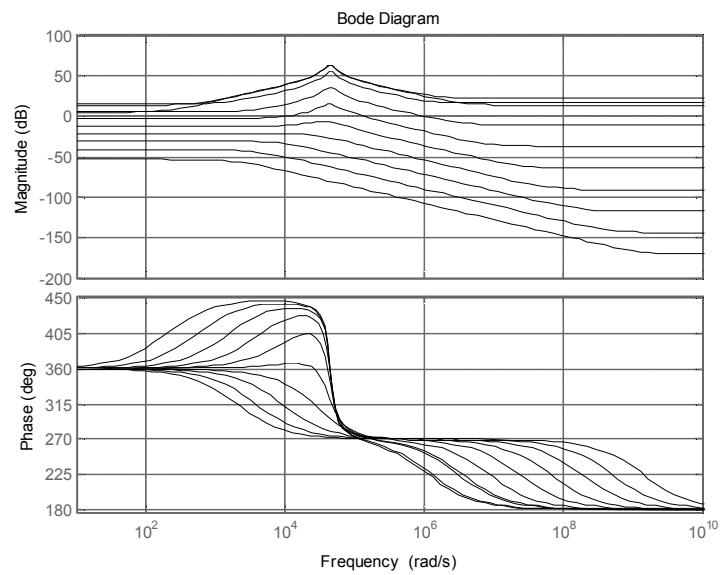
외부 전압 루프는 PI 제어기로 설계되며 보상기의 출력은 그림 3.1과 같이 내부 전류 루프의 지령 값으로 간주된다. 내부 제어 루프가 설계된 이후 control-to-voltage 전달함수는 식 (3.3)과 같다.

$$\frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_c} = \frac{G_c G_v FM}{1 + T_i} \quad (3.3)$$

T_i 는 전류 루프의 루프 이득을 의미한다. 식 (3.3)을 이용하여 설계한 제어기는 PI 제어기로 구성하였다.

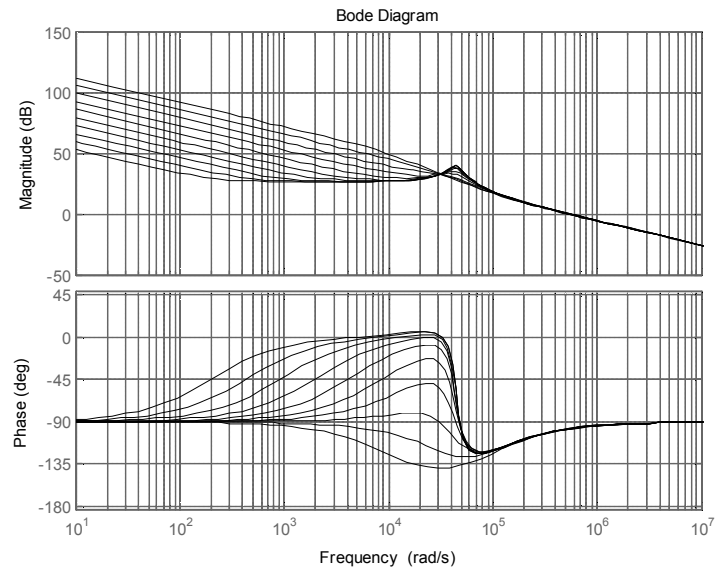


(a)

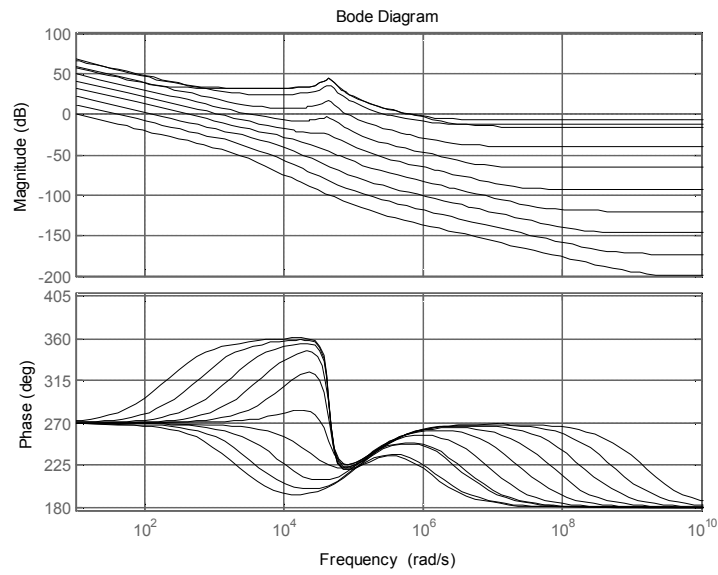


(b)

그림 3.2 부하에 따른 전달함수 G_{id} : (a)벅-컨버터; (b)부스트-컨버터.



(a)



(b)

그림 3.3 전류 루프 이득: (a)벅-컨버터; (b)부스트-컨버터.

3.2.2 전류제한 COT 제어

그림 3.4에서처럼 단락사고 시 컨버터의 제어기에서 외부 루프인 전압 보상기의 출력은 리미터를 통하여 전류 지령으로 전달된다. 리미터를 거친 전류 지령은 최소 전류와 최대 전류 지령이 제한된다. 단락사고 시 컨버터의 출력전압은 0V에 가까지 떨어지며 출력전류 지령은 미리 설계한 최대 전류 값인 $I_{o,max}$ 로 유지된다. 따라서 컨버터는 별도의 제어 전략 없이 전류 제한 제어를 수행할 수 있다.

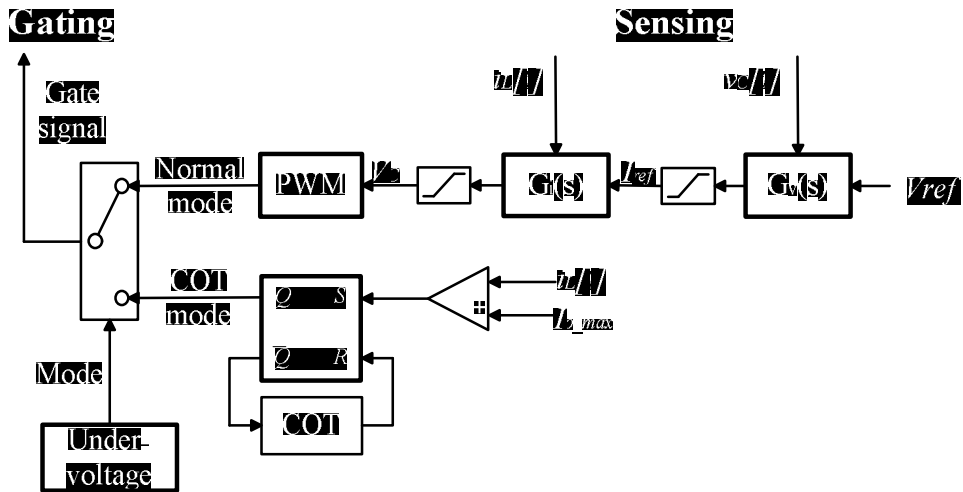


그림 3.4 DC-DC 컨버터 제어기 블록도.

그러나, 일반적인 벽 컨버터의 듀티인 M 은 $M = V_o/V_i$ 과 같은데, 단락 사고 시 출력전압 V_o 가 매우 작기 때문에 듀티는 0에 가깝게 되고 따라서 메인 스위치가 켜지는 온-타임이 크게 줄어든다. 온-타임이 스위치 소자의 상승, 하강 시간 (rise-, fall-time) 및 제어기와 게이트 드라이버의 전달 지

연과 가깝게 작아질 경우 컨버터가 오동작할 우려가 있다. 따라서 이를 방지하기 위하여 사교 시에는 PWM 제어가 아닌 이력 COT 제어를 한다.

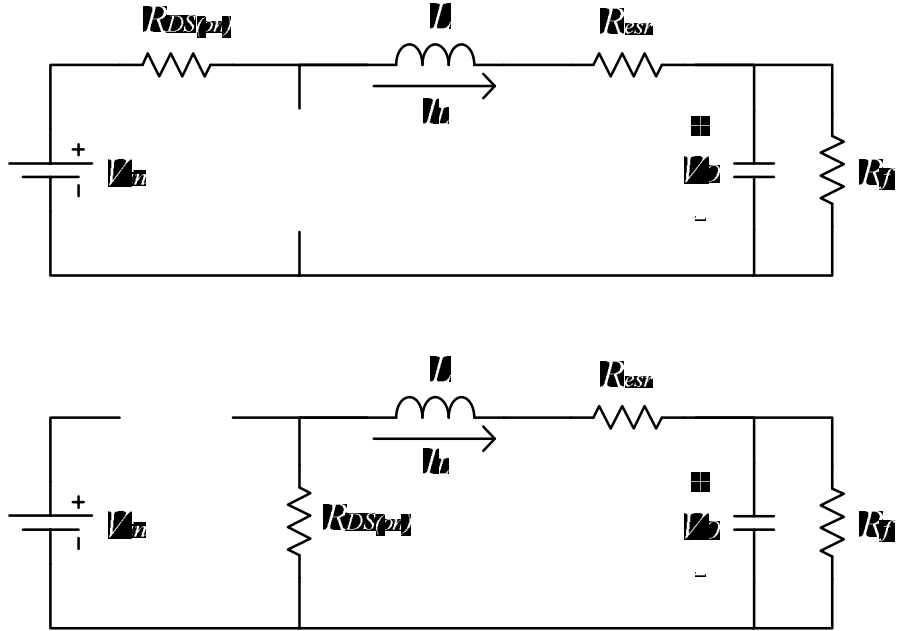


그림 3.5 벅 컨버터의 동작구간 별 등가회로.

그림 3.5는 벅-컨버터의 동작구간 별 등가회로를 나타내었다. 입력전압은 V_{in} 으로 일정하고 출력전류는 I_o 로 제어된다는 가정하에 각 구간 별 상태 방정식은 식 (3.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{ON: } L \frac{di}{dt} &= V_{in} - I_o R_{eq} \\
 \text{OFF: } L \frac{di}{dt} &= -I_o R_{eq}
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

R_{eq} 는 식 (3.5)에서처럼 도통 회로의 총 등가저항이다.

$$R_{eq} = R_{esr} + R_{DS(on)} + R_f \quad (3.5)$$

R_{esr} 은 인덕터의 직렬등가저항, $R_{DS(on)}$ 은 스위치의 온-저항(on-resistance), R_f 는 사고저항이다. 인덕터의 전압 균형식을 이용하여 구한 컨버터의 온-타임은 식 (3.6)이다.

$$T_{on} = DT_s = \frac{I_o R_{eq}}{V_{in}} \quad (3.6)$$

위 식에서 사고 시 R_{eq} 는 매우 작기 때문에, T_{on} 또한 매우 작아지게 된다. 이를 해결하기 위해 적용한 COT 제어는 다음의 방법으로 동작한다.

- 스위치 턴온

피드백 변수인 출력전류가 최대전류 값 I_{o_max} 아래로 떨어졌을 경우 스위치가 턴온된다. 출력 인덕터는 입력전압에 의해서 빠르게 충전되며, 턴온 시간 T_{o_min} 에 따라서 전류 변화량은 다음 식으로 근사할 수 있다.

$$\Delta i \cong \frac{T_{onmin} V_{in}}{L} \quad (3.7)$$

- 스위치 턴오프

컨버터의 ON-모드가 T_{o_min} 동안 지속된 이후 다시 컨버터는 OFF-모드가 된다. 식 (3.6)과 식(3.7)를 이용하여 COT모드 동안 컨버터의 동작 주파수는 다음 식과 같다.

$$f_s = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_{onm}} \frac{I_o R_{eq}}{V_{in}} \quad (3.8)$$

컨버터는 정상동작 시에는 PWM 제어를 수행하다가 출력전압이 일정 값 이상 내려갔을 경우 COT 제어를 수행한다. 그림 3.4는 COT 제어를 포함한 컨버터의 제어기의 전체 블록도이다.

3.2.3 보호 설정 설계

제안된 제어 방법으로 컨버터는 직류 측 단락사고에 따라서 동작 모드를 결정한다. 사고의 감지와 사고 차단을 위한 컨버터 정지는 컨버터의 센싱 정보인 출력전압 v_c 와 출력전류 i_L 을 이용해 이루어진다. 컨버터의 보호 기능은 사고의 전기적 특성을 고려하여 설계되어야 한다.

우선 컨버터는 단락사고 감지를 수행한다. 저전압 직류시스템에서 단락사고는 도통 전류의 증가율의 특성을 보인다. 단락사고는 직류 버스의 양극을 낮은 임피던스로 연결시키고 이는 출력 전압의 급속한 방전으로 이어진다. 캐패시터의 빠른 방전은 단순한 부하 증가로 인한 전류 증가와 큰 차이를 보인다. 그러나 컨버터의 센싱 정보인 인덕터 전류는 캐패시터의 방전 도통로를 포함하고 있지 않기 때문에, 그림 3.6과 같이 부하의 증가로 인한 인덕터 전류 증가와 사고로 인한 인덕터 전류 증가는 큰 차이를 보이지 않는다.

대신, 출력전압 측정 정보를 통해 컨버터는 출력전압이 부족전압(under-voltage)를 겪을 때, 사고를 감지한다. 전류제한 제어의 경우 출력전압은 식 (3.9)처럼 나타난다.

$$V_o = \min(V_{o_ref}, I_{o_max} * R_f) \quad (3.9)$$

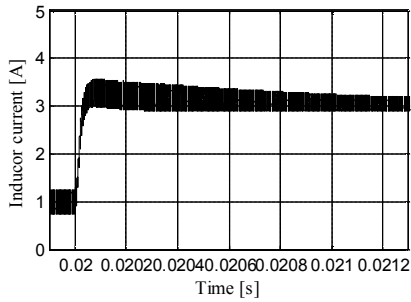
단락사고 임피던스가 정상동작 임피던스에 비해 수 퍼센트 이하이며 또한 직류시스템에서는 교류시스템과 달리 전압의 rms값을 고려할 필요가 없다는 것을 감안했을 때 출력전압은 크게 감소하기 때문에 이를 이용하여 단락사고를 쉽게 검출할 수 있다.

사고가 일정 시간 이상 지속되었을 때 컨버터는 사고를 차단하기 위해

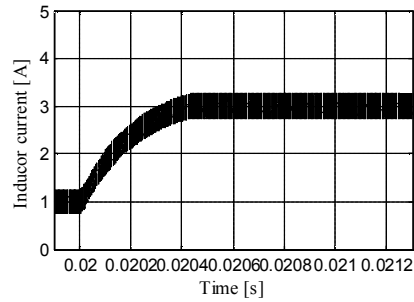
정지한다. 사고 직후의 캐패시터 방전 전류는 0A로 감소하며 컨버터를 통해서 전류제한 제어를 통해 인덕터 전류는 최대 전류로 포화 상태가 된다. 컨버터의 차단 작용은 소자 및 기기의 안전을 위해서 정상 상태 때 수행하도록 권장된다. 일반적으로 컨버터의 동특성보다 캐패시터의 동특성이 느리므로 정상상태까지의 딜레이는 식 (3.10)의 캐패시터 방전 전류의 시정수를 감안하여 설계한다. L_{eq} 는 도선의 등가 인덕턴스이다.

$$i_C(t) = \frac{V_{dc}}{\omega_1 L_{eq}} e^{-\frac{R_f}{2L_{eq}}t} \sin \omega_1 t \quad (3.10)$$

$$\text{where, } \omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C_o} - \left(\frac{R_f}{2L_{eq}}\right)^2}$$



(a)



(b)

그림 3.6 인덕터 전류의 시뮬레이션 파형: (a) 사고 시; (b) 부하 증가 시.

3.3 AC-DC 컨버터 제어기 설계

VSC+벽 컨버터 회로 구조는 그림 3.7과 같다. VSC는 단상 교류를 입력으로 하여 VSC와 벽 컨버터 사이의 링크 전압을 550V로 정류하며 벽 컨버터는 링크 전압 550V를 직류배전 전압 380V로 변환한다. 제안된 AC-DC 컨버터는 독립적인 두 개의 제어기를 통해서 제어된다. 벽 컨버터는 그림 3.5에 도시한 DC-DC 컨버터의 제어기의 방식으로 제어된다. VSC의 제어는 별개의 이중 루프 제어기를 통해서 이루어진다 [23]. 내부 루프는 교류 측 전류 I_{ac} 를 입력 변수로 하여 계통으로부터의 전력을 제어하고 외부 루프는 링크 전압 V_{link} 를 제어한다.

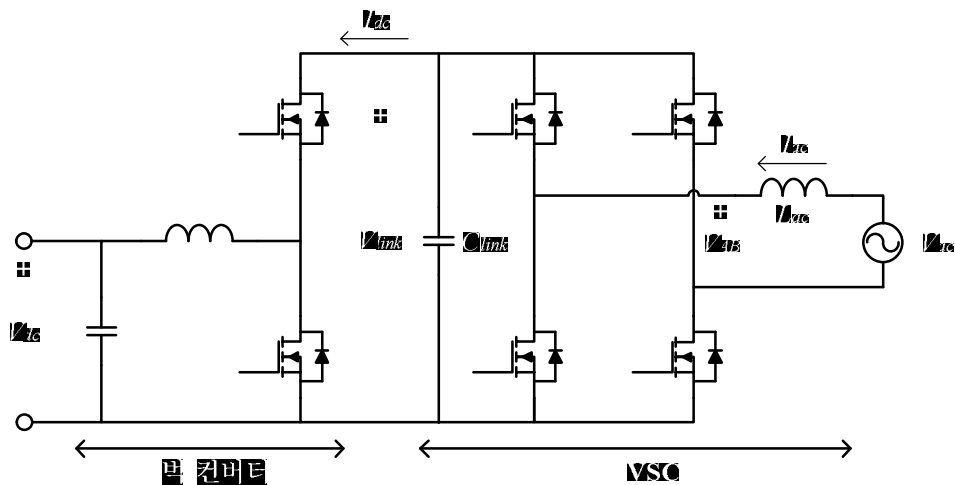


그림 3.7 VSC+벽 컨버터 회로 구조.

3.3.1 기본 제어기 설계

AC-DC 컨버터 제어기의 전체 블록도는 그림 3.8과 같다. 앞서 설명한 것처럼 백-컨버터를 제어하는 제어기는 그림 3.5과 동일하다. VSC 제어기는 이중 루프 제어로 구성되어 있으며 내부 루프는 컨버터의 입력전류 I_{ac} 를 변수로 한다. 외부 루프의 변수는 전력 조건에 따라서 결정된 동작 모드에 따라서 정한다. 1) 일반적인 계통-연결 제어의 경우 VSC의 외부 루프는 V_{ac} 를 입력 변수로 하여 제어하며 2) 직류 전압이 VSC가 아닌 다른 컨버터에 의해 제어될 경우 VSC는 외부 루프 없이 전류 지령을 전달하며 제어한다.

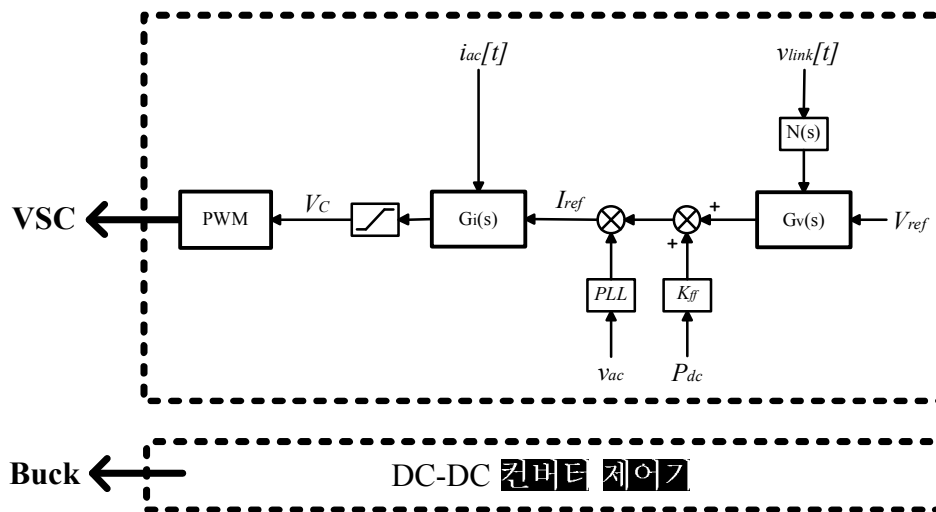


그림 3.8 AC-DC 컨버터 전체 제어기 블록도.

먼저 전류 제어기를 설계하기 위해 VSC의 입력 인덕터 L_{ac} 와 링크 캐

패시터 C_{link} 의 상태 방정식은 식 (3.11)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L_{ac} \frac{di_{ac}}{dt} &= v_{AB} - v_{ac} \\ C_{link} \frac{dv_{link}}{dt} &= -i_{dc} - \frac{v_{link}}{Z_{dc}} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Z_{dc} 는 출력단에 위치한 부하의 임피던스로서 이 경우에는 벡-컨버터의 입력 임피던스이다. 단극성 PWM 제어 방식의 경우 v_{AB} 와 i_{dc} 는 식 (3.12)와 같다.

$$\begin{aligned} v_{AB} &= (2d - 1)v_{Dc} \\ i_{dc} &= (2d - 1)i_{ac} \end{aligned} \quad (3.12)$$

식 (3.11)과 (3.12)를 이용하여 duty-to-current 전달 함수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G_{id} = V_{dc} \frac{2 + Z_{in}C_{dc}s}{d^2Z_{in} + L_{ac}s + Z_{in}L_{ac}C_{dc}s^2} \quad (3.13)$$

내부 루프 전류 제어기는 G_{id} 의 특성을 고려하여 PI-제어기로 설계한다. 식 (3.14)의 전력 균형 방법을 이용하여, 외부 루프 제어기를 설계하기 위해 필요한 컨트롤 전압 V_c 로부터 V_{link} 까지의 전달함수를 식 (3.15)과 같이 구할 수 있다 [24]. 외부 루프 전압 제어기 또한 PI-제어기로 설계하였다.

$$\frac{v_i^2}{k} v_c = v_o i_o \quad (3.14)$$

$$G_{vc} = \frac{V_{acRMS}^2}{KV_{dc}} \frac{Z_{in}}{2 + sC_{dc}Z_{in}} \quad (3.15)$$

3.3.2 피드포워드 제어

앞서 설명한 것처럼 AC-DC 컨버터를 이루는 VSC와 벽-컨버터는 독립적인 제어기를 통해서 개별적으로 제어된다. 따라서, 직류 측 단락사고가 발생했을 때 벽-컨버터는 사고를 일차적으로 경험하고 그보다 앞 단계에 위치한 VSC는 단락사고의 영향을 벽-컨버터를 통하여 간접적으로 경험한다. 게다가 VSC 제어기의 외부 전압 루프는 주파수 대역폭은 10~20Hz로 작은 편이다. 이러한 영향으로 인하여 VSC는 벽-컨버터에 비해서 사고에 대한 반응이 더디게 된다. 결과적으로 사고가 발생했을 때 벽-컨버터의 전달 전력은 빠르게 감소하는 반면 VSC가 전달하는 전력은 느리게 감소하기 때문에 잉여 전력은 링크 캐패시터에 저장되어 V_{link} 의 전압이 일시적으로 상승하게 된다.

이를 해결하기 위하여 본 논문이 제안하는 제어기는 피드포워드 방식을 적용하였다. 피드포워드는 제어기의 과도 응답 성능을 향상시키는 데에 쓰이는 방법으로 주로 PFC 컨버터에서는 출력전류 정보를 피드포워드 변수로 이용한다. 그러나 단락사고 이후 벽-컨버터의 출력전력은 크게 감소하는 양상과 달리 출력전류는 반대로 급격하게 증가하기 때문에 출력전류만을 피드포워드 에 이용하는 것은 오히려 VSC의 과도응답을 악화시킨다. 따라서 피드포워드를 적절히 적용하기 위해서는 벽-컨버터의 출력전력인 P_{dc} 를 변수로 사용해야 하며 이를 그림 3.8에서와 같이 출력전압 V_{dc} 와 출력전류 I_{dc} 의 곱으로 적용한다. 전력 균형의 원칙에 따라서 피드포워드 이득 K_{ff} 는 식 (3.16)와 같다.

$$K_{ff} = \frac{I_{refff}}{P_{dc}} = \frac{\sqrt{2}}{V_{acrms}} \quad (3.16)$$

제 4 장 모의 실험 및 실험 결과

제 4 장에서는 본 논문이 제안하는 직류배전시스템에서의 전력전자 기술을 이용한 단락보호를 검증하는 모의 실험과 실험 결과를 설명한다. 모의 실험을 통해 우선 개별 컨버터의 단락사고에 대한 보호 제어를 검증하고 이를 기반으로 구성된 직류배전시스템에서 발생하는 단락사고 결과를 확인한다. 뒤이은 실험에서는 하프브리지 DC-DC 컨버터의 단락사고에 대한 제어 결과를 검증한다.

4.1 컨버터 동작 모의 실험

4.1.1 DC-DC 컨버터 동작 모의 실험

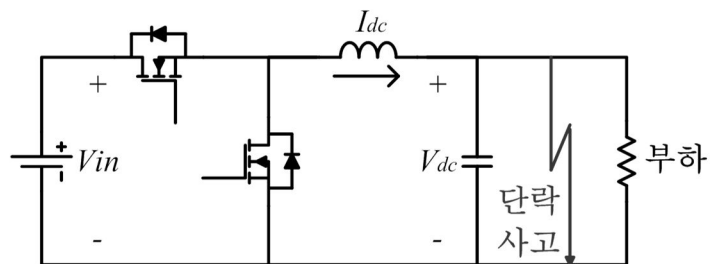


그림 4.1 모의 실험된 DC-DC 컨버터의 회로도

DC-DC 컨버터의 동작 모의 실험은 벡-컨버터를 기반으로 수행했다. 그림 4.1은 모의 실험을 수행한 컨버터의 회로도 및 단락사고를 나타내고 있다. 컨버터는 사고 이전에는 출력전압 V_{dc} 를 380V로 제어하며 부하에 전력을 공급하고 사고 이후에는 컨버터의 출력전류를 제한한 후 일정 시간 후에 컨버터를 정지한다.

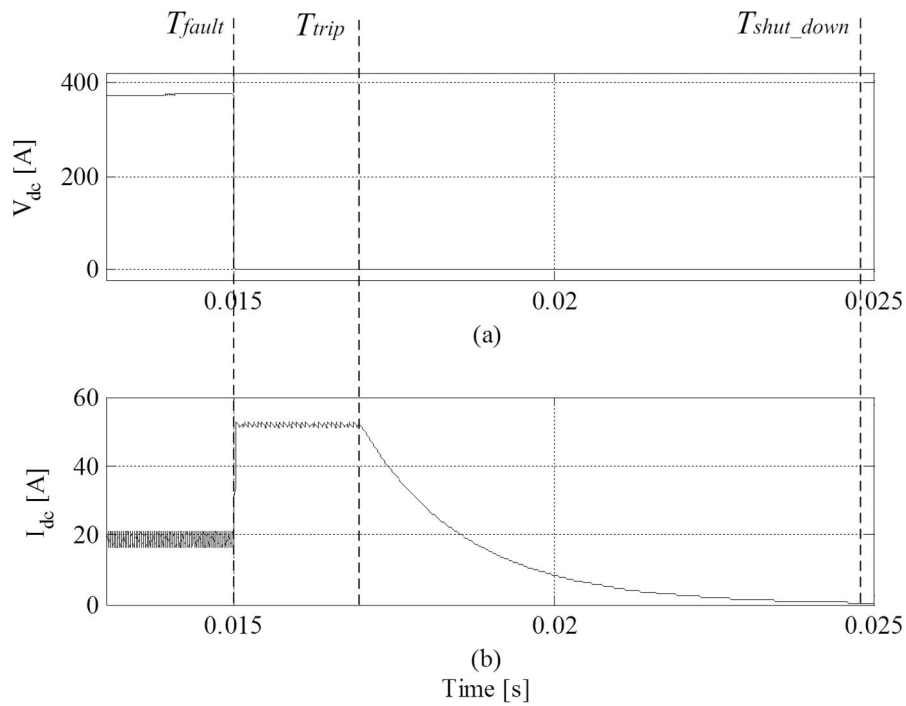


그림 4.2 DC-DC 컨버터의 단락사고 모의 실험 결과: (a) 출력전압 v_{dc} ; (b) 출력전류 i_{dc} .

그림 4.2는 벡-컨버터의 출력 측 단락사고에 대한 컨버터의 모의 실험 결과이다. 단락사고 시각 T_{fault} 이후 컨버터의 출력전압 v_{dc} 은 크게

감소하고 인덕터 전류 i_{dc} 는 최대 전류 값으로 제한되는 것을 확인할 수 있다. 단락사고가 2ms 이상 지속될 경우 컨버터가 차단하도록 설정했기 때문에 T_{trip} 시부터 i_{dc} 가 방전되기 시작하여 약 3ms 이후 (T_{shut_down}) i_{dc} 가 0A가 된다.

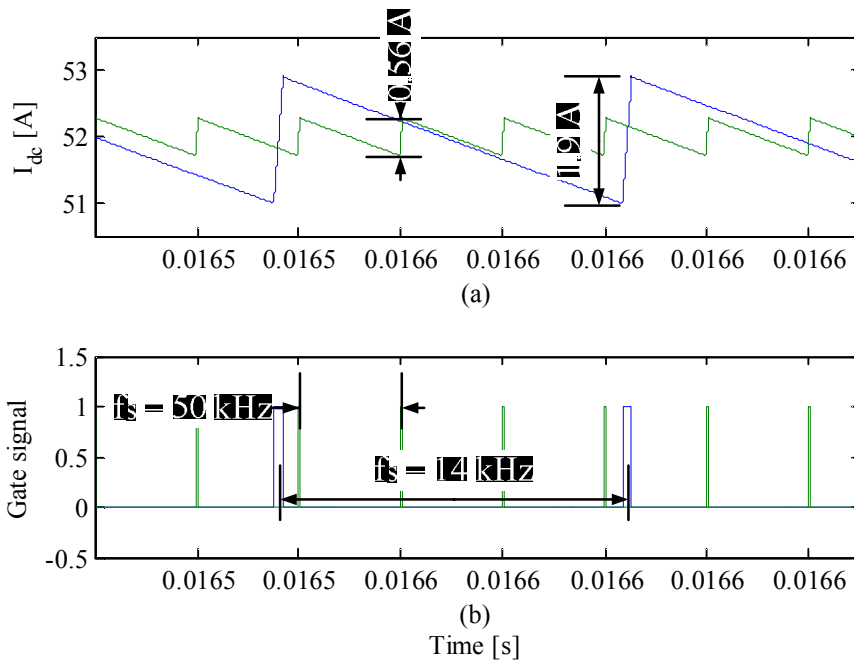


그림 4.3 COT 제어와 PWM 제어의 전류제한 제어 비교 결과: (a) 출력전류 i_{dc} ; (b) 주 스위치 구동 신호.

그림 4.3 은 제 3 장에서 설명한 사고 시의 COT 제어와 PWM 제어를 비교하여 나타낸 결과이다. 그림 4.3 (a)는 출력전류를 나타내고 있으며 초록색으로 도시된 PWM 제어와 파란색으로 도시된 COT 제어 두 경우 모두 출력전류가 최대 전류값인 52 A 로 제어되고 있다. PWM 제어는

사고 이전의 구동 주파수인 50kHz 가 사고 이후에도 50kHz 로 유지되고 출력전류 리플은 0.56 A 인 반면에 COT 제어는 약 14kHz 로 감소하며 출력전류 리플이 1.9 A 로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 위 모의 실험 결과에서는 두 제어 방식 모두 안정적으로 동작하지만 실제 구현 시 PWM 제어 방식을 이용하면 스위치의 온-타임이 짧아서 오동작을 야기할 가능성이 있기 때문에 COT 제어 방식을 이용한다.

4.1.2 AC-DC 컨버터 동작 모의 실험

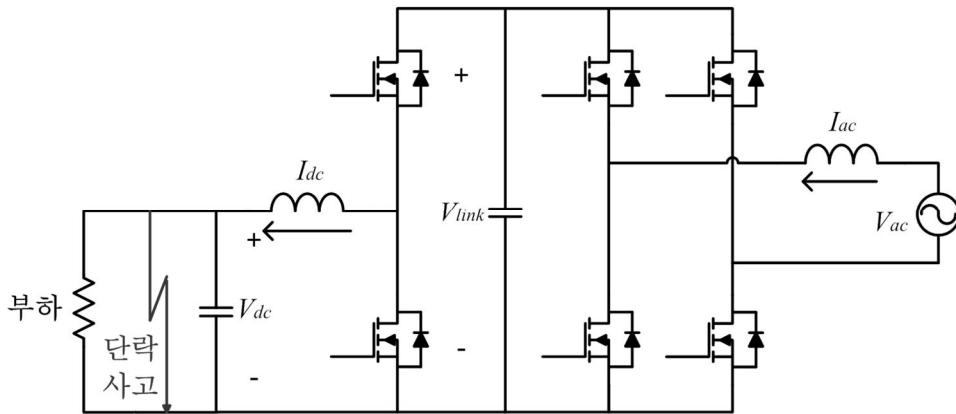


그림 4.4 모의 실험된 AC-DC 컨버터의 회로도

그림 4.4 는 모의 실험을 수행한 AC-DC 컨버터의 회로도 및 단락사고를 나타내고 있다. 회로에 대한 설명은 2 장에 기술되어 있다. 컨버터는 사고 이전에는 출력전압 V_{ac} 를 380V 로 제어하며 부하에 전력을 공급하고 사고 이후에는 컨버터의 출력전류를 제한한 후 일정 시간 후에 컨버터를 정지한다.

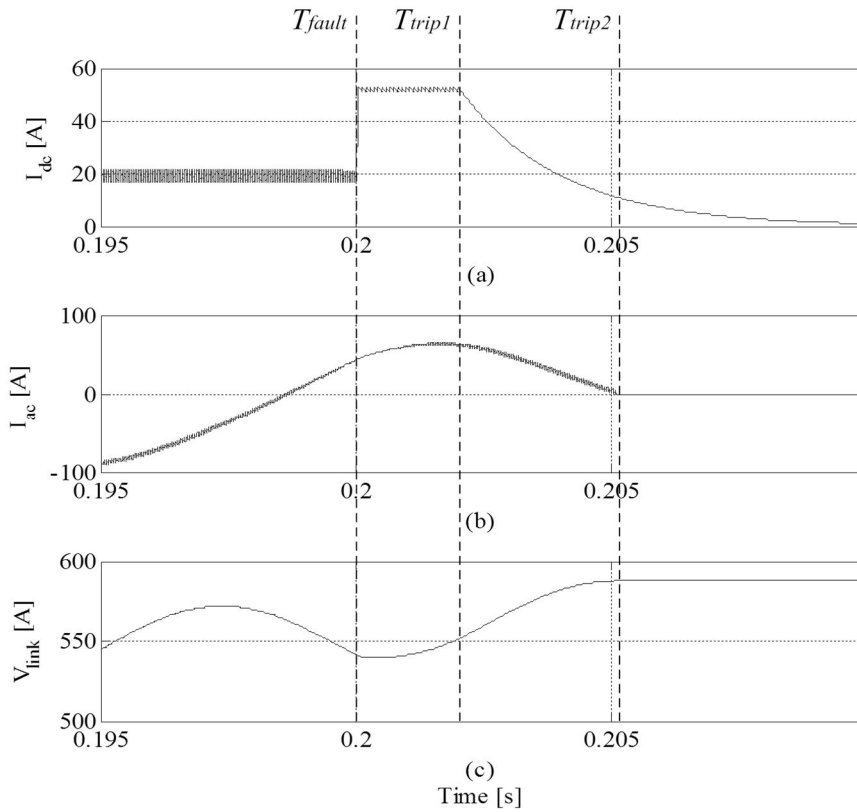


그림 4.5 AC-DC 컨버터의 단락사고 모의 실험 결과 (a) 출력전류 i_{dc} ; (b) 교류 입력전류 i_{ac} ; (c) 링크 전압 V_{link} .

그림 4.5 는 AC-DC 컨버터의 출력 측 단락사고에 대한 컨버터의 모의 실험 결과이다. 단락사고 시각 T_{fault} 이후 컨버터의 출력전압 v_{ac} 은 크게 감소하고 인덕터 전류 i_{ac} 는 최대 전류 값으로 제한되는 것을 확인할 수 있다. 벽-컨버터와 VSC 의 정지는 개별적으로 이루어진다. 우선 단락사고가 2ms 이상 지속될 경우 컨버터가 정지하도록 설정했기 때문에

그림 4.5 (b)에서 볼 수 있듯이 T_{trip1} 시부터 인덕터 전류가 방전되기 시작한다. VSC의 안정적인 정지를 위하여 사고 이후 입력 교류전류 I_{ac} 의 영점교차 순간에 VSC의 정지가 이루어진다. 그림 4.5 (c)에서 사고 이후 T_{trip2} 에서 VSC의 동작이 차단되어 I_{ac} 가 0A, 링크 전압 V_{link} 는 약 580V로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

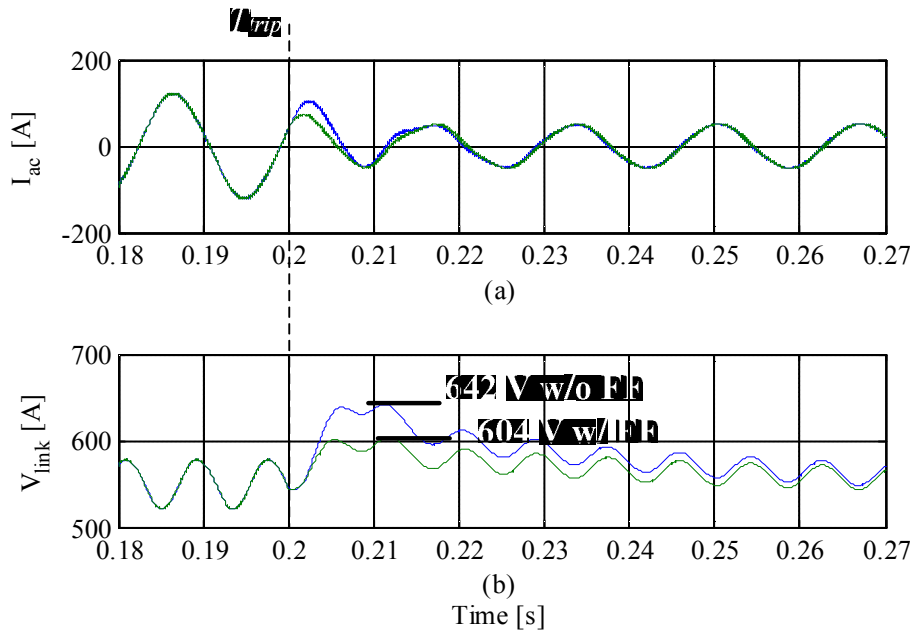


그림 4.6 피드포워드를 적용한 VSC의 시뮬레이션 파형: (a) VSC 입력전류; (b) 링크 전압 (파란색과 초록색 파형은 각각 피드포워드를 적용하지 않았을 때, 적용했을 때의 파형).

그림 4.6은 피드포워드의 적용 여부에 따른 VSC의 사고 과도응답 특성을 비교하고 있다. 사고 발생 시각 T_{trip} 이후 그림 4.6 (b)에서처럼

입력 교류 전류인 I_{ac} 가 피드포워드를 적용했을 때 더 빨리 응답하며 이에 따라서 링크 캐패시터의 전압 V_{link} 의 최대 증가치 또한 감소한다는 것을 확인할 수 있다.

4.2 직류배전 단락사고 모의 실험

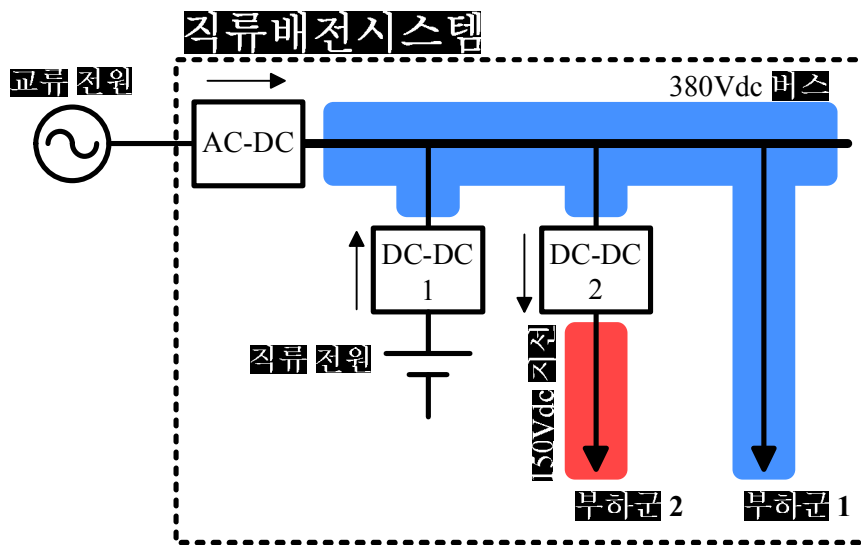


그림 4.7 직류배전 단락사고 모의 실험 개요.

그림 4.7 은 직류배전 단락사고 모의 실험을 수행하는 대상 시스템의 단선도이다. 교류 전원과 직류 전원은 각각 AC-DC 컨버터와 DC-DC 컨버터를 통해서 직류배전시스템에 연결된다. 교류 전원은 시스템의 동작 모드에 따라서 양방향 전력 제어를 한다. 한편 직류 전원이 배터리일 경우에 DC-DC 컨버터는 양방향 제어를 하며 그 외의 경우에는 단방향

제어를 한다. 또한 주-버스의 380V 를 부하가 이용 가능한 전압으로 변환하는 기능은 DC-DC 컨버터가 수행한다. 표 4.1 은 정상 동작 모드일 때 각 컨버터와 부하군의 기능 및 전력을 나타내었다. 전력은 그림 4.7 에 표시된 방향으로 전달된다.

표 4.1 정상 동작 모드에서의 컨버터와 부하 제원

분류		기능	전력
컨버터	AC-DC	계통 전력 정류	8.2 kW
	DC-DC 1	배터리 전력 전달	2.1 kW
	DC-DC 2	380V 버스 → 150V 지선	3 kW
부하	부하군 1	버스 연결 부하	7.2 kW
	부하군 2	지선 연결 부하	3 kW

그림 4.7 에서 파란색으로 표시된 부분은 직류배전시스템의 직류 380V 의 주-버스(main-bus)이며 빨간색으로 표시된 부분은 중간 DC-DC 컨버터를 통해서 제어되는 직류 150V 의 지선(feeder)이다. 직류배전의 단락사고 모의 실험은 버스에서 발생하는 단락사고와 지선에서 발생하는 단락사고의 두 가지 사고에 대해서 진행하였다.

4.2.1 버스 단락사고 모의 실험

그림 4.8 은 버스 단락사고의 모의 실험 결과이다. 버스 단락사고는 직류배전시스템에 전력을 공급하는 전력 모듈인 AC-DC 컨버터와 DC-DC 컨버터 1 을 통해서 차단한다. 그림 4.8 (b)와 (c)에서 사고 시각 T_{fault} 이후

AC-DC 컨버터의 출력전류 i_{ac} 와 DC-DC 컨버터 1 의 출력전류 i_{dc1} 이 각각 50A 와 22A 로 제한된 이후 차단 시각 T_{trip} 때 두 컨버터가 모두 정지하는 것을 확인할 수 있다. 주-버스의 전력이 차단되었기 때문에 부하군 2 에 공급되는 전류 i_{dc2} 또한 0A 가 된다.

4.2.2 지선 단락사고 모의 실험

그림 4.9 는 지선 단락사고의 모의 실험 결과이다. 지선 단락사고는 부하군 2 가 연결된 지선에 전력을 공급하는 DC-DC 컨버터 2 에 의해서 차단한다. 그림 4.9 (e)에서 사고 시각 T_{fault} 이후 DC-DC 컨버터 2 의 출력전류 i_{dc2} 가 30A 로 제한된 이후 차단 시각 T_{trip} 때 컨버터의 정지가 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 사고 이후에도 버스에 전력을 공급하는 전력 모듈은 정상적으로 동작하여 버스 전압은 지선 사고에 의해 약 17V 의 과도 응답을 보인 후 정상 전압으로 복귀한다. DC-DC 컨버터 1 은 사고 이전과 동일하게 5.5A 를 공급하고 AC-DC 컨버터는 직류 배전망의 380V 를 유지하며 제어한다.

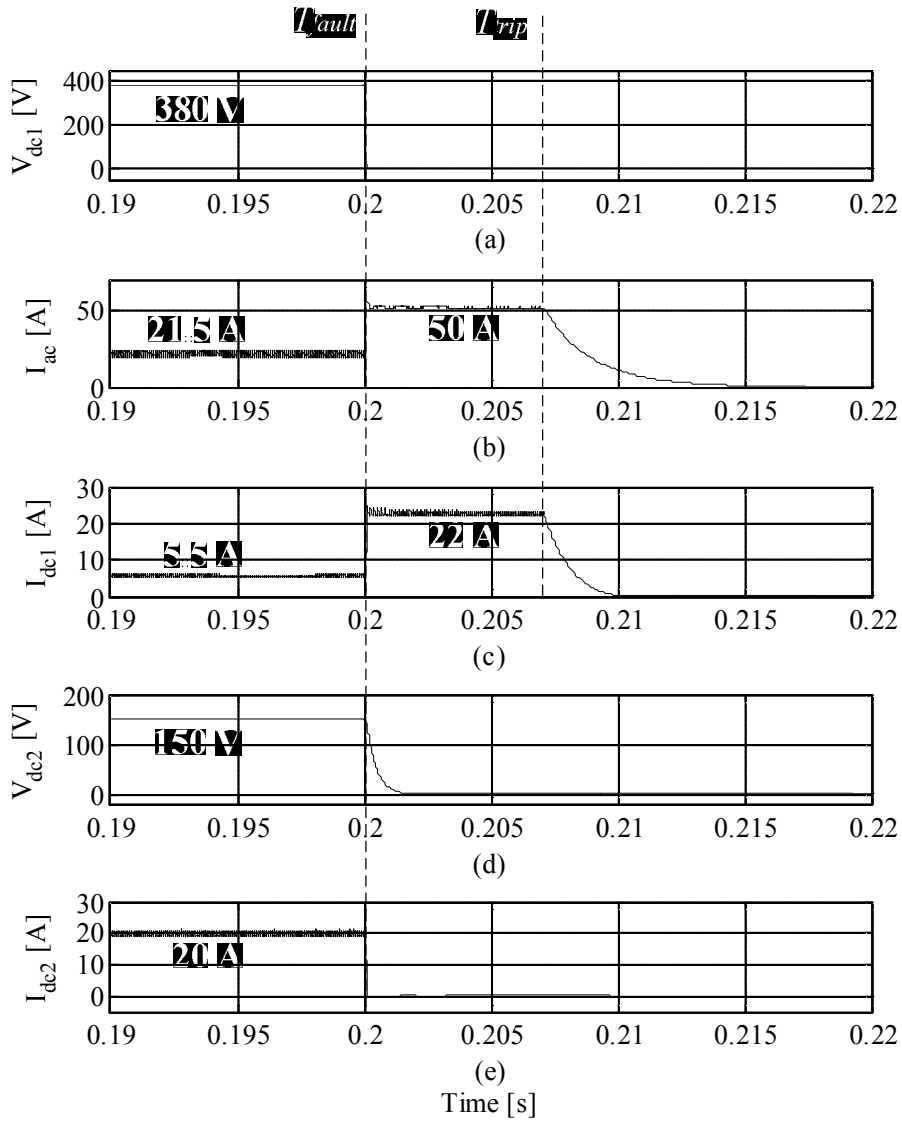


그림 4.8 버스 단락사고 모의 실험 결과: (a) 버스 전압 v_{dc1} ; (b) DC-DC 컨버터 1의 출력전류 i_{dc1} ; (c) AC-DC 컨버터의 출력전류 i_{ac} ; (d) 지선 전압 v_{dc2} ; (e) 부하 2의 전류 i_{load2} .

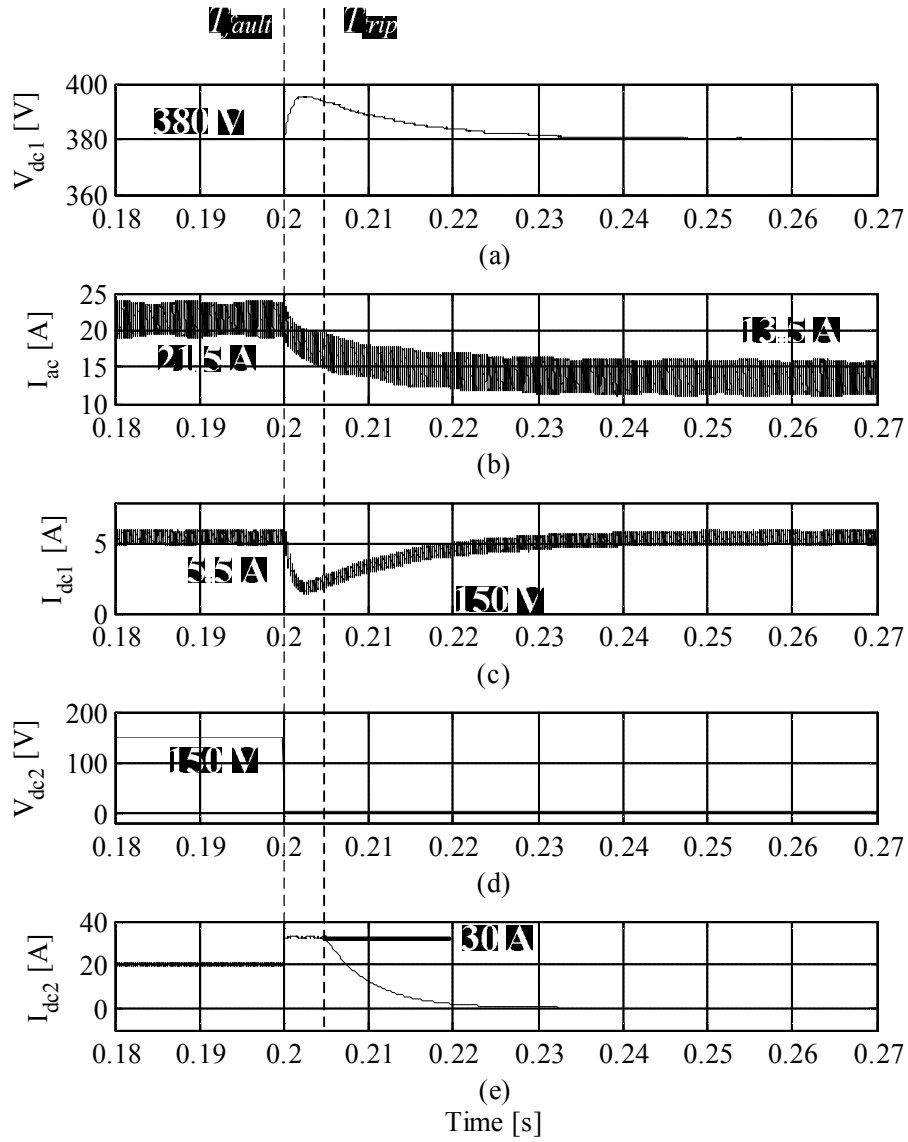


그림 4.9 버스 단락사고 모의 실험 결과: (a) 버스 전압 v_{dc1} ; (b) AC-DC 컨버터의 출력전류 i_{ac} ; (c) DC-DC 컨버터 1의 출력전류 i_{dc1} ; (d) 지선 전압 v_{dc2} ; (e) DC-DC 컨버터 2의 출력전류 i_{dc2}

4.3 DC-DC 컨버터 단락사고 실험 결과

실험은 그림 4.10 의 하프브리지 DC-DC 컨버터를 대상으로 했으며 컨버터의 제원은 표 4.2 와 같다. 안정한 실험을 위하여 컨버터의 용량을 소형화 했으며 컨버터의 제어기는 DSP 제어기 내에 구현했다. 단락사고 부하는 전기 부하기의 계단 변동(step change)으로 구현했다.

표 4.2 실험용 DC-DC 컨버터 제원

DC-DC 컨버터	토폴로지	하프-브리지
	구동 주파수	50 kHz
	전압 변환	60 V → 100 V
	최대 전류	2 A
	인덕터	300 uH
	캐패시터	100 uF
디지털 컨트롤러	제품명	TMS320x28335
	제조사	Texas Instruments
부하	제품명	PZK1003WH
	제조사	KIKUSUI
	모의 사고 부하	4 Ohm

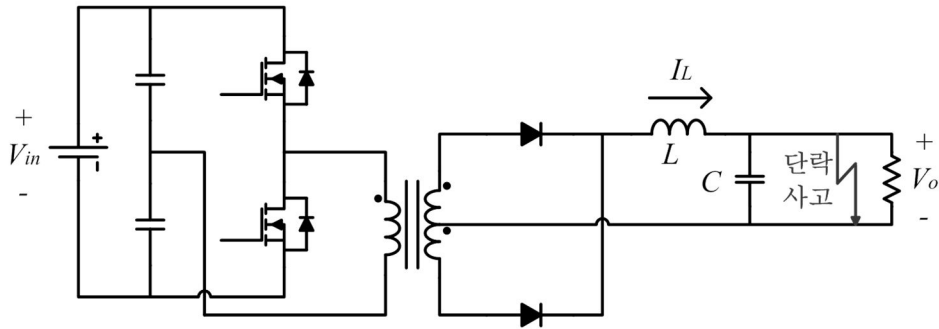
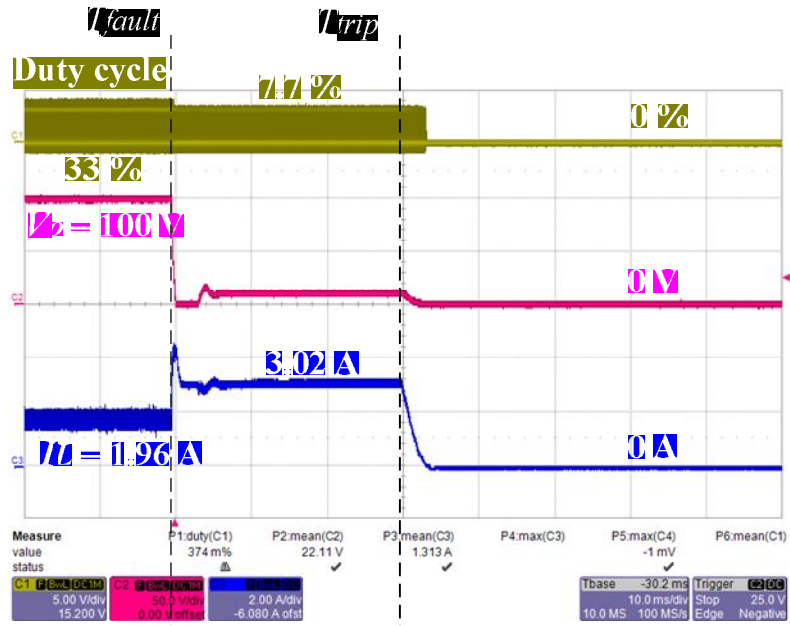


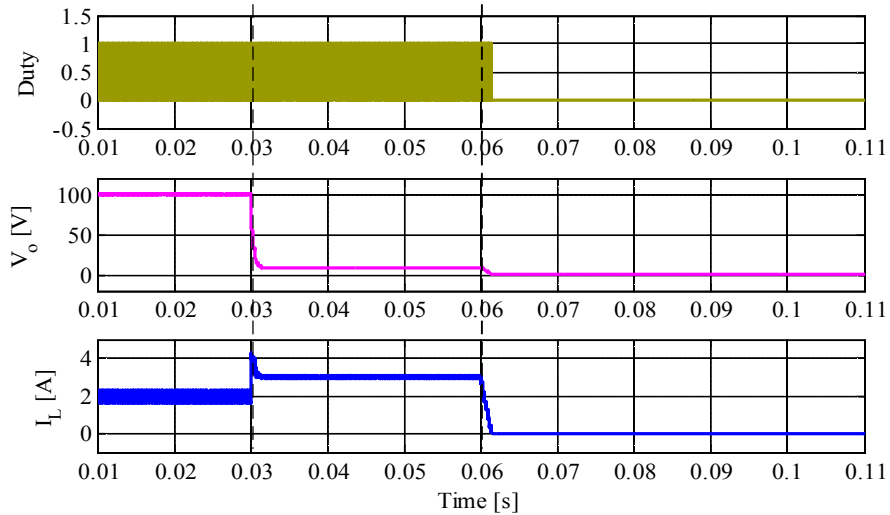
그림 4.10 실험용 DC-DC 컨버터의 회로도

그림 4.10 은 DC-DC 컨버터의 출력 측 단락사고에 관한 실험 결과를 모의 실험 결과와 비교하였다. 그림 4.10 (a)의 실험 결과와 같이 사고 이전 컨버터는 부하에 100V 전압을 제어하며 출력전류 1.96A 를 유지한다. 사고 시각 T_{fault} 이후 모의된 단락사고로 인해 컨버터의 출력전압은 0V 로 급감하며 동시에 출력전류는 최대전류인 3A 로 제어된다. 사고가 약 3ms 이상 지속된 후 T_{trip} 에 컨버터는 정지하여 사고를 차단한다. 실험과 모의 실험은 전반적으로 비슷한 결과를 보여주는 한편, 사고 직후 전류 파형은 다소 다르게 나타나는 이유는 전류 센서의 부정확성과 단락사고를 모의한 부하기 특성에 의한 것이라고 추측한다.

그림 4.11 은 각각 정상 동작 모드일 때와 사고 시의 전류제한 모드일 때의 컨버터의 스위치 게이트 신호를 확대한 파형이다. 그림에서 확인할 수 있는 것처럼 정상 동작 모드에서는 듀티가 33%로, 전류제한 모드에서는 7.7%로 유지된다.

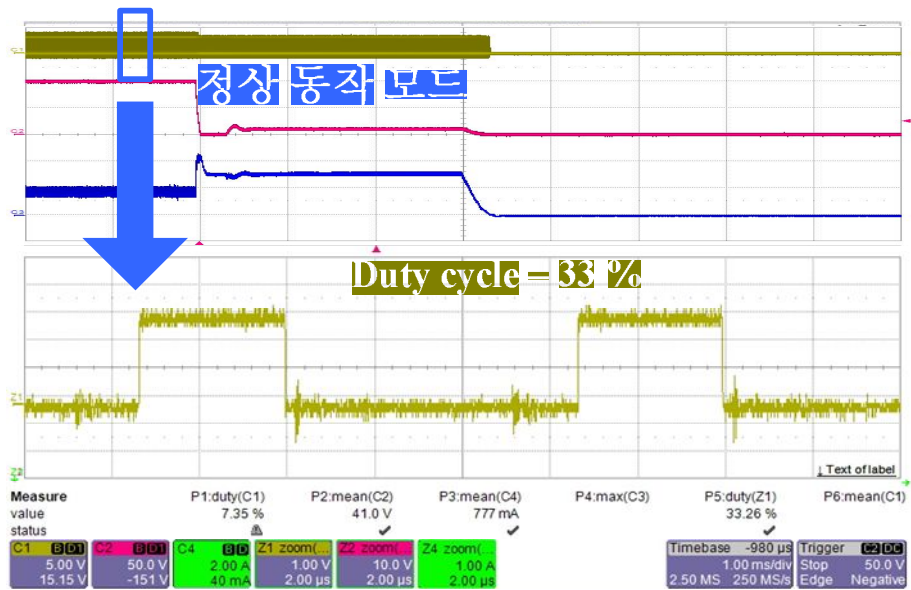


(a)

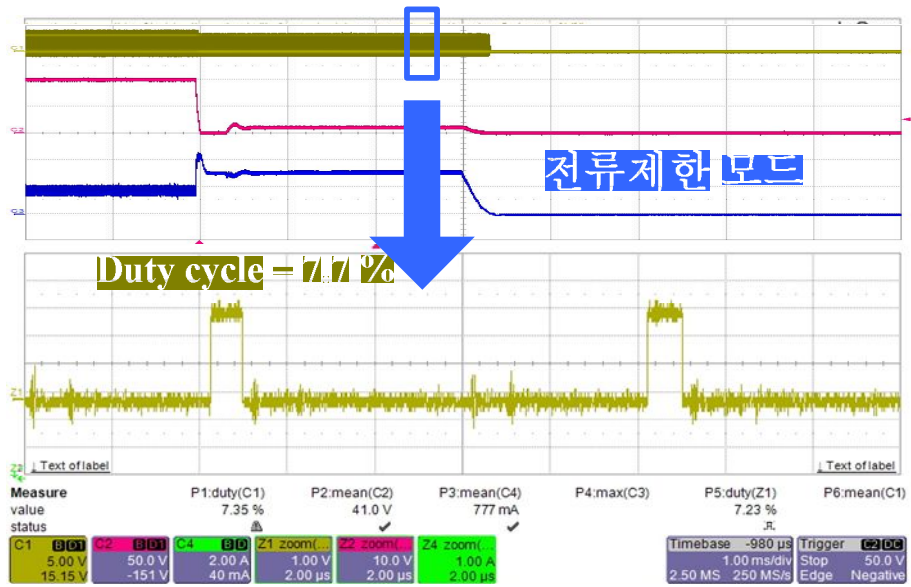


(b)

그림 4.11 DC-DC 컨버터 단락사고 결과: (a) 실험 결과 (b) 모의 실험 결과



(a)



(b)

그림 4.12 단락사고 실험의 듀티 확대 파형: (a) 정상 동작 모드 (b) 전류제한 모드

제 5 장 결론 및 향후 연구

본 논문에서 직류배전시스템에서 발생하는 단락사고에 대한 보호를 위하여 전력전자 요소를 이용하는 방법에 대하여 제안하였다. 우선 AC-DC 컨버터와 DC-DC 컨버터의 토폴로지 별 비교를 통해서 각 토폴로지의 타당성에 대해서 검토하였다. 보호 기능의 적합성을 기준으로 AC-DC 컨버터로서는 VSC+벽 컨버터, DC-DC 컨버터로서는 브리지형 컨버터를 선정하였다. 이들 컨버터에 대한 제어기 설계를 통해 정상 동작 모드와 단락사고 시 전류제한 모드에서 의도한 제어 성능을 획득하였다. 제안한 방법은 모의 실험과 실험을 통해서 검증하였다.

본 논문의 실험은 DC-DC 컨버터에 대해서 수행되었는데 향후 연구로서는 AC-DC 컨버터의 동작 또한 실험을 통해 검증해야 할 것이다. 선정된 토폴로지와 제어기의 성능을 실험 결과를 통해 확인하고 이를 기반으로 단순화된 직류배전시스템에 대해서도 단락사고 보호 기능을 실험한다.

직류배전시스템을 위한 보호 시스템에 대한 연구가 더욱 철저히 이루어져야 할 것이다. 보호 시스템을 구축하기 위해 다양한 보호 장치 및 사고 측정 기술과 보호용 릴레이 기능에 대한 연구도 수반되어야 한다. 또한, 단락사고 외의 접지-, 고저항-, 아크 사고 등의 잠재적인 사고들에 대해서도 연구를 한다. 한편, 실제적인 전력원으로서 다양한 신재생 에너지원, 에너지 저장 시스템의 특성을 고려한 사고 특성을 연구해야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Sannino, A., Postiglione, G., and Bollen, M.H.J., "Feasibility of a DC network for commercial facilities," Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the , vol.3, no., pp.1710-1717 vol.3, 13-18 Oct. 2002.
- [2] Ton, M., Fortenbery, B., and Tschudi, W., "DC Power for Improved Data Center Efficiency", Lawrence Berkeley National Laboratory Report, March, 2008.
- [3] Browne, T.J., and Browne, N.R., "Power quality considerations for utilities supplying residential DC installations," Harmonics and Quality of Power, 2008. ICHQP 2008. 13th International Conference on , vol., no., pp.1-5, Sept. 28 2008-Oct. 1 2008.
- [4] A. Agustoni, M. Brenna, E. Tironi, and G. Ubezio, "Proposal for a high quality dc network with distributed generation", 17th International Conference on Electricity Distribution, CIRED, 12-15 May 2003, Bracelona.
- [5] Saisho, M., Ise, T., and Tsuji, K., "DC loop type quality control center for FRIENDS-system configuration and circuits of power factor correctors," Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES , vol.3, no., pp. 2117- 2122 vol.3, 6-10 Oct. 2002.
- [6] Khan, S., Khan, S., and Ahmed, G., *Industrial Power Systems*, CRC Press, 2007.
- [7] Cuzner, R.M., and Venkataramanan, G., "The Status of DC Micro-Grid Protection," Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS '08. IEEE , vol., no., pp.1-8, 5-9 Oct. 2008.
- [8] Doyle, M.T., "Reviewing the impacts of distributed generation on distribution system protection," Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE , vol.1, no., pp.103-105 vol.1, 25-25 July 2002.
- [9] Yuxin Li, Huang, A.Q., and Lee, F.C., "Introducing the emitter turn-off

thyristor (ETO)," Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE , vol.2, no., pp.860-864 vol.2, 12-15 Oct. 1998

[10] Meyer, J.-M., and Rufer, A., "A DC hybrid circuit breaker with ultra-fast contact opening and integrated gate-commutated thyristors (IGCTs)," Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.21, no.2, pp. 646- 651, April 2006.

[11] Lianxiang Tang, and Boon-Teck Ooi, "Locating and Isolating DC Faults in Multi-Terminal DC Systems," Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.22, no.3, pp.1877-1884, July 2007.

[12] Laaksonen, H.J., "Protection Principles for Future Microgrids," Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.25, no.12, pp.2910-2918, Dec. 2010.

[13] Tucker, J., Martin, D., Mersenski, R., Barkley, A., Cairoli, P., Ghisla, U., Riccobono, A., Dougal, R., and Santi, E., "Fault protection and ride-through scheme for MVDC power distribution systems utilizing a supervisory controller," Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), 2011 IEEE , vol., no., pp.319-325, 10-13 April 2011.

[14] Prasai, A., Yi Du, Paquette, A., Buck, E., Harley, R., and Divan, D., "Protection of meshed microgrids with communication overlay," Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE , vol., no., pp.64-71, 12-16 Sept. 2010.

[15] Mesut E. Baran, and Nikhil R. Mahajan, "Overcurrent Protection on Voltage-Source-Converter-Based Multiterminal DC Distribution Systems," Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.22, no.1, pp.406-412, Jan. 2007.

[16] Nuutinen, P., Peltoniemi, P., and Silventoinen, P., "Short-Circuit Protection in a Converter-Fed Low-Voltage Distribution Network," Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.28, no.4, pp.1587-1597, April 2013.

[17] Cairoli, P., Kondratiev, I., and Dougal, R. A., "Coordinated Control of the Bus Tie Switches and Power Supply Converters for Fault Protection in DC Microgrids," Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.28, no.4, pp.2037-2047, April 2013.

[18] Jin Yang, Fletcher, J.E., and O'Reilly, J., "Multiterminal DC Wind Farm Collection Grid Internal Fault Analysis and Protection Design," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.25, no.4, pp.2308-2318, Oct. 2010.

[19] Fang Ming, Fu Lijun, Wang Ruitian, and Ye Zhihao, "Coordination protection for DC distribution network in DC zonal shipboard power system," *Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on*, vol.1, no., pp.418-421, 16-20 Oct. 2011.

[20] IEC Standard 61660-1, "Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations - Part 1: Calculation of short-circuit currents", 2008.

[21] Mahajan, N. R., *System Protection for Power Electronic Building Block Based DC Distribution Systems*, Ph.D Dissertation, North Carolina State University, Nov. 2004.

[22] Salomonsson, D. and Sannino, A., "Centralized ac/dc Power Conversion for Electronic Loads in a Low-Voltage dc Power System," *Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE*, vol., no., pp. 1- 7, 18-22 June 2006.

[23] Dong D. and Boroyevich, D., "A two-stage high power density single-phase ac-dc bi-directional PWM converter for renewable energy systems," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE*, vol., no., pp.3862-3869, 12-16 Sept. 2010

[24] R. B. Ridley, "Average Small-Signal Analysis of the Boost Power Factor Correction Circuit", *Proceedings of the Virginia Power Electronics Seminar*, pp. 108-120.

ABSTRACT

Topology and Control Design of Converters for Short-circuit Fault Protection in DC Distribution System

Recently, dc systems are asserted to be an alternative of current ac networks for their enhanced system efficiency and power quality. This concept is merged with the introduction of microgrid systems with the emergence of renewable energy sources (RES). Microgrid systems contain multiple distributed generations (DG) as well as the grid. Many literatures have investigated the feasibility of DC microgrid systems, and proposed various configurations and controls.

In this thesis, power electronics building blocks (PEBB) are exploited to effectively protect the short-circuit faults in DC distribution systems. In the DC distribution systems where the most of electrical sources and loads are connected through converters, the potential hazards from the short-circuit faults can be minimized using the converters.

Topological comparisons on various AC-DC and DC-DC converters are researched with respect to their short-circuit characteristics and protective functionalities. VSC+buck and the bridge-type converters are chosen as an AC-DC and DC-DC converter to isolate the faults in fast and reliable manner.

The control schemes to limit the converter fault currents are proposed. The proposed control schemes are verified through simulations and experiments.

Keywords : DC distribution system, short-circuit fault, protection system, converter control

Student Number : 2011-20942

감사의 글

짧다면 짧고 길다면 긴 2년 간의 석사 과정을 마무리하는 논문 제출을 목전에 두고 있습니다. 전력전자의 기초도 모르고 발을 들여놓고는 우왕좌왕하며 석사 과정을 마치는 데에는 많은 분들의 도움이 있어서 가능하였기에 짧은 지면을 통하여 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

언제나 학생들에 대한 믿음과 신뢰를 기반으로 가르쳐주신 조보형 교수님께 감사 드립니다. 교수님의 온화한 리더십이 없었다면 연구실 한 구석에 자리를 잡아 연구자의 생활에 적응하는 것이 쉽지 않았을 것입니다. 더불어 여러 번의 심사과정을 거치며 진심 어린 충고의 말씀을 아끼지 않으셨던 정현교 교수님과 윤용태 교수님께도 감사의 말씀을 올립니다. 심사 기간 동안 교수님들의 지도하에서의 배움이 앞으로의 제 연구에 큰 도움이 될 것이라 믿습니다.

빈 연구실에서 시작했던 연구실이 이제는 다양한 참고자료와 실험 장비들로 채워져 후배들이 자유롭게 연구할 수 있는 연구 환경을 가질 수 있던 것은 선배님들의 덕분입니다. 졸업생 선배님들을 포함한 모든 선배님들께 감사의 말씀을 올립니다. 저의 연구에 언제나 관심을 가져주시고 조언을 해주신 중훈이형, 종원이형, 종복이형, 규식이형, 갑수형, 승운이형, 창운이형, 바울이형, 혜진이형, 재준이형, 철우형께 감사 드립니다. 유일한 동기 제현이형, 그리고 기봉이형, 두호형, 준혁이형 세 후배 형들, 신입생 상우와 성현이에게도 감사와 축복의 말씀을 전합니다.

제가 하는 모든 일은 격려해주시되 잘못된 행동과 생각에 대해 꾸짖어 주시며 저를 키워주신 아버지와 어머니께 깊은 감사의 말씀 올립니다. 부모님의 기대와 사랑에 보답하는 아들이 되겠습니다. 또한 언제나 힘이 되어준 나의 아끼는 오누이들, 과거에도 미래에도 나와 함께 길을 걸어갈 나의 친구들, 저의 투정을 가장 가까이서 받아준 동희양에게도 감사하다는 말씀 전하고 싶습니다.

석사 졸업과 동시에 몇 년이 될지도 모르는 박사 과정을 들어가며 지금의 각오를 잊지 않고 열심히 하겠습니다.

2013년 1월

최우인 올림