



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](#)

2019年 8月
博士學位論文

HVDC 계통 신뢰도 향상을 위한
한류형 초전도 DC 차단기에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

崔惠願

2019年
8月
博士學位論文

HVDC 계통 신뢰도 향상을 위한 한류형 초전도 DC 차단기에 관한 연구

崔惠願

HVDC 계통 신뢰도 향상을 위한 한류형 초전도 DC 차단기에 관한 연구

A Study on the Current-limiting Type Superconducting DC
Circuit Breaker for the Reliability Improvement in HVDC Power System

2019年 8月 23日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

崔惠願

HVDC 계통 신뢰도 향상을 위한 한류형 초전도 DC 차단기에 관한 연구

指導教授 崔 孝 祥

이 論文을 工學 博士學位申請 論文으로 提出함.

2019年 04月

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

崔惠願의 博士學位 論文을 認准함.

委員長 朝鮮大學校 教授 曹錦培 印

委員 朝鮮大學校 教授 金容載 印

委員 朝鮮大學校 教授 金南勳 印

委員 東岡大學校 教授 鄭柄益 印

委員 朝鮮大學校 教授 崔孝祥 印

2019年 06月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT	x
I. 서 론	1
A. 연구배경 및 필요성	1
B. 연구동향	3
C. 연구목적 및 연구범위	6
II. 이론적 배경	9
A. DC 관련 이론	9
1. DC 차단방식 및 차단성능	9
2. HVDC 시스템 구간전압 및 종류	12
3. DC 시스템의 고장전류 기여요인	17
B. 한류형 초전도 DC 차단기의 구조 및 메커니즘	18
1. 구조	18
2. 메커니즘	20
C. 한류형 초전도 DC 차단기	23
1. 초전도 특성	23
2. DC 차단기 아크(Arc)	24

III. PSCAD/EMTDC를 활용한 설계 및 해석	26
A. 설계	26
1. 한류부 HTS	28
2. 차단부 M-DCCB	31
B. 동작특성 해석	36
1. 초전도체 결합 유무에 따른 차단특성	37
2. 차단기 타입별 100[kV]급 차단특성	43
3. 초전도체 결합에 따른 DC 차단기의 차단용량 범위	51
4. 초전도체 결합에 따른 DC 차단기 용량저감 특성	54
C. 계통연계형 PV 시스템에 적용된 경우 특성해석	56
1. DC 시스템 연계를 위한 신재생에너지원 선정	56
2. 계통연계형 PV 시스템 설계	56
3. 과도상태 해석	62
D. VSC-HVDC 시스템에 적용된 경우 특성해석	66
1. VSC-HVDC 시스템의 설계 및 해석 시 고려사항	66
2. 과도상태 해석	72
E. 결 언	82
IV. 실험 및 결과 고찰	84
A. 실험순서도	84

B. DC 전력시험 설비구축	85
1. DC 전원공급설비	85
2. 사고발생장치	88
3. 측정설비	92
4. 냉각시스템	93
C. 제작	95
1. 한류부 선정 및 적용	95
2. 차단부 선정 및 동작성능 실험	101
D. 실험 및 분석	105
1. 실험조건	105
2. 실험분석	107
E. 초전도선재의 인덕턴스 성분을 고려한 특성실험	133
1. 실험조건	133
2. 실험분석	136
F. 결 언	138
V. 결 론	140

참고문헌

List of Tables

Table 2-1 Performances of the existing circuit breakers	11
Table 2-2 Comparison of CSC-HVDC and VSC-HVDC system	15
Table 3-1 Design values of the simulation circuit	27
Table 3-2 Interruption characteristics according to the variation of the C value	34
Table 3-3 Interruption characteristics values of the 5[MVA] M-DCCB according to the existence or absence of a superconductor	42
Table 3-4 Comparison of the performances of between the existing circuit breakers and CLS-DCCB	43
Table 3-5 Interruption characteristics values at 100[kV] by the existence of a superconductor and the circuit breaker type	50
Table 3-6 Cut-off range of CLS-DCCB according to increasing voltage	53
Table 3-7 PV array design value	60
Table 3-8 Exceeded status of AC 345, 154[kV] fault current interruption capacity	67
Table 3-9 Comparison of AC, DC XLPE and HTS cable capacities	67
Table 4-1 Battery specification(LM150-12E)	86
Table 4-2 Set-up values of the fault generator equipment characteristics test	90
Table 4-3 HTS wire bobbin design value	99
Table 4-4 Parameter values according to HTS wire length	99
Table 4-5 Appropriate temperature and time criteria for the soldering work of AMSC 8602	100
Table 4-6 CLS-DCCB experimental variable design conditions	106
Table 4-7 Results of test 1	110
Table 4-8 Results of test 2	113

Table 4-9 Results of test 3	115
Table 4-10 Results of test 4	118
Table 4-11 Results of test 5	121
Table 4-12 Results of test 6	123
Table 4-13 Results of test 7	126
Table 4-14 Results of test 8	128
Table 4-15 Results of test 9	130
Table 4-16 HTS wire design values	133
Table 4-17 Results according to inductance values of HTS wire	136

List of Figures

Fig. 2-1 DC interruption method	9
Fig. 2-2 AC, DC voltage range(CIGRE 2018)	12
Fig. 2-3 CSC-HVDC system structure	13
Fig. 2-4 VSC-HVDC system structure	14
Fig. 2-5 CLS-DCCB structure	18
Fig. 2-6 Comparison of cut-off operation and loss according to CB types	19
Fig. 2-7 CLS-DCCB circuit diagram	20
Fig. 2-8 The voltage and current curves of CLS-DCCB	21
Fig. 3-1 CLS-DCCB simulation circuit	26
Fig. 3-2 Superconductor design algorithm	28
Fig. 3-3 Current-limiting characteristics according to current-limiting impedance magnitude of HTS	29
Fig. 3-4 characteristics curve of the designed superconductor	30
Fig. 3-5 Zero crossing curves according to the variation of the C value	33
Fig. 3-6 Interruption curves according to the variation of the C value	34
Fig. 3-7 Circuit structure of various CB types	36
Fig. 3-8 Operation characteristics when only M-DCCB is applied	38
Fig. 3-9 Operation characteristics when M-DCCB is applied without HTS	39
Fig. 3-10 Operation characteristics when CLS-DCCB is applied	41
Fig. 3-11 Operation characteristics when only M-DCCB is applied	44
Fig. 3-12 Operation characteristics when M-DCCB is applied without HTS	46
Fig. 3-13 Operation characteristics when CLS-DCCB is applied	48
Fig. 3-14 Application of M-DCCB(DC 110[kV])	52
Fig. 3-15 Application of CLS-DCCB(DC 110~450[kV])	52

Fig. 3-16 DCCB capacity reduction characteristics in case of a superconductor addition	55
Fig. 3-17 PV array circuit	59
Fig. 3-18 Grid connected PV system circuit	61
Fig. 3-19 Operation characteristics when only M-DCCB is applied in the PV system	63
Fig. 3-20 Operation characteristics when CLS-DCCB is applied in the PV system	65
Fig. 3-21 Conceptual diagram of VSC-HVDC	66
Fig. 3-22 The active and reactive power of VSC-HVDC system	66
Fig. 3-23 100[MVA]scale DC 120[kV] VSC-HVDC system circuit diagram	69
Fig. 3-24 Fault characteristics for a 1-line-to-ground fault from the AC line	72
Fig. 3-25 Fault characteristics for a 1-line-ground-fault on the AC line when CLS-DCCB is applied	74
Fig. 3-26 Fault characteristics for a 3-line-short-fault on the AC line	76
Fig. 3-27 Fault characteristics for a 3-line-short-fault on the AC line when CLS-DCCB is applied	78
Fig. 3-28 Fault characteristics for a ground-fault on the DC line	80
Fig. 3-29 Fault characteristics for a ground fault on the DC line when CLS-DCCB is applied	81
Fig. 4-1 Simulated DC power test equipment	86
Fig. 4-2 Battery bank	86
Fig. 4-3 DC power supply	87
Fig. 4-4 Fault generator controller	87
Fig. 4-5 Circuit diagram of the interior of the fault generator	89
Fig. 4-6 Interior of the fault generator	89
Fig. 4-7 Normal load	90

Fig. 4-8 Fault generator operation test	91
Fig. 4-9 Scopecorder	92
Fig. 4-10 DC current probe	92
Fig. 4-11 Cryogenic cooling equipment blueprint	93
Fig. 4-12 Cryogenic cooling equipment	94
Fig. 4-13 HTS cooling system	94
Fig. 4-14 HTS selection process	96
Fig. 4-15 HTS wires	99
Fig. 4-16 Quick 936	100
Fig. 4-17 GE Gerapid 4207	100
Fig. 4-18 LS Susol. DCCB	101
Fig. 4-19 Susol DC circuit minimum trip current measurement	103
Fig. 4-20 CLS-DCCB experimental circuit diagram	105
Fig. 4-21 Fault generator operation mode(Auto)	106
Fig. 4-22 CLS-DCCB operation curves of test 1	109
Fig. 4-23 CLS-DCCB operation curves of test 2	111
Fig. 4-24 CLS-DCCB operation curves of test 3	114
Fig. 4-25 CLS-DCCB operation curves of test 4	117
Fig. 4-26 CLS-DCCB operation curves of test 5	120
Fig. 4-27 CLS-DCCB operation curves of test 6	122
Fig. 4-28 CLS-DCCB operation curves of test 7	125
Fig. 4-29 CLS-DCCB operation curves of test 8	127
Fig. 4-30 CLS-DCCB operation curves of test 9	129
Fig. 4-31 Analysis of the interruption completion time and interruption ability according to the energy share of CLS-DCCB (Test 1~9)	131
Fig. 4-32 Simplified equivalent model for characteristics analysis	135
Fig. 4-33 Fault current increase-rate according to inductance magnitude of	

HTS wire 135

Fig. 4-34 Operation characteristics according to Inductance magnitude of HTS
wire CLS-DCCB 137

ABSTRACT

A Study on the Current-limiting Type Superconducting DC Circuit Breaker for the Reliability Improvement in HVDC Power System

Choi, Hye-Won

Advisor : Prof. Choi Hyo-Sang, Ph.D.
Department of Electrical Engineering,
Graduate School of Chosun University

Distributed power systems using renewable energy and power grids based on DC systems such as High Voltage Direct Current(HVDC) systems, which can be connected to different frequencies, have been expanding of late. HVDC is economical due to the low insulation level of the line, and has high transmission efficiency because there is no loss through the skin effect and reactance component. Because of these and its other advantages, HVDC is actively being researched on both in and outside the country. In the past, grids were constructed with CSC-HVDC systems, but VSC-HVDC systems are now in use. Thus, a DC circuit breaker technology with excellent interruption performance and stable operation reliability is essential. It is difficult to develop and commercialize DC circuit breakers, however, due to the problems of the existing circuit breakers, such as limited capacity, high prices, and poor protection coordination with the system.

Therefore, this paper proposes a new Current-limiting Superconducting DC Circuit Breaker(CLS-DCCB). CLS-DCCB has a simple structure, in which a superconductor and a DC circuit breaker are connected in series. It is a protective device that combines the fault-current-limiting technology and the line interruption

technology of the DC circuit breaker. The DC circuit breaker generates an operation delay due to open contact and relay signaling. If only the DC circuit breaker is applied, the system must fully bear the burden of faults during the operation delay. The superconductor maintains the superconducting state with zero resistance at below the threshold current. If a current above the threshold current flows, however, it changes into its normal conducting state within several milliseconds, and generates current-limiting impedance, which limits the maximum magnitude of the fault current. Furthermore, the superconductor shares the burden of faults during the operation delay of the DC circuit breaker. As a result, an initially limited fault current flows, and the interruption time is shortened due to the reduced arc magnitude.

The single-operation characteristics of CLS-DCCB were verified using the grid analysis application PSCAD/EMTDC. Next, a grid-connected PV system and a VSC-HVDC system, which are representative DC power systems, were designed. Then the transient state was analyzed by applying CLS-DCCB to a DC line. For the transient state, two fault points were set in the DC and AC lines. The simulation results showed similar current limiting and interruption trends when CLS-DCCB was applied to the grid. Based on this, the capacity indicator of the circuit breaker to be produced in the future was additionally proposed.

To improve the operation reliability of CLS-DCCB, a simulated DC power test system was constructed, and the CLS-DCCB was fabricated. The simulated DC power test system was constructed in a way to enable experimentation on a DC device by considering the essential elements of the experiment. Considering the actual application to the grid, a CLS-DCCB was fabricated by combining a DC circuit breaker with a superconducting wire. The operation characteristics with increasing voltage by capacity were analyzed, and the results confirmed that the simulation data of the HVDC system and the experimental data of the LVDC system had the same trends of limiting the maximum fault current and shortening

the interruption time.

The results of this study about CLS-DCCB can be used to establish the basic concepts and operation characteristics of such device. Furthermore, it was verified that when the capacity is increased with the structure proposed in this study, it can be applied to the HVDC system. Therefore, the results of this study can be used as reference data and will greatly contribute to the production of a 100[kV]-scale HVDC circuit breaker in the future. Moreover, when the CLS-DCCB proposed in this study is applied to the HVDC grid, it can improve the stability and reliability of the grid by reducing the possibility of interruption failure and shortening the fault interruption time.

I. 서론

A. 연구배경 및 필요성

2011년 기준 독일, 캐나다에 이어 한국의 전력소비량은 세계 8위였으며 전력설비 규모는 세계 13위 수준으로 전력소비량을 고려했을 때 설비 규모가 작은 편이었다. 이로 인해 전력수요량을 충족시키기 위한 여러 방안이 제시되었고 현재까지 전력설비규모 확충 및 대체에너지 투자개발 등 범국가적인 차원에서 진행되고 있다. 물론, 전력소비량은 핵가족화 현상, 수도권 인구밀집현상, 타 에너지원에서 전환수요, 기후변화로 인한 냉난방 부하의 사용량 급증, 가전기기 보급 확대 등으로 인하여 현재에도 매년 평균 3.4[%]씩 증가하고 있다[1-2].

매년 급증하는 전력수요량을 충족시키고 화석연료 사용으로 인한 기후 영향을 안정화시키기 위해 태양광 및 풍력 등 신재생에너지를 기반으로 한 발전 및 전력시스템이 제안되었다. 신재생에너지는 저탄소·친환경 에너지원으로써 정부에서 2030년까지 신규 설비의 95[%] 이상을 태양광 및 풍력 등 청정에너지원으로 공급하며, 전체 발전량 중 20[%]를 재생에너지를 이용해 발전할 것을 목표로 수립하였다. 위와 같이 신재생 에너지를 기반으로 한 연구는 정부의 전폭적인 지원을 받으며 다수의 국·공립, 사립 연구소 및 연구기관에서 진행되고 있다[3-4].

전력수요량을 충족시키기 위한 방안인 신재생에너지원 중 태양광, 풍력 등은 최초 발전원이 직류이므로 손실을 최소화하기 위해 직류 전송에 대한 관심이 집중되었다. 이로 인해 고압 직류송전(HVDC : High Voltage Direct Current)이 제안되었고 타당성을 입증받아 국내외 전기 관련 연구소 및 산업체, 학계에서 연구를 진행하고 있다. HVDC는 초고압 직류 송전으로써 발전소에서 생산되는 교류전력을 직류로 변환시켜 송전한 후 수전지역에서 다시 교류전력으로 변환시켜 공급하는 시스템으로 HVAC에 비해 대용량 장거리 전송, 송변전 설비 설치면적 감소로 인한 경제적 효과, 서로 다른 계통 간 비동기 연계가능, 신재생에너지 발전원 효율 극대화 등과 같은 장점을 지니고 있다[5-10].

HVDC는 위와 같이 많은 장점을 지니고 있어 미국, 유럽, 중국 등 전 세계적으로 HVDC 시스템을 구축하기 위해 활발히 연구를 진행하고 있다. 그러나 현재 HVDC 시스템의 신뢰도와 안정도를 확보할 수 있는 우수한 차단 성능 및 시스템과의 보호협조 등이 입증된 DC 차단 및 보호 기술의 부재로 인해 구축 및 실용화가 지연되고 있다[5][10-13].

DC 차단기술 부재로 인한 문제점을 해외 대표 선진사인 3사(ABB, Siemens, GE)와 연구소 및 학계 등에서 인지하여 많은 전문 인력과 막대한 비용을 투자해 다양한 타입의 차단기술을 제안하여 입증하였다. 다양한 타입의 DC 차단기가 제안되었으나 수 [msec] 이내에 수 [kA]의 고장전류 차단기술 구현 등 성능에만 치중한 나머지 차단기술의 경제적 실효성이 저감되었고 HVDC 시스템과의 보호협조를 고려하지 않은 차단기 단독 설계로 인한 보호협조 부재, 용량의 한계점 발생 등 여러 요인에 의해 실증된 제품은 없다[14-15].

위와 같은 이유로 HVDC 차단기술을 연구 및 개발하기 위해서는 HVDC 시스템의 전반적인 동작 메커니즘에 대해 이해하고 경제적인 실효성을 고려하면서 단시간 내 아크를 빠르게 소호시킬 수 있는 기술을 고안해야 한다.

게다가 국내에서는 기존 케이블보다 최소 약 5배 이상의 전력전송이 가능한 초전도 케이블이 적용된 HVDC 시스템 구축을 고려하고 있어 기존에 제안된 차단기들보다 용량도 증대시켜야 한다[16-19]. 또한, 적용 가능성 및 신뢰도를 확보하기 위해서는 현재 추진 및 구축되고 있는 HVDC 시스템과의 보호협조 및 구성요소를 고려해야 한다.

그러므로 기존에 제안된 DC 차단기들의 장점을 보유하면서 단점 및 취약점은 보완되고 성능과 안정도 측면에서 신뢰도가 높은 새로운 상위개념의 DC 차단기술에 대한 연구가 반드시 필요하다.

B. 연구동향

전 세계적으로 기후변화 협약 및 화석연료 고갈에 따른 태양, 풍력 조력 등 신재생에너지원에 대한 개발이 빠르게 진행되고 있어 HVDC 시장의 규모는 점점 증가될 것으로 예측된다. 현재 HVDC 시장은 ABB, Siemens, GE 3사가 약 95[%]를 점유하고 있으며 약 24개국에서 60여개의 HVDC 프로젝트를 추진, 진행, 실증 단계에 있다[1]. 전 세계적으로 HVDC는 800[kV]급 HVDC가 표준화되는 추세이며 송전용량을 극대화해 1000[kV] 이상의 HVDC 개발도 활발히 진행 중에 있다[20].

미국은 2030년까지 중부 내륙의 6,000[MW] 이상의 해상 풍력을 설치한 후 수용가까지 HVDC로 직접 연계하는 방안을 검토 중이다. 또한, 유럽은 영국과 아일랜드를 DC ± 200 [kV], 256[km], 500[MW] 전압형 HVDC로 연계할 계획이다. 또한, 프랑스와 스페인을 DC ± 320 [kV], 2,000[MW] 전압형 HVDC 연계 추진 중이다. 중국은 2020년까지 매년 DC 800[kV], 5,000~6,400[MW] HVDC 시스템을 계속해서 건설할 계획이다[11][20-21].

국내에서는 총 2개의 HVDC 선로가 운전 중에 있다. 국내 최초의 HVDC 프로젝트는 #1 HVDC 사업으로 100[km]가 넘는 제주와 해남 사이를 ± 180 [kV], 300[MW](2회선) 전류형 HVDC로 연계하는 사업이다. #1 HVDC는 1998년에 상업 운전을 시작하였다. 다음으로는 #2 HVDC 사업으로 제주 변환소에서 진도까지 ± 250 [kV], 400[MW](2회선) 전류형 HVDC로 연계하는 것이다.

2022년까지 계획된 HVDC 프로젝트는 총 3개이다. 첫 번째는 수도권 내 전력용통 설비를 확보하기 위해 북당진에서 고덕을 전류형 HVDC (1.5[GW])로 준공할 계획이다. 두 번째는 제주 지역의 안정적인 전력공급을 확보하고 육지계통의 이중전원을 확보하기 위해 육지와 제주를 잇는 #3 HVDC를 전압형 HVDC(± 150 [kV], 250[MW])로 계획 중이다. 마지막으로 서남해안 해상풍력 3단계(2,000[MW])사업이 준공될 계획이다[15][20].

HVDC 선로가 증설되기 위해서는 DC 차단기술의 수반이 필수이다. 왜냐하면 DC는 AC와 다르게 에너지가 최소화되는 전류영점이 존재하지 않아 전류영점에서 차단 동작을 수행하는 AC 차단기 적용이 불가하기 때문이다. 이에 따라 현재까지

다수의 연구기관에서 다양한 타입의 차단기가 제안되었다.

먼저, ABB에서 제안한 하이브리드 HVDC 차단기는 정격전압 320[kV], 정격전류 2[kA], 동작속도 5[msec], 최대 허용 고장전류 9[kA]이다[76]. 하이브리드 HVDC 차단기는 전력전자 소자와 기계식 스위치를 결합하여 단시간내 대규모 발전소의 전력조류를 차단할 수 있다[22][76]. 그래서 효율적이고 신뢰성 높은 전력공급이 가능하다. 사고가 발생하면 부하전류 스위치가 전류를 제한함과 동시에 울트라 고속 스위치가 개방하여 사고전류를 주차단기로 보냄으로써 차단하는 방식이다[76]. 주차단기에는 IGBT를 사용하였으며, 각각의 HVDC 차단모듈은 4개의 스택 (1스택=IGBT 20개)로 구성되어 있다. Snubber 회로로 인해 사고전류를 차단할 때 전압을 분배할 수 있으며, 별도의 냉각장치가 없다는 특징을 가지고 있다[76]. 즉, 다수의 IGBT 사용으로 인해 정상 시에도 발열로 인한 전력손실이 발생하며 성능에만 치중한 나머지 경제적인 실효성을 확보하지 못해 계통에 적용함에 있어 시기가 지연되고 있다[10][22].

다음으로, Siemens에서는 역전류 주입방식을 이용한 DC 차단기를 제안하였다. 역전류 주입방식을 이용할 경우 커패시터는 상시 충전상태로 유지한다. 고장이 발생하면 사이리스터가 turn-on되어 커패시터에 충전된 에너지를 LC 병렬 공진 회로를 통해 방전한다. 이로 인해 커패시터의 극성이 역방향으로 반전되면 고장전류와 반대되는 방향으로 전류가 유입되면서 주 차단 스위치에 전류영점이 생성된다. 이때 주 차단 스위치는 아크를 소호시켜 차단동작을 완료한다. 또한, IGBT 대신에 사이리스터를 적용시킴으로써 신뢰성 및 비용측면에서 유리하다. Siemens에서 제안한 방식은 정상상태 시 선로가 기계적인 접점으로 구성되어 있어 ABB에서 제안한 하이브리드 HVDC에 비해 정상 시 손실이 작다. 그러나 이러한 손실은 ABB에서 제안한 방식에 비해 비교적 작은 값이므로 마찬가지로 계통에 적용하기에는 논의가 필요하다[10][22].

그리고 국내에서는 한국전기연구원에서 개발한 80[kV]급 2/8[kA] HVDC 차단기이다. HVDC 차단기는 반도체 스위치 차단방식 DC 차단기으로써 38[kV] 진공 인터럽터(VI : Vacuum Interrupter)로 구현된 고속 스위치, 전류(Commutation)용 커패

시터 및 피뢰기, 자체 방전회로로 구성되어 있다. 고속 스위치는 전기연구원에서 자체 개발한 스위치로 VI와 톰슨 드라이버, PMA가 결합된 구조이다. DC 차단기에는 총 3개의 고속 스위치가 적용되어 있다. 2개는 쌍안정(Bi-stable)스위치이고 1개는 단안정(Mono-stable)스위치로 전력 반도체 스위치를 보호하는 역할을 한다. 전력 반도체 스위치(Solid-state s/w)의 전체 정격은 18[kV], 12[kA]이며 주선로를 차단하는 역할을 한다. 이는 4.5[kV], 4[kA]인 IGCT를 4직렬, 3병렬로 구성하였다. 차단 시간은 2[msec]이다. ABB와 Siemens와 마찬가지로 빠른 차단 시간을 확보하였으나 반복 동작 시 VI 접점의 개폐실패, 접점 마모, 접점 융착 등으로 다수 동작에 따른 신뢰도 확보가 미흡한 상황이다[10].

국내 타 대학의 경우 DC 차단기술로써 초전도체가 결합된 DC 차단기술을 제안하였으나 차단기가 아닌 DC 시스템을 보호할 수 있는 여러 차단기술에 중점을 두고 연구를 진행하고 있으며 개발이 아닌 시뮬레이션으로 연구를 진행하였다 [5][23]. 중국에서는 본 논문에서 제안하는 초전도 현상을 DC에 적용시킨 연구가 제안되고 있다[24-25]. M대학교의 전력변환 연구그룹에서 초전도 한류기를 HVDC 시스템에 적용하는 시뮬레이션 연구를 진행하였고, DC 시험설비를 구축해 DC에서 초전도 한류기(SFCL : Superconducting fault current limiter)실험을 진행한 연구팀도 있다[24-25]. 그러나 초전도 한류기가 단독으로 고장 전 구간을 부담하는 것은 초전도체의 손상 및 파손 가능성이 크다. 또한, 초전도체를 SF₆의 절연매질로 하는 가스차단기에 결합시킨 연구도 시뮬레이션과 실험으로 진행이 되었으나 SF₆는 국내에서 배제시키고 있고, 차단에 실패할 경우 위험성이 크다는 단점이 있다[26].

C. 연구목적 및 연구범위

연구동향에서 조사한 바와 같이 현재 국내외 여러 연구기관 및 기업에서 DC 차단기를 개발하기 위해 연구를 진행하고 있다. 현재까지 제안 및 개발된 DC 차단기는 크게 기계식 HVDC 차단기, 하이브리드 HVDC 차단기, IGBT와 기계식 DC 차단기가 결합된 반도체 HVDC 차단기로 나눌 수가 있다.

제안된 차단기들의 가장 빠른 차단시간은 5[msec]이고, 최대 차단용량은 12[kA]이다. IGBT, GTO, IGCT 등 반도체 소자를 사용할 경우 빠른 차단시간을 확보할 수 있다. 그러나 다량의 반도체 소자를 사용해야 하므로 가격이 고가이며, 반도체 소자는 발열로 인해 정상 시에 손실이 발생하게 된다[10][22]. 기계식 DC 차단기의 손실 기준, 타 차단기들은 손실이 최소 5배에서 최대 50배이다. 반면 손실을 최소화하고 가격 경쟁력을 확보하기 위해 반도체 소자 사용이 배제된 기계식 DC 차단기는 손실이 1이지만 차단시간이 30~50[msec]이며 계전 및 지연동작이 발생하게 된다[10]. 즉, 현재까지 제안 및 개발된 차단기술은 우수한 차단 성능과 경제적인 실효성, 2가지 측면을 모두 만족하는 기술이 구현되지 않아 적용에 어려움을 겪고 있다. 이에 더하여 DC 계통은 주파수의 영향을 받지 않아 나라간 연계가 가능하다. 이로 인해 DC 계통의 규모 및 고장이 발생했을 경우 고장 규모, 고장 전류 크기를 예측할 수가 없다. 그러므로 최근에는 HVDC 차단기는 우수한 차단성능, 경제적인 실효성 뿐만 아니라 DC 계통의 규모에 따라 DC 차단기의 용량증대가 용이한 용량증대 용이성 측면도 확보해야 한다.

연구동향에서 제시된 차단기들은 용량을 증대시키기 위해서 고장전류의 크기가 미리 예측이 가능해야 하며 기계식 및 반도체를 기반으로 한 DC 차단기의 경우 점점설계, 피뢰기 설계 등 용량을 증대시키기 위해서 고려해야 할 부분이 많다. 하이브리드 HVDC 차단기는 용량증대와 가격이 비례하여 상승하므로 용량증대 시 경제적인 실효성이 낮아지는 문제점이 있다.

앞에서 설명한 바와 같이 위에 제시된 조건들을 모두 만족하는 DC 차단기술의 부재로 인해 HVDC 선로의 실증 및 DC 전력망 구축, 신재생에너지원 활용 등과 같은 차세대 전력망을 구축하는 시기를 지연시키고 있다.

DC 차단기술의 부재로 인해 발생하는 문제점을 해결하기 위해 새로운 DC 보호 기술로써 한류형 초전도 DC 차단기(CLS-DCCB : Current-limiting Superconducting DC Circuit Breaker)를 제안하였다. 한류형 초전도 DC 차단기는 우수한 차단성능, 경제적인 실효성, 용량증대의 용이성 3가지 측면을 모두 만족한 기술이다. 초전도체는 선재의 길이, 권선법에 따라 고장전류 제한 및 적용범위가 넓고 한류동작으로 인해 고장전류의 크기를 제한시켜 차단기로 유입하므로 별도의 차단부 용량증대가 불필요하므로 용량증대가 용이하다.

본 연구에 사용된 시뮬레이션 해석 프로그램은 PSCAD/EMTDC(Electro Magnetic Transient Direct Current)로써 캐나다의 Manitoba HVDC research center에서 HVDC 계통해석용으로 개발한 CAD 기반 프로그램으로 국내뿐만 아니라 Alstom, ABB, Siemens 등 여러 기업에서 사용되고 있는 프로그램으로 신뢰도가 높다. 또한 본 연구에 적용 및 사용된 기기, 장비, 설비들은 각각의 시험에 의해 안정도와 신뢰도가 입증되었으므로 실 계통 적용에 있어 신뢰도가 우수할 것으로 판단된다.

선행연구를 통해 한류형 초전도 DC 차단기의 단독 동작특성을 확보하였다. 차단기는 단독 특성도 중요하지만 계통과의 보호협조 또한 고려되어야 할 중요한 부분이다. 본 연구를 통해 초전도체 결합으로 인한 DC 차단기의 용량증대 및 차단범위, 계통에 적용된 경우 동작 신뢰도를 확보하고자 한다. 또한, 동작신뢰도를 확보하기 위해 실험실 내에 DC 전력시험설비를 구축하고 한류형 초전도 DC 차단기를 제작하여 한류 및 차단특성 실험을 진행할 계획이다.

먼저, PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용해 전류영점이 존재하지 않아 점점 개극시 아크가 발생하는 차단특성이 결합된 DC 차단기를 구현한 후 초전도체를 결합시켜 한류형 초전도 DC 차단기를 설계하고자 한다. 시뮬레이션에서 회로를 구성하여 단독 성능을 분석한 다음 차단용량별 한류 및 차단성능을 분석할 계획이다. 이후 DC를 기반으로 한 계통연계형 태양광 시스템과 전압형 HVDC 시스템을 설계하여 한류형 초전도 DC 차단기를 시스템의 DC 선로에 적용시켜 차단동작을 분석하고, DC를 기반으로 한 시스템은 AC와 DC 계통이 연계된 구조이므로 DC 선로 및 AC 선로에서 고장이 발생했을 경우 각각의 계통에 미치는 영향을 IEC61660-1 규격에

명시된 DC 고장전류 기여요인을 고려하여 분석함으로써 계통 적용 타당성을 검토하겠다[36-37]. 시뮬레이션을 이용해 한류형 초전도 DC 차단기의 동작 메커니즘 일치성 및 DC 차단기의 전력분담으로 인해 차단실패 가능성의 저감 여부를 검토하고, 환경적 및 경제적인 제약조건을 고려하여 실험실 내에 소규모로 한류형 초전도 DC 차단기를 설계 및 제작하여 동작성능을 검증하며 시뮬레이션 및 실험을 통하여 차단 용량별, 한류부인 초전도선재의 턴 수, 보빈 반경을 고려한 인덕턴스 크기에 따른 동작특성을 중점적으로 분석하고자 한다.

본 논문에서는 한류 및 차단성능이 결합된 신개념 보호기기로 제안한 한류형 초전도 DC 차단기의 동작 메커니즘을 확인하고 계통 시뮬레이션 해석 및 제작, 실험을 통해 동작 신뢰도를 확보하고자 한다.

II. 이론적 배경

A. DC 관련 이론

1. DC 차단방식 및 차단성능

그림 2-1은 현재까지 제안 및 연구된 DC 차단기술이다. DC 차단방식은 크게 인위적인 전류영점을 생성시키는 방식과 전력용 반도체 소자(Static switch)를 이용하여 전류를 차단하는 방식으로 구분된다. 전류영점을 생성시키기 위한 방법으로는 아크 부특성을 이용한 수동방식과 커패시터의 충전방식을 이용한 능동방식이 있다. 또한, 커패시터를 충전시키기 위한 방식은 별도의 외부 전원을 이용하거나 계통전압을 이용하여 자체적으로 충전하는 2가지 방식이 있다. 반도체 소자를 이용하여 전류를 차단하는 방식은 순수하게 반도체 소자만 이용한 방식과 반도체 소자에 기계식 접점스위치가 적용된 방식으로 구분된다[11-12][21].

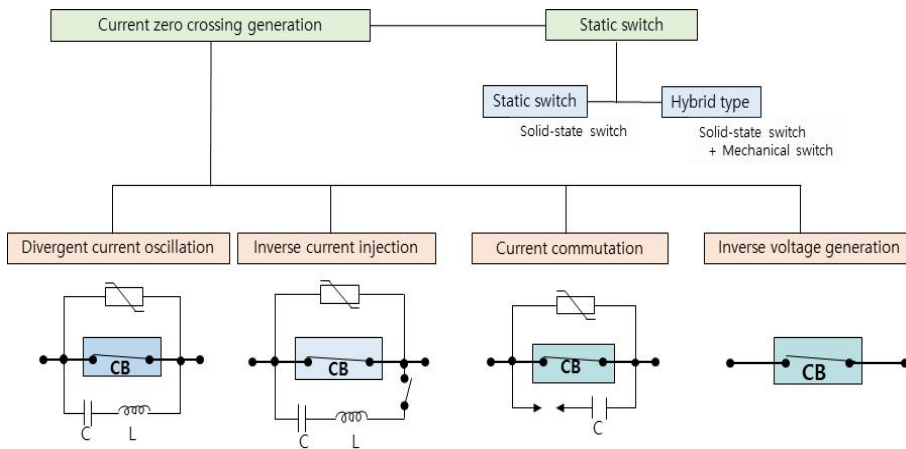


Fig. 2-1 DC interruption method

발산전류 진동방식과 역전류 주입방식, 반도체 소자와 기계식 DC 차단기가 결합된 하이브리드 차단기는 MVDC급, HVDC급 차단기이며 순수 static, 전류전환 방식, 역전압 발생방식을 이용한 차단기는 LVDC급 차단기이다.

먼저, 발산전류 진동(Divergent current oscillation)방식은 LC 전류회로와 아크자체로 구성된 전환 루프 내에서 진동전류의 크기를 증폭시킴으로써 인위적으로 전류영점을 발생시킨다[76]. 회로가 간단하며, 용량적인 측면과 시장성을 고려했을 때 우수하다. 단, 전류회로의 LC 조합에 따라 진동전류의 크기가 변화하므로 전류영점생성 시간의 변화폭이 크다[14-15][29-31].

두 번째는 역전류 주입(Inverse current injection)방식이다. 초기 충전된 커패시터를 인덕터를 통해 방전시키고, 방전으로 인해 발생하는 역전류를 고장전류에 중첩시켜 전류 영점을 발생시킨다[76]. 이는 저장된 에너지를 소산시킬 소호부의 필요성이 거의 없으며 기존의 교류차단기가 이 방식에 사용될 수 있다. 단, 커패시터를 미리 충전시켜 상시 충전상태를 유지해야 하므로 충전용 보조전원이 필요하며, 타 방식에 비해 회로구성이 복잡하다. 또한, 주입되는 역전류의 크기에 따라 전류영점 생성여부가 결정되며 각각의 소자 및 파라미터, 용량설정에 주의가 요구된다[5][14-15].

세 번째는 전류전환(Current commutation)방식이다. 아크현상의 전류제한 효과에 의해 전류를 부분적으로 저항이나 커패시터로 전환함으로써 유도성 회로에 저장된 에너지를 소산시키는 방식이다[76]. 무충전 콘덴서를 상시보조로 사용해 높은 아크전압 상승률을 이용하여 전류영점을 발생시킨다. 예측된 DC 고장전류 크기 및 고장발생 지속시간을 초과할 경우, 커패시터가 과충전되어 폭발가능성을 내포하므로 2차 고장의 원인이 된다. 또한, 저항소자 적용 시 아크를 열로 소호시킬 수 있다[5][14-15].

마지막으로 역전압 발생(Inverse voltage generation)방식이다. 아크의 길이를 길게 하여 전원전압보다 아크전압이 커질 때 차단된다. 주로 3[kV] 이하 전기철도 및 제철소용 전동기 회로 차단부로 사용한다[76]. 역전압 발생방식은 차단부만 이용하는 매우 이상적인 방식으로 고압, 초고압 분야에는 적용이 불가하다[5][14-15].

표 2-1은 서론에서 언급된 기존 연구 및 개발된 대표적인 차단기의 성능을 표로 나타낸다. 출원된 특허를 기준으로 ABB, Siemens, Alstom, Novel로 구분된다. 표에 나와 있듯이 빠른 차단속도를 확보하기 위해 IGBT, Thyristors, Diodes 등 반도체 소자의 적용이 불가피함을 확인할 수 있다.

이로 인해 정상 시 손실발생(On-state loss)이라는 취약점이 발생하였다. 시간에 따른 전류변화율인 dI/dt 는 차단기의 고장전류 차단능력을 나타내는 지표이다[5][27].

Table 2-1 Performances of the existing circuit breakers

Co., Ltd.	ABB	Siemens	Alstom	Novel
Patent No.	CN102687221A	CN103299544A	CN104126210	WO2015023157A1
Devises	AC breaker, IGBTs, MOSA	AC breaker, thyristor, diodes, LCR, MOSA	AC breaker, thyristor, diodes, LCR, MOSA	AC breaker, thyristor, diodes, LC, MOSA
Speed	5[msec]	5[msec]	6[msec]	-
Advantages	Fast	Fast	Fast	Fast
Disadvantages	Expensive, on-state loss	Voltage, reverse, on-state loss	Control, complex, on-state loss	Voltage, reverse, on-state loss
Voltage	320[kV]	400[kV]	120[kV]	120[kV]
Current	9.0[kA]	15[kA]	7.5[kA]	20[kA]
dI/dt ability	3.5[kA/msec]	3[kA/msec]	10[kA/msec]	10[kA/msec]

2. HVDC 시스템 구간전압 및 종류

그림 2-2는 AC, DC 전압구간이다. 현재 DC 전압구간은 명확하게 제정되지 않았으나 국제 대전력망 기술협의회인 CIGRE(Conseil International des Grands Reseaux Electriques) 에서 논의되고 있는 구간이다.

HVDC 시스템은 3상 전파 정류회로를 기반으로 한 컨버터의 내부 소자에 따라 크게 전류형(CSC : Current Source Converter) 및 전압형(VSC : Voltage Source Converter) HVDC 시스템으로 구분된다. CSC-HVDC 시스템은 converter station의 내부소자가 자체적인 단락보호가 불가능한 사이리스터(Thyristor)가 결합된 경우이고, VSC-HVDC 시스템은 컨버터의 내부 소자가 자체적으로 보호회로 동작이 가능하여 단락보호가 가능한 IGBT가 적용된 방식이다[13][15].

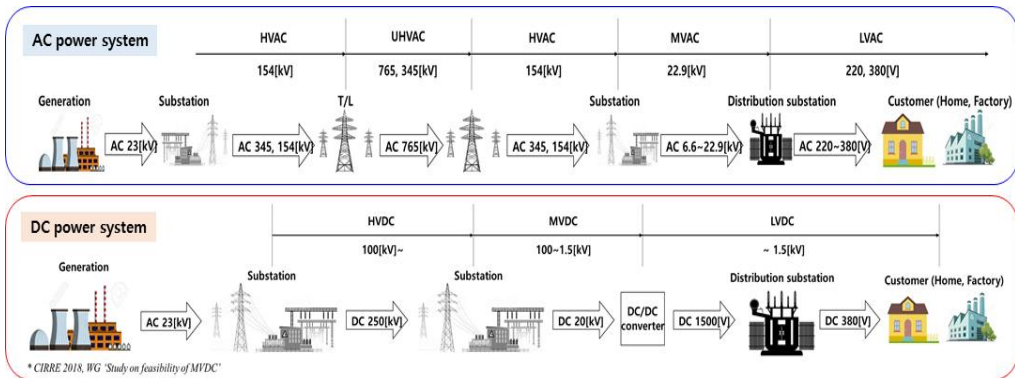


Fig. 2-2 AC, DC voltage range(CIGRE 2018)

a. CSC-HVDC 시스템

그림 2-3은 CSC-HVDC 시스템의 구조이다. CSC-HVDC 시스템은 컨버터와 평활리액터, 고조파필터, 무효전력 공급설비, AC 차단기로 구성된다.

CSC-HVDC는 컨버터에 turn-on만 가능한 사이리스터를 적용하고 사이리스터의 turn-on 시간을 조절함으로써 선로에 흐르는 전류의 크기를 제어한다. 전류형 HVDC는 송전전력의 약 55[%]가 무효전력으로 소비됨에 따라 무효전력을 AC 측에서 공급받아야 한다. 이를 위해 동기조상기, SVC, STACOM 등 facts기기가 추가적으로 필요하다[6-7].

무효전력 보상설비는 추후 고장발생의 원인으로 제기되고 있다. CSC-HVDC는 전 세계적으로 오래전부터 연구 및 상용운전에 돌입했기에 기술력이 검증되어 전력변환 손실이 약 0.7[%]로 적다. 또한, 현재 기술력으로 800[kV], 8[GW]급 대용량 설비의 구축이 가능하다[32]. 그러나 1:1 대용량 장거리 송전에 적합한 시스템으로 DC 그리드 적용에는 어려움이 있으며 설치면적이 크고 별도의 AC 전압원이 필요하다. 뿐만 아니라 무효전력설비 및 고장발생 후 시스템 재가동시 AC 발전원을 통해서만 가동이 되는 등 운영시스템이 복잡하다[13].

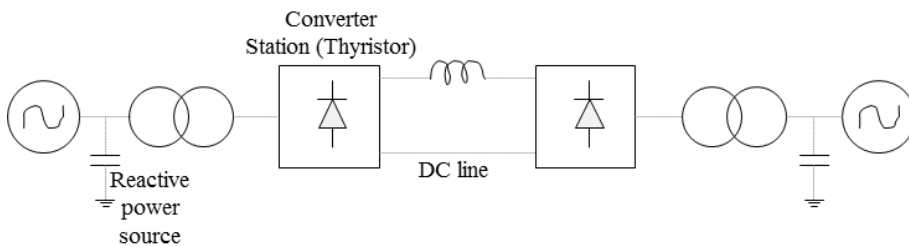


Fig. 2-3 CSC-HVDC system structure

b. VSC-HVDC 시스템

그림 2-4는 VSC-HVDC 시스템의 구조이다. VSC-HVDC는 AC-DC-AC 구조로 컨버터, 커패시터, DC 차단기, DC 케이블로 이루어져 있다. 컨버터에는 IGBT와 역병렬 환류 다이오드가 하나의 모듈로 결합된 스위칭 소자를 적용하여 AC 전압의 크기와 위상을 제어한다[13][34-35]. IGBT가 자체적으로 on/off가 가능하고 DC 케이블로 연결되어 고장이 발생하거나 선로를 잠시 중단해야 할 경우 VSC-HVDC 시스템에서 자체적으로 전력을 차단시킬 수 있으며 다시 재가동을 시킬 때도 별도의 외부전원이 필요하지 않아 시스템 운영이 안정적이다. 또한, 스위칭 동작횟수를 높여 고조파를 제거할 수 있으므로 임계 스위칭 횟수에서는 필터가 필요하지 않는다. 뿐만 아니라 양방향 송전이 가능해 1:N의 다수 터미널 연계로 DC 그리드 구축이 가능하다. 그러나 전력변환 손실이 1[%]로 CSC-HVDC에 비해 상대적으로 크고 현재 기술력으로 최대 구축할 수 있는 용량이 ± 345 [kV], 1[GW]급이며 설비비용이 고가이다[32].

VSC-HVDC를 구축할 때 반드시 필요한 기술은 DC 차단기술이다. VSC-HVDC 시스템에서는 양방향으로 자유롭게 송전하기 위해 IGBT를 사용하기 때문이다. IGBT는 정상운전 시 스위칭 동작을 할 때 특성상 소자 내부 모듈에 역기전력으로 인한 스트레스가 인가된다. 이를 방지하기 위해 역병렬 환류 다이오드를 IGBT에 결합하여 하나의 모듈로 구성한 것이다. 물론 고장이 발생하면 스위칭 소자를 보호하기 위해 IGBT를 수 $[\mu\text{s}]$ 내에 셧다운 시킨다.

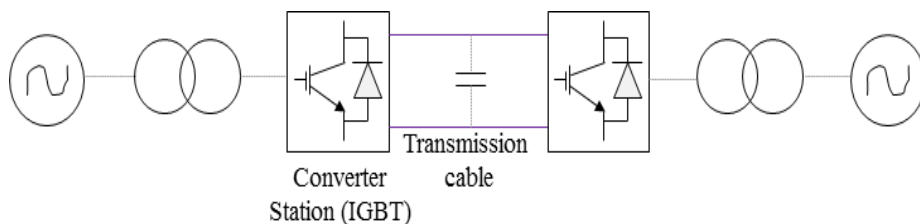


Fig. 2-4 VSC-HVDC system structure

그러나 IGBT가 셧다운된 환류 다이오드는 다이오드만으로 정류회로를 구성해 계속해서 AC-DC 변환을 진행한다. 다이오드의 회로변환으로 인해 고장전류는 사고지점과 무관하게 모든 사고지점으로 공급이 가능하게 되며, 고장전류가 DC 선로에 유입될 경우 AC 측에서 제어가 불가능하다[5]. 그러므로 VSC-HVDC 시스템에서는 반드시 DC 차단기가 필요하다.

c. CSC 및 VSC-HVDC 시스템 비교

표 2-2는 앞에서 설명한 CSC, VSC-HVDC 시스템을 비교하여 나타낸 표이다. 기존에는 많은 연구가 CSC-HVDC로 이루어져 상업운전을 시작하였으나 멀티 터미널 연계 불가, 별도의 외부전원 설치 등의 단점으로 인해 최근에는 VSC-HVDC에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[13].

Table 2-2 Comparison of CSC-HVDC and VSC-HVDC system

	CSC-HVDC	VSC-HVDC
Converter station	Thyristor (turn-on)	IGBT (turn-on, off)
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 대용량 설비 가능 ▪ 전력변환손실 적음 ▪ 컨버터 가격이 저렴함 ▪ 오랜 상용운전으로 기술력 검증 ▪ 장거리 지중화 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 설치면적이 작음 (전류형 대비 60%) ▪ Black start 가능 ▪ 무효전력보상설비 불필요 ▪ 양방향 자유 송전 가능으로 DC grid 구축
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 설치면적이 큼 ▪ 복잡한 운영체계 ▪ 별도의 AC 전압원 필요 ▪ DC grid 구축 어려움 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 용량이 적음 ▪ 설비비용이 고가임 ▪ 전력변환손실이 전류형 HVDC에 비해 상대적으로 큼
Grid	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1:1 대용량 장거리 송전 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1:N multi-terminal DC grid 연계가능

VSC-HVDC는 기술적 제약이 작아 용도 제한이 없고 멀티 터미널 연계가능으로 DC 그리드 구축이 가능하다는 것이 큰 장점이다. 또한, 설치면적이 작아 공간 제약 문제에서 자유롭기 때문에 해상플랫폼, 도심지 등 건설단가를 낮출 수 있어 경제적으로도 유리하다. 국내는 수도권 인구밀집화 현상으로 인해 주로 수도권에 부하가 밀집되어 집중도 및 복잡도, 계통에 고장전류의 크기가 지속적으로 증가하고 있다. 수도권 지역에 대규모의 전력을 공급하기 위해서는 신규 발전단지의 전력 인출선로가 필요하다.

그러나 기존의 AC 초고압 송전선로는 밀양 송전탑 사태와 같이 전자파 때문에 주민들의 반대로 인해 건설이 어려운 실정이다. 이로 인해 전자파 유해성 논란이 없고 첩탑 규모 및 설치면적이 상대적으로 작아 사회적 수용성이 우수한 HVDC에 대한 기술개발이 추진되었다. 그 결과, 현재 증설된 1, 2호기 HVDC는 전류형으로 증설되었다. 이는 전압안정도, 계통신뢰도 등으로 인해 제주계통에 문제발생 가능성이 큰 것으로 평가되고 있으며 추가로 CSC-HVDC가 증설될 경우 경제성 및 안정성 측면에서 문제가 제기될 것으로 판단된다.

이로 인해 전력품질, 향후 전력망의 발전방향, 전력망구축 측면에서 추가 증설될 3호기 HVDC는 북당진과 고덕 간 100[km]를 200[MW]급 VSC-HVDC 시스템으로 결정되었다[20]. 또한, 부하밀집 지역에 적합한 시스템으로 수도권을 여러 개의 구역으로 나누고 구역별로 시스템을 구축한다면 고장이 발생한 구역만 자체 차단 후 재가동시킬 수 있으므로 대규모 정전사태를 사전에 예방할 수 있다.

3. DC 시스템의 고장전류 기여요인

고장전류해석은 차단기를 포함한 계통에 설치되는 모든 전력기기들의 용량 및 정격, 계통안정도 검토 등을 산정하기 위해서 필수이다. IEC 61660-Part 1 ‘short-circuit currents in DC auxiliary systems in power plants and substations : calculation of short circuit currents’에서는 DC 고장이 발생했을 경우, 고장전류에 영향을 주는 기여성분과 DC 보조설비에 흐르는 고장전류 계산방법을 규정하고 있다[36-37]. IEC-61660에 따르면 DC 고장전류 기여성분은 크게 평활 커패시터, 납축전지, 3상 교류 브리지에 접속된 정류기, 타여자 DC모터로 나눌 수 있다[36-38]. 고장전류 기여요인 중 CSC 및 VSC-HVDC 시스템 내 고장전류 기여요인은 평활 커패시터와 3상 교류브리지에 접속된 정류기이다.

평활 커패시터는 CSC-HVDC 보다는 주로 VSC-HVDC 시스템에서 고장이 발생했을 경우에 영향을 미치는 요인이다. CSC-HVDC 시스템의 경우 평활 리액터가 존재하기 때문이다. 평활 커패시터는 정상상태에서는 완충되어 전압변동을 억제하는 역할을 한다. 그러나 고장이 발생하면 커패시터 내에 충전된 전하가 방전되면서 순간적인 과전류가 생성된다. 커패시터의 방전 특성상 수 [msec] 이내에 수 [kA]까지 상승하게 되며 이러한 방전특성이 고장전류가 급속도로 상승하게 되는 원인이다. 물론 방전이 완료된 후에는 내부에 축적된 전하가 존재하지 않으므로 다른 요인들에 비해 고장전류에 영향을 미치는 시간은 짧다[5][36-37].

3상 교류브리지에 접속된 정류기는 AC 선로 측에서 발생된 모든 고장전류를 정류기를 통해 DC로 정류하여 과도상태 동안 고장지점으로 공급한다. 또한, 정류된 DC 전류는 고장초기에 평활 커패시터의 방전전류와 중첩되어 수 [msec] 이내에 수십 [kA]까지 증가하므로 선로에 치명적인 과전류를 발생시킬 수 있다. 뿐만 아니라 정류된 DC 전류는 과도상태 내내 공급되므로 고장선로를 제때에 분리시키지 못할 경우 HVDC 시스템에 지속적인 스트레스가 인가되고, 시스템에 연결 및 적용된 전력 및 계측 기기들의 파손까지 가져오게 된다.

B. 한류형 초전도 DC 차단기 구조 및 메커니즘

1. 구조

그림 2-5는 한류형 초전도 DC 차단기의 구조이다. 고장전류의 크기를 제한하는 한류부(Current-limiting part)에는 초전도체(HTS : High temperature superconductor)를 적용하였고 고장 선로 차단 역할을 수행하는 차단부(Interruption part)에는 기계식 DC 차단기(M-DCCB : Mechanical-DC circuit breaker)를 적용하였다.

그림 2-6은 현재까지 제안된 차단기들의 동작속도와 손실을 나타낸다. 기계식 DC 차단기는 현재 제안 및 연구된 HVDC용 DC 차단기 중 다른 차단기들에 비해 구조가 간단하고 가격이 저렴하며 제작이 용이하고, 손실이 최소 5~50배 낮은 장점이 있다[10]. 그러나 기계식 점점 사용 및 계전 시간으로 인해 동작지연이 발생하여 차단시간이 느려 상용화에 어려움을 겪고 있다. 현재 ABB에서 제안한 하이브리드 DC 차단기는 5[msec] 이내에 차단동작을 완료할 수 있다. ABB에서 제시한 5[msec]는 HVDC 시스템 내 보호협조를 고려한 차단시간이 아닌 약 630개의 IGBT 소자로 이루어진 차단기가 고장전류를 견딜 수 있는 최대의 시간이다. 그러므로 기계식 DC 차단기의 상용화가 지연된 원인은 차단시간이 아니라 지연 동작 때문이다.

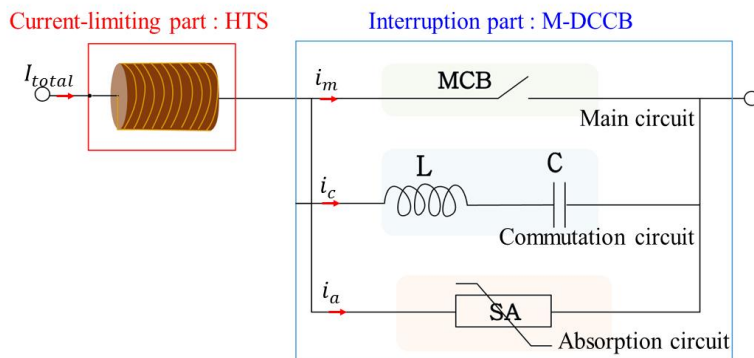


Fig. 2-5 CLS-DCCB structure

앞서 설명한 바와 같이 지연동작으로 인해 고장이 발생하고 최소 30[msec]동안에 계통에 고장전류가 도통되어 계통 내에 연계된 기기들이 고장을 온전히 부담해야 한다는 점 때문에 문제가 된 것이다. 그러나 차단기의 지연시간 동안 초전도체가 고장전류의 크기를 제한하여 부담한다면 기계식 DC 차단기의 단점을 보완할 수 있다. 즉, 타 차단기들에 비해 성능 및 경제적인 측면의 취약점을 보완하므로 개발시기가 가장 빠를 것으로 판단되므로 기계식 DC 차단기를 차단부에 적용하였다.

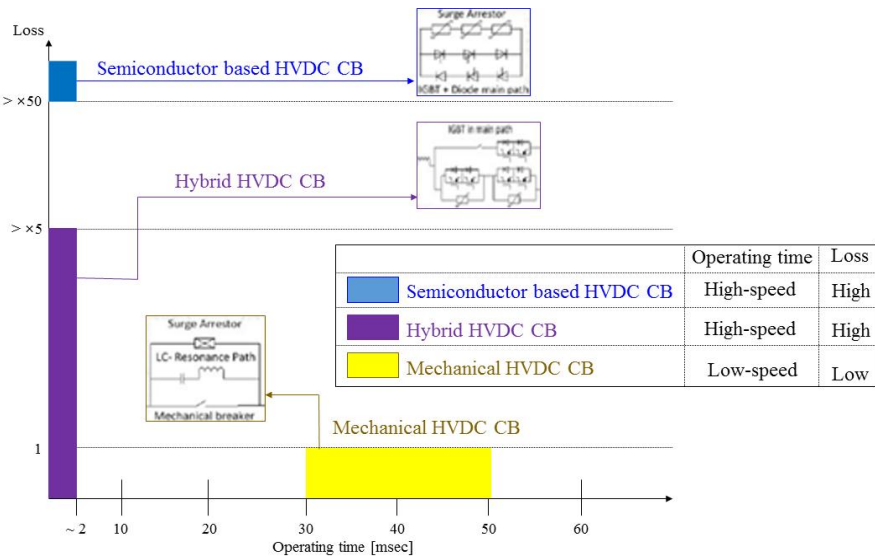


Fig. 2-6 Comparison of cut-off operation and loss according to CB types

2. 메커니즘

그림 2-7은 한류형 초전도 DC 차단기의 회로도이고 그림 2-8은 한류 및 차단 동작 메커니즘을 나타낸다. ‘Normal state’는 고장이 발생하기 전 정상구간이고 ‘Fault state’는 고장구간 이다. 설명의 편의성을 고려해 정격전압은 100[kV], 정격 전류는 1[kA], 고장전류 최대 크기는 50[kA], 고장발생 지점 10[msec], 초전도체(HTS)의 퀘치 동작시간은 2[msec], 기계식 DC 차단기(M-DCCB)의 동작지연 시간은 5[msec]로 설정하였다.

고장이 발생하기 전 정상 상태인 ‘normal state’에서는 ①과 같이 I_{total} 이 초전도체(HTS)와 기계식 접점(MCB)이 결합된 주회로(Main circuit)로 도통되어 안정적으로 1 [kA]의 전류가 Load로 유입된다. 이때 I_{total} 의 크기가 HTS의 임계 전류인 $I_{critical}$ 값을 초과하지 않으므로 HTS는 저항이 0인 초전도 상태를 유지하여 선로에 손실을 발생시키지 않는다.

한류형 초전도 DC 차단기는 기계식 접점 사용 및 계전시간으로 인해 약 5[msec]의 차단동작 지연시간이 발생한다. 그러므로 그림 2-8의 ②와 같이 고장이 모의한 후 2 step으로 나누어 설명하였다. Setp 1은 초전도체의 한류동작이고 Step 2는 기계식 DC 차단기의 차단동작이다. Step 1은 기계식 DC 차단기가 계전시간으로 인해 동작이 지연되는 구간으로 고장이 발생하고 약 5[msec]이내로 10[msec]에서 15[msec]를 나타낸다.

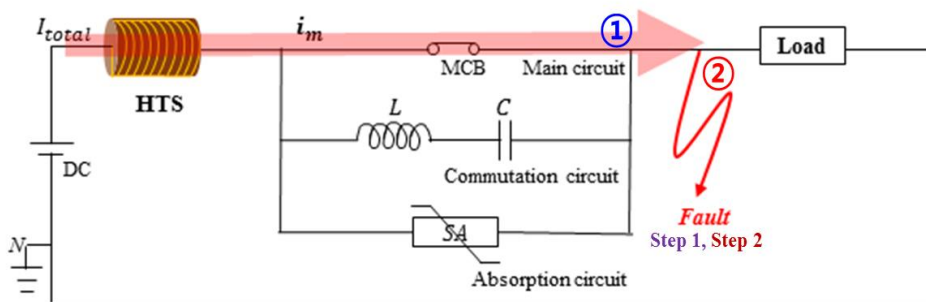


Fig. 2-7 CLS-DCCB circuit diagram

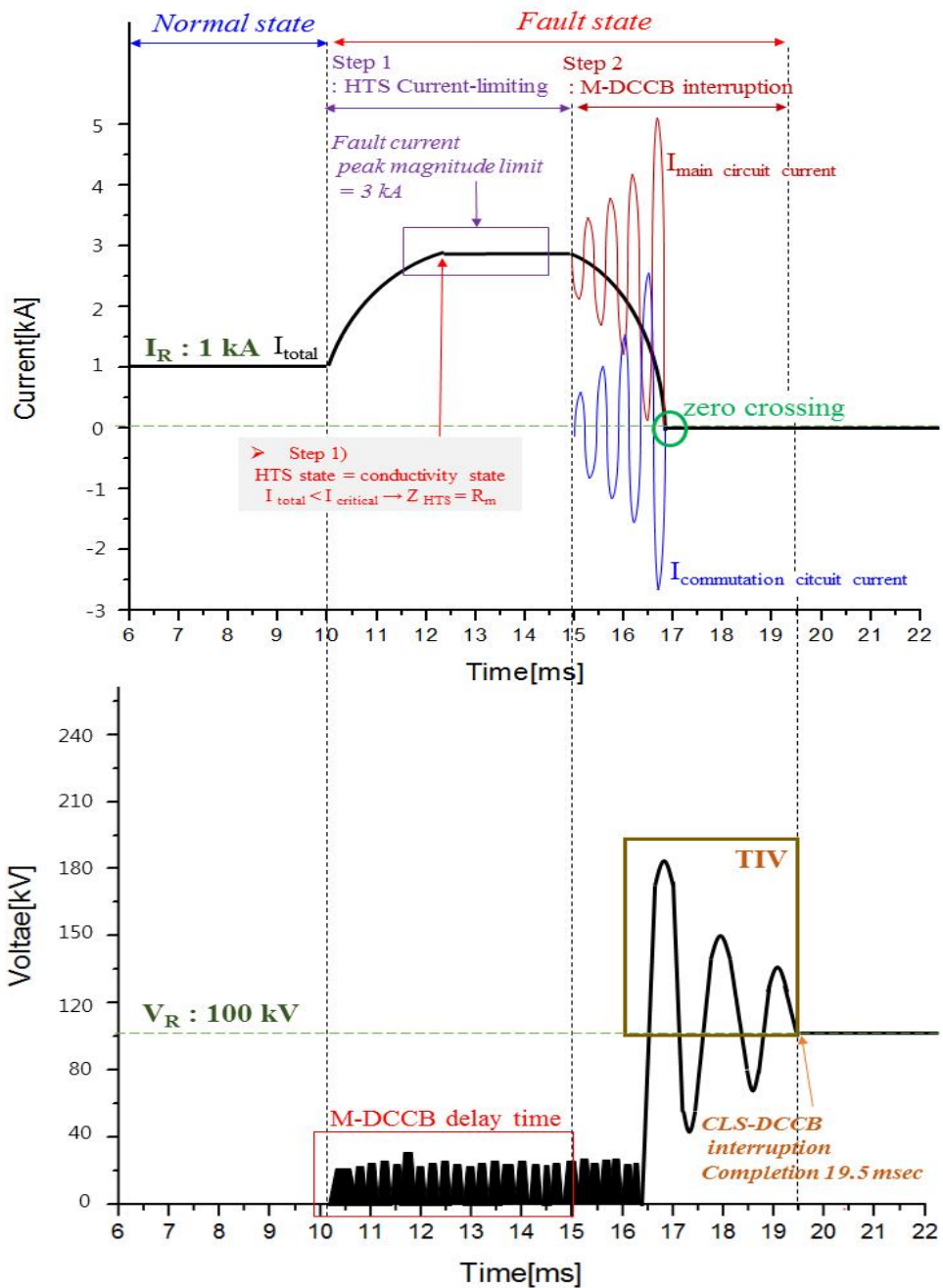


Fig. 2-8 The voltage and current curves of CLS-DCCB

고장이 발생하고 선로에 유입되던 정상전류인 I_{total} 은 크기가 급증하여 고장전류가 된다. 고장전류는 HTS의 $I_{critical}$ 값을 초과한다. 이로 인해 HTS는 설계한 값이 2[msec]이내에 임의의 임피던스를 지니는 상전도 상태로 전이된다. HTS의 상전리로 인해 고장전류의 크기는 최대 크기까지 도달하지 못하고 HTS가 지니는 임피던스에 의해 제한된 고장전류인 3[kA]가 선로에 도통된다. HTS는 DC 차단기가 동작하기 전까지 고장전류의 크기를 제한하고 전력을 온전히 부담함으로써 계통에 미치는 영향 및 고장 확대를 막아주는 역할을 수행한다.

Step 2는 기계식 DC 차단기가 개극 동작을 시작하는 구간으로 고장 발생 약 5[msec]이후인 15[msec]부터 19.5[msec]사이를 나타낸다. 기계식 DC 차단기가 개극 동작을 시작함과 동시에 HTS는 초전도성을 회복하기 시작한다. 기계식 DC 차단기의 주회로에 결합된 MCB가 개극동작을 시작하면 고장전류가 전류회로(Commutation circuit)로 우회되어 유입된다. MCB가 개극 되는 순간 MCB 양단에 발생하는 아크로 인하여 고장전류는 진동하는 왜형파($I_{main\ circuit\ current}$)가 된다. 진동하는 고장전류는($I_{commutation\ circuit\ current}$) LC가 적용된 전류회로에 우회되어 흐르게 되고 LC의 위상관계에 의해 주회로에 흐르는 전류와 반전된 발산진동을 하게 된다. 이때 전류회로에 흐르는 전류의 크기가 주회로에 흐르는 크기를 넘어서는 시점인 약 17[msec]에 그림 2-8과 같이 영점을 통과하는 인위적인 전류 영점(Zero crossing)이 생성되고 이때 MCB가 개극되어 고장선로가 차단된다. 식 (2-1)은 주회로에 흐르는 전류이고 식 (2-2)는 전류회로에 흐르는 전류를 나타낸다. 이후 TIV가 차단기 양단에 인가되고 이는 흡수회로(Absorption circuit)에 결합된 서지흡수기(SA : Surge Arrester)를 통해 소호되어 차단동작이 19.5[msec]에 완료된다.

$$I_{main\ circuit} = I_{total} \left\{ 1 + e^{-0.5L \frac{du_{arc}}{dt_m} t} \sin\left(\frac{1}{\sqrt{LC}} t\right) \right\} \quad (2-1)$$

$$I_{commutation\ circuit} = \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\frac{R}{2L} t} \sin\frac{1}{\sqrt{LC}} t \quad (2-2)$$

C. 한류형 초전도 DC 차단기

1. 초전도 특성

1908년 네덜란드의 Leiden 대학의 Kamerlingh Onnes 교수와 그 연구팀이 임계온도(T_c) 4[K]부근에서 수은의 저항이 0이 되는 것을 확인하고 이를 초전도라 하였다. 초전도 현상을 발견한 이래로 현재까지 지속적으로 연구가 진행되고 있다. 초전도체란 초전도 현상이 발생하는 물질을 뜻한다. 이때 초전도 현상은 '극저온에서 저항이 0이 되거나 완전 반자성체 특성을 보이는 현상'을 뜻한다. 초전도 상태를 유지하기 위해서는 임계온도, 임계전류밀도(J_c), 임계자기장(H_c)을 만족해야만 저항이 0인 초전도 상태를 유지할 수 있다[16][19].

초전도체의 영저항 특성을 이용해 AC 전력계통에는 SFCL을 보호기기로 적용하고 있다. 초전도 한류기는 임계전류 값 이하의 전류가 도통될 경우 저항이 0인 초전도 상태를 유지하여 선로에 손실을 발생시키지 않는다. 그러나 고장이 발생하여 초전도 한류기의 임계전류 값을 초과하는 고장전류가 유입되면 약 2[msec] 이내에 퀘칭 현상이 발현되어 임의의 임피던스를 지닌 상전도 상태로 상전이가 일어난다. 이때 초전도 한류기가 지닌 한류 임피던스에 의해 고장전류의 크기는 차단기의 차단내력 이하로 제한되고 이후 차단기가 안정적인 차단동작을 수행해 계통을 보호한다. 현재 AC 154[kV]계통에 적용된 하이브리드 초전도 한류기는 약 70[%]의 한류율로 96[msec]동안 고장전류를 감당한다[19][39].

2. DC 차단기 아크(Arc)

시뮬레이션 프로그램 내에 있는 DC 차단기 소자를 적용할 경우, 아크특성의 부재로 인해 과도현상 해석 시 정확도가 낮으므로 아크특성을 반드시 고려해야 한다. 아크특성은 주로 black-box 아크모델이 적용된다. Black-box 아크모델은 도전율을 변수로 설정하여 아크와 DC 차단기 사이의 상호작용을 상미분방정식으로 나타낸다. 대표 모델은 Cassie, Mayr, Schavmaker 아크모델이 있다[40-48].

식 2-3은 Cassie 모델의 아크방정식이다. Cassie model은 대전류 영역 및 온도가 8000[K]이상인 영역에 적합하다. 이는 아크전압의 크기를 고정시킴으로써 고장 전류가 상승하는 대전류 구간에서는 정확도가 높다. 그러나 전류영점이 포함된 소전류 구간에서는 도전율이 제로가 되어 아크가 완전 소호되는 것으로 계산되므로 소전류 구간에는 적합하지 않다[23][42-47].

식 2-4는 Mayr 모델의 아크 방정식이다. Mayr 모델은 전류영점 근처 및 소전류 영역, 온도가 8000[K]미만인 영역에 적합하다. 이 모델은 아크를 소호시킬 수 있는 에너지의 크기인 냉각용량 P_0 가 일정하다는 가정을 기반으로 도출된 모델으로써, 소전류 구간에서는 실제 차단기에서 발생하는 아크특성과 유사하다.

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u}{u_0^2} - 1 \right) \quad (2-3)$$

여기서,

g = 아크도전율 τ = 아크시정수 u_0 = 일시적인 안정구간에서 아크 전압

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P_0} - 1 \right) \quad (2-4)$$

여기서,

P_0 = 차단기의 용량(냉각용량) 아크를 소호시킬 수 있는 에너지

그러나 대전류 영역에서도 높은 신뢰도를 확보하려면 온도가 올라감에 따라 비례하여 P_0 도 변화를 해야 과도차단전압 특성이 반영되어 신뢰도가 높지만, 이는 P_0 가 일정하므로 대전류 영역에는 적합하지 않다[42-45].

식 2-5는 Schwarz 모델의 아크방정식이다. Schwarz 모델은 Cassie와 Mayr model의 서로 상반된 장단점을 보유하고 있는 하이브리드 모델이다. 아크시정수와 냉각용량을 도전율에 의한 식으로 표현하였기에 주위 기압에 따른 냉각용량의 변화와 전류 크기에 따른 에너지 및 아크시정수 특성을 모두 표현할 수 있어 정확한 아크현상 모의가 가능하다[5][23][42-48].

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau g^\alpha} \left(\frac{gu^2}{pP_0g^\beta} - 1 \right), \quad g = \int_0^t \frac{1}{\tau(g)} \left(\frac{i^2}{P_0(g)} - g \right) dt \quad (2-5)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 g &= \text{아크도전율} \quad \tau(g) = \text{도전율에 대한 아크시정수} \\
 P_0(g) &= \text{도전율에 대한 냉각용량} \quad p = \text{주의 기체의 압력}
 \end{aligned}$$

III. PSCAD/EMTDC를 활용한 설계 및 해석

A. 설계

그림 3-1은 PSCAD/EMTDC 프로그램을 활용해 설계한 한류형 초전도 DC 차단기의 실험 회로도이고, 표 3-1은 설계 값이다. 본 절에서는 한류형 초전도 DC 차단기의 한류 및 차단 특성을 중점적으로 분석하기 위해 회로를 단순화시켰고 전원부인 system, 한류부인 HTS, 차단부인 M-DCCB으로 나누어 설계하였다.

한류형 초전도 DC 차단기는 국내 및 국제 적용이 목적이기에 국제 HVDC 구간 전압을 충족시키면서 해석상 계산이 용이한 DC 100[kV]를 인가전압으로 설정하였다. 정격전류는 국내의 DC ± 80 [kV], 60[MW], HVDC 5.2[km]구간 중 약 0.5[km]에 초전도 케이블을 적용함으로써 미래형에 가장 가깝게 건설한 제주 한림과 금악 변전소(C/S : Converter Station) 구간의 정격전류 값인 375[A]를 기준으로 계산상 편의를 위해 400[A]로 설정하였다. 고장전류의 크기는 최대 70[kA]로 설계하였다. 고장 전류의 크기 설계 값에 대해서는 ‘IV’에서 서술하였다.

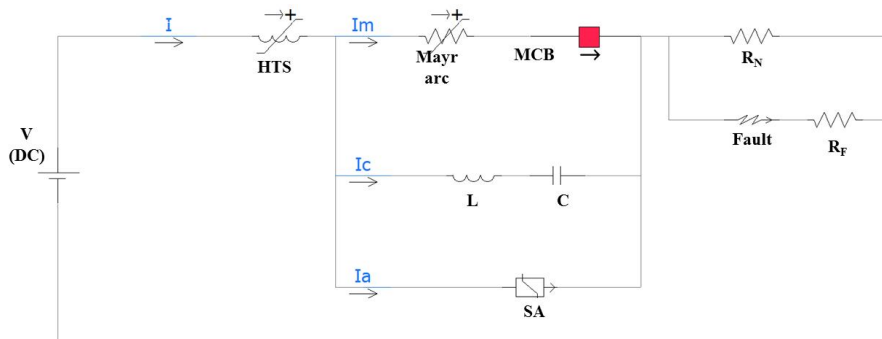


Fig. 3-1 CLS-DCCB simulation circuit

Table 3-1 Design values of the simulation circuit

Part	Parameter	Value	Unit
System	V : DC	100	[kV]
	I : Total current	400	[A]
	R _N : Normal load	250	[Ω]
	R _F : Fault load	1.42	[Ω]
	Fault time	0.1	[sec]
	Fault period	0.1~0.3	[sec]
HTS	I _C : Critical current	4	[kA]
	R _M : Quench resistance	10	[Ω]
	Inductance	0.01	[mH]
Mechanical Circuit Breaker	Arc model	Mayr	-
	MCB capacity (P ₀)	0.3 / 5	[MVA]
	L	0.01	[mH]
	C	100	[μF]
	SA (Arrester voltage rating)	125	[kV]

1. 한류부 HTS

그림 3-2는 한류형 초전도 DC 차단기의 고장전류 제한기술 확보를 위한 초전도체 설계 알고리즘이다. 선로에 흐르는 전류(I)의 크기가 초전도체의 임계전류(I_c : I_{critical current}) 이하일 경우 초전도체는 임피던스가 0인 초전도상태를 유지한다. 그러나 고장이 발생하여 초전도에 인가되는 I의 크기가 초전도체의 I_c를 초과할 경우, 시정수와 제한 값에 따라 초전도체의 임피던스가 증가하여 상전도 상태로 전이된다. 이는 식 (3-1)을 기반으로 설계하였다[11-12][27-28][49]. R_m은 최대 퀘칭 저항으로서 초전도체의 최대 저항크기이고, T_{sc}는 퀘칭 상태의 전이특성 시정수이다[49-52][34-35][53-54]. 또한, 고장전류의 상승시간을 지연시키기 위해 초전도체를 코일타입으로 설계하였으며 인덕턴스는 0.01[mH]로 설정하였다.

$$R_{SFCL}(t) = \begin{cases} 0 & (t < t_{quenching}) \\ R_m \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{t}{T_{sc}}\right)} & (t_{quenching} < t) \end{cases} \quad (3-1)$$

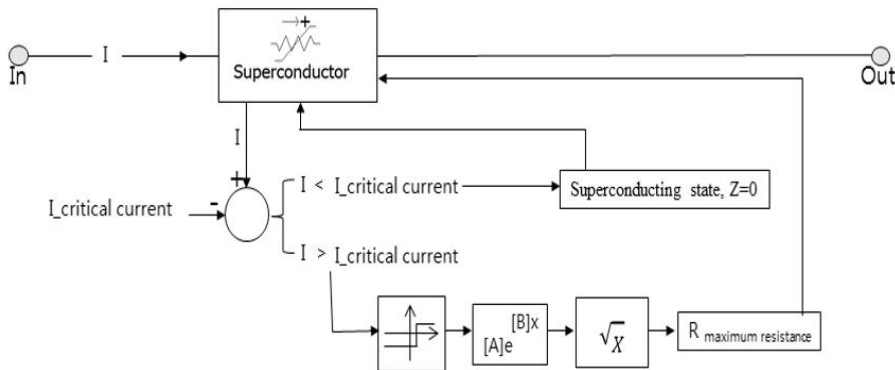


Fig. 3-2 Superconductor design algorithm

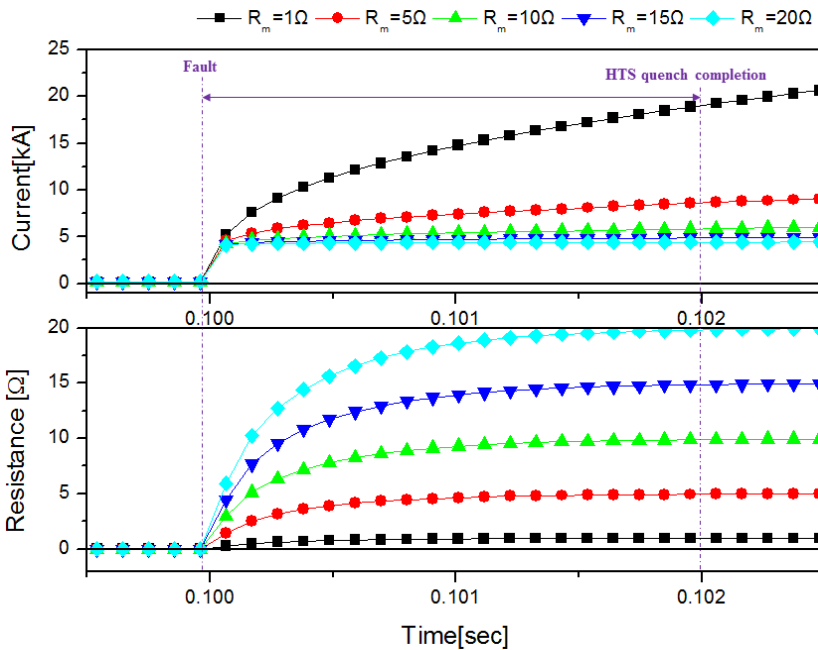


Fig. 3-3 Current-limiting characteristics according to current-limiting impedance magnitude of HTS

그림 3-3은 초전도체의 한류 임피던스 크기에 따른 한류특성을 나타내는 곡선이다. 초전도체는 고가이므로 최소의 사용으로 최대의 효과를 도출하는 것이 중요하다. 초전도체의 최대 한류 임피던스 크기를 선정하기 위해 한류 임피던스 크기를 1~20[Ω]까지 5배씩 증가시켜 분석하였다. 인가전압은 100[kV]이고 임계전류 값은 정격전류의 10배인 4[kA]로 설정하였다.

시뮬레이션 결과, 1, 5[Ω]의 경우 초전도체가 최대 한류 임피던스 값에 도달했음에도 불구하고 고장전류의 크기가 계속해서 증가하였다. 이는 한류 임피던스 크기가 고장전류의 크기를 제한하기에 부족함을 의미한다. 반면 10~20[Ω]까지는 초전도체가 최대 한류 임피던스 크기에 도달함과 동시에 고장전류에는 거의 변화가 없었다. 물론, 초전도체의 한류 임피던스 크기가 클 수록 고장전류의 크기는 더욱 낮게 제한되었다. 그러나 앞에서 서술한 바와 같이 초전도체의 경제적인 측면을

고려해야하므로 본 시뮬레이션에서는 초전도체의 한류 임피던스 최대값을 10[Ω]으로 설정하였다.

그림 3-4는 설계된 초전도체의 동작 곡선이다. 초전도 이론에서 설명한 바와 같이 임계값 이하인 정상 상태에서는 임피던스가 0인 초전도 상태를 유지하였다. 이후 고장을 0.1[sec]에 모의하였고 고장전류의 크기가 4[kA]를 넘어서는 순간 전이 특성 시정수에 따라 초전도체의 임피던스는 설정된 R_m 까지 약 2[msec] 이내에 증가하여 상전도 상태로 전이됨을 확인하였다. 이때 전이특성 시정수를 2[msec]로 설정한 이유는 현재 AC 345[kV]에 적용된 초전도 한류기가 2[msec]이내에 켜치되어 고장전류를 제한하므로 이를 기준으로 설정하였다.

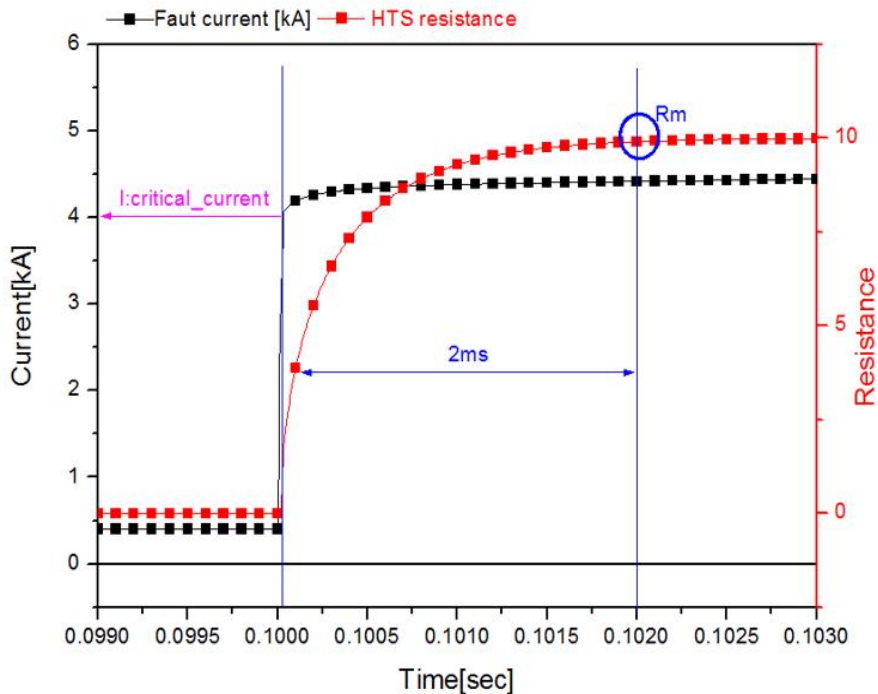


Fig. 3-4 characteristics curve of the designed superconductor

2. 차단부 M-DCCB

기계식 DC 차단기는 주회로, 전류회로, 흡수회로로 총 3개의 회로가 병렬로 결합된 구조이다. 기계식 점접인 MCB가 적용된 주회로, L과 C가 직렬로 결합된 전류 회로, 피뢰기로 구성된 흡수회로는 주선로에 적용된 MCB의 개방동작을 보조하는 선로이다.

차단기의 차단동작 완료시간 및 차단성능은 dI/dt 로 시간변화에 따른 전류변화량으로 결정된다. 여기서 dI 는 설계된 고장전류 크기에서 제한 혹은 저감된 고장전류 크기의 차이를 나타내고, dt 인 시간 변화는 고장이 발생한 시점부터 고장 선로가 완전히 개방된 시점까지의 시간을 의미한다. 그러므로 고장전류 감소율인 dI/dt 의 값이 클 수록 고장전류의 크기가 빠르게 감소되므로 차단동작이 빠르게 이루어짐을 뜻한다[31].

주회로는 사고가 발생하면 기계식 DC 스위치가 점접을 개방하여 사고 선로를 차단한다. DC의 경우는 AC와 달리 반주기마다 전류 영점이 존재하지 않으므로 아크 특성에 대한 고려가 필수이다.

앞에서 설명한 3개의 아크모델 중 mayr 아크모델을 선정하였다. 발산전류진동 차단방식이 적용된 기계식 DC 차단기 사용으로 인해 전류영점 근처에서 차단동작이 이루어지며 이때 온도는 8000[K]이하이므로 mayr 아크모델이 적합하다. 아크모델 설계 시 입력하는 냉각상수 P_0 는 차단기의 차단능력을 결정짓는 요소로써 5[MVA]로 설정하였다. 냉각상수 선정기준은 기존에 개발된 차단기의 점접 사이의 축적된 압력수치이다. 현재 ABB에서 개발한 SF₆가 적용된 puffer type의 AC 차단기의 경우 최대 70[bar]의 압력이 축적되어 있고 SF₆가 적용되지 않은 정격 차단전류가 25[kA]인 차단기에는 2[bar]의 공기압력이 축적되어 있다[5].

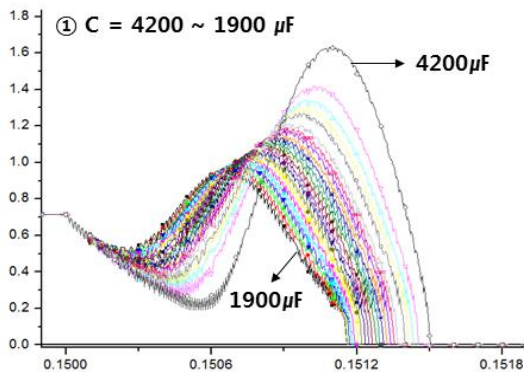
이에 본 논문에서 설계된 DC 차단기는 기계식 점접에 공기압력이 축적되어 있다가 차단동작을 할 때 출력되므로 앞에서 제시된 값($P_0 = 12.5[kA/bar]$)을 기준으로 고장전류 최대 크기가 70[kA]이므로 약 5배 이상인 5[bar]로 설정하였다.

전류회로는 L과 C가 수동소자로 동작하여 차단동작을 보조한다. 주회로에 적용된 MCB가 개극됨과 동시에 고장전류는 전류회로로 우회되어 유입되고 이로 인해 L, C가 충·방전이 이루어지면서 발산진동전류가 생성된다. 전류회로에서 생성된 발산진동전류의 크기가 점점 커지면서 주회로에 흐르는 전류의 크기를 초과하는 순간 인위적인 전류영점이 생성되어 MCB가 개극 동작을 완료하여 고장선로를 차단한다. 그러므로 기계식 DC 차단기에는 전류회로에서 인위적인 전류영점을 생성하므로 L, C값을 선정하는 것이 중요하다. 그러나 참고문헌에 조사된 바와 같이 현재 IEEE 등 SCI급에 게재된 타 논문들에도 명확한 선정 기준이 제시되어 있지 않으므로 자체적으로 변수를 설정하여 분석한 후 선정하였다[27][56-59]. 전류회로는 L과 C를 교차로 고정 및 가변시켜 전류영점 생성시점과 차단동작 특성을 해석한 후 자체적인 기준을 제시하여 L, C값을 선정하였다.

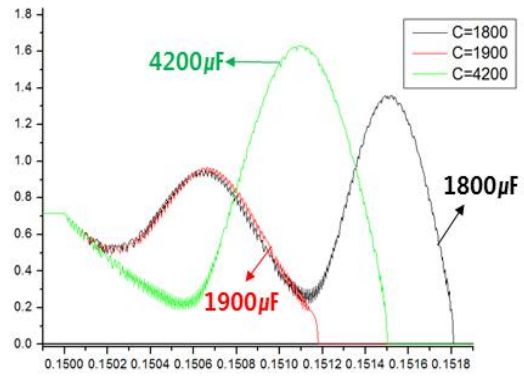
먼저, 그림 3-5, 3-6은 L을 0.01[mH]로 고정하고 C값을 4300[μ F]에서 700[μ F]가 변시켜 분석한 그래프이다. 700[μ F]이하 10[μ F]까지는 이전의 C값과 같은 패턴을 나타내므로 그래프는 생략하였다. 그림 3-5는 C값 가변에 따른 전류영점생성 곡선을 나타낸다. C값에 따라 전류영점생성 주기가 1~4주기(T) 이상으로 구분되었다.

C값이 커질수록 전류영점 생성주기가 단축되었다. C값이 4200~1900[μ F]인 경우 그림 3-5(a)와 같이 전류영점이 1주기 이내 생성되었다. C값이 1800~1200[μ F]인 경우는 그림 3-5(b)와 같이 2주기 이내, C값이 1100~800[μ F]인 경우에는 그림 3-5(c)와 같이 3주기 이내, C값이 700[μ F]이하부터는 4주기 이후에 생성되었다.

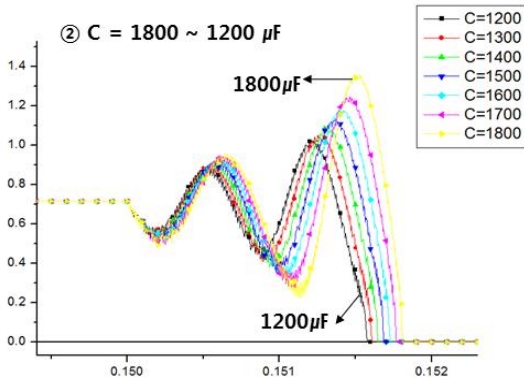
그림 3-6은 C값에 따른 차단특성을 나타낸 곡선이다. 전류영점은 그림 3-6(a)와 같이 C=4200~1900[μ F]일 때 가장 빠르게 1주기 이내 생성되었지만 전류회로의 수동소자인 L, C에 축적된 에너지 또한 C값의 크기에 비례하였다. DC 차단기의 차단동작은 L, C에 축적된 에너지를 모두 방전시키는 시간까지 포함되므로 그림 3-6(c)와 같이 차단시간이 가장 오래 걸렸다. 반면에 최소 3주기 이후에 전류영점이 생성된 구간인 1100~700[μ F]일 때는 L, C에 축적된 에너지가 작으므로 DC 차단기의 차단동작이 빠르게 이루어짐을 확인하였다.



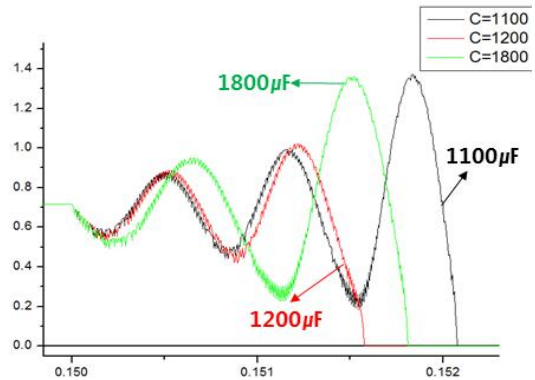
(a) $C=4200\sim 1900[\mu F]$



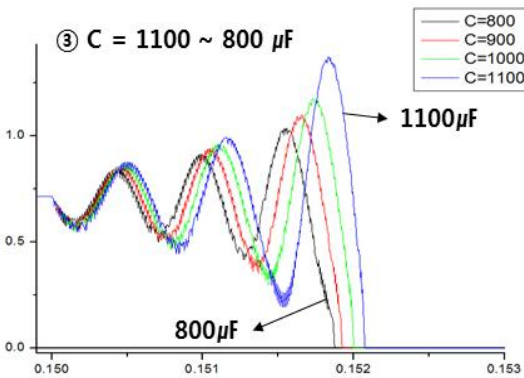
(d) 1~2[T]



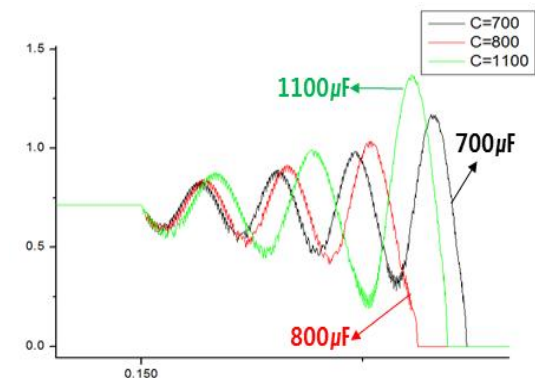
(b) $C=1800\sim 1200[\mu F]$



(e) 2~3[T]



(c) $C=1100\sim 800[\mu F]$



(f) 3~4[T]

Fig. 3-5 Zero crossing curves according to variation of the C values

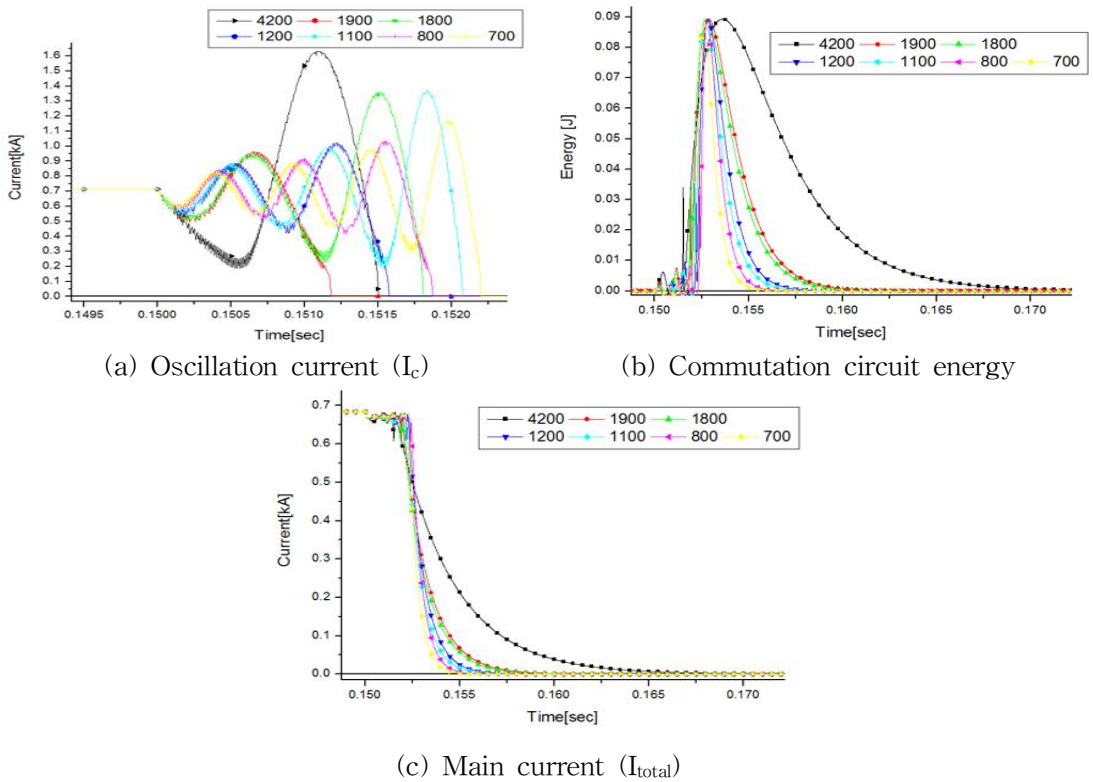


Fig. 3-6 Interruption curves according to variation of the C values

Table 3-2 Interruption characteristics according to variation of the C values

L [mH]	C [μ F]	F [Hz]	1cycle [msec]	Zero crossing creation cycle [T]	Zero crossing creation time [msec]	Cut-off completion time [msec]	Energy [J]
0.01	4300	768	1.30	X	-	-	-
	4200	777	1.29	2T	1.5	17.59	0.525
	1900	1155	0.87		1.1	10.6	0.238
	1800	1187	0.84	3T	1.8	10.6	0.225
	1200	1454	0.69		1.57	8.5	0.15
	1100	1518	0.66	4T	2	8.5	0.1375
	800	1780	0.56		1.87	6.9	0.1
	700	1903	0.53	5T 이상	2.2	6.25	0.0875

표 3-2는 위의 결과를 표로 나타낸 값이다. 전류영점 생성시점과 DC 차단기의 차단동작 완료 시점이 비례하지 않음을 확인하였다. 전류영점생성 주기로 보면 차이가 크지만 전류영점생성 시간이나 차단완료 시간을 비교할 때 큰 차이가 발생하지 않았다.

다음으로 C값을 고정하고 L값을 가변시켜 분석한 결과, L값이 증가함에 따라 파장이 길어지게 되어 전류영점이 늦게 생성되었고 C값이 작더라도 L값에 의해 전류영점 생성이 지연되어 범주를 선정할 기준이 명확하지 않았다. 그러므로 본 연구에서는 L값 고정 후 C값을 가변시키는 방법으로 L, C값을 선정하였다.

흡수회로에는 MOV SA가 적용되었다. 이는 주회로와 전류회로가 차단동작을 완료한 후 차단기 양단에 인가되는 과도차단전압(TIV : Transient Interruption Voltage)과 잔류에너지를 흡수시켜 소호하는 역할을 한다[37]. TIV는 AC 차단기에서 과도회복전압(TRV : Transient Recovery Voltage)과 같은 의미로 차단기 양단에 발생하는 과전압을 의미한다[36]. 단, AC에서는 차단기 양단에 발생하는 과전압을 회복전압이라 판단하여 차단기의 차단시간을 고장이 발생한 시점부터 TRV가 발생하기 전까지로 규격화 하였다. 그러나 DC에서는 전류영점의 부재로 인해 차단기 양단에 발생하는 과전압이 회복단계가 아닌 잔류 전압, 전류, 아크 등이 소호되는 차단전압으로 판단하였다. 이에 차단시간을 고장이 발생한 시점부터 TIV가 소호되는 시점으로 규격화되고 있다.

SA는 전압억제형 서지보호장치(SPD : Surge Protection Device)로써 동작전압을 초과하는 전압에 대하여 매우 낮은 임피던스를 갖게 되어 선로 임피던스와 SPD 임피던스의 상관관계에 의하여 전압이 억제되도록 동작한다. SA의 동작전압은 인가전압보다 약 15~25[%] 높은 125[kV]로 설정하였다.

B. 동작특성 해석

초전도체 결합에 따른 한류형 초전도 DC 차단기의 차단성능을 입증하기 위해 그림 3-7과 같은 기본적인 3가지 타입의 차단기를 설계하여 비교분석하였다. 그림 3-7(a)는 기계식 접점만 존재하는 순수 기계식 DC 차단기이고, 그림 3-7(b)는 초전도체가 없이 기계식 DC 차단기에 발산전류진동방식이 적용된 기계식 DC 차단기이고 그림 3-7(c)는 그림 3-7(b)의 기계식 DC 차단기에 초전도체를 직렬로 결합한 한류형 초전도 DC 차단기이다.

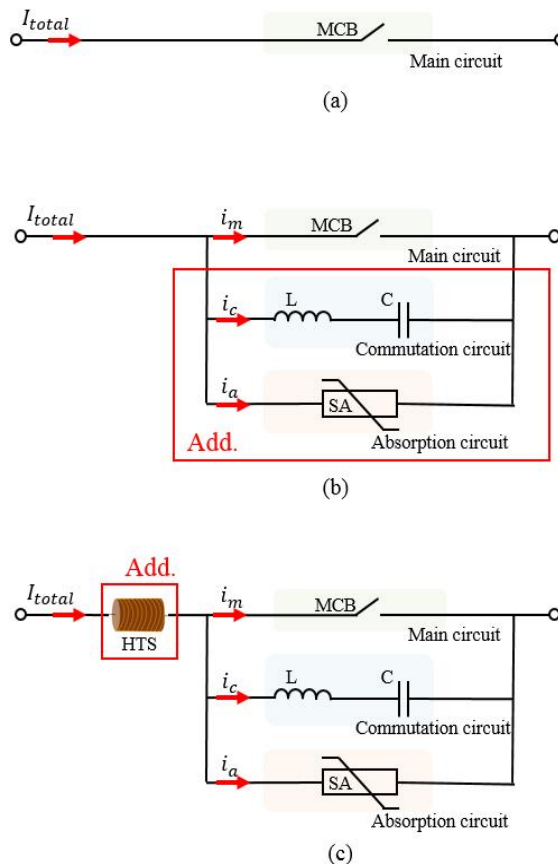


Fig. 3-7 Circuit structure of various CB types

1. 초전도체 결합 유무에 따른 차단특성

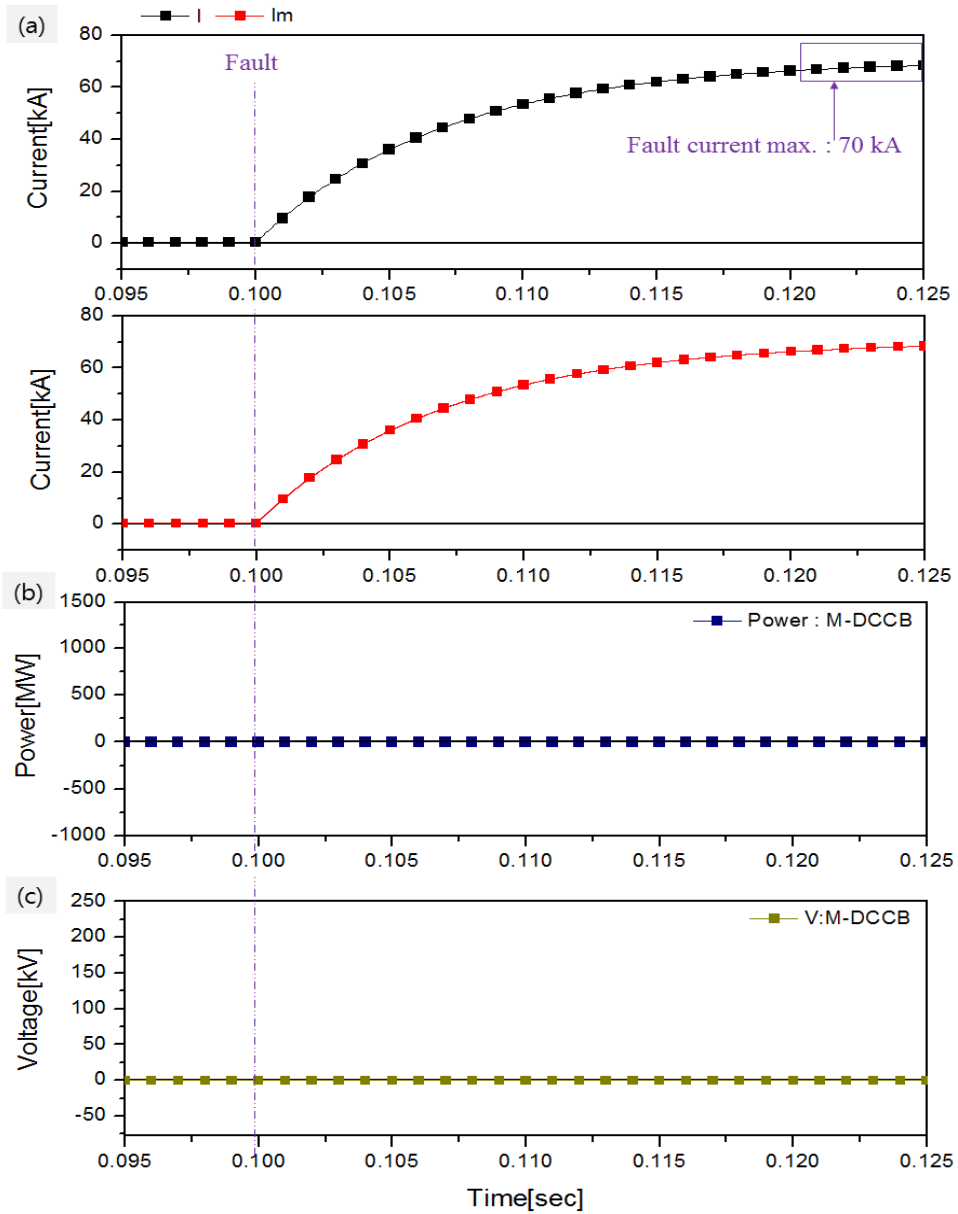
a. 순수 기계식 DC 차단기

그림 3-8은 기계식 접점만 적용된 순수 기계식 DC 차단기의 동작특성을 나타낸다. 시뮬레이션 해석조건은 “A. 한류형 초전도 DC 차단기 설계”에서 설정한 바와 같다. 정격전압인 100[kV]를 인가하자 400[A]의 정상전류가 도통되었다. 그러나 0.1[sec]에 고장을 모의하자 전류의 크기가 점점 증가하였고 설계 값인 최대 고장 전류 크기인 70[kA]까지 도달하였다. 동작지연 시간 이후 MCB가 개극동작을 시도하였으나 개극되지 않았다. 이는 DC 차단기가 차단동작에 실패함을 뜻한다. 차단 실패의 이유는 전류영점이 존재하지 않는 DC 전류의 경우 차단동작 시 기계식 접점인 MCB 사이에 큰 아크에너지가 발생되는데 이를 소호시키기에 설계된 차단기의 냉각 전력(P_0) 값이 충분하지 않았기 때문이다.

b. HTS가 결합되지 않은 기계식 DC 차단기

그림 3-9는 초전도체가 적용되지 않고 발산진동전류 방식이 적용된 기계식 DC 차단기가 적용된 경우 전압 및 전류 특성을 나타낸 곡선이다. 순수 기계식 DC 차단기와 같은 동작 메커니즘을 나타냈다. 100[kV]의 전압을 인가하자 설계된 정상전류 값인 400[A]가 안정적으로 도통되었다.

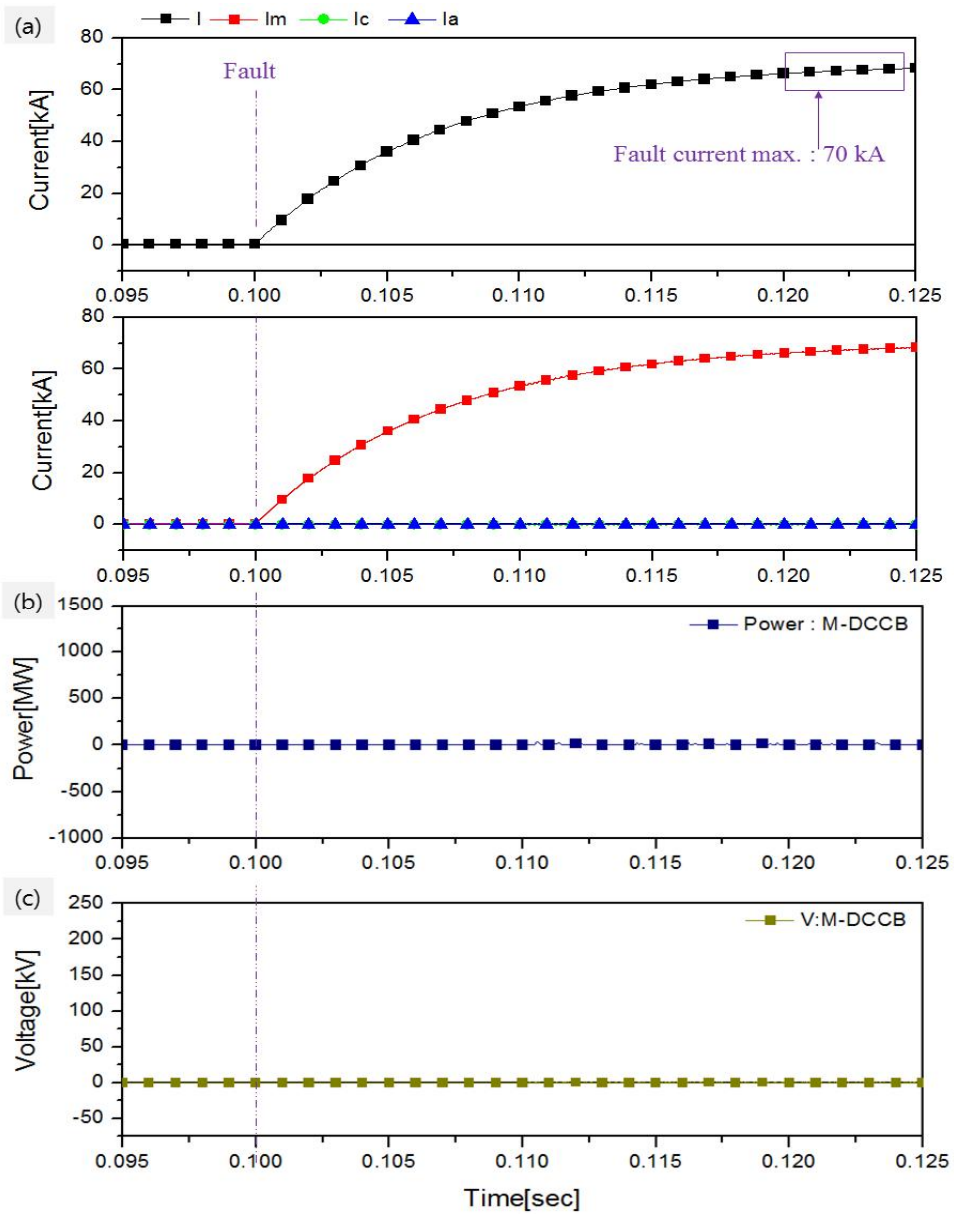
이후 0.1[sec]에 사고를 발생시키자 전류의 크기는 점점 증가하였다. 기계식 접점 사용 및 계전시간으로 인해 고장이 발생하고 약 10[msec]이후에 DC 차단기의 주회로에 적용된 MCB가 개극 동작을 시도하였다. 그러나 MCB의 접점 사이에 발생하는 아크를 소호시키기에 설계된 차단기의 냉각전력(P_0)값이 충분하지 않아 개극되지 않았고 이로 인해 고장전류는 최대 크기는 70[kA]까지 증가되었다. 이는 DC 차단기가 차단에 실패됨을 의미한다.



(a) total line and M-DCCB cut-off current

(b) M-DCCB power burden (c) M-DCCB voltage

Fig. 3-8 Operation characteristics when only M-DCCB is applied



(a) total line and M-DCCB cut-off current

(b) M-DCCB power burden (c) M-DCCB voltage

Fig. 3-9 Operation characteristics when M-DCCB is applied without HTS

c. 한류형 초전도 DC 차단기

그림 3-10은 한류형 초전도 DC 차단기가 적용된 경우 동작특성을 나타낸 그래프이다. 정상 시 초전도체에 인가되는 전류의 크기가 임계 전류 값 이하이므로 초전도체는 저항이 0인 초전도 상태를 유지한다. 이로 인해 정상 시에는 초전도체에 의한 손실은 발생하지 않고 안정적으로 전류를 유입한다. 이후 0.1[sec]에 모의사고를 발생시켰다. 사고가 발생하고 약 2[msec] 이후에 초전도체는 그림 3-2의 알고리즘에 따라 켄치되어 상전도 상태로 전이되었고 이로 인해 고장전류의 최대값은 16.07[kA]로 제한되었다. 초전도체의 한류특성에 의해 설계된 고장전류보다 약 4배 낮은 고장전류가 기계식 DC 차단기로 유입되었다. 고장이 발생하고 약 10[msec]이후인 0.11[sec]에 기계식 DC 차단기의 MCB가 개극동작을 시작하였다. MCB가 개극동작을 시작함과 동시에 고장전류는 전류회로로 유입되었고 L, C가 진동전류를 발생시켰다. L, C의 충·방전 동작에 의해 생성된 진동전류의 크기가 점점 증가하여 주회로에 흐르는 전류의 크기를 넘어서는 순간인 0.1135[sec]에 인위적인 전류영점이 생성되었고 이때 MCB가 개극동작을 완료하여 고장선로를 차단하였다. 이후 차단기 양단에 인가된 TIV가 흡수회로의 SA를 통해 소호됨으로써 식 (3-2)에 따라 고장전류는 1[msec]당 3.08[kA]를 감소시켜 차단동작을 완료하였다.

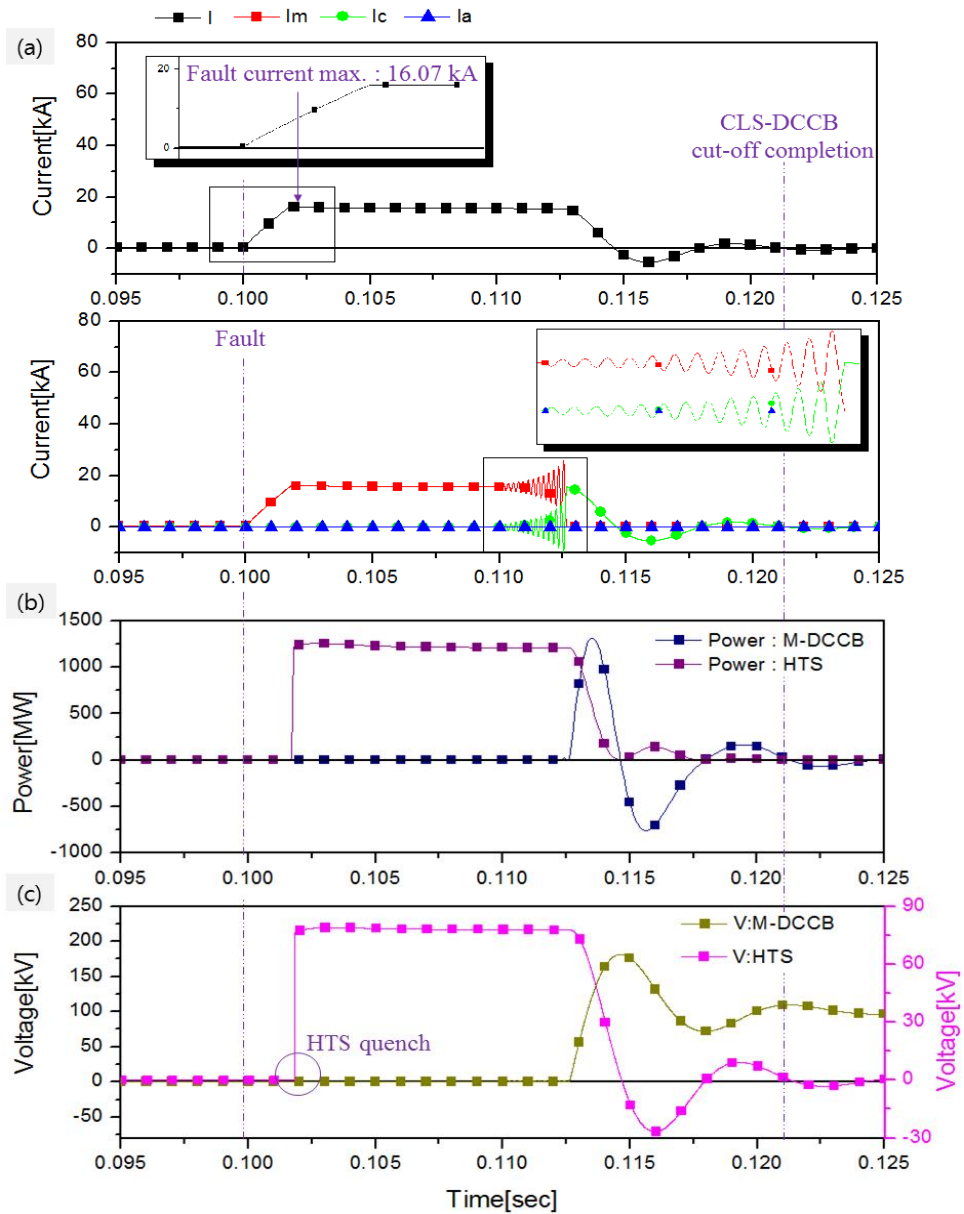
$$I_{\text{fault current reduction rate}} = \frac{dI}{dt} [A/ms] \quad (3-2)$$

$$\int_{T_s}^{T_e} V_{M-DCCB} \cdot I_t dt \quad (3-3)$$

$$\int_{T_s}^{T_e} V_{HTS} \cdot I_t dt \quad (3-4)$$

여기서,

$$T_s = \text{fault start time}, T_e = \text{fault end time}, I_t = I \text{ total current}$$



(a) total line and M-DCCB cut-off current

(b) M-DCCB power burden (c) M-DCCB voltage

Fig. 3-10 Operation characteristics when CLS-DCCB is applied

d. 고찰

표 3-3은 그림 3-7과 같은 차단기 타입별 동작특성을 분석한 그림 3-8, 3-9, 3-10의 결과값을 나타낸 표이다. HVDC급인 100[kV]의 전압에서는 순수 기계식 DC 차단기, 발산전류 진동방식을 이용한 기계식 DC 차단기만 적용된 경우 차단동작이 실패되었다. 그러나 차단동작을 실패한 기계식 DC 차단기에 직렬로 초전도체를 결합시킨 한류형 초전도 DC 차단기의 경우 초전도체의 한류동작으로 고장전류의 최대 크기를 약 70[%] 낮게 제한함으로써 제한된 전류가 기계식 DC 차단기로 유입되므로 발생하는 아크에너지가 저감되어 약 1주기 이내 차단동작이 이루어짐을 확인하였다.

표 3-4는 연구동향에서 언급된 기존에 연구 및 개발된 차단기와 한류형 초전도 DC 차단기의 성능을 비교한 표이다. 한류형 초전도 DC 차단기(CLS-DCCB)는 반도체 소자 적용 없이 빠른 차단동작을 확보하였으며 기존에 제안된 차단기들의 전압 및 전류 대비 고장전류 감소율인 dI/dt ability도 우수함을 확인하였다.

Table 3-3 Interruption characteristics values of the 5[MVA] M-DCCB according to the existence or absence of a superconductor

Interruption capacity: 5[MVA]	Only M-DCCB	Without M-DCCB	CLS-DCCB
Rated voltage[kV]	100	100	100
Rated current[kA]	0.4	0.4	0.4
Max. fault current[kV]	70	70	16.07
dI/dt [kA/msec]	-	-	3.08
Current-limiting rate[%]	-	-	77.04

Table 3-4 Comparison of the performances of between the existing circuit breakers and CLS-DCCB

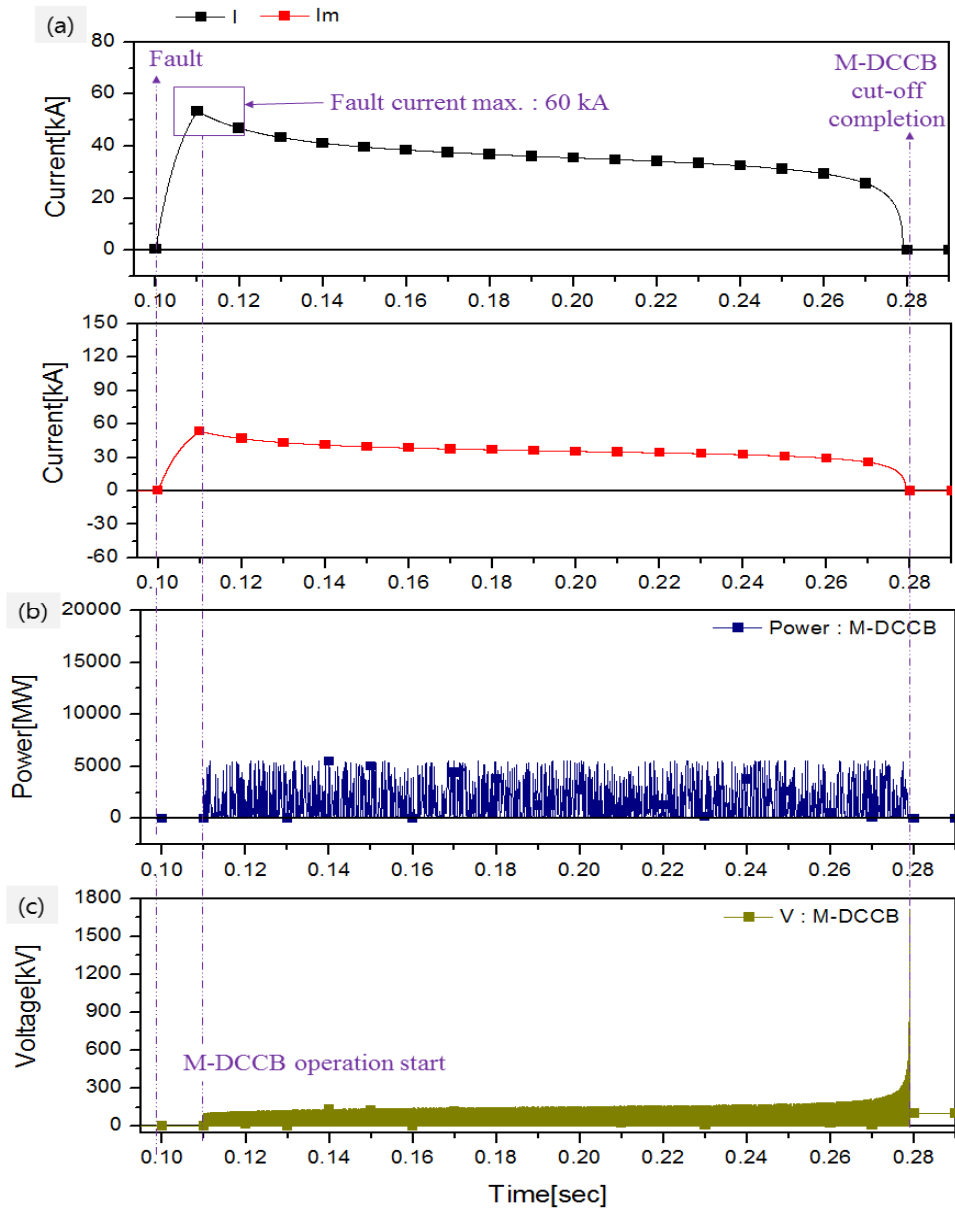
	ABB	Siemens	Alstom	Novel	CLS-DCCB
Static switch	IGBTs	Thyristor, diodes	Thyristor diodes	Thyristor, diodes	-
Cut-off speed	Fast	Fast	Fast	Fast	Fast
Weakness	Expensive, on-state loss	Voltage, reverse, on-state loss	Control, complex, on-state loss	Voltage, reverse, on-state loss	Expensive
Rated voltage[kV]	320	400	120	120	100
Cut-off current[kA]	9	15	7.5	20	16
dI/dt[kA/msec]	3.5	3	10	10	3.1

2. 차단기 타입별 100[kV]급 차단특성

차단기의 차단용량을 5[MVA]로 설계한 경우, 초전도체가 결합되지 않은 구조의 DC 차단기 모두 차단동작이 실패함을 확인하였다. 초전도체의 결합 유무에 따른 정확한 동작특성을 비교 분석하기 위해 기계식 DC 차단기만 단독으로 적용할 경우에도 차단이 가능하도록 차단용량을 점점 증가시켜 분석하였다.

a. 순수 기계식 DC 차단기

그림 3-11은 그림 3-7(a)와 같은 순수 기계식 DC 차단기의 차단 용량을 증가시킨 차단특성 곡선이다. 순수 기계식 DC 차단기가 적용된 경우 HVDC 전압인 100[kV]에서 차단이 완료되는 조건을 도출하기 위해 냉각전력을 점점 증가시켜 분석한 결과, 표 3-1에 언급한 초기 설계조건보다 약 360배 높은 값인 최소 1800 [MVA] 차단용량일 때부터 차단동작이 성공하였다. 정상 시 동작 메커니즘은 앞에서 해석한 바와 같이 안정적으로 전류가 유입되었다.



(a) total line and M-DCCB cut-off current

(b) M-DCCB power burden (c) M-DCCB voltage

Fig. 3-11 Operation characteristics when only M-DCCB is applied

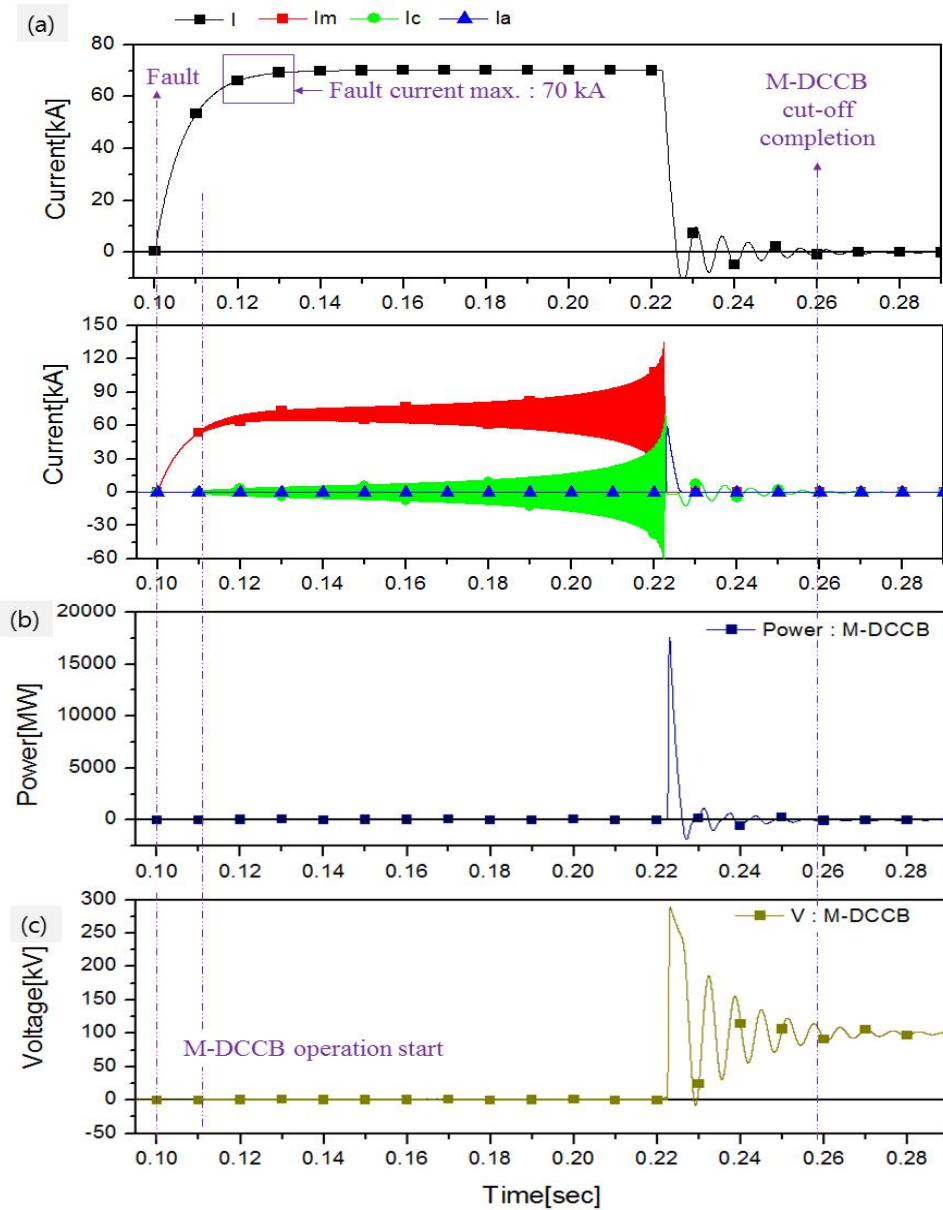
0.1[sec]에 고장을 모의하였고 사고전류의 크기는 점점 증가하였다. 차단동작에 실패한 앞의 경우와는 다르게 차단기의 MCB가 개극동작을 수행하여 사고 전류의 크기가 60[kA]까지만 증가하였다. 0.11[sec]이후 MCB가 개극동작을 계속 시도하였으나 0.28[sec]에 아크가 소호되어 차단동작이 완료되었다. 식 (3-2)와 같이 고장 전류의 크기가 1[msec]당 0.39[kA]로 감소되어 차단동작을 완료하였다.

b. HTS가 결합되지 않은 기계식 DC 차단기

그림 3-12는 초전도체 없이 순수 기계식 DC 차단기에 전류 및 흡수회로의 보조회로가 결합된 기계식 DC 차단기의 동작특성이다. 그림 3-10과 마찬가지로 100[kV]에서 차단이 완료되는 설계조건을 도출하기 위해 냉각전력을 점점 증가시켜 분석하였다.

그 결과, 차단용량을 5[MVA] 기준 약 4배 상승된 23[MVA]에서부터 차단동작이 성공하였다. 100[kV]의 전압을 인가하자 400[A]의 정상전류가 안정적으로 도통되었다. 0.1[sec]에 사고를 모의하자 전류가 최대 70[kA]까지 증가하였다. DC 차단기의 동작지연 시간이 지난 10[msec]이후인 0.11[sec]에 MCB에 계전신호가 인가되어 개극동작을 시작하였다. MCB가 개극동작을 시작함과 동시에 전류회로에 있는 L과 C가 식 (2-2)와 같은 진동전류를 발생시켰고 이는 주회로에 흐르는 전류에 중첩되었다. 이로 인하여 사고발생 후 126.54[msec]에 인위적인 전류영점이 생성되어 MCB의 접점이 개극되어 고장선로를 차단하였다.

이후 흡수회로에 결합된 SA가 TIV를 소호시켜 차단동작을 보조함으로써 식 (3-2)와 같이 고장전류의 크기가 1[msec]당 0.44[kA]로 감소되어 차단동작을 완료하였다.



(a) total line and M-DCCB cut-off current

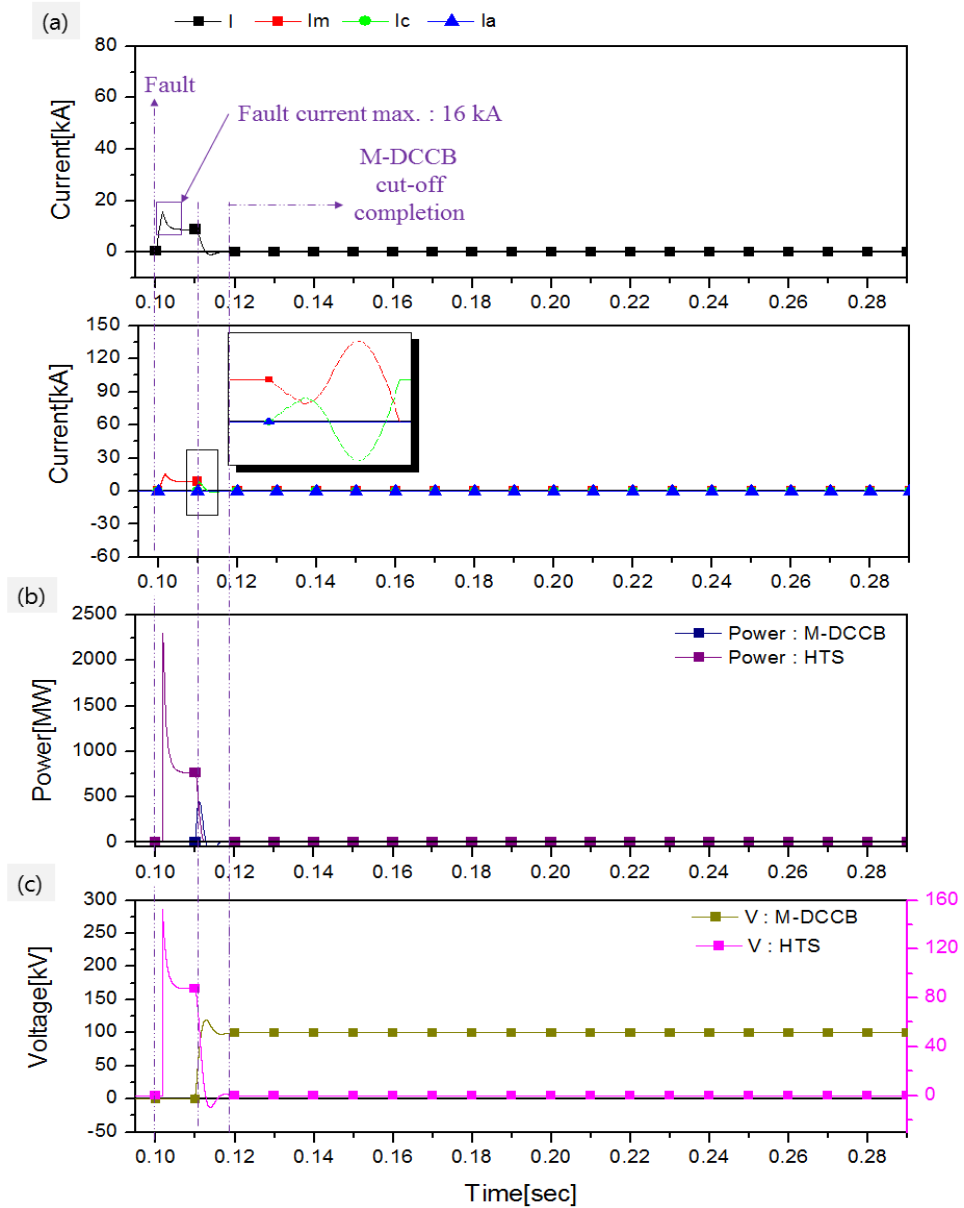
(b) M-DCCB power burden (c) M-DCCB voltage

Fig. 3-12 Operation characteristics when M-DCCB is applied without HTS

c. 한류형 초전도 DC 차단기

그림 3-13은 차단용량이 증대된 차단기에 초전도체를 결합한 한류형 초전도 DC 차단기의 동작특성을 나타낸 그래프이다.

시뮬레이션 조건은 초전도체가 없이 기계식 DC 차단기가 적용된 경우인 그림 3-12와 같다. 마찬가지로 100[kV]의 전압을 인가하자 400[A]의 전류가 안정적으로 도통되었다. 초전도체의 임계전류 값을 4[kA]로 설정했기에 정상상태에서 초전도체는 저항이 0인 초전도 상태를 유지하므로 선로에 손실을 발생시키지 않는다. 이후 0.01[sec]에 고장을 발생시켰다. 그림 3-10과 마찬가지로 고장발생과 동시에 초전도체가 켜치되어 고장전류의 최대 크기를 16[kA]로 제한하였다. DC 차단기가 동작하기 전까지 초전도체가 고장전류와 전력을 온전히 부담함으로써 계통의 부담을 완화시켰다. 초전도체 및 DC 차단기에 인가되는 전력부담은 식 (3-3~4)로 산출하였다. 고장이 발생하고 10[msec] 이후 DC 차단기에 계전신호가 인가됨에 따라 MCB가 개극 동작을 시작함과 동시에 초전도체는 빠르게 초전도성을 회복하기 시작하였다. 전류회로의 보조동작으로 인해 0.1123[msec]에 인위적인 전류영점이 생성되어 고장선로가 개방되었다. 이후 차단기 양단에 인가된 TIV를 SA가 소호시켜 3.77[kA/msec]의 고장전류 감소율로 차단동작이 완료되었다.



(a) total line and M-DCCB cut-off current

(b) M-DCCB power burden (c) M-DCCB voltage

Fig. 3-13 Operation characteristics when CLS-DCCB is applied

d. 고찰

표 3-5는 기계식 DC 차단기만 단독으로 적용한 경우에도 차단동작이 성공함을 확인하기 위해 차단용량을 점점 증가시켜 분석한 그림 3-11, 12, 13의 결과값을 나타낸 표이다. 초전도체가 결합된 한류형 초전도 DC 차단기는 순수 및 초전도체가 결합되지 않은 기계식 DC 차단기에 비해 고장전류의 최대 크기를 70[kA]에서 16[kA]로 약 70[%] 낮게 제한시켰다. 또한, 초전도체의 전력 부담과 한류 동작으로 인해 DC 차단기에 인가되는 전력부담이 크게 완화되어 고장전류의 크기도 0.44[kA/msec]에서 약 8.56배 빠르게 3.77[kA/msec]로 단축되었다.

그림 3-11, 12에 설계된 DC 차단기의 차단용량을 의미하는 냉각전력 값은 표 3-1에서 설계된 값보다 최소 4배에서 최대 360배 높은 값으로 재설계하였다. 앞에서 아크 특성을 설명할 때 언급한 바와 같이 5[MVA] 차단용량은 아크 저항 크기에 비하여 현저히 높은 압력수치로 설계한 값이므로 절대 낮은 값이 아니다 [17-18]. 23[MVA] 차단용량도 이상적인 수치이므로 추후 제작할 경우 실효성 및 기술적 실현 가능성 부분에서 많은 논의 및 검토가 요구된다. 순수 기계식 DC 차단기의 1800[MVA] 차단용량은 실현 불가능한 값으로 시뮬레이션에서만 적용 가능한 수치이다.

그러므로 이후의 해석 및 분석에서 순수 기계식 DC 차단기는 제외한다. 또한, 100[kV] 이상의 HVDC 계통에는 순수 및 초전도체가 결합되지 않은 기계식 DC 차단기만 단독으로 적용하기에는 많은 어려움이 있다고 판단된다.

표 3-3과 표 3-5를 보면 차단 용량에 관계없이 초전도체가 결합된 경우 초전도체의 한류동작 및 전력분담으로 인해 DC 차단기의 차단 성능이 크게 향상되었다. 또한, DC 차단기의 차단실패 가능성이 저감되므로 계통의 안정도 및 신뢰도가 향상될 수 있다는 가능성을 확인할 수 있었다.

Table 3-5 Interruption characteristics values at 100[kV]-scale
by the existence of a superconductor and the circuit breaker type

	Only M-DCCB	Without M-DCCB	CLS-DCCB
Interruption capacity[MVA]	1800	23	23
Rated voltage[kV]	100	100	100
Rated current[kA]	0.4	0.4	0.4
Max. fault current[kV]	60	70	16
dI/dt[kA/msec]	0.39	0.44	3.77
DCCB power burden[MJ]	298.06	28.87	0.52
HTS power burden[MJ]	-	-	11.73
Current-limiting rate[%]	-	-	77

3. 초전도체 결합에 따른 DC 차단기의 차단용량 범위

전 세계적으로 HVDC, MVDC, LVDC 계통은 다양한 시스템으로 새롭게 증설되고 있다. 나라 간 연계가 불가능했던 AC 계통과 달리 DC 계통은 나라 간 연계가 가능함에 따라 계통의 규모가 점점 커지고 있으며 이에 따른 고장전류의 크기 등 파급효과를 예측하기 어렵다. 그러므로 계통에서 예측하지 못한 고장이 발생했을 경우에도 차단동작을 수행할 수 있는 차단용량 범위가 넓은 차단기를 확보하는 것 또한 중요하다. 이에 앞에서 분석한 3가지 차단기 유형 중 순수 기계식 DC 차단기는 제외하고 차단용량이 23[MVA]인 기계식 DC 차단기의 시뮬레이션 설계값을 기반으로 초전도체가 적용된 한류형 초전도 DC 차단기의 정격전압을 증가에 따른 차단기의 차단용량 범위를 분석하였다.

a. HTS가 없는 기계식 DC 차단기

그림 3-14는 기계식 DC 차단기만 적용된 경우 정격전압보다 10[kV] 높은 110[kV]의 전압을 인가했을 때 동작특성이다. 정격전압 보다 높은 전압이 인가되어 예측된 고장전류의 크기보다 더 큰 고장전류가 발생할 경우 차단이 실패됨을 확인할 수 있었다.

b. 한류형 초전도 DC 차단기

그림 3-15는 한류형 초전도 DC 차단기에 인가전압을 110, 250, 350, 450[kV]를 인가했을 때 동작특성이다. 앞에서 설계 및 분석한 데이터들과 같이 초전도체가 전력을 분담하고 고장전류의 크기를 제한시켜 DC 차단기에 유입함으로써 DC 차단기에 가해지는 전력부담이 저감되었고 이로 인해 정격전압보다 77[%] 높은 전압까지 최대 0.28[kA/msec]로 고장전류를 감소시켜 차단동작이 완료되는 것을 확인하였다. 또한, 정격전압보다 약 4배 높은 450[kV]까지는 기계식 DC 차단기만 적용한 경우보다 2배 이상 빠르게 차단동작을 수행하였다.

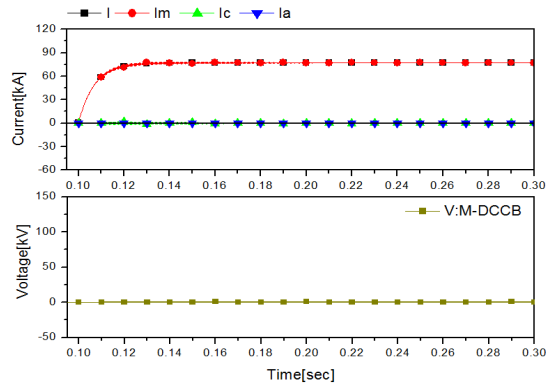
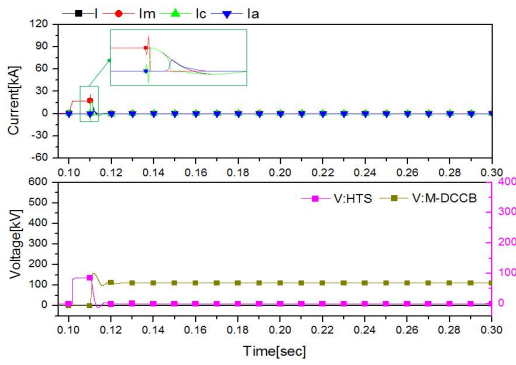
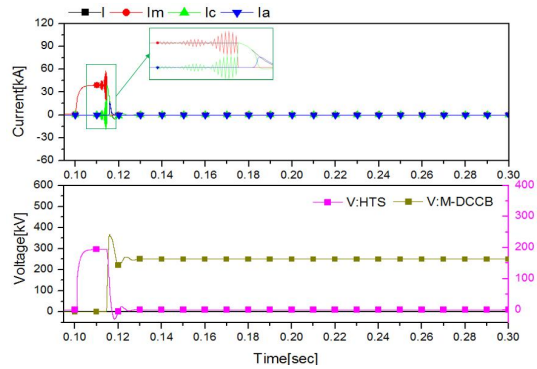


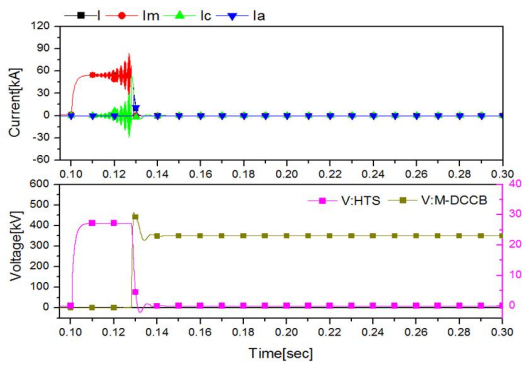
Fig. 3-14 Application of M-DCCB (DC 110[kV])



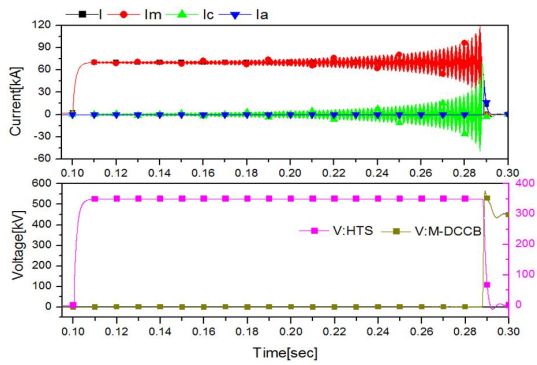
(a) DC 150[kV]



(b) DC 250[kV]



(c) DC 350[kV]



(d) DC 450[kV]

Fig. 3-15 Application of CLS-DCCB (DC 110~450[kV])

c. 고찰

표 3-6은 그림 3-14, 15의 결과값을 나타낸다. 차단기의 차단여부를 판단할 때는 차단기의 점점 개극 여부로만 판단하는 것이 아니라 시스템 측면의 보호협조를 고려한 시간 안에 차단이 되는 지가 중요한 요소이다. 자체적으로 2가지 조건을 제시하여 한류형 초전도 DC 차단기의 차단여부 및 차단용량의 범위를 분석하였다.

1번째 조건은 기계식 DC 차단기보다 빠르게 고장전류를 감소시켜야 하며 2번째 조건은 정격전압 기준, 초전도체에 가해지는 전력부담률이 60[%] 이내일 것으로 선정하였다. 현 계통에서 부하율도 60[%] 이상 사용할 경우 과부하 위험이 있기 때문에 이를 기준 수치로 제시하였다.

분석 결과, 기계식 DC 차단기만 적용할 때는 예측한 고장전류의 크기보다 큰 고장이 발생했을 경우 차단실패 가능성이 높다. 즉, 정확하게 고장전류의 크기를 예측하여 적용을 해야 하므로 다소 신뢰도 및 실효성 측면에 어려움이 있다. 반면에 한류형 초전도 DC 차단기는 정격전압 100[kV]를 기준으로 약 33[%] 높은 범위까지 차단이 가능하다.

Table 3-6 Cut-off range of CLS-DCCB according to increasing voltage

Rated voltage and test type[kV]		100	110	150	200	250	300	350	400	450
M-DCCB	Fault current reduction rate [kA/msec]	0.55	fail	fail	fail	fail	fail	fail	fail	fail
CLS-DCCB	Fault current reduction rate [kA/msec]	4.39	2.95	2.40	1.94	1.84	1.73	1.40	1.02	0.28
	HTS power burden [MJ]	11.7	13.8	27.3	54	102	196	396	949	4579
		-	11%	57%	78%	88%	94%	97%	98%	99%

4. 초전도체 결합에 따른 DC 차단기 용량저감 특성

앞에서 설계한 차단기의 차단용량인 5[MVA]와 23[MVA]는 아크특성에서 설명한 바와 같이 구현하기에는 다양한 측면의 고려가 필요하며 수 [mΩ]인 아크저항 크기에 비하면 이상적인 수치이다.

이에 그림 3-16과 같이 5[MVA] 기계식 DC 차단기에 초전도체가 결합된 경우 차단기의 용량저감 특성을 분석하였다.

시뮬레이션 결과, 초전도체가 결합된 한류형 초전도 DC 차단기의 경우 정격전압 100[kV] 기준 DC 차단기의 차단용량을 최대 1.2[MVA]까지 낮출 수 있었다. 그러나 1.2[MVA]의 경우 고장전류 감소율이 시간당 0.42[kA]로 5[MVA]인 차단기에 비해 차단동작이 7배 늦게 완료된다. 그러므로 기준용량 대비 고장전류 감소율의 최대 변화 폭을 3배로 설정하였고 약 60[%] 낮은 1.5[MVA]까지 차단용량을 저감할 수 있었다. 차단기의 용량을 낮출 수 있다는 것은 설계된 차단용량보다 더 큰 고장전류가 발생했을 경우에도 더욱 폭 넓게 차단이 가능함을 의미한다. 또한, 한류형 초전도 DC 차단기는 결합된 초전도체의 임계전류, 한류 임피던스 크기, 초전도체의 길이 등을 조절함으로써 차단용량 및 적용계통을 용이하게 조절이 가능하다.

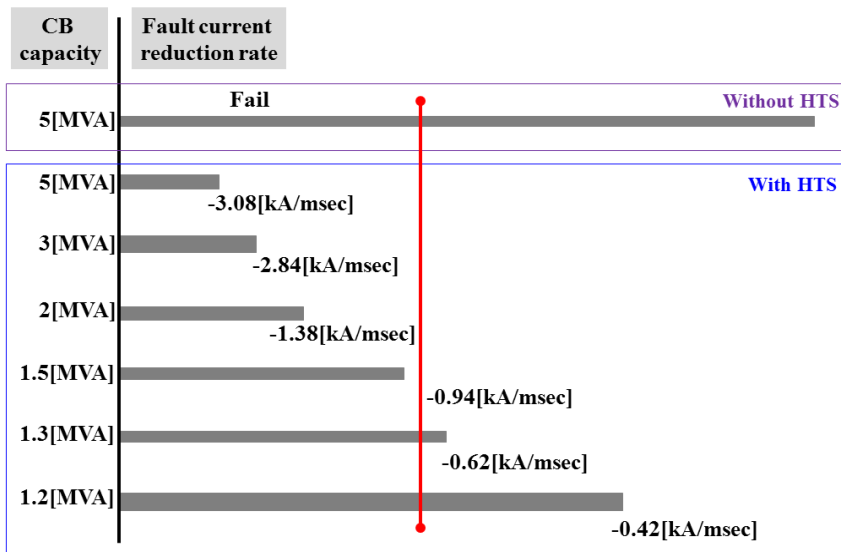
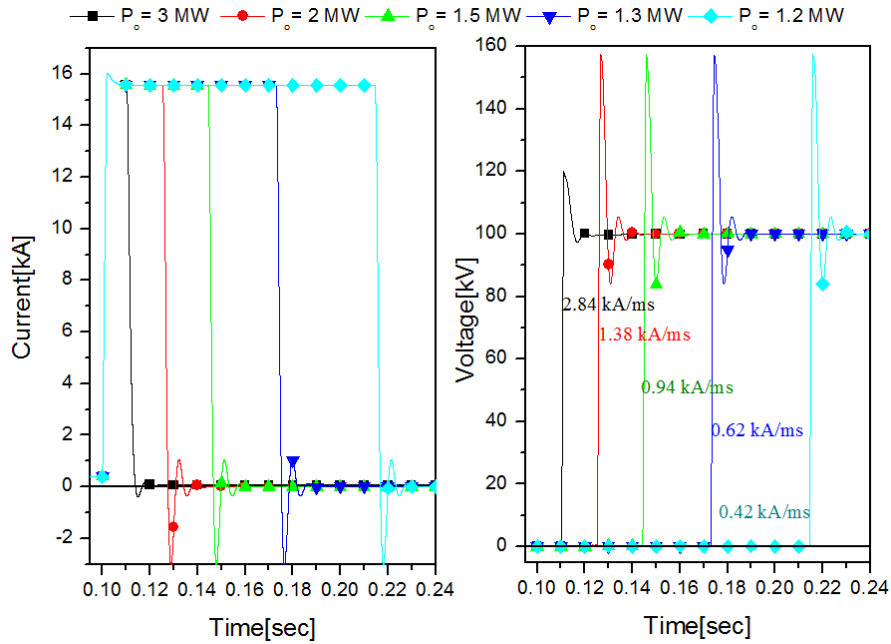


Fig. 3-16 DCCB capacity reduction characteristics in case of a superconductor addition

C. 계통연계형 PV 시스템에 적용된 경우 특성해석

1. DC 시스템연계를 위한 신재생에너지원 선정

친환경에너지에 대한 세계적인 관심이 높아지면서 국내에서도 신재생 에너지 공급 규모를 확대하기 위한 정책을 제시하고 있다. 신재생에너지원을 활용한 발전 시스템은 독립적인 발전을 이용한 대형시스템 및 소형 발전설비를 이용한 분산전원 시스템 구축도 진행되고 있다. 특히 기존 수력발전 중심에서 신재생에너지원 중 태양광과 풍력발전이 큰 비중을 차지하고 있다.

태양광에너지원은 타 에너지원에 비해 무한한 에너지를 가지고 있으며 기계적인 소음과 진동이 없고 발전용량의 신축, 운전 및 유지관리가 매우 용이하다. 뿐만 아니라, 태양전지 모듈의 수명은 최소 20년 이상으로 타 발전방식과 비교할 때 경제적인 비용이 크게 절감된다. 이로 인해 국내 태양광발전 시장은 연간 1.8[GW] 규모의 시장으로 2배 이상의 성장이 예상된다. 또한, 정부가 제시한 에너지 정책 2030은 신재생에너지 중 태양광의 비중을 크게 늘리는 것을 목표로 하고 있다[3-4].

이에 본 장에서는 발전량과 매장량, 계통연계와의 용이성, 설치비용 등을 고려하여 태양광발전을 기반으로 한 DC 시스템을 구축하여 한류형 초전도 DC 차단기의 차단특성을 해석하고자 한다.

2. 계통연계형 PV 시스템 설계

계통연계형 태양광(PV : Photovoltaic)발전 시스템은 PV 어레이, MPPT 제어, DC/AC 인버터, 수송가로 구성된다. 태양의 일사량과 온도를 계측하여 어레이를 통해 시간별 전압, 전류, 전력을 출력한다. 이를 DC-DC 컨버터에서 최대전력점 추종제어(MPPT : Maximum-power-point-tracking)를 통해 항상 최대 전력점에서 동작하여 출력전압이 일정하게 유지되도록 한다. 이후 인버터에서 AC로 변환하여 계통에서 요구하는 부하에 전송되어 소비된다[60-61].

a. PV 어레이

PV 어레이는 태양의 일사량과 온도를 실시간으로 계측하여 어레이를 통해 전력을 출력하는 역할을 한다. 그림 3-17은 시뮬레이션 내에서 전류원, 다이오드, 저항 소자를 활용해 설계한 어레이의 등가회로이다. 태양전지에서 출력되는 전류 값은 키르히호프(Kirch-hoff)의 전류법칙에 따라 식 (3-5~6)와 같이 표현된다. 이때, 병렬저항 R_{sh} 는 저항 값이 상대적으로 수 $[k\Omega]$ 이상의 큰 값을 지니므로 개방상태로 간주한다. 프로그램에 설계된 다이오드는 비선형 특성이 고려되어 있지 않으므로 이를 고려할 경우 식 (3-7)과 같이 표현된다. 앞서 산출된 식을 기반으로 일사량과 온도 변수를 고려할 경우 PV 어레이의 단락전류 관계가 식 (3-9)와 같이 표현된다. 또한, 식 (3-11~12)은 포화전류의 온도와 에너지 갭의 온도에 대한 관계식을 나타낸다[62].

태양 전지는 셀, 모듈, 어레이로 구성된다. 1개의 셀은 출력전압 및 단자전압이 너무 작아 다수개의 셀을 직렬로 연결하여 사용한다. 모듈은 전기를 출력할 수 있는 최소 단위로써 모듈 여러 개를 직병렬 연결하여 어레이를 형성한다. PV 어레이의 최종 출력량은 식 (3-5~12)에 설계 전압에 적합하게 설계된 모듈의 직렬, 병렬 수를 식 (3-13~18)를 대입시켜 식 (3-19)와 같이 산출하였다[60-65]. 표 3-7은 PV 어레이의 설계변수 값을 나타낸다. PV 어레이의 출력량은 현재 서거차도 DC island 구축사업에 설치된 200[kW] 태양광설비를 기준으로, 208.8[kW]로 산정하였다[65].

$$I = I_s - I_d - I_{sh} [A] \quad (3-5)$$

$$I = I_s - I_{df} \left(\exp \left[\frac{V + IR_{sr}}{nV_T} \right] - 1 \right) - \frac{V - IR_{sr}}{R_{sh}} [A] \quad (3-6)$$

$$I = I_s - I_{df} \left(\exp \left[\frac{V + IR_{sr}}{nV_T} \right] - 1 \right) [A] \quad (3-7)$$

$$V = n V_T \ln \left(\frac{I_s - I}{I_0} + 1 \right) - I R_{sr} [A] \quad (3-8)$$

$$I_s = I_{s(ref)} \left(\frac{S}{1000} \right) + J(T - T_{ref}) [A] \quad (3-9)$$

$$I_{df(ref)} = I_{s(ref)} \frac{1}{\exp \left(\frac{V_{oc}}{n V_T} \right) - 1} \approx I_{s(ref)} \cdot \exp \left(- \frac{V_{oc}}{n V_T} \right) [A] \quad (3-10)$$

$$I_0 = A T^\gamma \exp \left(\frac{-E_g}{n K T} \right) [A] \quad (3-11)$$

$$E_g = 1.16 - 7.02 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T - 1108} [eV] \quad (3-12)$$

$$I_a = N_p I_{\max PV} [A] \quad (3-13)$$

$$I_s = N_p I_s [A] \quad (3-14)$$

$$V_{oc} = N_s V_{\max PV} [V] \quad (3-15)$$

$$V_{soc} = N_s V_{oc} [V] \quad (3-16)$$

$$R_{sr} = \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \times R [\Omega] \quad (3-17)$$

$$\frac{I_a}{N_p} = \frac{I_s}{N_p} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_a + \frac{I_a}{N_p} \cdot \frac{N_p}{N_s} \cdot R_{sr}}{n V_T} \right) - 1 \right] \quad (3-18)$$

$$I_a = I_s - N_p I_{df} \left[\exp \left(\frac{V_a + I_a R_{sr}}{n N_s V_T} \right) - 1 \right] [A] \quad (3-19)$$

여기서,

I_s = PV 어레이 단락전류[A] I_d = 다이오드 전류[A] I_{sh} = 병렬저항 전류[A]

$I_{s(ref)}$ = 기준온도에서의 단락전류[A] I_{df} = 다이오드 포화전류[A]

R_{sr} = 직렬저항[Ω] R_{sh} = 병렬저항[Ω] n = 다이오드 이상 정수

V = 부하전압[V] V_{oc} = PV 어레이 개방전압 [V] V_T = 열 전위차[V]

단, $V_T = (kT/q)/m$ $q = 1.6 \times 10^{-19} [C]$ coulomb constant

$k = 1.38e^{-23} [J/K]$ Boltzmann constant m = PV 어레이 모듈 내 cell 수

T = 절대온도[K] T_{ref} = 기준온도 25[°C] = 298.15[K]

S = 일사량, 1000[W/m²] J = 단락전류 온도계수[A/K]

A = 포화전류 온도계수[A/K] γ = 온도의존인자 E_g = energy band gap[eV]

I_a = PV 어레이 출력전류[A] V_{soc} = PV 어레이 단락전압[V]

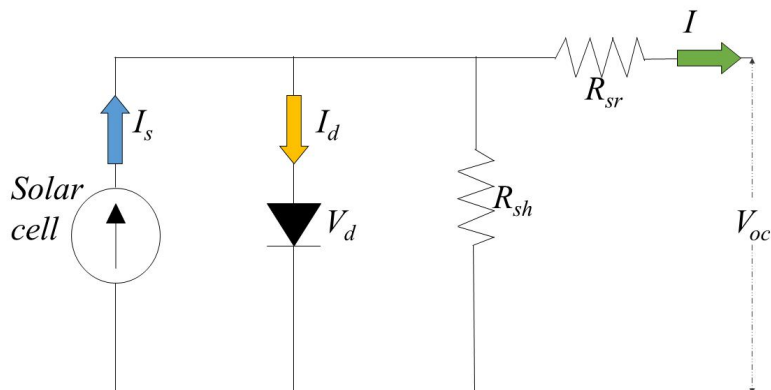


Fig. 3-17 PV array circuit

Table 3-7 PV array design value

Parameter	Value	Unit	Parameter	Value	Unit
N_p	20	[EA]	R_{sr}	0.02	[Ω]
N_s	20	[EA]	R_{sh}	1000	[Ω]
N_{sm}	2100	[EA]	n	1.5	-
N_{pm}	5000	[EA]	E_g	1.103	[eV]
T_{ref}	25	[$^{\circ}C$]	$I_{s(ref)}$	0.025	[kA]
S	1000	[W/m ²]	A	0.001	[A/K]
I_s	160.1	[A]	k	$1.38e^{-23}$	[J/K]

b. MPPT

PV 발전 시스템은 일사량, 온도, 표면온도, 설치조건, 기상조건 등 다양한 요인에 따라 출력량이 변한다. 그러므로 일정한 최대 출력량을 내기 위해서는 MPPT 제어가 필수이다. 제어법은 크게 정전압 제어법, 비선형 함수 계산법, P&O법, IC법이 있다. 4가지의 방법 중 IC법은 임피던스 비교법으로 태양전지 어레이 출력의 컨덕턴스와 증분컨덕턴스를 비교하여 최대 출력점을 추종하는 제어방식이다. 온도가 일정하고 일사량이 증가할 경우, 전압의 변동 폭이 0인 경우의 제어 알고리즘의 추가되어 있어 빠른 일사량 변동 시에 유리하다[60-65]. 또한, 최대 출력점에 도달할 경우 태양전지 어레이의 출력전력이 안정적이므로 타 제어법에 신뢰도가 높다.

c. DC/AC 인버터

PV 어레이에서 출력된 전력은 DC-DC 컨버터에서 MPPT 제어를 통해 항상 일정하게 유지되도록 제어한다. 이후 인버터를 통해 DC를 AC로 변환하여 수용가로 공급한다. AC는 연계된 계통 전압에 적합하게 승압변압기를 통해 변환되어 수용가로 공급된다. 변압기의 1차 전압은 0.23[kV]이고 변압기의 2차 전압은 0.6[kV]로 설정하였다.

d. 시플레이션 조건

그림 3-18은 앞에서 설계한 PV 어레이, MPPT, DC/AC 인버터, AC 전력계통을 결합하여 설계한 계통연계형 PV 시스템이다. PV 어레이에서 일사량과 온도를 측정 한 후 식 (3-1~15)에 따라 최종 출력량이 산출된다. 이후 IC MPPT 제어를 통해 온도나 조건이 변하여도 일정하게 안정적으로 최종출력량이 산출되도록 제어한다 [60-65]. 최종 출력량은 DC-DC 선로를 도통되어 DC/AC 인버터에서 AC로 변환된다. 변환된 AC는 승압변압기를 통해 AC 전력계통에 최적화된 전압으로 변압되어 사용된다.

앞에서 설계된 데이터 및 회로를 기반으로 계통연계형 PV 시스템에서 사고가 발생했을 경우 초전도 한류기의 유무에 따른 동작특성을 분석하였다. 사고는 0.3[sec]부터 3[sec]동안 모의하였다. 아크모델과 차단기의 차단용량은 ‘II’에서 설계한 바와 같다. 다만, PV 시스템의 동작을 고려하여 기계식 DC 차단기의 전류회로 내 L은 0.01[mH], C는 30[μ F]으로 변경하여 설정하였다. 한류형 초전도 DC 차단기는 그림 3-18에 표시된 위치에 적용하였다.

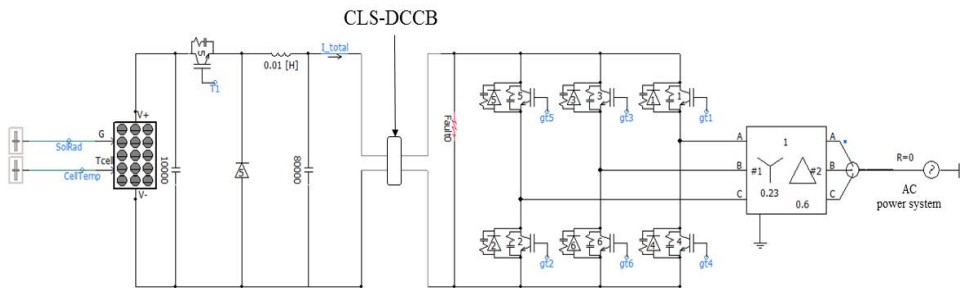


Fig. 3-18 Grid connected PV system circuit

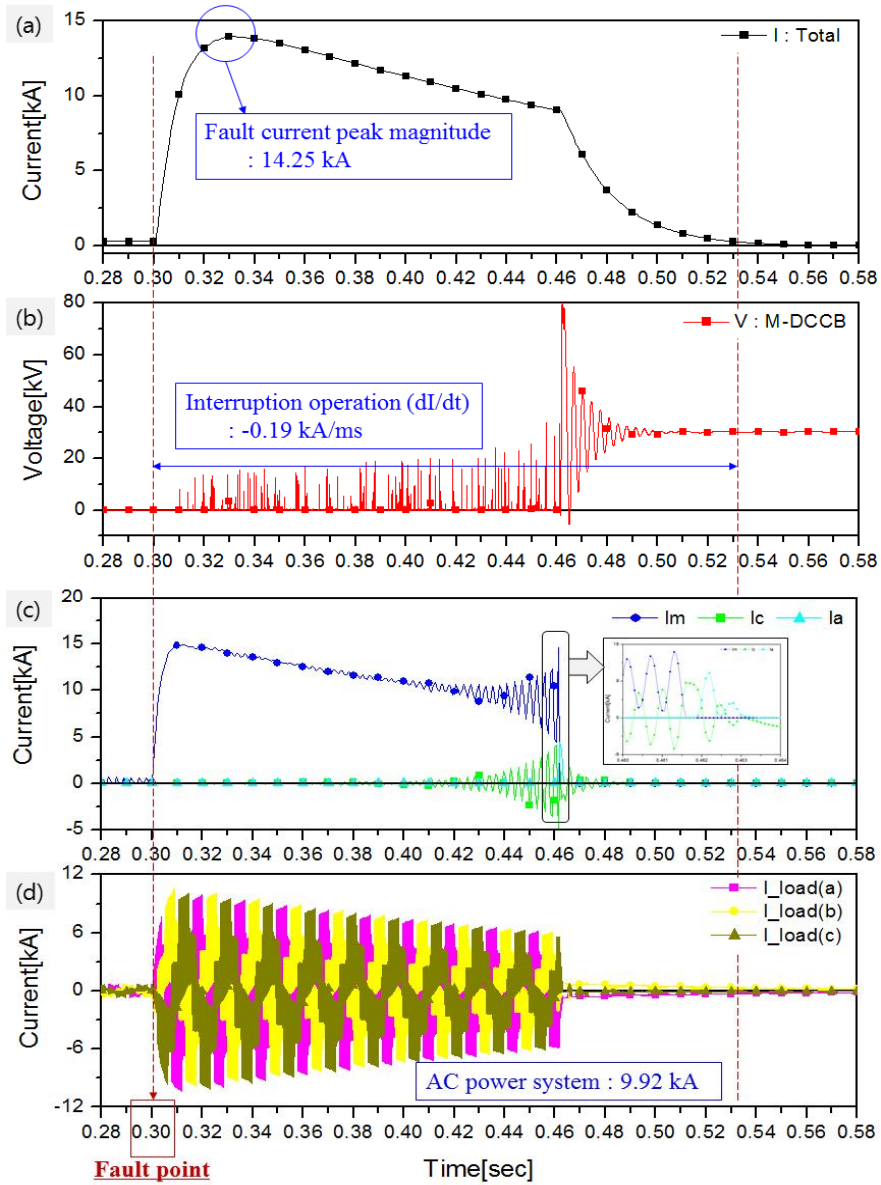
3. 과도상태 해석

a. HTS가 없는 기계식 DC 차단기

그림 3-19는 계통연계형 PV 시스템에 HTS 없이 전류 및 흡수 보조 회로가 적용된 기계식 DC 차단기가 적용된 경우 차단특성을 나타낸다.

정상 시에는 초기 설계된 조건에 의해 PV 어레이가 전압 및 전류를 측정한다. 측정된 전력은 설계된 IC법 알고리즘에 따라 MPPT 제어를 통해 최대 출력점에서 동작이 가능하게 한다. 이후 DC 선로에 0.325[kA]의 정상전류가 유입되고 DC-AC 인버터를 통해 0.5[kA] AC 정상전류가 수용가를 통해 안정적으로 도통된다.

단락사고 발생시점인 0.3[sec]에서 고장발생과 동시에 DC 선로에 14.2[kA]까지 고장전류가 증가하였다. 고장이 발생하고 약 10[msec]이후 기계식 DC 차단기에 차단동작 신호가 인가되었다. 신호가 인가되고 주회로의 MCB가 개방동작을 시작함과 동시에 전류회로의 L, C가 진동전류를 생성하였다. 진동전류는 점차 증가하여 주회로에 흐르는 전류의 크기를 초과하였다. 초과하는 순간 인위적인 전류영점이 생성되어 기계식 DC 차단기의 주회로에 있는 MCB가 완전 개극 되었다. 주회로에 흐르는 차단전류는 식 (2-1)과 같다. 기계식 DC 차단기가 개극이 완료되면서 차단기 양단에 인가되는 TIV는 흡수회로에 적용된 SA를 통해 소호되어 1[msec]당 0.19[kA]의 기울기로 고장전류의 크기를 감소시켜 차단동작을 완료하였다. AC 전력계통에는 차단기가 차단동작을 완료하기 전까지 정상전류의 25배인 9.92[kA]의 고장전류가 유입되었다.



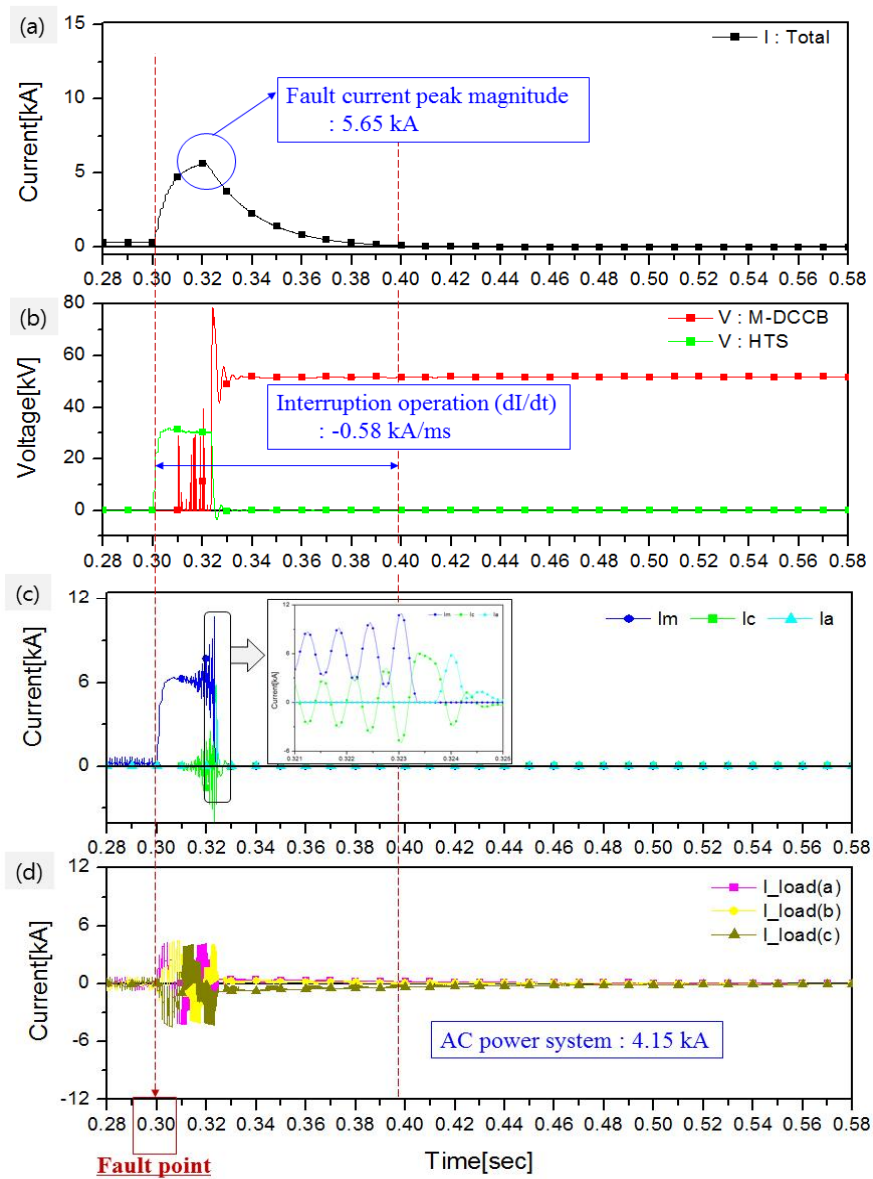
(a) Total line current (b) M-DCCB voltage
 (c) M-DCCB cut-off current (d) AC power system side 3-phase current
 Fig. 3-19 Operation characteristics when only M-DCCB is applied
 in the PV system

b. 한류형 초전도 DC 차단기

그림 3-20은 계통 연계형 PV 시스템에 한류형 초전도 DC 차단기가 적용된 경우 차단특성을 나타낸 곡선이다.

정상상태에서는 그림 3-19와 같은 동작을 수행한다. 앞서 설계된 일사량과 온도에 따라 PV 어레이가 전력을 인가한다. 전력이 인가되면 IC법 MPPT 제어 알고리즘에 따라 항상 최적의 출력점에서 동작이 될 수 있도록 제어한다. 제어동작을 통해 정상 시에는 마찬가지로 $0.325[\text{kA}]$ 의 정상전류가 도통된다. 이때 초전도체에 유입되는 전류가 임계전류 값 이하이므로 초전도체는 임피던스가 0인 초전도상태를 유지한다. 이로 인해 정상 상태에서는 손실이 발생하지 않는다. DC/AC 인버터 및 승압용 변압기를 통해 AC $0.5[\text{kA}]$ 의 전류가 안정적으로 수용가에 공급된다.

마찬가지로 $0.3[\text{sec}]$ 에 고장을 모의하였다. 고장전류의 급격한 상승으로 인해 초전도체에 유입되는 전류의 크기가 초전도체의 임계전류 값을 초과하였다. 이로 인해 초전도체는 사고가 발생하고 $2[\text{msec}]$ 이후에 켄치되어 고장전류의 크기를 $5.65[\text{kA}]$ 로 제한하였다. 이와 동시에 기계식 DC 차단기에 고장신호가 인가되었고 동작지연 시간인 약 $10[\text{msec}]$ 이후에 개극동작을 시작하였다. 개극동작을 시작함과 동시에 전류회로에서 진동전류를 생성하였고 이는 점점 증폭되어 주회로의 흐르는 전류와 중첩되어 인위적인 전류영점이 생성되었다. 전류회로의 차단보조동작으로 인해 MCB가 완전 개극되어 고장선로를 차단하였다. 마찬가지로 차단기의 TIV는 SA로 유입되어 소호되었고 고장전류 감소율은 $0.58[\text{kA}/\text{msec}]$ 이다. 또한, AC 전력계통에는 한류형 초전도 DC 차단기가 차단동작을 완료하기 전까지 정상전류의 약 10배인 $4.15[\text{kA}]$ 의 고장전류가 유입되었다.



(a) Total line current (b) M-DCCB voltage
 (c) M-DCCB cut-off current (d) AC power system side 3-phase current
 Fig. 3-20 Operation characteristics when CLS-DCCB is applied
 in the PV system

D. VSC-HVDC 시스템에 적용된 경우 특성 해석

1. VSC-HVDC 시스템 설계 및 해석 시 고려사항

a. 동작 메커니즘

그림 3-21과 그림 3-22는 VSC-HVDC 시스템의 동작 메커니즘을 설명하기 위한 개념도 및 벡터도이다. “이론적배경”에서 설명한 바와 같이 정류기(Rectifier)와 인버터(Inverter) 내부에 적용된 IGBT를 이용해 입력 전압, 전류, 위상각 제어를 통해 유효 및 무효전력을 제어하고 최종적으로 AC 계통으로 전력을 출력한다. 유효 및 무효전력은 그림 3-22와 같이 위상에 따라 출력의 흐름이 정해진다.

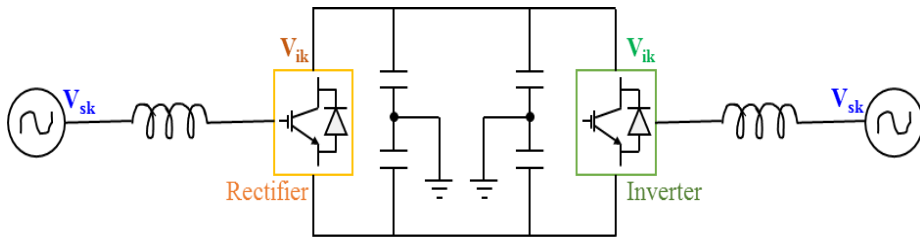


Fig. 3-21 Conceptual diagram of VSC-HVDC

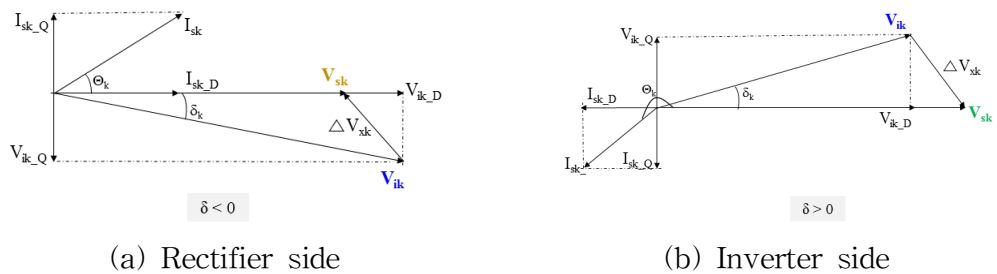


Fig. 3-22 The active and reactive power of VSC-HVDC system

먼저, 정류기 측면에서는 정류기 출력전압 V_{ik} 가 AC 선로 측 출력전압인 V_{sk} 보다 위상이 앞서므로 유효전력은 AC 선로 측에서 정류기로 흐르게 되고 무효전력은 공급된다. 다음으로 인버터 측면에서 보면 인버터 출력전압 V_{ik} 가 AC 선로 측 출력전압 V_{sk} 출력되는 전압보다 위상이 뒤지게 되므로 유효전력은 인버터에서 AC 선로 측으로 흐른다[13]. 이와 같이 AC, DC 선로 측의 출력전압에 따라 유효전력의 출력 방향이 결정되므로 VSC-HVDC는 양방향 전력전송이 가능하다.

Table 3-8 Exceeded status of AC 345, 154[kV]
 fault current interruption capacity

AC power system	Average fault current	an exceed bus line of circuit breaker
345[kV]	32[kA]	7
154[kV]	24[kA]	27

Table 3-9 Comparison of AC, DC XLPE and HTS cable capacities

1500[MVA]		AC		DC
		XLPE	HTS	HTS
Cable size[mm]		140	135	315
Cable number[EA]		9	4	1
1[km]	Transmission voltage[kV]	275	66	130
	Transmission current[kA]	1	3.3	12
	Transmission loss[kW]	740	200	20

b. 시플레이션 설계

VSC-HVDC 시스템을 해석할 때 가장 중요한 설계 변수는 총 2가지이다. 첫 번째는 증설될 시스템과의 구조 유사도이고 두 번째는 과도상태 시 발생하는 고장전류의 크기이다.

먼저, 국내의 경우 총 2개의 HVDC 선로(1호기 : 해남 c/s - 제주 c/s, 2호기 : 진도 c/s - 서제주 c/s)가 있지만 이는 모두 CSC-HVDC 시스템으로 현재 국내에는 VSC-HVDC 시스템으로 구축된 선로가 없다. 그러므로 계통해석 프로그램 내에 있는 VSC-HVDC 예제 모델 중 가장 보편적인 구조로 국내에 적용할 경우 용량 값만 변경해서 사용할 수 있는 모델로써, ABB에서 진행한 gotland HVDC light project를 기반으로 설계된 VSC Trans. 예제 파일을 사용하여 그림 3-23과 같이 설계하였다. 계통의 구조와 설계요소는 VSC-HVDC 구조를 설명한 바와 같이 AC-DC-AC 구조이다.

두 번째 중요 요소는 고장전류의 크기로서, 아래와 같은 조건 및 기준을 고려하여 범주로 설정하였다. 표 3-8은 국내의 AC 345, 154[kV] 계통의 평균 고장전류 차단내력 초과현황을 나타낸 표이고 표 3-9는 일반 초고압 케이블과 초전도 케이블을 AC와 DC 계통에서 비교한 표이다[48]. M, Hirose 등의 연구결과에서 분석한 바에 따르면 초전도 케이블은 초고압 송전선로에 사용되는 전력케이블인 XLPE(Cross-Linked Poly Ethylene)에 비해 1[km]당 약 3.3배의 전류를 더 흘릴 수 있다[16-18]. 또한 같은 초전도 케이블이라 할지라도 DC에서는 4배 더 흘릴 수 있다. 즉, AC 기준을 보면 DC 계통에 초전도 케이블을 적용할 경우 전류의 크기가 최소 4배에서 12배까지 도통할 수 있다는 뜻이다.

DC 전력계통에서는 많은 전류를 손실 없이 전송하고자 초전도 케이블 적용을 고려하고 있으며 국내의 제주 한림 c/s과 금악 c/s구간에 DC ± 80 [kV], 60[MW] 5.2[km] 중 0.5[km]에 초전도 케이블이 적용되었다. 이때 정격전류는 375[A]이다[18][66].

또한, 국내에서 초전도 케이블을 설계 및 제작하는 L사에서는 초전도 케이블은 50[kA]까지의 전류가 도통될 때까지는 초전도 상태를 유지하고 51[kA]이상의 전류가 1초 이상 흐를 경우 켄치 되도록 설계한다고 확인하였다. 이러한 설계 값은 A사에서

제시한 값으로 컨버터 및 인버터에 적용된 IGBT, GTO 등 반도체 소자가 견딜 수 있는 용량을 고려해 산출된 값이다. 마지막으로, AC 345[kV]까지 단시간을 포함해 발생된 고장전류의 크기는 최대 70[kA]이다. 그러므로 초전도 케이블을 적용하여 선로를 구축할 경우, AC 계통 발생된 고장전류 크기, 현재 초전도 케이블이 적용되어 구축된 선로의 정격전류를 고려하여 고장전류 최대 크기 범위를 최소 4[kA]에서 최대 50[kA]로 선정하였다.

정류기 AC 계통은 그림 3-23의 크게 발전기와 변압기, 정류기로 구성된다. 발전기는 가장 많이 사용되는 동기발전기와 출력전압을 조정하기 위해 여자기를 결합하였다. 여자기는 무효전력을 제어하여 발전기에서 출력되는 전압을 정전압으로 제어하고 회전기의 전력을 제어함으로써 발전기의 보호역할을 수행한다[67]. 발전기의 용량은 75[MW]이다. Y- Δ 결선으로 구성된 100[MVA]변압기는 3상변압기로 13.5[kV]에서 61.5[kV]로 승압하여 정류기에 유입된다. 정류기는 고속 스위칭 동작을 위해 게이트전압에 따라 개폐동작을 하는 IGBT를 적용하였다. VSC-HVDC 시스템의 구조에서 설명한 바와 같이 IGBT의 내부모듈을 보호하고자 역병렬 환류 다이오드를 결합하여 하나의 모듈로 구성하였다.

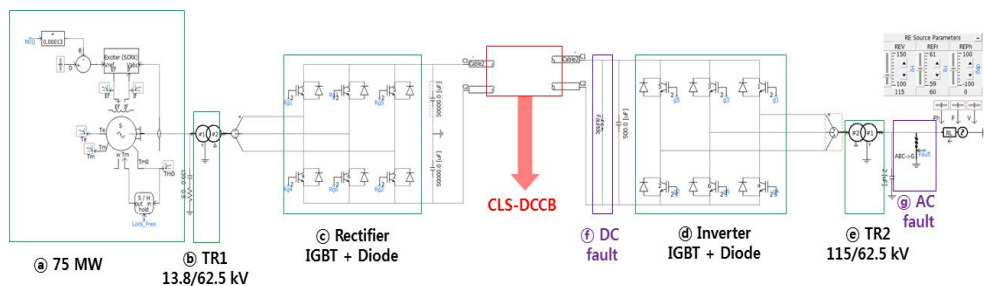


Fig. 3-23 100[MVA] scale DC 120[kV] VSC-HVDC system circuit diagram

다음으로, DC선로는 110[kV]의 전압으로 운전하며 선로의 길이는 100[km]로 설정하였다. 한류형 초전도 DC 차단기는 그림 3-23과 같이 DC 송전선로 사이에 적용하였다. 마지막으로, 인버터 AC 계통은 정류기와 마찬가지로 IGBT와 다이오드가 하나의 모듈로 결합되어 스위칭 동작을 수행하고 115/62.5[kV]변압기를 거쳐 계통에 연계된다.

모의사고는 그림 3-23의 ㉑와 ㉓ 2지점에서 발생시켰다. ㉑는 DC 선로 내부 사고이고 ㉓는 AC 선로에서 발생시키는 사고이다. ㉑ 지점에서 발생하는 DC 지락 사고를 모의하였다. ㉓ 지점에서 발생하는 현 AC 계통에서 70[%]의 발생률로 가장 빈번한 1선 지락사고와 가장 위험한 사고인 3상 단락사고를 모의하였다. 모든 고장은 3[sec]부터 0.05[sec]동안 모의하였다. 한류형 초전도 DC 차단기는 시스템 용량에 맞춰 초전도체의 임계전류 값을 1[kA], 최대 한류 임피던스 크기를 10[Ω], 기계식 DC 차단기의 차단용량을 5[MVA]로 설정하였다

c. 시뮬레이션 해석 시 고려할 사항

VSC-HVDC 시스템의 과도상태를 해석할 때는 아래와 같은 2가지 측면을 중점적으로 분석해야 한다.

먼저 고장유형 및 고장이 발생한 지점에 따라 각각의 계통에 미치는 영향이다. CSC-HVDC 시스템의 경우 단방향성이므로 AC 측에서 제어가 가능하다. 그러나 VSC-HVDC 시스템의 경우 양방향성이며 IGBT 사용으로 인해 DC측에서 고장이 발생할 경우 제어가 불가능하다. 이에 고장지점에 따른 영향을 고려해야 한다.

다음으로 차단기의 차단동작 완료시간으로 DC 커패시터의 첫 번째 동작이 끝나고 두 번째 동작이 시작하기 전까지 차단동작을 완료해야 한다. 이유는 다음과 같다. 이론적 배경에서 설명한 IEC-61660에 따른 시스템에서 발생할 수 있는 고장 발생 요인 중 커패시터로 인한 고장이대[36-37]. VSC-HVDC 시스템에 적용된 DC 커패시터는 정상상태에서 정전압 특성을 유지시켜 DC에 포함된 AC 성분의 전압 리플을 억제하여 시스템의 안정도를 보조하는 역할을 수행한다. 커패시터의 용량은 HVDC 시스템의 정격에 비례하여 대부분 대용량 및 대규모로 설계되어 적용된다.

고장이 발생할 경우, DC 커패시터는 IEC-61660에 따라 2개의 동작을 거의 동시에 수행하면서 고장요인으로 작용된다[37]. 첫 번째 동작은 DC 커패시터의 방전이다. DC 커패시터는 대용량으로 설계되므로 내부에 충전된 전하들이 방전되면 고장전류의 크기를 수 $[\mu\text{s}]$ 이내에 수십 $[\text{kA}]$ 까지 증가시킬 수 있다.

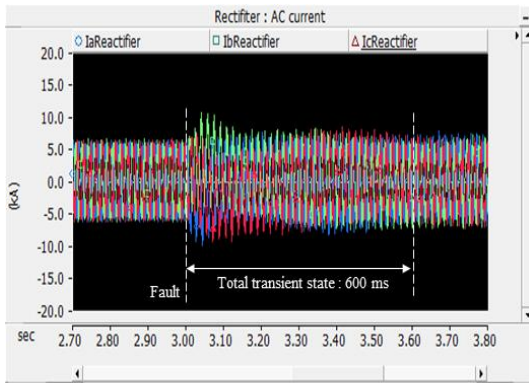
두 번째 동작은 역병렬 환류 다이오드의 정류기로써의 동작이다. 역병렬 환류 다이오드의 IGBT가 turn-off됨과 동시에 거의 수 $[\text{msec}]$ 이내에 정류회로가 구축된다. 정류회로가 구축되고 DC 커패시터의 방전이 완료되면 그 순간부터 잔여 고장전류가 정류회로를 통해 연계된 계통으로 모든 계통으로 도통되어 고장이 확대되므로 위험하게 된다. 그러므로 DC 선로에서 고장이 발생할 경우 DC 커패시터가 다이오드로 정류기로 동작해 고장전류를 도통하기 전에 차단동작을 완료해야 한다.

2. 과도상태 해석

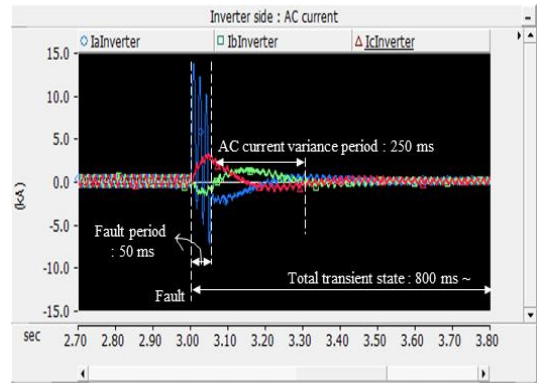
a. AC 선로 측 1선 지락사고

(1) 1선 지락사고 시 고장전류 및 전압곡선

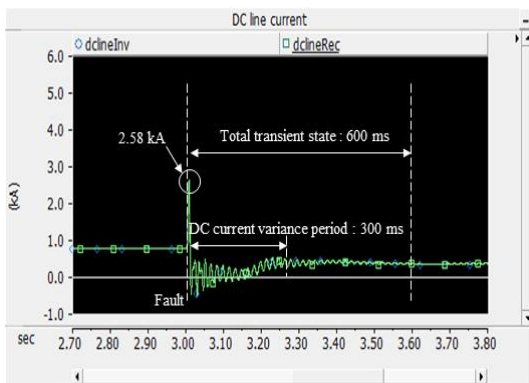
VSC-HVDC 시스템은 AC-DC-AC가 연계된 구조로 설계하였다. 먼저 AC 선로 측 그림 3-23 ㉔위치에서 1선 지락사고를 모의하였다. 그림 3-24 (a)는 정류기 측의 AC 전류, (b)는 인버터 측의 AC 전류이고, (c), (d)는 DC 선로 측의 전류와 전압이다. 100[MVA]급 변압기를 이용해 AC 61.5[kV]를 정류기에 인가한다.



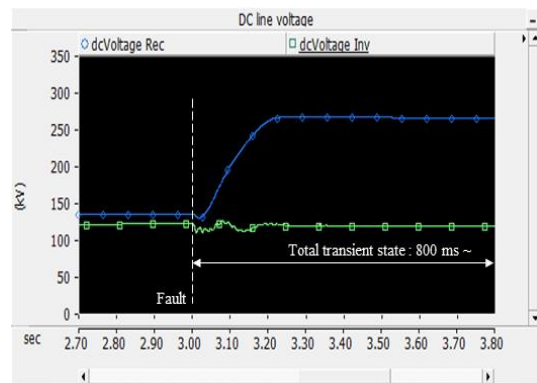
(a) Rectifier : AC current



(b) Inverter : AC current



(c) DC line current



(d) DC line voltage

Fig. 3-24 Fault characteristics for a 1-line-to-ground fault from the AC line

고장이 발생하기 전 구간인 0.3[sec]전까지는 전압이 인가되면 AC 선로 측에 흐르던 AC 5.1[kA] 3상전류는 정류기 내부에 적용된 IGBT가 PWM 고속 스위칭 동작을 수행해 AC 전류를 DC로 변환하여 DC 선로에는 DC 0.8[kA]의 전류가 인가된다. 이후 DC 선로에 흐르는 전류는 인버터 내부에 적용된 스위칭 소자에 의해 AC로 변환되고 AC 선로 측에 적용된 115/62.5[kV] 강압용 변압기에 의해 약 AC 1[kA]가 안정적으로 도통된다. 전원인가 후 3[sec]가 되는 지점에서 고장을 모의하였고 고장으로 인해 AC 선로 측의 R상에 흐르는 전류는 그림 3-24(b)와 같이 최대 AC 15[kA]까지 증가하였다. 고장 상의 영향으로 건전 상인 S, T상 또한 순간적으로 전류의 크기가 최소 2[kA]에서 최대 4[kA]로 증가하였다. 고장을 모의한 인버터 AC 선로 측의 경우 고장 구간인 3.0~3.05[sec]동안에만 급격한 전류의 변동이 발생하고 이후 시스템 내부에 설계된 제어기에 의해 안정화되었다.

그러나 그림 3-24(a), (c), (d)와 같이 정류기 및 DC 선로 측의 경우 고장구간보다 약 250[msec] 긴 3.0~3.3[msec]동안 변동이 발생하였다. DC 선로에 흐르던 0.8[kA]의 전류는 고장으로 인해 2.58[kA]까지 급격하게 증가하였다. 고장이 발생하고 정류기는 내부소자를 보호하기 위해 IGBT의 turn-off 동작을 수행하였고 이와 동시에 커패시터가 방전동작을 수행함으로써 DC 선로에 양단 전압은 275[kV]까지 증가하였다. 커패시터의 1단계 동작인 방전으로 인해 고장전류의 크기는 점점 감소되었다. 그러나 커패시터의 1단계 방전동작이 끝나기 전에 별도의 차단동작이 유입되지 않아 2단계인 환류 다이오드의 정류회로 구성이 시작되었다. 고장모의 구간이 끝났음에도 불구하고 DC 선로에는 정상전류보다 더욱 낮은 약 0.31[kA]전류가 도통되었다. 인버터 AC 선로 측에 발생한 고장전류에 의해 인버터측은 최대 3.3[sec]이후 정상 동작을 회복하였다. 그러나 정류기 측에 흐르는 AC 전류와 DC 선로는 고장의 영향으로 인해 정상전류보다 낮은 전류가 유입되어 시스템 재가동이 어려움을 확인할 수 있다.

(2) 한류형 초전도 DC 차단기가 적용된 경우 고장전류 및 전압곡선

그림 3-25는 한류형 초전도 DC 차단기를 적용한 후 인버터 AC 선로 측에 1선 지락사고를 모의하였다. 그림 3-25의(a)와 (b)는 정류기, 인버터 측의 3상 AC 전류이고 (c), (d)는 DC 선로의 전류와 전압이다. 정상 시에는 송압변압기를 이용해 AC 61.5[kV], 5.1[kA]가 정류기에 인가된다. AC 전류는 정류기에 적용된 IGBT와 다이오드의 빠른 스위칭 및 변환 동작으로 인해 DC 전류로 변환된다. 이로 인해 DC 선로에는 DC 0.8[kA]가 흐르게 되고 이는 인버터 내부 소자가 다시 스위칭 동작을 수행하고 AC 1[kA]가 흐른다.

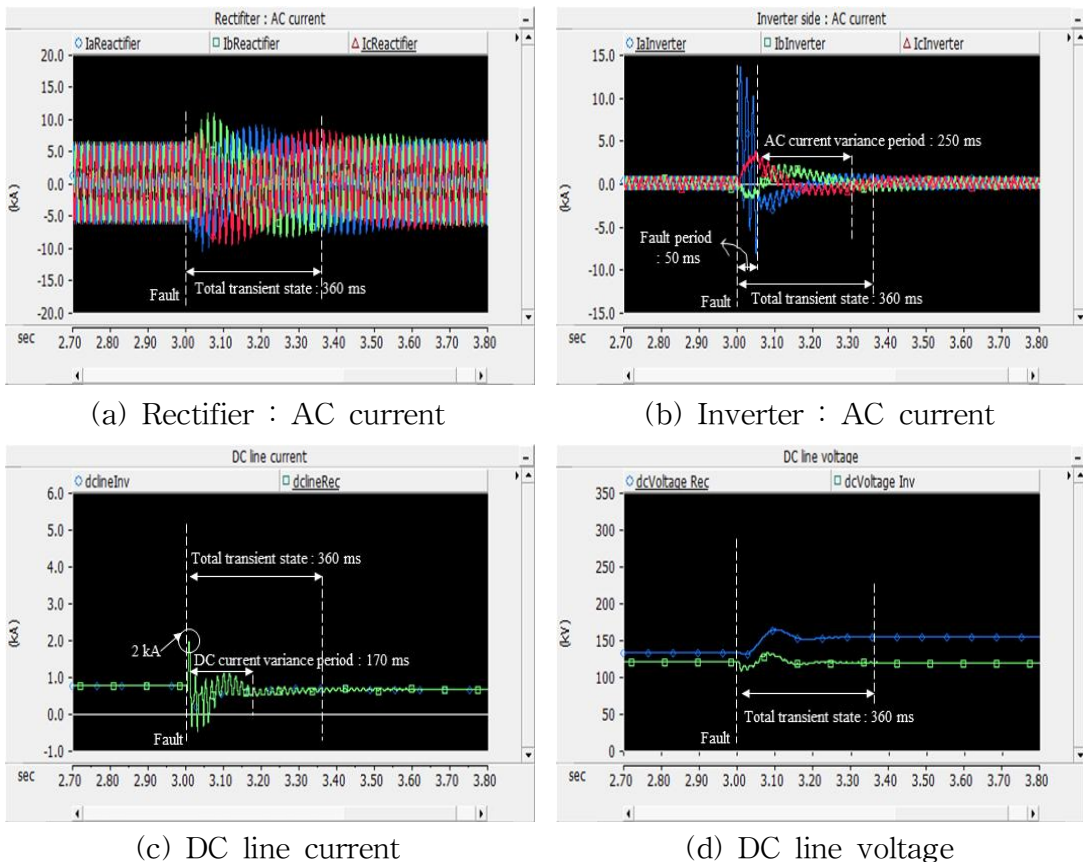


Fig. 3-25 Fault characteristics for a 1-line-ground-fault on the AC line when CLS-DCCB is applied

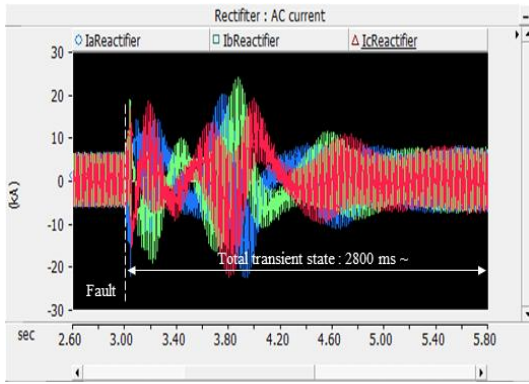
이때 한류형 초전도 DC 차단기가 DC 선로에 적용되어 있으나 초전도체에 유입되는 전류의 크기가 임계 값 이하이므로 초전도체는 저항이 0인 상태를 유지하여 손실 없이 안정적으로 정상전류가 유입된다. 전원이 인가된 후 3[sec]에 그림 3-23 ㉔위치에 1선 지락사고를 모의하였고 고장상은 R상이고 건전상은 S, T상이다. 고장을 모의함과 동시에 그림 3-25(b)와 같이 전류는 최대 AC 15[kA]까지 증가하였다. 마찬가지로 고장 상의 영향으로 인해 순간적으로 건전상도 전류의 크기가 2~4[kA]로 증가되었다. 고장을 발생시킨 점에서 가장 가까운 인버터 AC 선로 측의 경우 고장 구간인 3.0~3.05[sec]동안에만 전류의 변동이 발생하고 이후 시스템 내부에 설계된 제어기에 의해 안정화되었다.

그림 3-25 (a), (c), (d)는 정류기 및 DC 선로 측에 흐르는 전류 및 전압을 나타낸다. 고장 발생과 동시에 고장전류가 급격하게 증가하였고 이는 초전도체의 임계전류 값을 초과하였다. 이로 인해 초전도체는 저항이 0인 초전도 상태에서 설정한 한류 임피던스인 10[Ω]을 지닌 상전도로 전이되어 고장전류의 최대 크기를 2[kA]로 제한하였다. 이후 제한된 고장전류가 기계식 DC 차단기로 유입되어 전류회로 및 흡수회로의 차단 보조동작으로 인해 약 170[msec]이후에 차단동작이 완료되었다. 또한, 한류형 초전도 DC 차단기의 한류 및 차단동작과 동시에 IGBT turn-off, 커패시터의 1단계 방전동작이 수행되어 DC 선로에 양단 전압은 175[kV]까지 증가하였다. 그러나 커패시터의 1단계 방전동작이 끝나기 이전에 한류 및 차단동작이 유입되어 방전동작은 3.1[sec]에 중단되었고 이로 인해 2단계인 환류 다이오드의 정류회로가 구성되지 않았다. 이후 시스템에 적용된 소자 및 제어동작의 프로세서에 의해 고장이 발생하고 약 360[msec]에 VSC-HVDC 시스템이 재가동을 시작함을 알 수 있었다. 이때 한류형 초전도 DC 차단기의 고장전류 감소율은 식 (3-2)에 따라 2.1×10^{-3} [kA/msec]로 산출되었다.

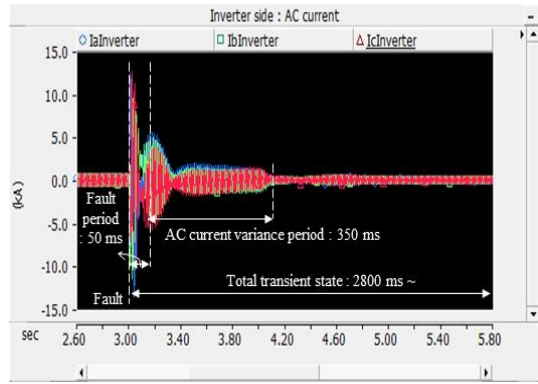
b. AC 선로 측 3선 단락사고

(1) AC 선로 측 3선 단락사고 시 고장전류 및 전압곡선

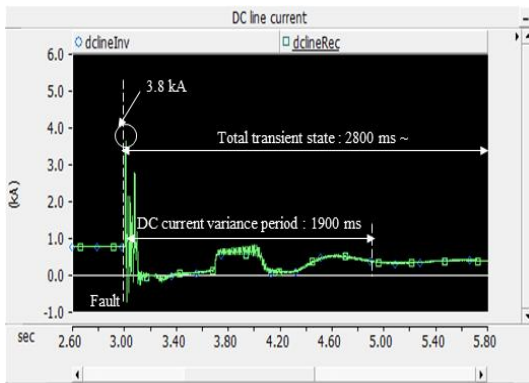
그림 3-26은 3선 단락사고 시 고장전류 및 전압 곡선이다. 정상 시에는 1선 지락 사고를 모의했을 경우와 같은 동작을 수행한다. 고장이 발생하기 전까지는 정류기와 인버터에 적용된 IGBT가 스위칭 동작을 수행해 AC 전류를 DC로 변환하고 다시 AC로 변환하여 안정적으로 유입된다.



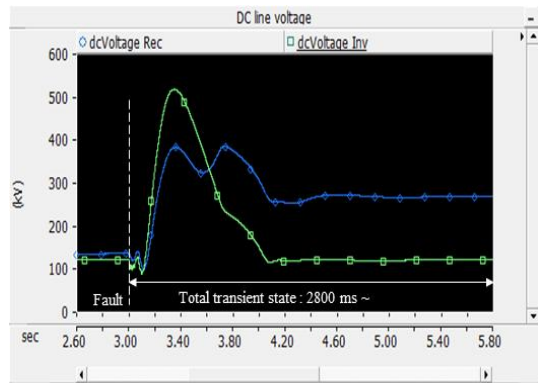
(a) Rectifier : AC current



(b) Inverter : AC current



(c) DC line current



(d) DC line voltage

Fig. 3-26 Fault characteristics for a 3-line-short-fault on the AC line

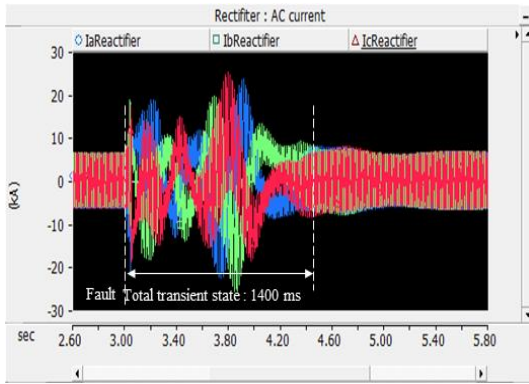
설계된 고장 모의 시간인 3[sec]에 단락 사고를 발생시켰다. 이와 동시에 인버터 측의 AC 전류는 고장 모의 구간인 50[msec]동안 R, S, T 3상 모두에 최대 15[kA]까지 증가하였고 이후 커패시터가 1단계 방전동작을 수행하여 고장지점으로 역전류를 유입시킴으로써 4.12[sec]에 약 4[kA]로 제한되었다. 반면에 정류기 측의 AC 전류는 고장이 발생하고 2[sec]동안 전류가 최대 20[kA]까지 증가함으로써 고장을 모의한 지점보다 고장에 의한 영향이 1550[msec]동안 지속되었다. 그림 3-26 (c), (d)인 DC 선로 측에 흐르는 전류 및 전압 곡선을 보면 마찬가지로 고장을 모의한 구간에 0.82[kA]로 흐르던 전류가 3.8[kA]까지 급격하게 증가하였다.

마찬가지로 IGBT는 turn-off 되고 앞에서 설명한 바와 같이 커패시터가 방전동작을 시작하였다. 이로 인해 DC 양단전압은 평균 448[kV]까지 증가하였다. 커패시터의 1단계 방전동작이 끝나기 전에 별도의 차단동작이 유입되지 않아 2단계인 환류 다이오드의 정류회로 구성이 시작되었고 이로 인해 고장 설정 주기가 끝났음에도 불구하고 DC에 흐르는 전류 및 전압은 불안정하게 도통되었다. 인버터 측 AC 계통은 정상동작을 회복하였으나 이를 제외한 나머지 구간은 고장의 영향으로 인해 설정 값보다 낮은 전류 및 전압이 인가되고 동작이 불안정함을 확인하였다. 또한, 정상동작 여부는 판단할 수가 없다.

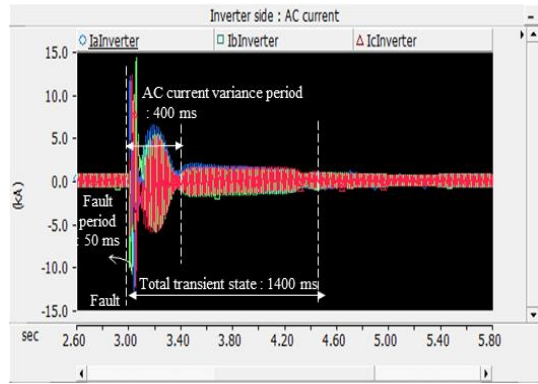
(2) 한류형 초전도 DC 차단기가 적용된 경우 고장전류 및 전압곡선

그림 3-27은 한류형 초전도 DC 차단기를 적용한 후 3선 단락사고를 모의하였다. 정상 시 동작 메커니즘은 그림 3-26과 같다. 마찬가지로 한류형 초전도 DC 차단기는 초전도체가 초전도 상태를 유지하므로 손실 없이 0.82[kA]가 도통되었다. 3[sec]에 고장을 모의함과 동시에 그림 3-27 (b)과 같이 고장전류는 3상 모두에 최대 AC 15[kA]까지 증가하였다. 커패시터가 방전동작을 수행하여 고장지점으로 역전류를 인가함으로써 고장이 발생하고 약 400[msec]이후인 3.4[sec]에 약 4[kA]로 정상 상태를 회복하였다. 그러나 정류기 측의 AC 전류는 고장이 발생하고 약 4.5[sec]까지 평균 3상 전류가 최대 20[kA]까지 증가함으로써 고장을 모의한 지점보다 더 큰 전류가 발생하였다.

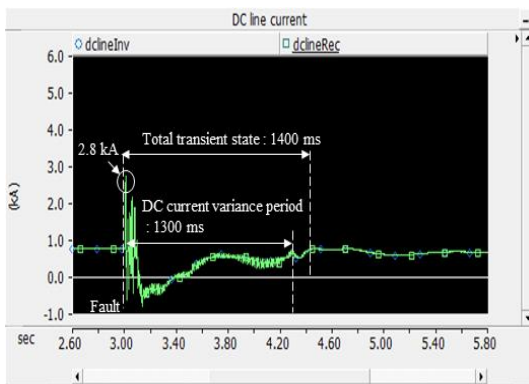
그림 3-27 (c), (d) DC 선로 측에 흐르는 전류 및 전압을 보면 DC 선로에 유입되는 전류 역시 고장발생과 동시에 급격하게 증가하였다. 급격하게 증가된 고장전류로 인해 초전도체는 상전도 상태로 전이되어 고장전류의 최대 크기를 2.8[kA]로 제한하였다. 1차 제한된 고장전류가 DC 차단기로 유입되었고 전류회로 내 LC의 보조동작으로 인해 전류영점이 생성되어 MCB가 3.4[sec]에 개극되었다. TIV 및 잔류에너지가 SA를 통해 소호됨으로 차단동작은 고장이 발생하고 1300[msec]이후인 4.3[sec]에 완료되었다.



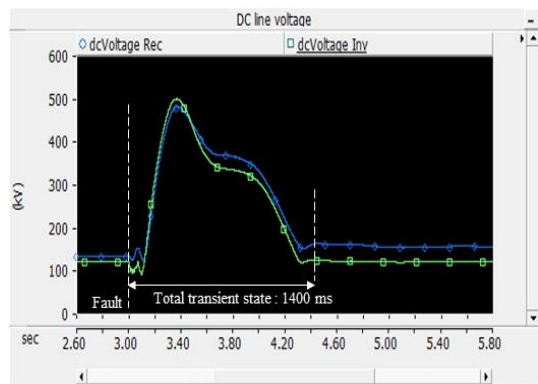
(a) Rectifier : AC current



(b) Inverter : AC current



(c) DC line current



(d) DC line voltage

Fig. 3-27 Fault characteristics for a 3-line-short-fault on the AC line when CLS-DCCB is applied

1선 지락고장과 같이 한류 및 차단동작, IGBT turn-off, 커패시터 방전동작이 함께 시작되었다. 그림 3-29와는 달리 커패시터의 1단계 동작이 끝나기 전에 초전도체의 켄치로 인한 한류동작이 시작되어 3.36[sec]에 방전동작이 중단되었다. 이후 시스템에 적용된 소자 및 제어동작의 프로세서에 의해 고장이 발생하고 약 1400[msec] 이후 재가동을 시작하였다. 이때 한류형 초전도 DC 차단기의 고장 전류 감소율은 식 (3-2)에 따라 $3.3 \times 10^{-3} [\text{kA}/\text{msec}]$ 로 산출되었다. 정상적인 동작은 회복하였으나 산출된 고장전류 감소율은 기 개발된 차단기술에 비해 현저히 낮은 수준이므로 추후 한류형 초전도 DC 차단용량을 재설계할 필요가 있다.

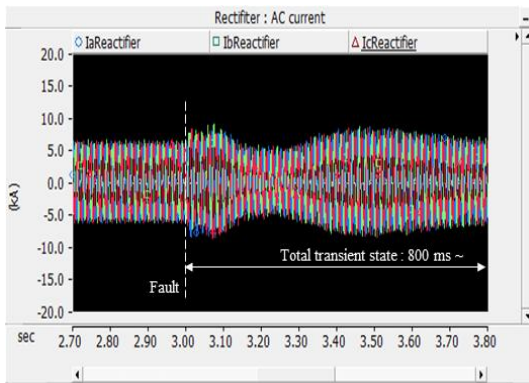
c. DC 선로 측 지락사고

(1) DC 선로 측 지락사고 시 고장전류 및 전압곡선

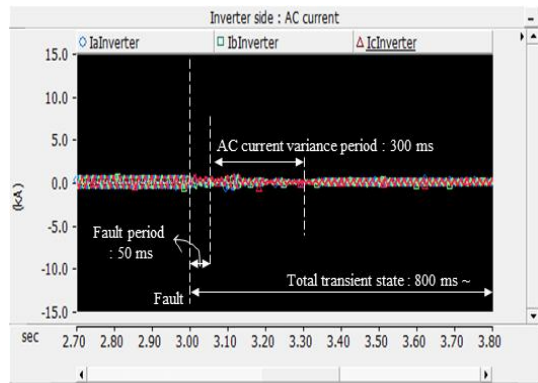
그림 3-28은 DC 지락사고를 모의한 경우를 나타낸다. 고장이 발생하기 전에는 AC 선로 측 사고발생 전과 같은 메커니즘이다.

DC 선로에서 고장을 모의하자 DC 선로에 흐르는 전류의 크기가 5.08[kA]까지 급격하게 증가하였다. 이와 동시에 커패시터의 방전으로 전류의 크기는 감소되었으나 전류의 크기가 0에 도달함으로써 커패시터가 완전 방전되어 1단계가 끝났음을 확인하였다. 또한, DC 선로고장으로 인해 AC 선로인 정류기와 인버터에 흐르는 전류 크기도 증감하여 변화하였다.

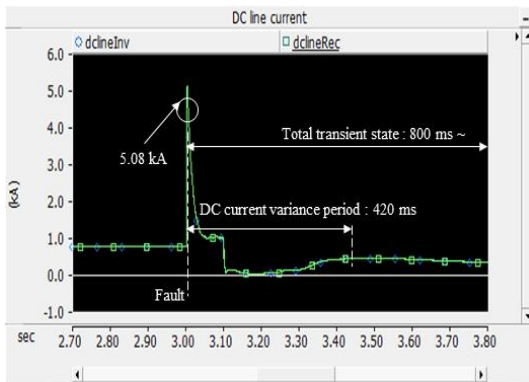
커패시터의 방전단계에서 차단동작이 유입되지 않아 커패시터는 완전 방전되었고 이로 인해 2단계인 환류 다이오드의 정류회로 구성이 시작되었다. 이에 따라 고장 모의 구간이 끝났음에도 불구하고 DC 선로에는 정상전류보다 더욱 낮은 약 0.34[kA] 전류가 도통되었다. 정류회로 구성으로 인해 전압 및 전류가 안정도를 회복하지 못하였으므로 시스템을 재가동하기에는 어려움이 있었다. 단, AC 선로 측에서 고장을 모의한 경우 AC 선로 측은 정상 동작을 회복하였으나 DC 선로 측이 정상동작을 회복하지 못하였다. 그러나 DC 선로 측에서 고장을 모의하자 AC 선로 측도 회복하지 못했다.



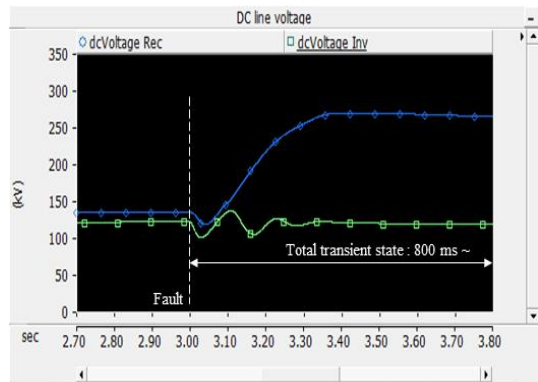
(a) Rectifier : AC current



(b) Inverter : AC current



(c) DC line current



(d) DC line voltage

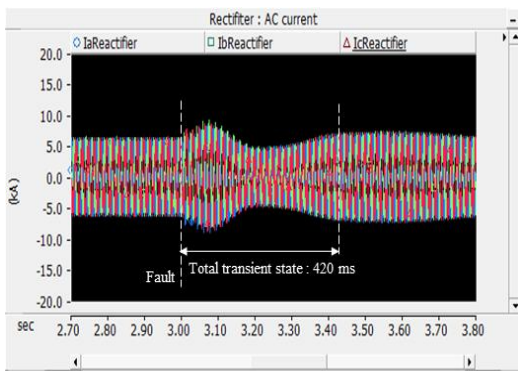
Fig. 3-28 Fault characteristics for a ground-fault on the DC line

(2) 한류형 초전도 DC 차단기가 적용된 경우 고장전류 및 전압곡선

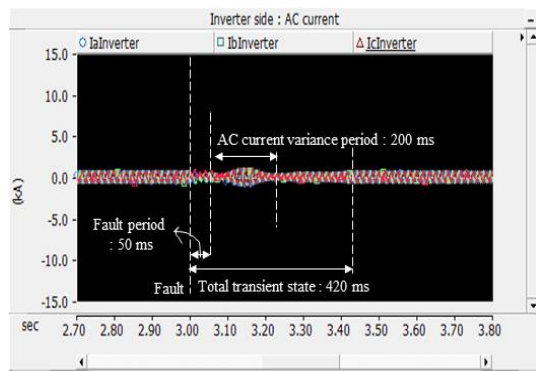
그림 3-29는 한류형 초전도 DC 차단기를 적용한 후 DC 선로에 지락고장을 모의한 경우 동작특성을 나타내는 그래프이다. 고장이 발생하기 전에는 0.82[kA]의 전류가 DC 선로에 도통됨에 따라 초전도체의 임계값 이하의 전류이므로 한류형 초전도 DC 차단기가 선로에 손실을 발생시키지 않았다.

그림 3-28과 달리 고장발생과 동시에 한류형 초전도 DC 차단기의 한류 및 차단동작, IGBT 스위칭, 커패시터 방전동작이 동시에 수행되었다. 이로 인해 고장전류의 크기는 4.45[kA]로 제한되었다. 제한된 고장전류가 DC 차단기로 유입되어 차단기는 3.15[sec]에 병렬로 결합된 전류 및 흡수 회로의 보조동작에 의해 MCB를 개극하고 TIV를 소호시킴

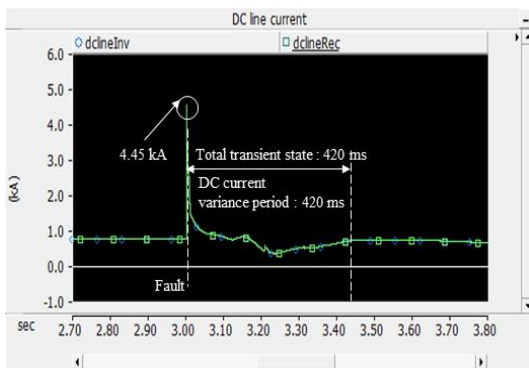
에 따라 고장이 발생하고 420[msec] 이후인 3.42[sec]에 차단동작을 완료하였다. 이때 고장전류 감소율은 커패시터의 방전으로 인해 양단에 인가되는 전압은 160[kV]까지 증가하였다. 그러나 커패시터의 1단계 동작이 끝나기 전에 한류 및 차단동작이 시작되었다. 이로 인해 커패시터의 방전은 고장이 발생하고 130[msec]이후인 3.13[sec]에 중단되었고 정류회로도 구성되지 않았다. 이후 설계된 시스템 내부에 적용된 제어동작의 프로세서에 따라 고장이 발생하고 약 0.45[sec] 이후 시스템이 정상동작을 수행함을 확인하였다. 한류형 초전도 DC 차단기의 고장전류 감소율은 8.4×10^{-3} [kA/msec]이다.



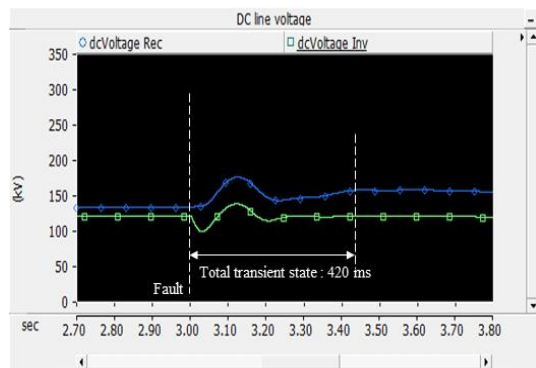
(a) Rectifier : AC current



(b) Inverter : AC current



(c) DC line current



(d) DC line voltage

Fig. 3-29 Fault characteristics for a ground fault
 on the DC line when CLS-DCCB is applied

E. 결론

PSCAD/EMTDC 계통해석 프로그램을 활용하여 한류형 초전도 DC 차단기의 차단 및 동작특성을 분석하였다. 한류형 초전도 DC 차단기의 단독 특성을 분석한 다음 DC를 기반으로 한 시스템에 적용하여 동작특성을 해석하였다.

해석 결과, HVDC급 100[kV]의 전압을 인가했을 경우, 기계식 DC 차단기만 단독으로 적용한 경우 차단용량을 이상적으로 설계하였음에도 불구하고 차단에 실패하였다. 그러나 차단에 실패한 기계식 DC 차단기에 초전도체를 결합시켜 한류형 초전도 DC 차단기를 모의하자 약 1주기 이내에 차단동작이 완료되었다. 또한, HVDC급 계통에 기계식 DC 차단기만으로 차단동작을 수행하기 위해서는 차단용량을 이상적인 설계 값인 5[MVA]보다 더 크게 최소 4배 이상인 23[MVA]로 용량을 증대시켜야 한다. 하지만 이는 실효성 측면에서 부적합할 뿐만 아니라 차단시간도 100[msec] 이상으로 성능 측면에서도 부적합하다. 반면 한류형 초전도 DC 차단기를 적용할 경우 차단시간은 9배 단축되며 정격전압보다 약 33[%] 높은 전압 범위(100[kV]기준, 155[kV])까지 적용 가능하다. 즉, 예상치 못한 고장전류가 발생 하더라도 특정 범위까지는 차단이 가능함을 의미한다. 또한, 기존에 연구된 차단기들과 dI/dt 를 비교한 결과 정격전압 및 차단용량 대비 성능측면의 실효성도 확인하였다.

다음으로 계통연계형 PV 시스템을 설계한 후 한류형 초전도 DC 차단기를 DC 선로에 적용시켜 과도상태를 해석하였다. 그 결과, 고장전류의 최대 크기를 약 2배 낮게 (14.25[kA]→5.65[kA])제한하여 DC 차단기에 인가되는 전력을 분담하였다. 이로 인해 고장전류의 크기는 1[msec]당 0.58[kA/msec]로 감소되었고 이는 DC 차단기만 적용된 경우 (0.19[kA/msec])보다 약 3배 빠른 고장전류 감소율이다. 고장전류가 빠르게 감소됨으로써 차단기의 차단동작시간도 단축되었고 이로 인해 연계된 AC 계통에 미치는 고장전류의 크기도 9.92[kA]에서 4.15[kA]로 감소되었으며 도통시간도 170[msec]에서 30[msec]로 약 6배 단축시켰다. 한류형 초전도 DC 차단기는 계통에 적용된 경우에도 고장전류의 크기와 차단기에 가해지는 부담을 저감시킴으로써 연계된 AC 계통에 미치는 영향을 최소화시킬 수 있었다. 계통연계형 PV 시스템에 적용할 경우에도 안정도 및 신뢰도

향상 가능성을 확인하였다.

마지막으로 VSC-HVDC 시스템에 적용하여 해석하였다. 그 결과, 평균 4.6×10^{-3} [kA/msec] 로 고장전류를 저감시켜 차단동작을 완료하였다. 사고유형별로 비교한 결과, AC 선로 측에서 사고를 모의할 경우 AC선로는 자체적으로 회복을 하지만 DC 선로는 자체적으로 회복이 불가하며 반드시 차단기술이 커패시터의 방전 전에 시작해야만 다소 시간이 지연되더라도 정상 동작으로 회복함을 확인하였다. VSC-HVDC 시스템에 한류형 초전도 DC 차단기가 결합된 경우에는 초전도체의 한류동작으로 인해 커패시터는 방전을 시작하고 평균 0.19[sec] 이내에 중단되므로 정류회로의 미구성으로 고장파급의 가능성을 감소시킬 수 있는 가능성을 확인하였다.

단, 한류형 초전도 DC 차단기의 단독 특성을 분석했을 때와 같은 용량으로 설계하여 적용하였으나 차단동작 및 고장전류 감소율이 작게 나타났다. 이는 VSC-HVDC 시스템 경우 양방향 전력전송이 가능하므로 다수의 선로정수 및 제어 컨트롤러가 존재하므로 한류형 초전도 DC 차단기를 설계할 때 반드시 시스템 측면을 고려해서 보호기기를 설계해야 함을 의미한다. 그러나 한류 및 차단동작의 추세는 유사하게 나타남에 따라 추후 시스템 측면을 고려해 재설계할 경우 높은 동작 신뢰도를 확보할 수 있다고 판단된다.

한류형 초전도 DC 차단기를 단독으로 한류 및 차단특성을 분석하고 DC를 기반으로 한 계통연계형, VSC-HVDC 시스템에 적용하여 해석한 결과, 고장전류제한 및 최대 크기 제한으로 인해 차단시간이 단축되고 차단실패 가능성 또한 감소됨을 확인하였다. 차단시간이나 고장전류 감소율은 다소 차이가 발생하였으나 이는 앞에서 언급된 부분을 고려하여 심화된 연구를 통해 보완할 수 있을 것으로 사료된다.

IV. 실험 및 결과 고찰

A. 실험순서도

앞에서 설명한 ‘Ⅱ, Ⅲ장’에서는 PSCAD/EMTDC 계통해석 프로그램을 이용해 한류형 초전도 DC 차단기의 한류 및 차단특성과 계통에 적용되었을 경우 우수한 동작 성능 및 계통의 안정도 향상 가능성을 확인하였다. 이에 본 장에서는 한류형 초전도 DC 차단기 동작 신뢰도를 확보하기 위해 설계 및 제작한 후 자체 DC 전력 시험 설비를 구축하여 실험을 진행하였다.

한류형 초전도 DC 차단기는 판매되고 있는 상용 DC 차단기 중 실험실 내 구축된 DC 전력시험설비에서 실험이 가능한 용량의 차단기를 초전도선재와 결합하여 제작하였다. 한류형 초전도 DC 차단기에서 초전도체의 역할은 DC 차단기의 동작지연 시간동안 전류 및 전력을 온전히 부담함으로써 DC 차단기에 가해지는 전력을 분담하는 역할을 한다. 이에 HVDC 및 MVDC, LVDC 계통 적용을 고려했을 때, 초전도체와 결합될 DC 차단기는 현 시점 기준 판매되고 있는 DC 차단기일 것으로 예측되어 상용 DC 차단기를 선정하여 실험을 진행하였다. 시뮬레이션을 통해 입증한 바와 같이 초전도체가 고장전류의 최대 크기를 제한하여 DC 차단기에 인가되는 전력을 부담함에 따라 고장전류 감소율을 기준으로 차단 동작시간 단축여부를 중점적으로 분석하여 한류형 초전도 DC 차단기술의 우수성 및 신뢰도를 확인하고자 한다.

B. DC 전력시험 설비구축

한류형 초전도 DC 차단기의 동작특성을 확인하기 위해 그림 4-1과 같이 DC 전력망과 유사하게 전원설비, 실험설비, 측정설비, 시뮬레이션 프로그램 등으로 나누어 필요한 설비들과 측정기기들을 실험실 수준에 맞춰 소규모로 구축하였다.

1. DC 전원공급설비

그림 4-2는 DC 전원을 공급하기 위해 설계 및 제작한 배터리이다. DC 전력시험설비 구축 당시 배터리뱅크의 용도는 전류의 크기를 증폭시켜 고장전류를 모의하기 위함이었다. 그러나 설비를 구축하던 중 설계 및 제작과정에서 오차가 발생해 기존에 제작된 설비들과 제작 완료한 DC power supply의 용량이 상이해 연계가 되지 않아 DC 전원공급설비 확보에 어려움이 발생했다. DC 시험 설비 중 전원공급설비는 핵심 설비이다. 그러므로 배터리를 이용해 DC 전원을 공급하기로 결정하였다. 제작된 배터리뱅크는 12[V]의 배터리 63개를 직렬로 연결하였다. 사용된 배터리의 재원을 표 4-1에 나타내었다. 배터리뱅크의 최대 인가전압은 800[V]이고 크기는 가로 1900[mm], 세로 700[mm], 높이 1600[mm]이다.

그림 4-3은 DC power supply로서 용량은 AC 380[V], 3 ϕ , 60[Hz], ± 10 [%]이다. 투입 전원을 입력받아 DC 정전압 및 전류제어를 할 수 있는 장치이고 정전압을 공급하여 각종 전자 기기시험 및 전원공급 생산용으로 제작하였다. 용량은 DC 0-2000[V], 0-10[A]이고, 최대 소비전력은 25[kVA], 부하 변동률은 0.05[%] 이하, 리플률은 rms 0.05[%] 이하이다. 정밀도가 높은 전압계 및 전류계가 부착되어 있어 낮은 전압 및 전류에서 분해 능력이 높다. 앞에서 설명한 바와 같이 제작상의 오차로 인해 이는 배터리뱅크를 충전하기 위한 용도로 변경하였다.

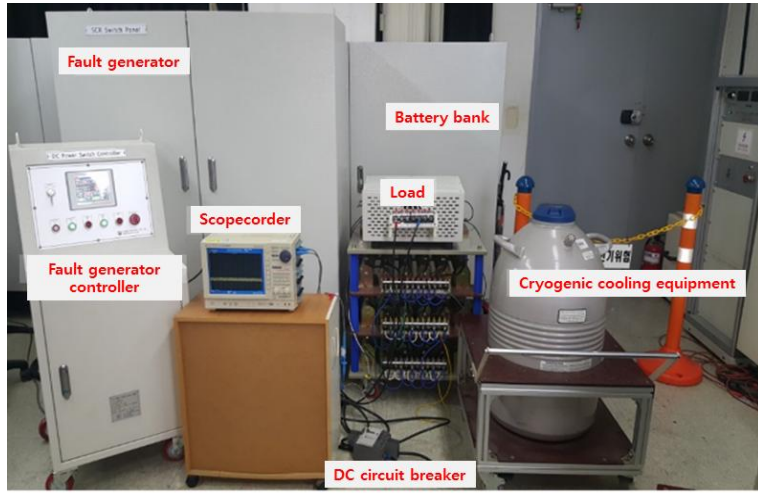


Fig. 4-1 Simulated DC power test equipment



(a) Interior of battery bank



(b) Exterior of battery bank

Fig. 4-2 Battery bank

Table 4-1 Battery specification(LM 150-12E)

Product name	Capacity[Ah]	Dimensions[mm]				Liquid weight[kg]
		length±2	Width±2	Height±3	Total height±5	
LM150-12E	150	508	222	213	253	47.1



Fig. 4-3 DC power supply

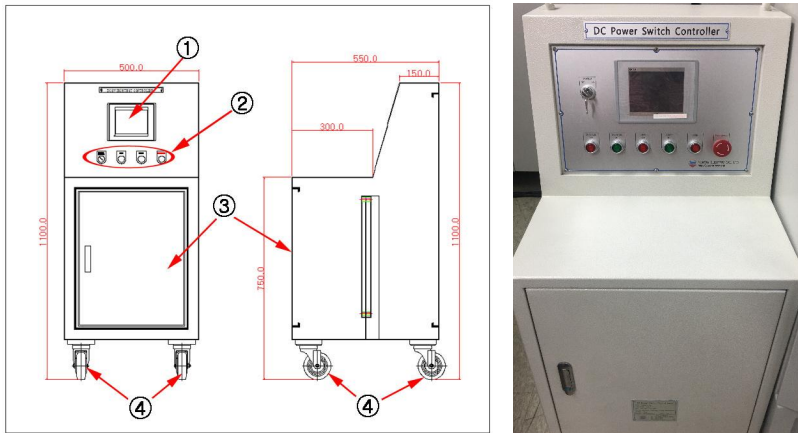


Fig. 4-4 Fault generator controller

2. 사고발생장치

AC, DC 계통 내에서 발생하는 사고는 시간 및 장소 등의 제약을 받지 않고 자유롭게 발생된다. 사고 시 차단기가 동작하여 사고선로를 차단하는 데 약 수 [msec]가 소요된다. 이에 사고발생장치를 설계 및 제작할 때 사고 모의 시간을 임의로 제어하고 일정시간 이후에는 회로가 개로될 수 있도록 설계하였다. 사고발생장치는 크게 DC 스위치 패널과 컨트롤 패널로 구성된다. DC 스위치 패널은 SCR, 다이오드, SCR PCB, 드라이버 PCB, 전압, 전류 검출회로로 구성된다. 컨트롤 패널은 스위치류, 디스플레이 컨트롤 관련 시퀀스 회로로 구성된다.

사고발생장치는 고장부하의 크기를 조절해 사고전류의 크기를 최대 1[kA]까지 모의할 수 있다. 사고는 60~500[msec]동안 모의할 수 있으며 차단기, 초전도 한류기, 한류형 초전도 DC 차단기 등 DC 보호기기가 트립 및 차단동작을 수행하지 못할 경우 설정된 사고 주기 이후 시스템에 결합된 주 차단기가 99[msec] 이후에 강제로 회로를 차단한다.

그림 4-4는 사고발생장치의 제어함의 외형도와 모습이다. ①은 HMI로 터치스크린(설정 및 디스플레이)이고, ②는 시험기기 동작 스위치이다. ③은 내부 점검 및 보수용 문이고, ④ 이동을 고려한 caster이다. 그림 4-5는 사고발생장치 회로도이고, 그림 4-6은 설계도에 따라 제작 완료된 사고발생장치의 내부 모습이다. 그림 4-7은 정상상태 시 정상전류의 크기를 결정하는 정상부하이다.

제작된 사고발생장치의 동작을 확인하기 위해 표 4-2와 같이 설계하여 성능실험을 실시하였다. 부하 선로에 유입되는 전류의 크기는 DC 10[A]로 고정하고 고장선로에 발생하는 고장전류의 크기를 전압 및 단락저항 값을 가변시켜 조정하였다. 전류는 50[mV], 25[A] 셉트저항을 이용하여 측정하였다. 그 결과, 제작된 사고발생장치가 그림 4-8과 같이 동작하는 것을 확인하였다.

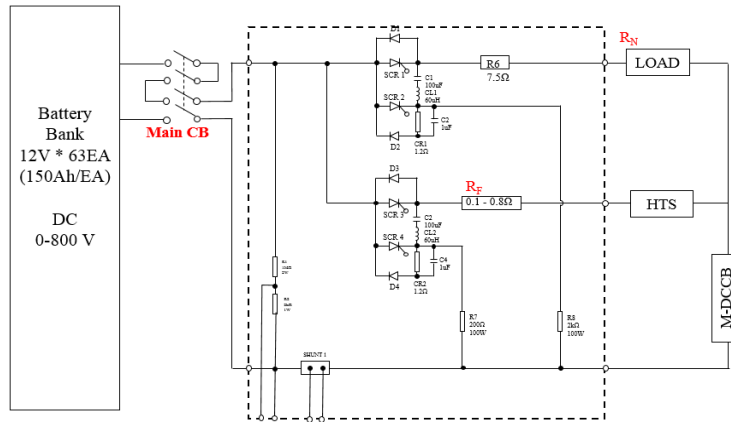


Fig. 4-5 Circuit diagram of the interior of the fault generator

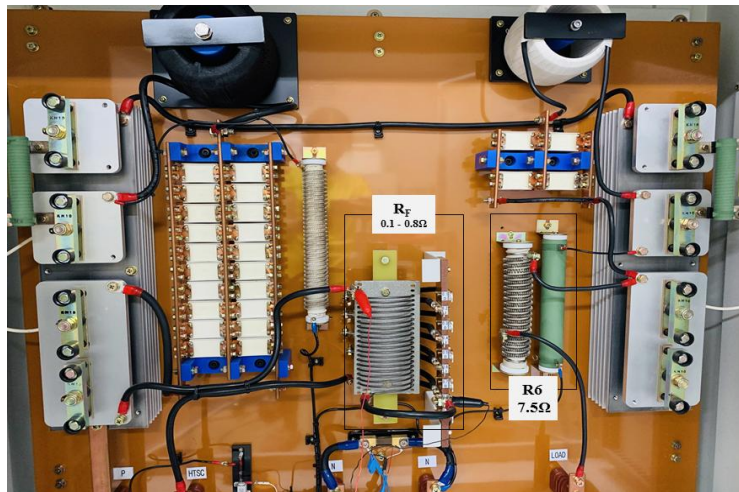


Fig. 4-6 Interior of the fault generator

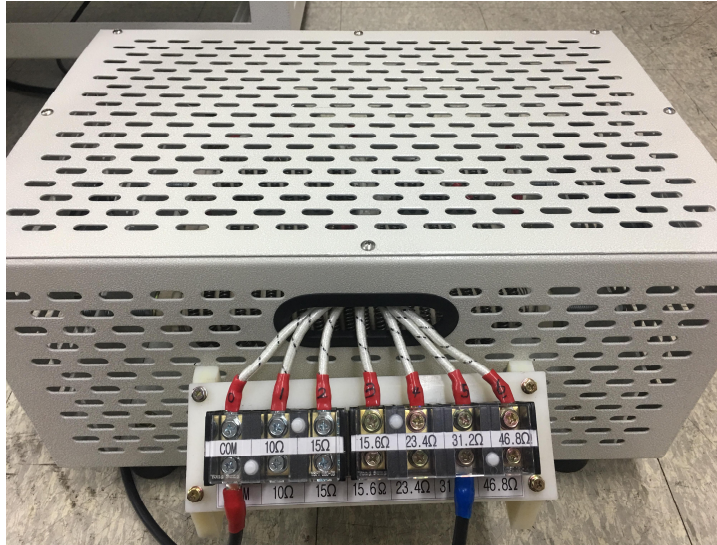
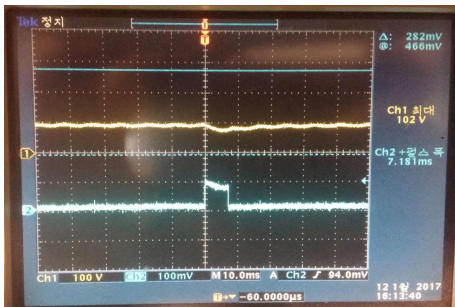


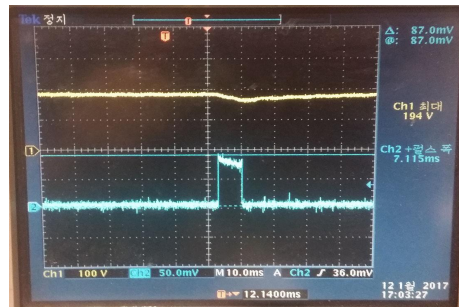
Fig. 4-7 Normal load

Table 4-2 Set-up values of the fault generator equipment characteristics test

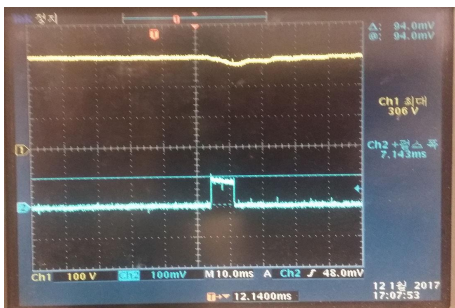
	Voltage[V]	Current[A]	$R_N[\Omega]$	$R_F[\Omega]$
(a)	100	50	10	2.5
(b)	200	50	20	5
(c)	300	50	30	8
(d)		100	30	3.5
(e)	400	50	40	10
(f)		100	40	5
(g)		150	40	2.5



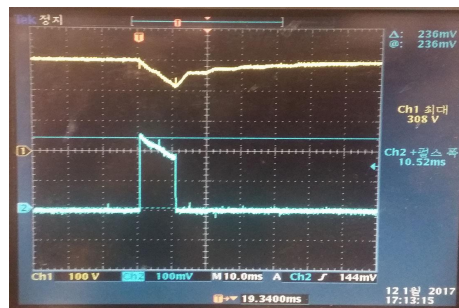
(a) 100[V], 50[A]



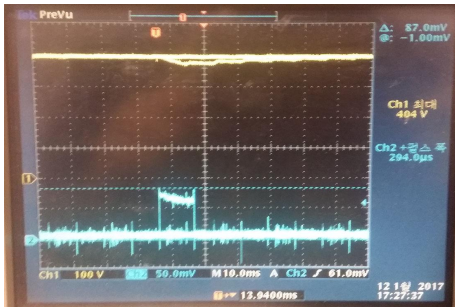
(b) 200[V], 50[A]



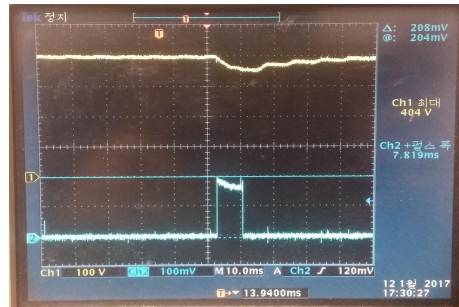
(c) 300[V], 50[A]



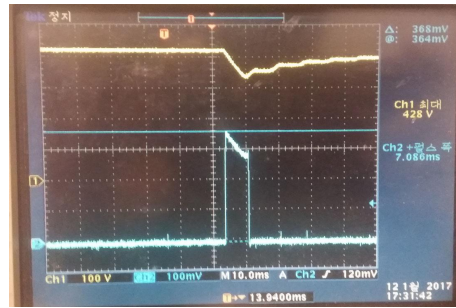
(d) 300[V], 100[A]



(e) 400[V] 50[A]



(f) 400[V], 100[A]



(g) 400[V], 150[A]

Fig. 4-8 Fault generator operation test

3. 측정설비

그림 4-9는 Scopecorder로써 전압, 전류 프로브를 이용하여 회로에 발생하는 특정 시간 대역의 전압과 전류파형을 측정하는 기기이다. 특히 Scopecorder는 16개의 신호를 동시에 표현할 수 있기 때문에 다양한 신호를 동시에 관측할 수 있으며, 단발성 신호 포착이 용이하다. 측정된 파형은 LCD 모니터를 이용하여 표현되기 때문에 눈으로 신호를 파악할 수 있어 파형의 최소/최대치, 주기적 신호의 빈도, 펄스 간 시간, 관련 신호간의 시차 등을 쉽게 분석할 수 있다.

그림 4-10은 DC 전류측정에 사용된 DC 프로브이다. HIOKI-CT6844로 진폭 확도 $\pm 0.3\%$, 위상 확도 $\pm 0.1\%$ 의 높은 정확도로 정격전류는 DC 500[A]이며 단시간내 최대 DC 720[A]까지 측정이 가능하다.



Fig. 4-9 Scopecorder (DL 750)



Fig. 4-10 DC current probe

4. 냉각시스템

그림 4-11은 초전도선재의 냉각용기 설계도면이고 그림 4-12는 제작된 냉각용기이다. 그림 4-13은 DC 전력시험설비 내 구축된 냉각시스템이다.

냉각시스템은 냉각용기, 액체질소용기, 기체질소용기로 이루어져있다. 기체질소를 액체질소용기에 주입함으로써 액체질소용기에 압력이 가해지고 이 압력을 이용해 냉각용기에 액체질소를 채우는 방식이다. 액체질소용기는 냉매역할을 하므로 보온이 가장 중요하며, 외부에서 충전이 용이해야 하므로 이동성을 고려해 제작하였다. 실험을 진행할 때 초전도선재가 보관된 냉각용기에는 액체질소가 채워져 있어야 한다. 이때, 액체질소에 의해 초전도선재가 유동성을 가질 수 있으므로 고정할 수 있는 탑 플래그와 외부단자와 연결할 수 있도록 전류 도입선 포트를 함께 제작하였다.

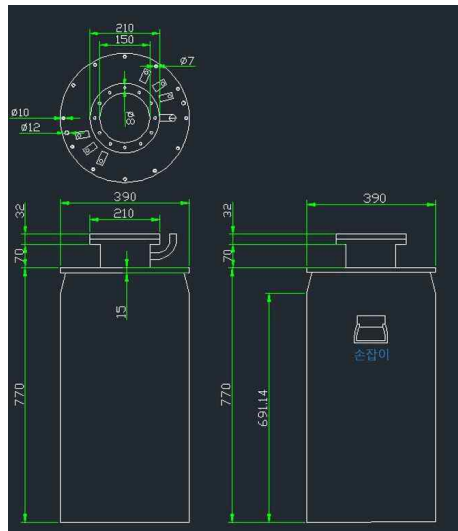


Fig. 4-11 Cryogenic cooling equipment blueprint



Fig. 4-12 Cryogenic cooling equipment

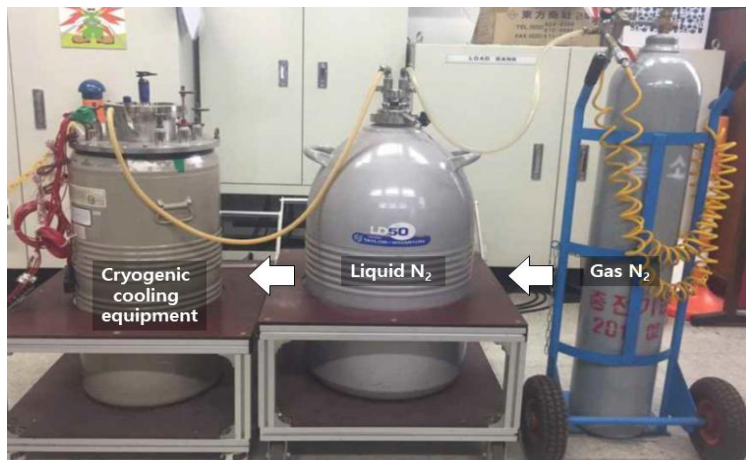


Fig. 4-13 HTS cryogenic cooling system

C. 제작

1. 한류부 선정 및 적용

a. 초전도체 선정

그림 4-14는 한류형 초전도 DC 차단기를 설계하기 위해 기계식 DC 차단기와 결합할 초전도체의 선정과정을 나타낸다. 초전도체의 경우 냉각제 수반이 필수이므로 냉각제의 종류가 중요하다. 임계온도가 77[K] 이하인 저온 초전도체의 경우 액체 헬륨을 냉각물질로 이용해야 하므로 값이 매우 비싸고, 고체 형태로 수송해야 했기에 여러 문제점들이 발생된다. 반면 임계온도가 77[K] 이상인 고온 초전도체의 경우 액체질소를 냉각물질로 이용할 수 있다. 액체질소는 값이 저렴하고, 어디서나 생산이 가능하며 수송이 간편해 초전도체의 사용이 매우 편리하다.

고온 초전도체는 임계온도가 77[K]인 YBCO(Y-Ba-Cu-O), 임계온도가 120[K]인 BSCCO(Bi-Sr-Ca-Cu-O), 임계온도가 125[K]인 TBCCO(Ti-Ba-Ca-Cu-O), 임계온도가 134[K] 이상인 HBCCO(Hg-Ba-Ca-Cu-O) 등이 있다[24][68]. 그러나 YBCO와 BSCCO를 제외한 나머지는 화학적인 불안성 및 유해성 등의 문제점으로 인해 적용 및 응용이 어렵다. 또한 BSCCO 고온 초전도체의 경우 액체질소 내 온도영역에서 자속피닝 특성으로 인해 전류 밀도가 크게 감소하므로 안정도를 확보하기 어렵다[24][68]. 그러므로 임계온도가 높고 응용성 및 안정도가 높은 YBCO를 선정하였다.

YBCO는 크게 박막형과 선재형으로 나눌 수 있는데 박막형의 경우 임계전류 값과 용량이 작아 HVDC에 적용하기에는 부적합하다. 이에 임계전류 크기 및 용량 증대가 용이하며 권선방법에 따라 고장전류의 상승시간 및 속도를 지연시킬 수 있는 선재형을 선택하였다.

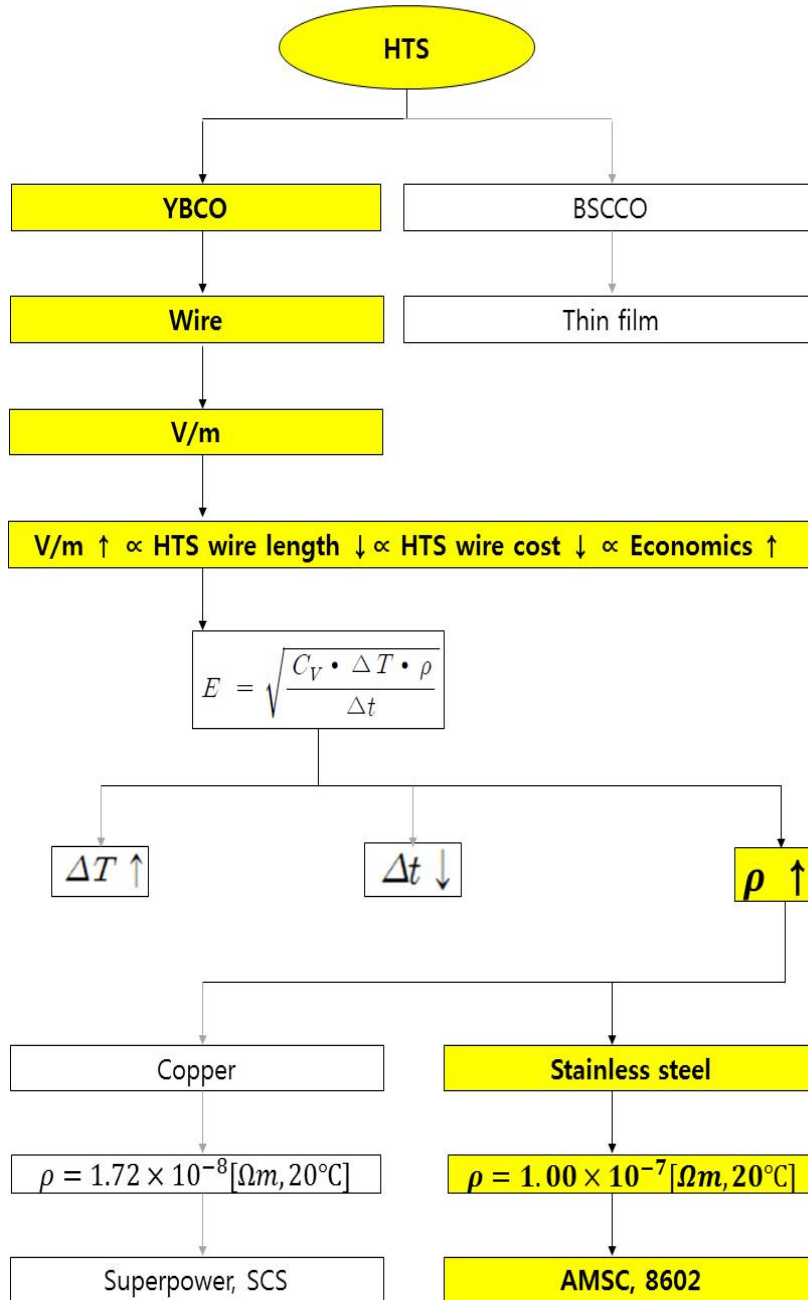


Fig. 4-14 HTS selection process

또한, 적합한 초전도선재를 선정하기 위해서는 해석적인 방법이나 실험을 통해 단위 [m]당 허용전압의 크기를 산출해야 한다. 단위 [m]당 허용전압이 클 수록 초전도선재의 길이가 감소되므로 초전도선재 비용이 절감되고 이로 인해 경제성이 향상되기 때문이다. 초전도선재의 단위 [m]당 허용전압을 증가시키기 위한 방법이 그림 4-14에 나타내었다[68-69].

그림 4-14에 제시된 식은 초전도선재의 전기적 발열이 열에너지로 치환되는 에너지 관계를 나타낸 식인 식 4-1을 초전도선재의 단위길이 당 인가전압으로 나열한 식이다. 초전도선재의 온도가 300[K]를 초과할 경우 선재의 손상 가능성 및 초전도성 회복시간이 증가하기 때문에 250~300[K]을 유지해야 한다. 또한, 연계된 기기와의 동작을 고려해야 하므로 최소 4주기를 유지해야 한다. 즉, 초전도체의 온도나 동작시간은 한계가 있다. 이에 비저항이 큰 안정화 층이 적용된 초전도선재를 적용하는 것이 가장 효과적이라고 판단된다. 초전도선재의 경우 안정화 층의 재료와 형상에 대한 고려가 필수이다. 왜냐하면 초전도선재는 매우 짧은 시간에 퀘치가 이루어지므로 열 교환이 이루어지지 않아 고장전류가 안정화 층으로 유입되어 저장된다. 고장전류의 크기를 제한하는 초전도 한류기용 선재는 대표적으로 Super Power의 SCS 선재와 AMSC사의 8602 선재가 있다. Super power의 SCS 선재는 안정화 층이 구리로써 비저항이 $\rho=1.72 \times 10^{-8} [\Omega m, 20^\circ C]$ 이고, AMSC사의 8602는 안정화 층이 스테인리스 스틸로써 비저항이 $\rho=1.00 \times 10^{-7} [\Omega m, 20^\circ C]$ 이다. 이에 스테인리스 스틸을 안정화 층으로 사용한 AMSC사의 8602 선재를 선정하였다.

$$\frac{V^2}{R} \cdot t = C_V \cdot \Delta T \quad (4-1)$$

여기서,

V = 초전도체 양단 전압 R = 초전도체 발생 저항

C_V = 안정화 층 구성 재료의 열용량 ΔT = 초전도체의 온도변화

E = 초전도선재의 단위길이 당 인가전압 [V/m]

ρ = 안정화 층 재료의 비저항 Δt = 초전도체 동작 시간

b. 초전도선재 적용

앞에서 선정된 초전도선재를 활용하여 한류 동작을 수행하기 위해 표 4-3과 같이 보빈(Bobbin)을 설계 및 제작하였다. 초전도 한류기용 보빈재질은 대부분 유리섬유 강화 플라스틱인 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic)를 사용하지만 이는 고가이므로 추후 프로토타입을 제작할 때 적용하기로 하고 본 실험에서는 아크릴을 표 4-3과 같이 제작하여 적용하였다[70]. 초전도선재를 제작한 보빈에 감아 그림 4-15와 같이 결선한 후 냉각설비에 장착하였다. 초전도선재는 켄치 될 때 발열로 인한 합선을 예방하기 위해 헬리컬 타입으로 선택하였고 이에 따라 인덕턴스 크기는 식 (4-2)에 따라 산출되었다[71-73].

실험에 사용할 초전도선재를 제작할 때에는 적합한 온도에서 초전도선재와 신호선을 연결하는 접합 작업이 중요하다. 적합한 온도보다 높은 온도를 인가하여 접합 작업을 진행할 경우 초전도선재의 안정화 층이 분리되어 최악의 경우 초전도성이 깨지게 된다. 본 논문에서 선정한 AMSC 8602의 안정화 층은 스테인리스 스틸로써 인덱스를 이용해 접합 작업을 할 때 표 4-5와 같은 온도가 제시되었다. 그러나 접합에 사용된 Quick 936의 온도 조절범위는 200~480[°C]이므로 온도를 최소 값인 200[°C]로 설정한 다음 최대 3분 이내에 접합 작업을 완료하였다.

$$L = \frac{D^2 N^2}{0.45D+h} [nH/m] \quad (4-2)$$

여기서,

$$L = \text{inductance} [nH] \quad D = \text{diameter} [mm] \quad N = \text{turns} \quad h = \text{height} [mm]$$

$$R_{HTS} = \rho \frac{l}{S} [\Omega] \quad (4-3)$$

Table 4-3 HTS wire bobbin design value

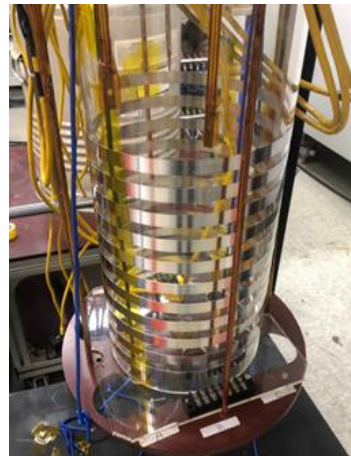
	Value
Material	acrylic
Out diameter[mm]	200
Inner diameter[mm]	190
Total height[mm]	900
Thickness[mm]	50

Table 4-4 Parameter values according to HTS wire length

Length[m]	1	3	5
Height[mm]	76	140	204
Inductance[μ H]	2.17	4.35	6.67
Contact resistance[Ω]	0.1	0.06	0.09



(a) HTS wound on bobbin



(b) HTS mounted on cooling facility

Fig. 4-15 HTS wires

Table 4-5 Appropriate temperature and time criteria for the soldering work of AMSC 8602

Temperature range	Maximum time
165-175[°C] (329-347[°F])	3 minutes
155-165[°C] (311-329[°F])	20 minutes
145-155[°C] (293-311[°F])	60 minutes



Fig. 4-16 Quick 936

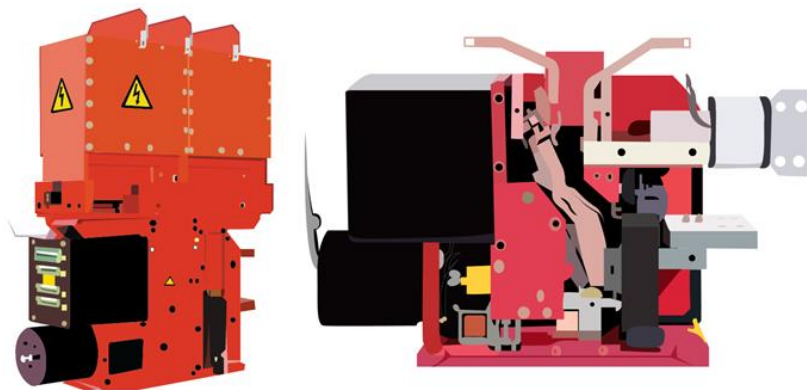


Fig. 4-17 GE gerapid 4207

2. 차단부 선정 및 동작성능 실험

a. DC 차단기 선정

현재 제작되어 구매 가능한 차단기는 그림 4-17의 GE에서 제작한 철도용 DC 차단기 Gerapid 4207과 그림 4-18의 LS산전에서 제작한 DC 회로적용 차단기 Susol 이 있다. Gerapid 4207은 정격전류가 4150[A]이고 정격전압이 1000~3600[V], 정격차단전류가 40[kA], 정격최대 차단용량이 100[kA]이다. LS산전의 Susol CB는 정격전류가 16, 32, 50, 80, 100, 200[A], 정격전압이 500~1000[V]이다. 정격차단전류는 정격전류 값에 따라 ① 정격전류가 40[A]이하인 경우 : 400[A], ② 정격전류가 40[A] 초과 경우 : 정격전류×10 으로 나뉜다. 본 논문을 위해 DC 전력시험설비는 경제적인 비용 및 설치장소의 한계, 위험성을 고려하여 최대 DC 800[V], DC 1000[A]를 인가하도록 구축하였다. GE에서 개발한 gerapid 4207의 경우 실험실 내에서 사용하기에는 용량이 적절하지 않아 제외하였다.

그러므로 실험실 수준의 소규모로 구축된 DC 전력시험설비를 이용해 한류형 초전도 DC 차단기의 차단성능을 확인하기 위해서는 비교적 용량이 낮고 계통용 차단기로 설계 및 제작된 LS산전의 suso 차단기를 선정하였다.



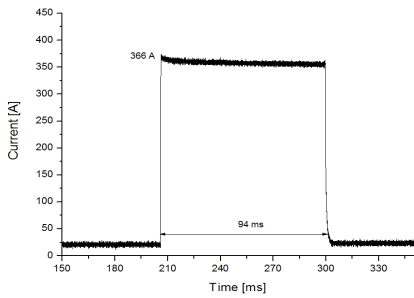
Fig. 4-18 LS DCCB

b. DC 차단기 동작성능 실험 : Susol M-DCCB

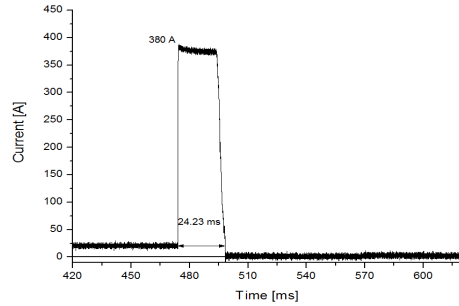
그림 4-19는 LS산전의 Susol DC 회로 차단기의 동작성능 실험 그래프이다. 초전도체는 DC 차단기의 동작지연시간 동안 전류 및 전력을 분담하며, 차단기의 차단내력을 초과하는 고장전류가 발생할 경우 고장전류의 크기를 차단내력 이하로 제한하는 역할을 한다. 만약, 초전도체가 고장전류의 크기를 과제한 하여 차단기의 트립전류 이하까지 제한시킬 경우 DC 차단기를 개방되지 않는다. 즉, 초전도체에 인가되는 전력이 과부담 되어 초전도체의 파손 가능성만 증대된다. 초전도체의 최소 및 최대 한류 임피던스 크기를 선정하기 위해 상용 DC 차단기인 Susol. DC 차단기의 최소 트립전류 측정실험을 진행하였다. 본 논문을 위해 구축된 DC 전력 시험설비는 최대 고장전류를 1[kA]까지 모의할 수 있으나, 환경적인 요인으로 인해 최대 800[A]까지 발생 가능하다. 그러므로 정격전류 16, 32, 50[A]인 차단기만 선정하여 실험하였다. 인가전압은 611[V]이고 정상부하는 26.91[Ω]으로 설정하였다.

그림 4-19 (a), (b) 정격전류 16[A] DC 차단기의 최소 트립전류를 측정한 그래프이다. 그림 4-20 (a)는 고장부하를 1.8[Ω]으로 설정하여 366[A]의 고장전류를 발생시켰다. 그 결과, 고장전류는 약 94[msec]동안 도통되다가 그 이후에 정상전류 크기와 함께 감소되었다. 이는 차단기가 트립동작을 수행하지 못해 사고발생장치 시스템에서 메인차단기가 자동으로 고장신호를 차단한 것이다. 그림 4-20 (b)는 고장 부하를 1.61[Ω]으로 설정하여 380[A]의 고장을 모의하였다. 그 결과 차단기는 주 차단기가 강제로 차단하는 동작시간인 94[msec] 보다 빠른 약 24.23[msec] 이내에 트립되었고 고장전류 감소율은 15.68[A/msec]이다.

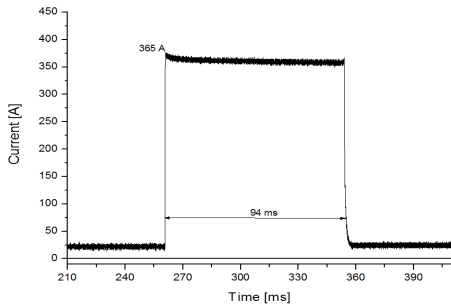
그림 4-19 (c), (d)는 정격전류 32[A] DC 차단기의 트립전류 측정그래프이다. 그림 4-19 (c)는 고장 부하를 1.67[Ω]으로 설정하여 365[A]의 고장전류를 모의하였다. 그 결과, 그림 4-19 (a)와 같이 94[msec] 이후에 고장전류가 개방되었고 이는 차단기가 트립동작을 수행하지 못하였음을 의미한다. 그림 4-19 (d)는 고장부하를 1.58[Ω]으로 설정하였고 고장전류는 387[A]이다. 이때 약 17.48[A/msec]로 고장전류 크기를 감소시켜 주 차단기의 동작시간 이내에 차단이 완료되었다.



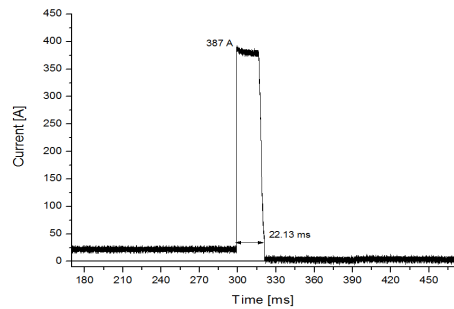
(a) 16[A] DCCB, $R_F=1.81[\Omega]$



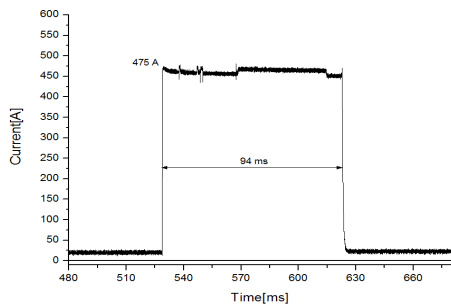
(b) 16[A] DCCB, $R_F=1.61[\Omega]$



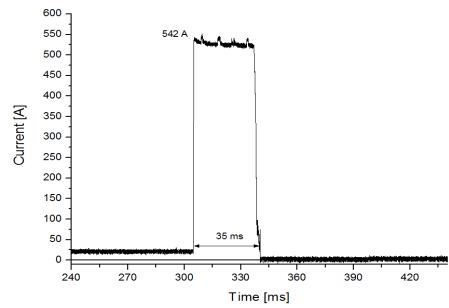
(c) 32[A] DCCB, $R_F=1.67[\Omega]$



(d) 32[A] DCCB, $R_F=1.58[\Omega]$



(e) 50[A] DCCB, $R_F=1.29[\Omega]$



(f) 50[A] DCCB, $R_F=1.13[\Omega]$

Fig. 4-19 Susol DCCB minimum trip current measurement

그림 4-19 (e), (f)는 정격전류 50[A] DC 차단기의 최소 트립전류 측정 그래프이다. 그림 4-19 (e)는 고장부하를 1.29[Ω]으로 설정하였다. 이에 따라 고장전류의 크기는 475[A]가 발생하였다. 그림 4-19 (a), (c)와 마찬가지로 약 94[msec] 이후 고장신호가 차단된 것을 보면 차단기가 트립동작을 수행하지 못하였음을 알 수 있다. 그림 4-19 (f)는 고장 부하를 1.13[Ω]으로 설정하여 약 542[A]의 고장전류를 발생시킨 그래프이다. 마찬가지로 1[msec]에 15.48[A]의 기울기로 고장전류의 크기를 감소시켜 주 차단기보다 빠르게 고장전류를 소호시켜 차단동작이 완료됨을 확인하였다.

Susol DC 차단기 최소 트립전류를 측정한 동작특성 실험은 초전도선재의 설계 사양 중 최대 한류 임피던스 크기를 선정할 때 고려되는 요소이다. 초전도선재의 최대 한류 임피던스 크기는 결합되는 DC 차단기의 차단 용량에 따라 다르다. 위에서 제시된 차단기를 기준으로 보면, 초전도선재가 16, 32[A]용 차단기와 결합될 경우, 초전도선재는 최대 1.57[Ω]을 초과하지 않도록 설계해야 한다. 그리고 50[A]용 차단기와 초전도선재가 결합될 경우 초전도선재의 최대 한류 임피던스 크기는 1.1[Ω]을 넘지 않도록 설계해야 한다. 왜냐하면 초전도선재의 한류 임피던스 크기가 위에서 제시된 최대 한류 임피던스 크기인 1.57, 1.1[Ω]보다 더 큰 값으로 설계될 경우 초전도선재가 고장전류의 크기를 차단기의 트립전류 보다 더욱 낮게 제한함으로써 차단기가 동작을 하지 않게 된다. 차단기가 차단동작을 수행하지 않음으로써 초전도선재는 단시간이 아닌 고장이 발생하는 시간 내내 온전히 전력을 부담하게 된다. 한류형 초전도 DC 차단기에서 초전도선재의 역할은 DC 차단기의 계전 및 점점 개극으로 인해 발생하는 단시간인 지연동작 구간에 고장을 분담하는 역할이다. 즉, 최소 사용으로 최대한의 효과를 도출하는 것이 목표이다.

그러나 차단기가 동작하지 않아 고장이 발생하는 전 구간동안 고장을 부담할 경우 초전도선재는 파손 및 손상될 가능성이 크다. 초전도선재의 파손 및 손상을 예방하거나 초전도선재가 파손될 경우에 소요되는 경제적인 비용은 차단기 교체와는 비교할 수 없을 정도의 큰 비용이 발생할 수 있으므로 설계할 때 반드시 고려해서 설계해야 하며 다음 장에서 실험을 진행할 때 주의 깊게 분석할 부분이다,

D. 실험 및 분석

1. 실험조건

그림 4-20은 한류형 초전도 DC 차단기의 실험회로도이다. 실험조건은 정상전류의 크기를 결정하는 R_N 은 10[Ω], 고장전류의 크기를 결정하는 R_F 는 0.8[Ω], 사고발생장치 동작모드는 그림 4-21과 같은 Auto, 초전도선재(HTS sample) 유형은 앞에서 선정한 바와 같이 I_C 가 226[A]인 AMSC사의 type 8602이고, 고장모의시간은 60[msec]로 설정하였다. 실험에 따라 변하는 조건은 표 4-6에 나타내었다.

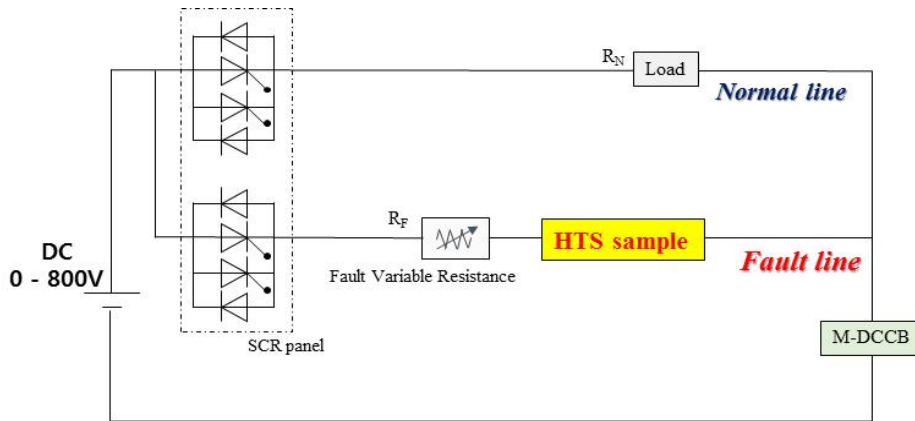


Fig. 4-20 CLS-DCCB experimental circuit diagram

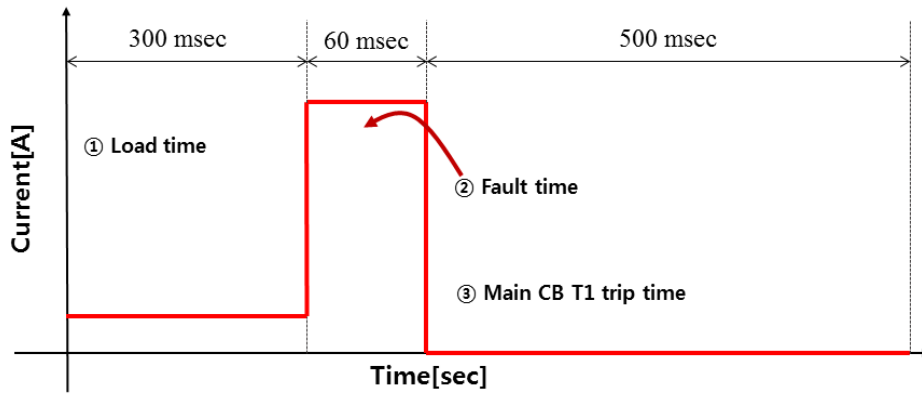


Fig. 4-21 Fault generator equipment operation mode(Auto)

Table 4-6 CLS-DCCB experimental variable design conditions

Test	Battery [EA]	Rated voltage [V]	Max. fault current [A]	HTS Max. Current-limiting impedance[Ω]	HTS sample length[m]				M-DCCB model
					0	1	3	5	
1	40	500	644	~1.57	0	1	3	5	TD100-16[A]
2	44	545	686						
3	48	600	725						
4	40	500	651	~1.57	0	1	3	5	TD100-32[A]
5	44	545	689						
6	48	600	729						
7	40	500	652	~1.1	0	1	3	5	TD100-50[A]
8	44	545	690						
9	48	600	733						

2. 실험분석

a. TD100-16[A] DC 차단기에 결합된 경우

(1) Test 1

그림 4-22는 표 4-6과 같이 TD100-16[A] DC 차단기와 초전도선재를 결합시켜 배터리 40개를 직렬로 결합해 DC 500[V], 고장전류의 최대 크기 634[A]를 모의하여 동작특성을 나타낸 그래프이다. 표 4-7은 이에 따른 결과값을 나타낸다.

정상 시에는 초전도선재에 유입되는 전류의 크기가 50[A]로써 초전도선재의 임계전류 값이 이하의 전류가 유입됨에 따라 초전도선재는 저항이 0인 초전도상태를 유지하여 선로에 손실을 발생시키지 않는다. 이로 인해 안정적으로 정상전류가 도통되는 것을 확인하였다.

그러나 설정된 시간에 고장을 모의하자 초전도선재의 유무 및 길이에 따라 차단특성이 상이하게 나타났다. 초전도선재 없이 DC 차단기만 적용된 경우(■), 설계된 고장전류의 최대값에 근사하게 643.6[A]가 발생되었다. 기계식 DC 차단기가 개극동작을 시작할 때 측정된 고장전류의 크기는 630.2[A]였다. 이는 선로에 결합된 저항이나 리액터스에 의해 제한된 값이다. 기계식 DC 차단기는 앞에서 언급한바와 같이 기계식 접점 및 계전시간으로 인해 약 8.65[msec]의 지연동작이 발생하였다. 이후 개극동작을 시작해 고장이 발생하고 차단동작이 완료되었다. 앞에서 설명한 바와 같이 차단기의 차단동작 시간은 식 (3-2)와 같은 시간에 따른 전류 변화율의 기울기를 측정하여 확인할 수 있다. dI/dt 값이 클 수록 1[msec]당 감소되는 전류 값이 크기 때문에 차단기의 차단동작이 빠르게 이루어짐을 뜻한다. 고장전류 감소율은 1[msec]당 17.72[A]이다. DC 차단기에는 인가되는 식 (3-3)에 의해 약 1.81×10^6 [kJ]의 에너지가 부담된 것을 확인할 수 있었다.

1[m]의 초전도선재가 적용된 경우(●), 고장을 발생시킴과 동시에 초전도선재에 유입되는 고장전류의 크기가 임계전류 값인 226[A]를 초과하여 약 1[msec]이내에 0.08[Ω]을 지닌 상전도 상태로 켜치 되었다. 이로 인해 고장전류의 최대 크기는 630.9[A]로 제한되었다. 기계식 DC 차단기만 적용된 경우와 마찬가지로 약 8.65

[msec]의 동작지연 시간동안 초전도선재가 온전히 전류 및 전력을 분담하였다. 이로 인해 초전도선재는 지연시간 동안 계속해서 퀘치가 진행되어 DC 차단기가 개극 동작을 시작하기 전까지 한류 임피던스가 최대 0.038[Ω]까지 증가하였고 약 8.57[%]의 한류율로 고장전류의 크기를 588.8[A]로 최종 제한하였다. 이후 DC 차단기는 1[msec]당 43.64[A]로 전류를 감소시켜 차단동작을 완료하였다. 1[m]의 HTS가 적용된 경우 초전도선재가 DC 차단기에 인가되는 전력을 분담함으로써 DC 차단기는 1.73×10^6 [kJ], 초전도선재는 0.08×10^6 [kJ]의 에너지가 분담되었다.

3[m]의 초전도선재가 적용된 경우(▲)도 한류 및 동작 메커니즘은 1[m] 초전도선재가 적용된 경우와 같다. 단, 초전도선재의 길이가 증가함에 따라 식 (4-3)와 같이 초전도선재의 한류 임피던스가 0.023[Ω]으로 증가하였다. 이로 인해 고장전류의 최대 크기는 621.6[A]로 제한되었고 DC 차단기가 동작하기 전까지 한류 임피던스가 0.059[Ω]까지 증가하였다. 고장전류의 크기는 설계된 값보다 약 11.44[%] 제한된 570.3[A]까지 제한되었다. 이후 DC 차단기는 식 (3-2)와 같이 52.57[A/msec]로 고장전류를 감소시켜 차단동작을 완료하였다. 식 (3-3~4)에 따라 DC 차단기에는 1.68×10^6 [kJ], 3[m] 초전도선재는 0.13×10^6 [kJ]의 에너지가 분담되었다.

5[m]의 초전도선재가 적용된 경우(▼)도 1, 3[m]와 마찬가지로 같은 동작을 수행한다. 초전도선재의 길이가 길어짐에 따라 한류 임피던스가 0.035[Ω]으로 증가하였다. 이로 인해 고장전류의 최대 크기를 612.8[A]로 제한하였고 DC 차단기의 동작지연시간 동안 초전도선재의 퀘치가 계속 진행됨에 따라 한류 임피던스는 차단기가 동작하기 전까지 0.099[Ω]까지 증가하여 고장전류의 크기를 543[A]까지 제한하였다. 전류 제한율은 1[msec]당 70.7[A]로 전류를 감소시켜 15.68[%]로 가장 높은 한류율을 확보하였다. 마찬가지로 앞에서 언급된 식에 따라 DC 차단기에는 1.56×10^6 [kJ]의 에너지가 부담되었고 5[m]의 초전도선재에는 0.19×10^6 [kJ]의 에너지가 부담되었다.

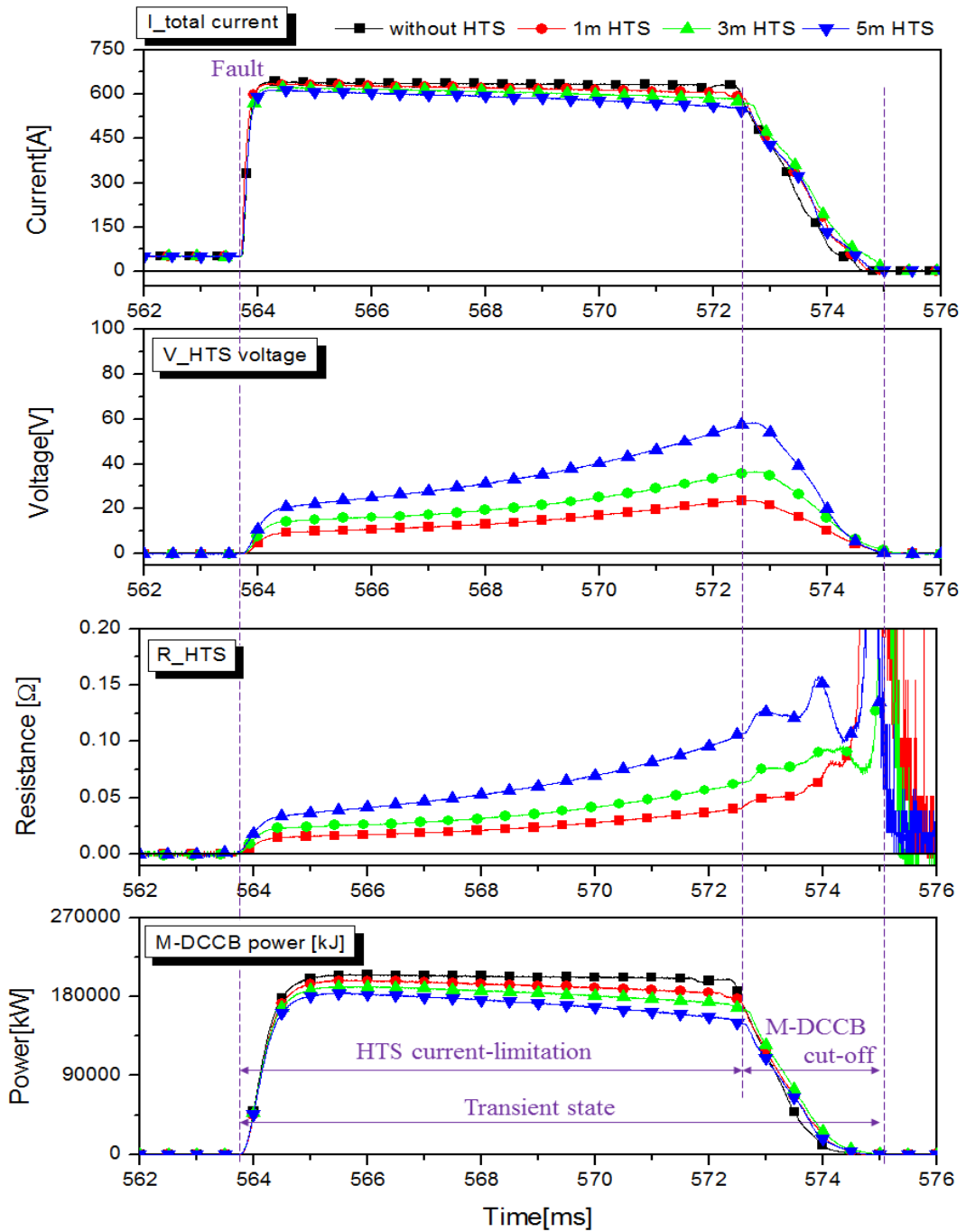


Fig. 4-22 CLS-DCCB operation curves of test 1

Table 4-7 Results of test 1

Without HTS	Without HTS	1[m] HTS	3[m] HTS	5[m] HTS
Max. fault current[A]	643.6	630.9	621.6	612.8
Limiting fault current[A]	630.2	588.8	570.3	543.0
Current-limiting rate[%]	2.14	8.57	11.44	15.68
dI/dt[A/msec]	17.72	43.64	52.57	70.7
M-DCCB power burden $\times 10^6$ [kJ]	1.81	1.73	1.68	1.56
HTS power burden $\times 10^6$ [kJ]	-	0.08	0.13	0.19
HTS current-limiting impedance magnitude[Ω]	-	0.038	0.059	0.099

(2) Test 2

그림 4-23은 한류형 초전도 DC 차단기를 배터리 44개를 직렬로 결합해 DC 545[V], 고장전류의 최대 크기 686[A]를 모의하여 실험을 실시하였다. 표 4-8은 결과값을 나타낸다. DC 500[V]와 마찬가지로 정상 시에는 54.5[A]의 전류가 초전도선재에 유입되므로 초전도선재는 0저항 특성에 의해 초전도성을 유지한다. 이로 인해 정상 시에는 손실 없이 안정적으로 정상전류가 부하로 유입된다.

고장을 모의하자 초전도선재의 유무 및 식 (4-3)에 의해 초전도선재의 길이에 따라 차단특성이 상이하게 나타났다. DC 차단기만 적용된 경우(■), 설계된 고장전류의 최대값에 근사하게 685.9[A]가 발생되었다. 선로에 결합된 저항이나 리액턴스에 의해 DC 차단기가 개극 동작을 시작할 때 측정된 고장전류의 크기는 672[A]로써 이는 제한된 값으로 보기에 어렵다. DC 차단기는 앞에서 언급한바와 같이 계전신호가 인가되고 약 8.43[msec]의 동작지연이 발생하였고 이후에 차단동작이 완료되었다. 고장전류 감소율은 17.78[A/msec]이다. DC 차단기에 부담된 에너지는 식 (3-3)에 의해 약 1.98×10^6 [kJ]로 산출되었다.

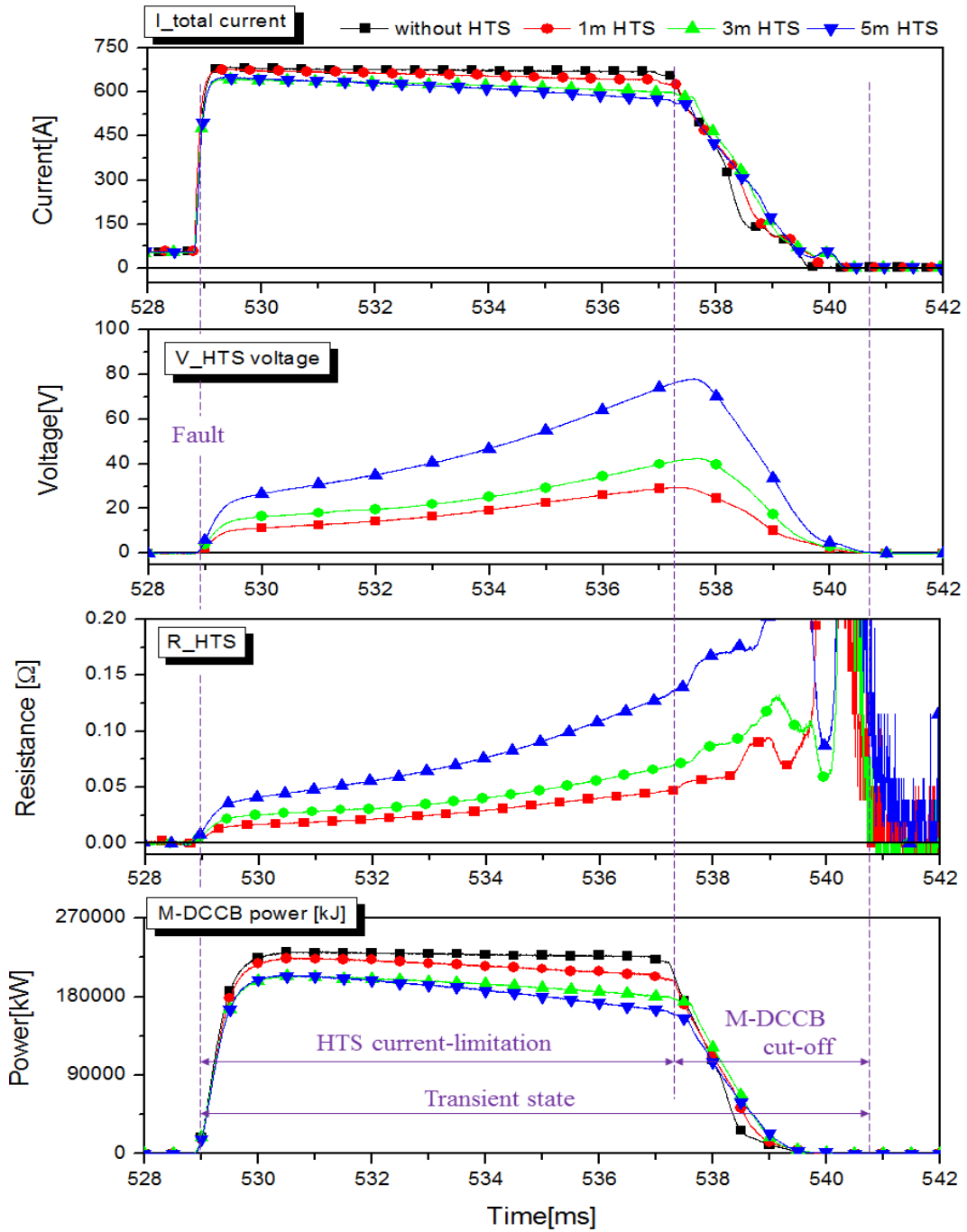


Fig. 4-23 CLS-DCCB operation curves of test 2

1[m]의 초전도선재가 적용된 경우(●)도 DC 500[V]와 마찬가지로 고장발생과 동시에 초전도선재가 켜치되어 약 0.016[Ω]의 한류 임피던스로 고장전류의 크기를 675.2[A]로 제한하였다. 8.43[msec]의 DC 차단기 동작 지연시간 동안 고장전류를 온전히 부담함으로써 초전도선재는 계속 켜치되어 DC 차단기가 동작을 시작하기 전까지 0.056[Ω]까지 한류 임피던스가 증가하였다. 이로 인해 고장전류의 크기는 최종 640[A]로 제한되어 DC 차단기로 유입되었다. 초전도선재의 한류 및 전류분담으로 인해 1[msec]당 36.89[A]의 고장전류를 감소시켜 차단이 완료되었다. 기계식 DC 차단기만 적용한 경우보다 차단동작을 약 2배 빠르게 단축되었다. 초전도선재와 DC 차단기는 표 4-8과 같이 DC차단기에는 1.88×10^6 [kJ], 초전도선재에는 0.11×10^6 [kJ]의 에너지가 분담하여 부담되었다.

3[m]의 초전도선재가 적용된 경우(▲)도 앞에서 언급한 바와 같은 동작을 수행한다. 초전도선재의 길이가 증가함에 따라 식 (4-3)과 같이 초전도선재의 한류 임피던스는 1[msec]이내 0.025[Ω]으로 증가하였다. 이로 인해 고장전류의 최대 크기를 647.6[A]로 제한하였고 DC 차단기가 동작하기 전까지 한류 임피던스가 0.079[Ω]까지 증가하였다. 따라서 고장전류의 크기는 설계된 값보다 약 12.71[%] 제한된 598.8[A]까지 제한되었다. 고장전류 감소율인 dI/dt 는 52.57[A/msec]이고, 식 (3-3~4)에 따라 DC 차단기에는 1.74×10^6 [kJ], 초전도선재에는 0.15×10^6 [kJ]의 에너지가 분담되었다.

5[m]의 초전도선재가 적용된 경우(▼)도 마찬가지다. 초기 한류임피던스는 0.04[Ω]으로 고장전류의 최대 크기를 647.7[A]로 제한하였다. 이후 DC 차단기의 지연시간동안 한류 임피던스가 0.15[Ω]까지 증가하여 고장전류의 크기를 약 16.5[%]낮게 572.8[A]로 제한하였다. 초전도선재가 고장구간에 전력을 분담함으로써 식 (3-3~4)에 따라 DC 차단기에는 1.67×10^6 [kJ], 초전도선재에는 0.26×10^6 [kJ]의 에너지가 분담되었다. 5[m]초전도선재가 결합된 한류형 초전도 DC 차단기는 75.68[A/msec]로 고장전류를 감소시켜 차단을 완료하였다.

Table 4-8 Results of test 2

	Without HTS	1[m] HTS	3[m] HTS	5[m] HTS
Max. fault current[A]	685.9	675.2	647.6	647.7
Limiting fault current[A]	672	640	598.8	572.8
Current-limiting rate[%]	2.04	6.71	12.71	16.50
dI/dt[A/msec]	17.78	36.89	50	75.68
M-DCCB power burden $\times 10^6$ [kJ]	1.98	1.88	1.74	1.67
HTS power burden $\times 10^6$ [kJ]	-	0.11	0.15	0.26
HTS current-limiting impedance magnitude[Ω]	-	0.056	0.079	0.15

(3) Test 3

그림 4-24는 표 4-6에 TD100-16[A] DC 차단기에 결합된 한류형 초전도 DC 차단기의 초전도선재의 유무 및 길이에 따른 동작특성을 나타낸 그래프이고, 표 4-9는 결과값을 나타낸다. 인가전압은 배터리 48개를 직렬로 연결하여 평균 DC 600[V]이고 고장전류는 최대 725[A]를 모의하였다.

초전도선재(HTS)없이 기계식 DC 차단기만 적용된 경우(■), 정상 시에는 약 60[A]의 전류가 안정적으로 선로에 도통되었다. 이후 고장을 모의함과 동시에 고장전류의 최대 크기는 설계 값과 거의 동일하게 723[A]가 발생되었다. 고장전류는 선로에 연결된 선로저항에 의해 707[A]까지 제한되었다. 고장이 발생하고 DC 차단기는 계전 시간 및 기계식 점접사용으로 인해 동작 지연이 발생하여 약 8.32[msec] 이후에 차단 동작이 시작되었다. DC 차단기는 19.73[A/msec]로 고장전류를 감소시켜 차단동작을 완료하였다. 이때 차단기에 식 (3-3)에 따라 2.15×10^6 [kJ]의 전력이 부담되었다.

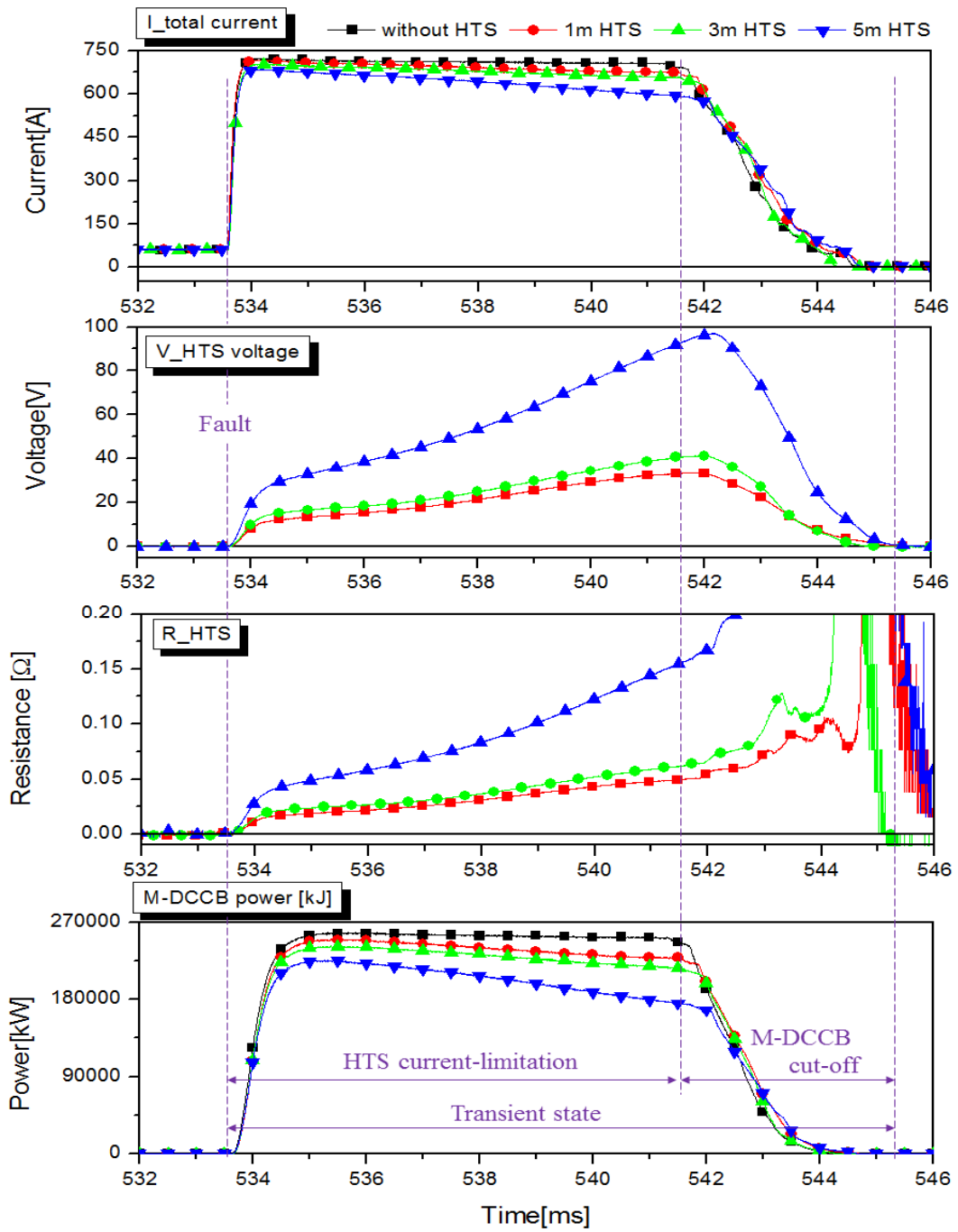


Fig. 4-24 CLS-DCCB operation curves of test 3

Table 4-9 Results of test 3

	Without HTS	1[m] HTS	3[m] HTS	5[m] HTS
Max. fault current[A]	723	715.8	702.1	683.9
Limiting fault current[A]	707	674	655	592
Current-limiting rate[%]	2.21	6.78	9.41	18.12
dI/dt[A/msec]	19.73	43.28	48.38	92.53
M-DCCB power burden $\times 10^6$ [kJ]	2.15	2.06	1.98	1.76
HTS power burden $\times 10^6$ [kJ]	-	0.14	0.16	0.34
HTS current-limiting impedance magnitude[Ω]	-	0.055	0.066	0.16

1[m]의 초전도선재가 적용된 경우(●), 정상 시에는 기계식 DC 차단기만 적용되었을 때와 같은 동작을 수행한다. 그러나 고장을 모의함과 동시에 약 1[msec] 이내에 초전도선재가 켄치되어 0.018[Ω]의 한류 임피던스를 지닌 상전도 상태로 전이되어 고장전류의 최대 크기를 715.8[A]로 제한한다. 마찬가지로 DC 차단기는 약 8.32[msec] 동안 지연동작이 발생하고 지연시간동안 초전도선재가 고장전류 및 전력을 온전히 부담하여 제한한다. DC 차단기가 동작하기 전까지 초전도선재는 계속해서 켄치가 진행되어 한류 임피던스가 0.055[Ω]까지 증가하여 고장전류의 크기를 설계된 값보다 약 6.78[%] 낮은 674[A]까지 제한하였다. 이후 DC 차단기가 고장이 발생하고 식 (3-2)와 같이 43.28[A/msec]로 고장전류를 감소시켜 차단동작을 완료하였다. 이때 한류형 초전도 DC 차단기는 DC 차단기와 초전도체가 전력을 분담함으로써 DC 차단기에 인가되는 전력부담은 2.06×10^6 [kJ]이고 HTS에 인가되는 전력부담은 0.14×10^6 [kJ]이다.

3[m]의 초전도선재가 적용된 경우(▲)도 1[m] 초전도선재가 적용된 경우와 같은

동작 메커니즘을 수행한다. 고장전류의 최대 크기는 고장발생 1[msec]이내에 702.1[A]로 제한되었고 DC 차단기가 동작하기 전까지 한류 임피던스가 0.066[Ω]까지 증가하여 고장전류의 크기를 설계된 값보다 약 9.41[%] 낮은 655[A]까지 제한하였다. 이후 DC 차단기에 계전신호가 인가되어 고장이 발생하고 표 4-9에 나와 있듯이 48.38[A/msec]로 고장전류가 감소되어 차단동작이 완료하였다. 차단기에 인가되는 전력부담은 식 (3-3)에 따라 1.98×10^6 [kJ]이고 3[m] 초전도선재에 인가되는 전력부담은 식 (3-4)에 따라 0.16×10^6 [kJ]로 계산되었다.

5[m]의 초전도선재가 적용된 경우(▼)도 1, 3[m]와 마찬가지로 같은 동작을 수행한다. 초전도선재의 길이가 길어짐에 따라 한류 임피던스가 0.049[Ω]으로 증가하여 고장전류의 최대 크기는 683.9[A]로 제한되었다. 차단기의 동작지연시간 동안 초전도선재의 켄치가 계속 진행되어 한류 임피던스는 차단기가 동작하기 전까지 0.16[Ω]까지 증가하여 고장전류의 크기를 592[A]까지 제한하였다. 이때 전류제한율은 18.12[%]로 가장 높은 한류율을 확보하였다. 고장전류 감소율은 92.53[A/msec]이다. 마찬가지로 앞에서 사용한 식 (3-3~4)에 의해 차단기에는 1.76×10^6 [kJ]의 전력이 부담되었고 5[m]의 초전도선재에는 0.34×10^6 [kJ]의 전력이 부담되었다.

b. TD100-32[A] DC 차단기에 결합된 경우

(1) Test 4

그림 4-25와 표 4-10은 표 4-6에 있는 Test 4번으로 정격전류가 32[A]인 DC 차단기에 결합된 한류형 초전도 DC 차단기의 동작특성과 결과값을 나타낸다. 인가전압은 DC 500[V]이고 고장전류의 최대 크기는 561[A]이다. 정상 시에는 초전도체의 유무 및 길이에 관계없이 설계된 정상전류가 안정적으로 도통되었다. 이후 고장이 발생하자 앞에서 언급한 바와 같이 최대 10.46[msec]의 차단기의 동작지연이 발생하였다. DC 차단기만 적용된 경우(■), 고장전류의 최대값은 설계 값과 거의 동일한 650.3[A]가 되었고 고장전류는 식 (3-2)에 따라 1[msec]당 31.52[A]로 감소되어 차단이 완료되었다. DC 차단기에는 식 (3-3)에 따라 2.14×10^6 [kJ]의 전력이 부담되었다.

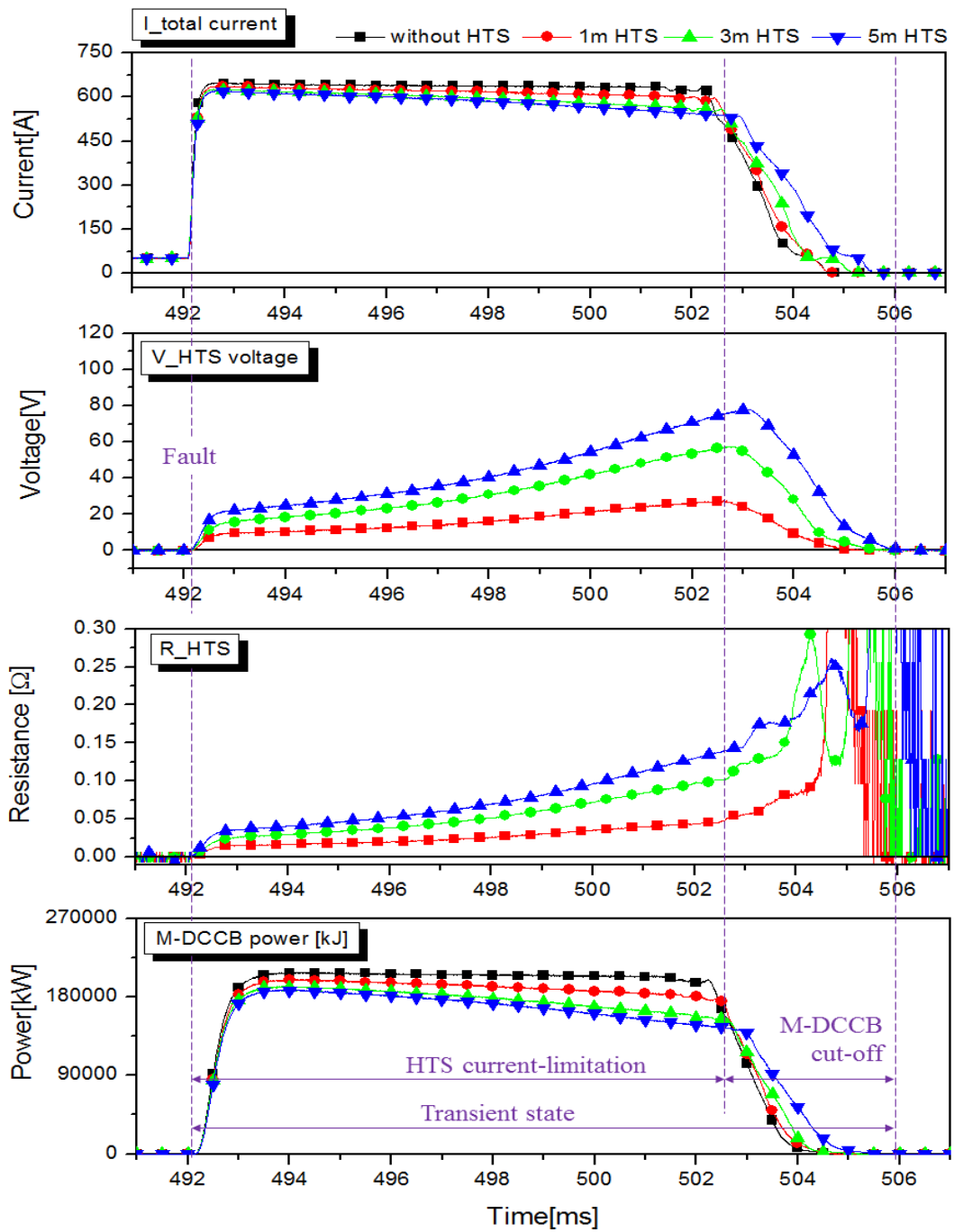


Fig. 4-25 CLS-DCCB operation curves of test 4

Table 4-10 Results of test 4

	Without HTS	1[m] HTS	3[m] HTS	5[m] HTS
Max. fault current[A]	650.3	636.9	629.9	618.0
Limiting fault current[A]	621.4	590.6	560.2	532.8
Current-limiting rate[%]	4.4	9.18	13.86	18.07
dI/dt[A/msec]	31.52	47.98	70.90	86.24
M-DCCB power burden $\times 10^6$ [kJ]	2.14	2.02	1.90	1.88
HTS power burden $\times 10^6$ [kJ]	-	0.12	0.24	0.26
HTS current-limiting impedance magnitude[Ω]	-	0.052	0.12	0.14

1[m]의 초전도선재가 적용된 경우(●), 고장을 모의함과 동시에 약 1[msec] 이내에 초전도선재가 켄치되어 0.016[Ω]의 한류 임피던스를 지닌 상전도 상태가 되어 고장 전류의 크기를 636.9[A]로 제한한다. 초전도선재가 DC 차단기의 동작 지연 시간인 10.46[msec] 동안 고장을 온전히 부담한다. DC 차단기가 개극 동작을 수행하기 전까지 초전도선재는 계속 켄치가 진행되어 한류 임피던스가 0.052[Ω]까지 증가하여 고장전류의 크기를 설계된 값보다 약 9.18[%] 낮은 590.6[A]까지 제한하였다. 이후 제한된 고장전류가 차단기로 유입되어 DC 차단기는 부담이 완화되어 차단을 완료하였다. 이때 시간에 따른 전류 변화량은 47.98[A/msec]로 산출되었다.

초전도선재와 DC 차단기에 인가되는 부담되는 전력량은 각각 2.02×10^6 [kJ], 0.12×10^6 [kJ]이다. 3, 5[m]의 초전도선재가 적용된 경우(▲, ▼)도 1[m] 초전도선재와 같은 동작을 수행하였다. 초전도선재의 길이가 길어짐에 따라 한류 임피던스가 최대 0.12, 0.14[Ω]까지 증가하였고 이로 인해 고장전류의 최대 크기가 1[m]보다 더욱 낮은 560.2, 532.8[A]로 제한되었다. 고장전류 감소율인 dI/dt는 각각

70.90[A/msec], 86.24[A/msec]로 길이가 길어질수록 DC 차단기의 차단동작이 더욱 단축됨을 확인하였다. 초전도선재의 길이가 길어질수록 고장구간에 부담하는 전력량이 증가하였고 DC 차단기에 인가되는 전력량은 표 4-10에 나와 있듯이 감소됨을 확인할 수 있었다.

(2) Test 5

그림 4-26과 표 4-11은 32[A]용 M-DCCB에 결합된 한류형 초전도 DC 차단기의 동작특성을 나타낸다. 인가전압은 545[V]이고 고장전류의 최대 크기는 689[A]로 설계하였다.

정상 시와 고장이 발생했을 경우 동작 메커니즘은 앞에서 언급한 4번의 실험과 같은 동작을 수행한다. DC 차단기는 기계식 접점 사용 및 계전동작으로 인해 약 7.04[msec]의 지연동작이 발생하였다. DC 차단기만 적용된 경우, 고장을 모의하자 688.4[A]까지 고장전류의 크기가 증가하였다. 이후 DC 차단기는 1[msec]당 21.52[A]의 기울기로 차단동작을 완료하였다. DC 차단기에는 식 (3-3)에 따라 2.31×10^6 [kJ]의 모든 전력이 온전히 부담되었다.

1, 3, 5[m]의 초전도선재가 적용된 경우, 고장이 발생하고 약 1msec 이내에 켄치되어 고장 전류의 최대 크기를 675.3, 662.9, 657.2[A]로 제한되었다. 차단기의 동작 지연 시간동안 초전도선재는 계속해서 켄치가 진행되었고 식 (4-3)에 의해 초전도선재의 길이에 비례하여 한류 임피던스의 크기가 각각 0.06, 0.14, 0.19[Ω]까지 증가하였다. 이로 인해 고장전류는 평균 15.46[%]의 한류율로 631, 657.2, 553[A]까지 제한된 후 DC 차단기로 유입되었다.

초전도선재의 전력분담으로 인해 DC 차단기에는 표 4-11과 같이 부담되는 전력량이 저감되었고 고장전류 감소율도 45.96, 88.2, 104.98[A/msec]로 차단시간이 더욱 단축되는 것을 확인하였다. 이는 DC 차단기만 적용된 경우보다 약 79[%] 단축된 값이다.

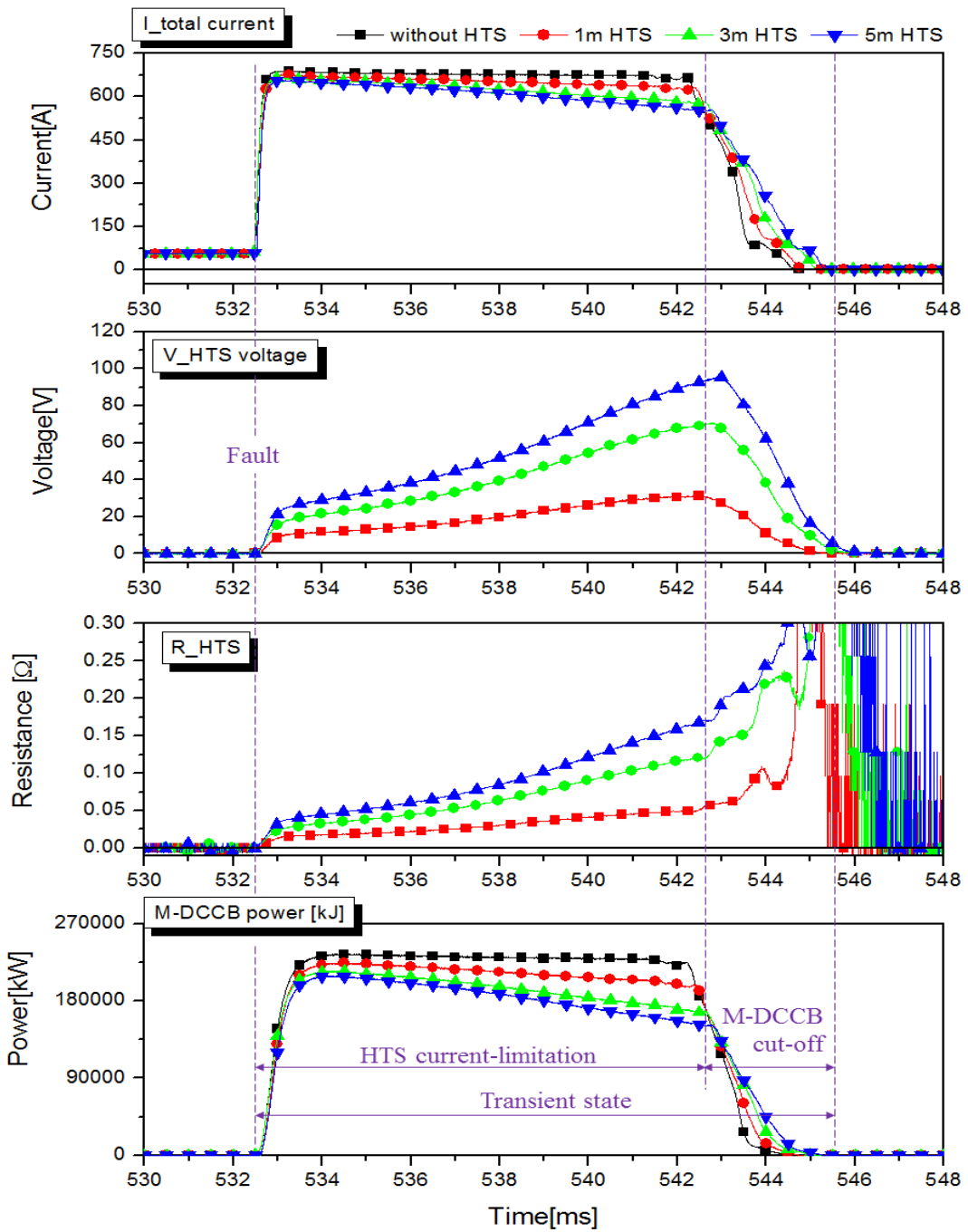


Fig. 4-26 CLS-DCCB operation curves of test 5

Table 4-11 Results of test 5

	Without HTS	1[m] HTS	3[m] HTS	5[m] HTS
Max. fault current[A]	688.4	675.3	662.9	657.2
Limiting fault current[A]	670.6	631.0	657.2	553.0
Current-limiting rate[%]	2.67	8.59	17.11	20.69
dI/dt[A/msec]	21.52	45.96	88.20	104.98
M-DCCB power burden $\times 10^6$ [kJ]	2.31	2.17	2.03	1.95
HTS power burden $\times 10^6$ [kJ]	-	0.13	0.28	0.37
HTS current-limiting impedance magnitude[Ω]	-	0.06	0.14	0.19

(3) Test 6

그림 4-27과 표 4-12는 32[A]용 M-DCCB에 결합된 한류형 초전도 DC 차단기의 동작특성을 나타내고 인가전압은 600[V], 고장전류의 최대 크기는 729[A]이다.

고장이 발생하기 전 후의 동작 메커니즘은 앞에서 설명한 바와 같다. 단, DC 차단기의 동작지연시간이 9.98[msec]로 증가하였다. DC 차단기만 적용된 경우, 고장전류의 최대 크기가 설계 값과 거의 동일하게 728.6[A]가 발생되었고 선로에 적용된 임피던스에 의해 차단기의 동작지연 시간 동안 701.1[A]로 감소되었다. 이후 DC 차단기는 식 (3-2)에 따라 30.01[A/msec]로 고장전류를 감소시켜 차단동작을 완료하였다. 고장구간 동안 DC 차단기가 2.52×10^6 [kJ]의 모든 전력이 온전히 부담하였다.

초전도선재를 적용한 경우, 고장발생과 동시에 상전도 상태로 전이되어 각각 0.055, 0.13, 0.19[Ω]의 한류 임피던스가 발생되어 고장전류의 최대 크기를 711.7, 702.6, 693.4[A]로 제한하였다.

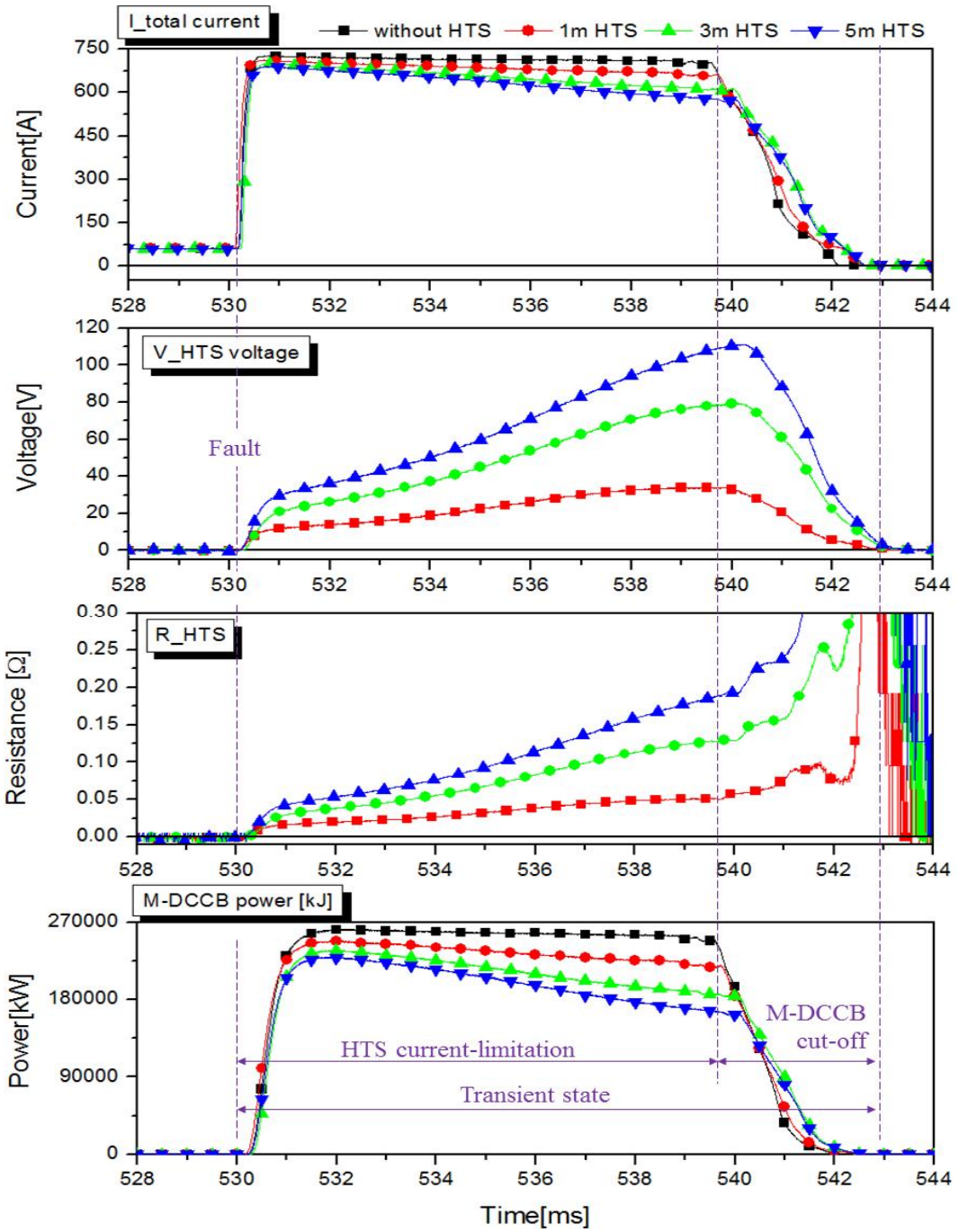


Fig. 4-27 CLS-DCCB operation curves of test 6

Table 4-12 Results of test 6

	Without HTS	1[m] HTS	3[m] HTS	5[m] HTS
Max. fault current[A]	728.6	711.7	702.6	693.4
Limiting fault current[A]	701.1	664.5	609.5	568.3
Current-limiting rate[%]	3.83	9.06	17.01	23.18
dI/dt[A/msec]	30.01	48.82	93.94	125.73
M-DCCB power burden $\times 10^6$ [kJ]	2.52	2.34	2.16	2.03
HTS power burden $\times 10^6$ [kJ]	-	0.16	0.34	0.45
HTS current-limiting impedance magnitude[Ω]	-	0.055	0.13	0.19

초전도선재의 켄치로 인해 고장전류는 최종 664.5, 609.5, 568.3[A]로 제한되어 DC 차단기로 유입되었다. 즉, 초전도선재의 전력 분담으로 인해 표 4-12에 나와 있듯이 DC 차단기에 인가되는 에너지가 저감되어 DC 차단기만 적용되었을 경우보다 1[msec]당 감소되는 고장전류 기울기가 48.82, 93.94, 125.73[A]로 약 76[%] 증가하여 차단 시간이 단축되는 것을 확인할 수 있었다.

c. TD100-50[A] DC 차단기에 결합된 경우

Test 7, 8, 9는 정격 전류가 50[A]인 M-DCCB에 초전도선재를 결합하여 제작한 한류형 초전도 DC 차단기이다. 정격전류가 50[A]부터는 정격 차단전류는 정격 전류 $\times 10$ 이므로 약 500[A]에서 트립이 가능하지만 앞서 분석한 동작성능 실험을 통해 최소 트립전류는 547[A]로 측정되었다. 전압이 증가함에 따라 설계된 최대 고장전류의 크기는 DC 차단기의 최소 트립전류 크기를 넘는 값이다. 하지만 고장이 발생하고 DC 차단기에 계전신호가 인가됨과 동시에 초전도선재가 켄치되어

고장전류의 크기를 제한시켜 DC 차단기의 트립전류보다 약간 낮은 값으로 제한하므로 AC에서와 마찬가지로 Test 7에서 Test 9까지 DC 차단기의 동작지연 시간이 상당히 나타났다[75]. 이는 앞에서 분석한 초전도체 결합에 따라 DC 차단기의 차단용량을 저감시킬 수 있다는 실험적인 근거로 제시될 수 있다고 판단된다.

(1) Test 7

그림 4-28과 표 4-13은 50[A]용 M-DCCB에 초전도선재를 결합한 후 DC 600[V], 고장전류의 최대 크기를 652[A]로 설정하여 동작특성을 분석한 그래프와 결과값이다. 초전도선재의 유무 및 길이에 따라 앞에서 설명한 바와 같이 DC 차단기의 동작은 최소 19.87[msec]에서 최대 24.62[msec]까지 지연되었다. DC 차단기만 적용된 경우, 고장전류의 최대 크기는 651.2[A]까지 발생되었고 고장전류 감소율인 di/dt 는 27.32[A/msec]이다. DC 차단기에는 식 (3-3)에 따라 4.08×10^6 [kJ]의 에너지가 부담되었다.

1, 3[m]의 초전도선재를 적용한 경우, 고장발생과 동시에 DC 차단기에 계전신호가 인가되었고 초전도선재는 0.015, 0.025[Ω]을 지닌 상전도로 전이되어 고장전류의 최대 크기를 636.8, 630[A]로 제한하였다. DC 차단기의 지연동작으로 인해 초전도선재의 한류 임피던스는 0.18, 0.24[Ω]까지 증가하였고 고장전류의 크기를 최대 586.5, 533.3[A]까지 제한하였다. 제한된 고장전류가 DC 차단기로 유입되었다. DC 차단기에 유입되는 전류의 크기와 에너지가 저감됨으로써 고장이 발생하고 1[msec]당 56.02, 99.79[A]의 기울기로 전류를 감소시켜 차단동작을 완료하였다. 5[m]의 초전도선재가 적용된 경우도 1, 3[m]와 마찬가지로 고장발생과 동시에 초전도선재가 켄치되어 고장전류의 최대 크기를 620.5[A]로 제한하였고 이와 동시에 DC 차단기에는 계전신호가 인가되었다. 초전도선재의 켄치는 계속 진행되어 한류 임피던스가 0.29[Ω]까지 증가하였고 이로 인해 DC 차단기의 유입되는 고장전류의 크기는 최소 트립전류 보다 낮은 값인 484.6[A]까지 제한되었다. DC 차단기의 동작지연 시간이 늘어났음에도 불구하고 고장전류 감소율은 138.08[A/msec]로 차단동작이 앞에서 분석된 경우보다 더욱 가파른 기울기로 빠르게 차단이 완료됨을 확인하였다.

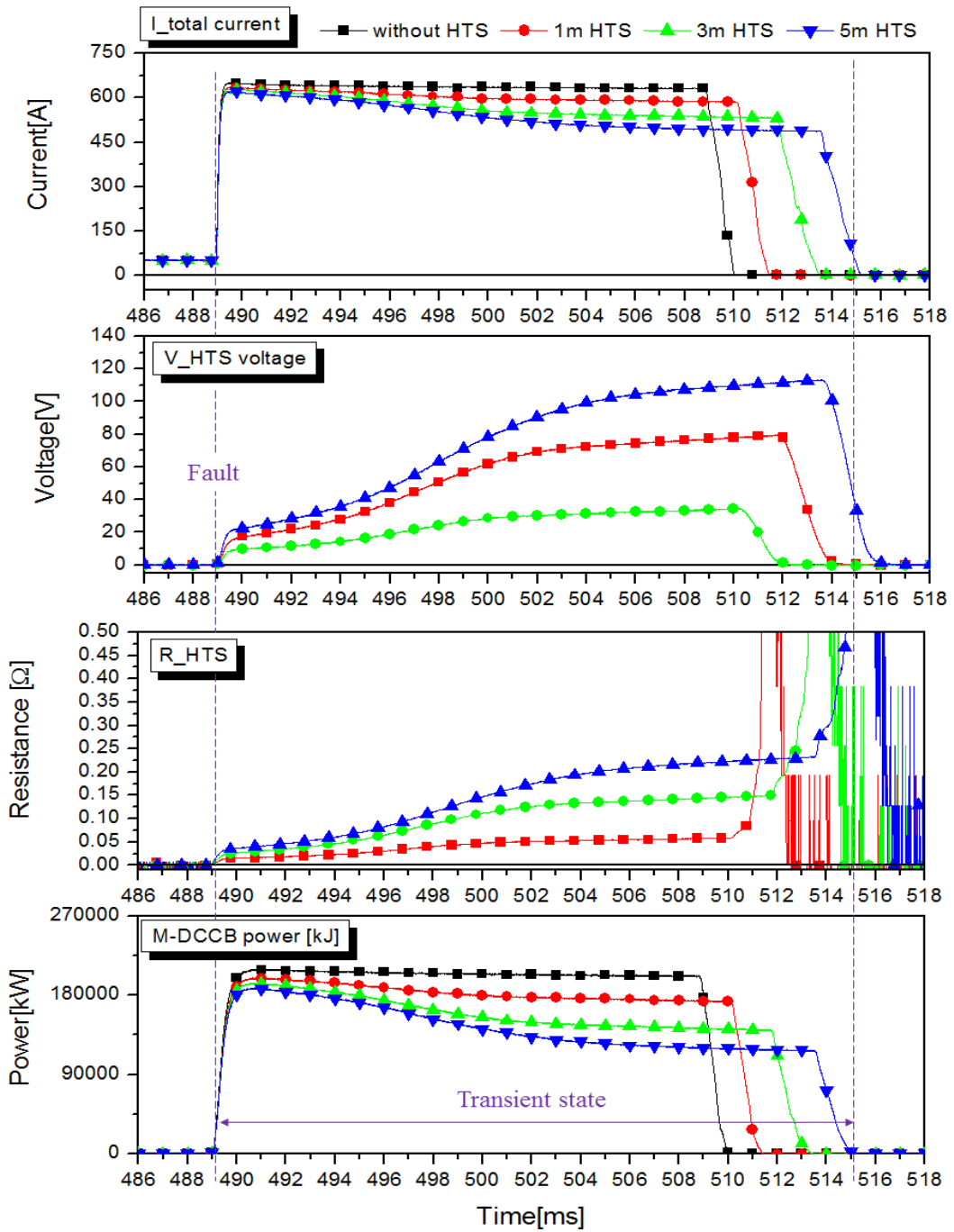


Fig. 4-28 CLS-DCCB operation curves of test 7

Table 4-13 Results of test 7

	Without HTS	1[m] HTS	3[m] HTS	5[m] HTS
Max. fault current[A]	651.2	636.8	630.0	620.5
Limiting fault current[A]	633.4	586.5	533.3	484.6
Current-limiting rate[%]	2.86	10.29	18.84	26.98
dI/dt[A/msec]	27.32	56.02	99.79	138.05
M-DCCB power burden $\times 10^6$ [kJ]	4.08	3.89	3.68	3.56
HTS power burden $\times 10^6$ [kJ]	-	0.31	0.71	0.99
HTS current-limiting impedance magnitude[Ω]	-	0.18	0.24	0.29

(2) Test 8

그림 4-29와 표 4-14의 그래프와 결과는 DC 540[V]를 인가했을 경우 동작특성이 다. Test 7과 같이 DC 차단기의 동작은 최소 19.3[msec]에서 최대 22.24[msec]까지 지연되었다. DC 차단기만 적용된 경우, 고장전류의 최대 크기는 677.2[A]까지 발생되었다. 시간변화율에 따른 전류변화율을 측정된 결과 고장전류는 1[msec]당 58.81[A]의 기울기로 감소시켜 차단동작을 완료하였다. 마찬가지로 고장구간 동안 DC 차단기가 온전히 고장을 부담함으로써 DC 차단기에는 식 (3-3)에 따라 4.08×10^6 [kJ]의 에너지가 부담되었다.

1, 3, 5[m]의 초전도선재를 적용한 경우, 고장발생과 동시에 DC 차단기에 계전신호가 인가되었고 초전도선재는 0.014, 0.029, 0.043[Ω]을 지닌 상전도로 켜치되어 고장전류의 최대 크기를 677.2, 660.8, 644.8[A]로 제한하였다. DC 차단기의 지연동작으로 인해 초전도선재의 한류 임피던스는 최대 0.23, 0.44, 0.56[Ω]까지 증가하였다.

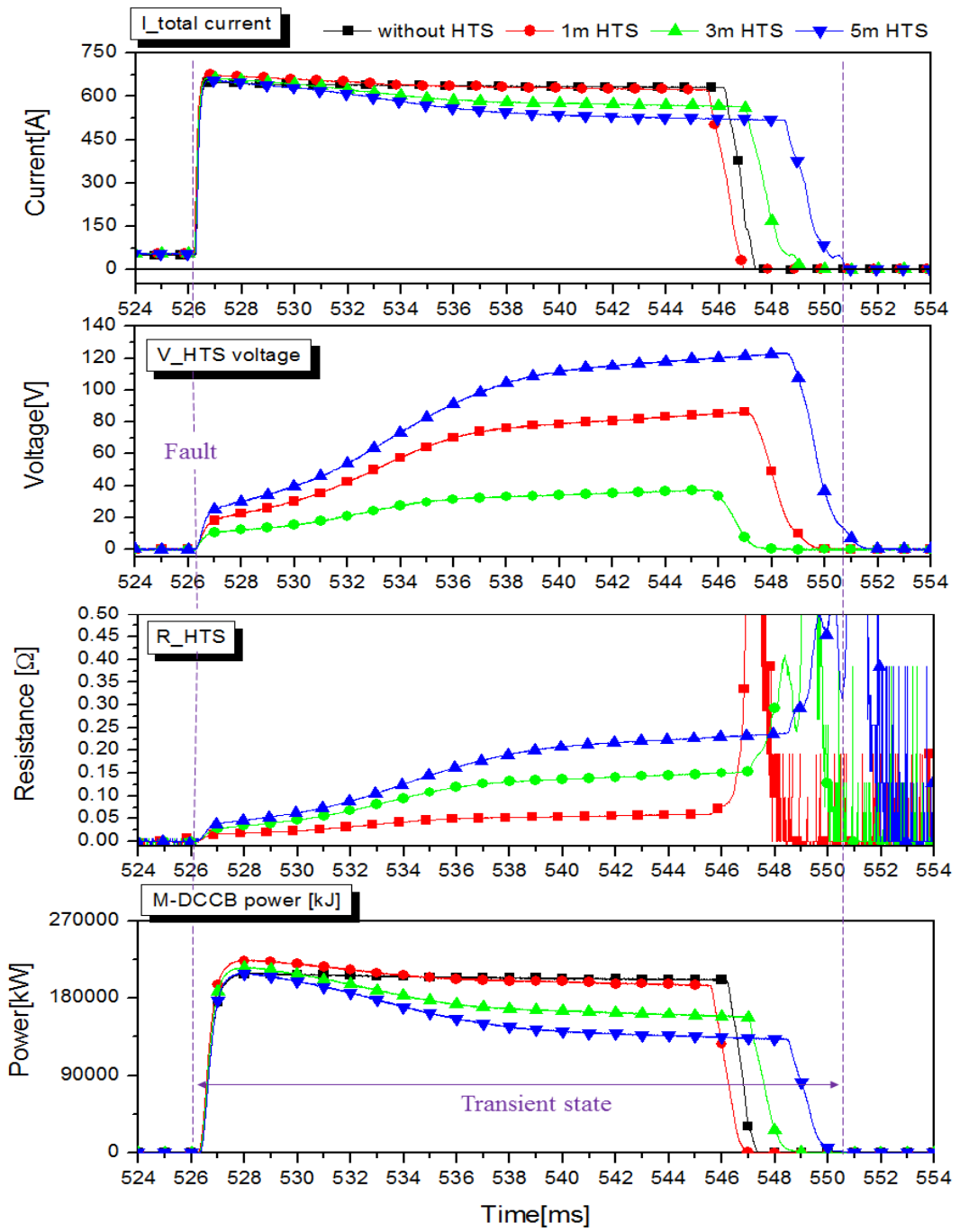


Fig. 4-29 CLS-DCCB operation curves of test 8

Table 4-14 Results of test 8

	Without HTS	1[m] HTS	3[m] HTS	5[m] HTS
Max. fault current[A]	690	677.2	660.8	644.8
Limiting fault current[A]	635.1	623.8	563.9	520.2
Current-limiting rate[%]	7.96	9.78	19.08	26.33
dI/dt[A/msec]	58.81	57.30	99.55	127
M-DCCB power burden $\times 10^6$ [kJ]	4.08	4.01	3.74	3.58
HTS power burden $\times 10^6$ [kJ]	-	0.34	0.77	1.09
HTS current-limiting impedance magnitude[Ω]	-	0.23	0.44	0.56

이로 인해 고장전류는 623.8, 563.9, 520.2[A]로 제한되어 DC 차단기에 유입되었다. 초전도선재가 고장구간에 상전도로 전이되어 에너지를 분담함으로써 DC 차단기에 유입되는 전류의 크기와 에너지도 저감되었다. 이에 따라 고장이 발생하고 1[msec]당 감소되는 고장전류의 크기가 57.3, 99.55, 127[A]로 더욱 증가 되어 차단 동작이 더욱 단축됨을 확인할 수 있었다. 각각의 에너지 분담률은 표 4-14에 나타내었다.

(3) Test 9

그림 4-30과 표 4-15는 DC 600[V]를 인가했을 경우 동작특성이다. Test 7, Test 8과 같이 DC 차단기의 동작은 최소 17[msec]에서 최대 20.46[msec] 지연되었다. DC 차단기만 적용되었을 경우에는 고장전류가 최대 732.9[A]까지 발생되었다. 차단동작은 식 (3-2)와 같이 시간에 따른 전류 변화율을 산출한 결과 29.96[A/msec]로 완료되었다. DC 차단기에는 식 (3-3)에 따라 4.35×10^6 [kJ]의 에너지가 부담되었다.

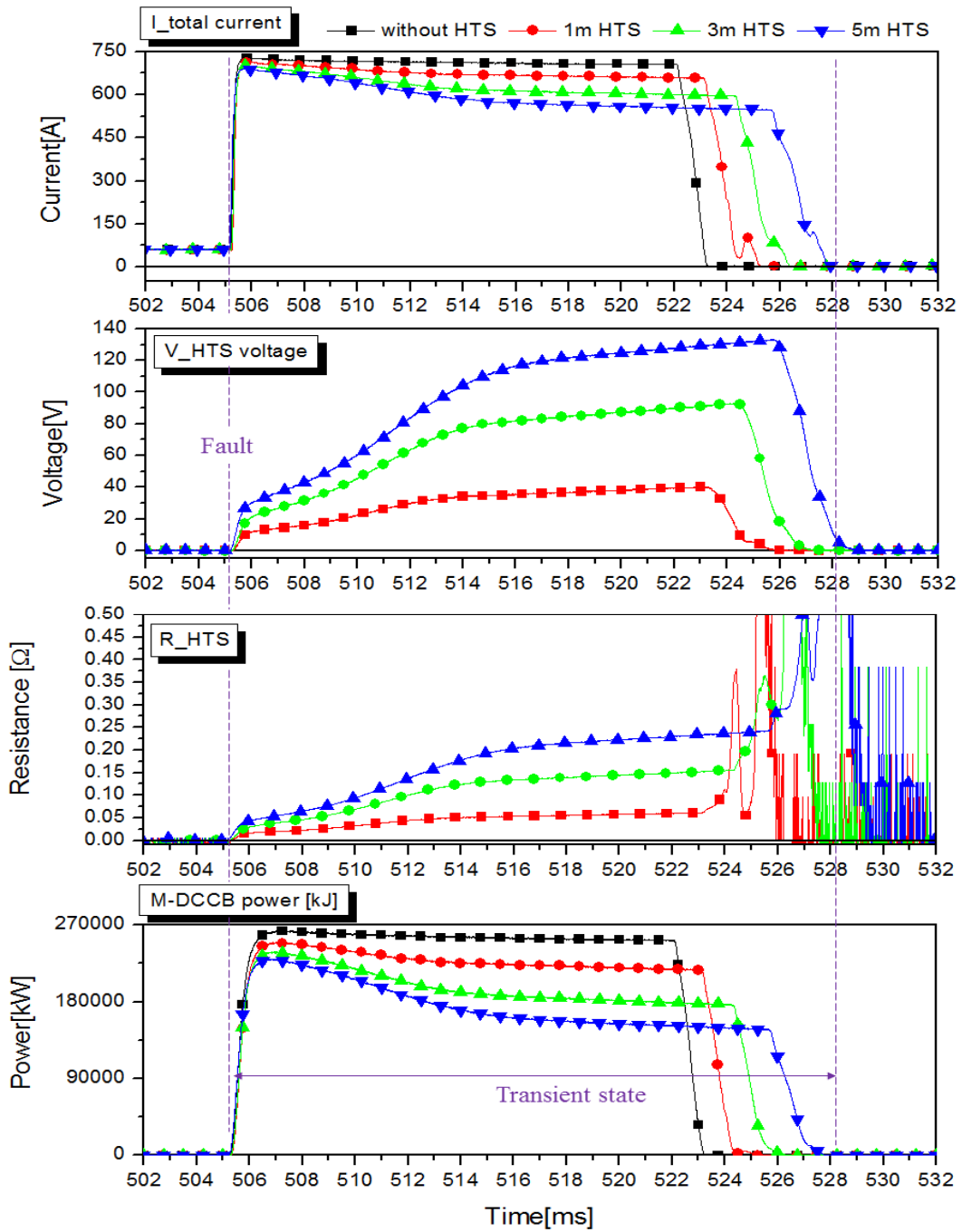


Fig. 4-30 CLS-DCCB operation curves of test 9

초전도선재가 적용된 경우, 고장발생과 동시에 DC 차단기에 계전신호가 인가되었고 초전도선재는 식 (3-2~4), (4-3)에 따라 길이에 비례하여 한류 임피던스의 크기가 0.017, 0.038, 0.057[Ω]까지 증가하였다. 이로 인해 고장전류의 최대 크기를 716.1, 706.9, 688.3[A]로 제한하였다. 이후 DC 차단기의 지연동작으로 인해 초전도선재의 한류 임피던스는 최대 0.23, 0.32, 0.42[Ω]까지 증가하였다. 고장전류는 657, 597, 547[A]로 제한되어 DC 차단기에 유입되었다.

초전도선재가 고장구간에 상전도로 전이되어 에너지를 분담함으로써 DC 차단기에 유입되는 전류의 크기와 에너지도 저감되었다. 이로 인해 한류형 초전도 DC 차단기는 시간에 따른 전류변화율의 기울기를 측정 한 결과 1[msec]당 62.41, 111.94, 143.13[A]로 고장전류를 감소시켜 차단동작을 완료하였다. 각각의 에너지 분담률은 표 4-15와 같다.

Table 4-15 Results of test 9

	Without HTS	1[m] HTS	3[m] HTS	5[m] HTS
Max. fault current[A]	732.9	716.1	706.9	688.3
Limiting fault current[A]	709	657	597	547
Current-limiting rate[%]	3.27	10.61	19.24	27.02
dI/dt[A/msec]	29.96	62.41	111.94	143.13
M-DCCB power burden×10 ⁶ [kJ]	4.35	4.12	3.80	3.65
HTS power burden×10 ⁶ [kJ]	-	0.36	0.80	0.19
HTS current-limiting impedance magnitude[Ω]	-	0.23	0.32	0.42

d. 차단기 용량별 전압증가에 따른 특성분석

그림 4-31은 한류형 초전도 DC 차단기의 용량별 전압증가에 따른 동작특성 중 초전도선재와 DC 차단기의 에너지 분담률에 따른 차단시간을 그래프로 나타내었다. 초전도체가 없이 기계식 DC 차단기만 적용된(without HTS) 경우를 에너지 부담 100[%]이라 가정하고 비율을 산정하였다.

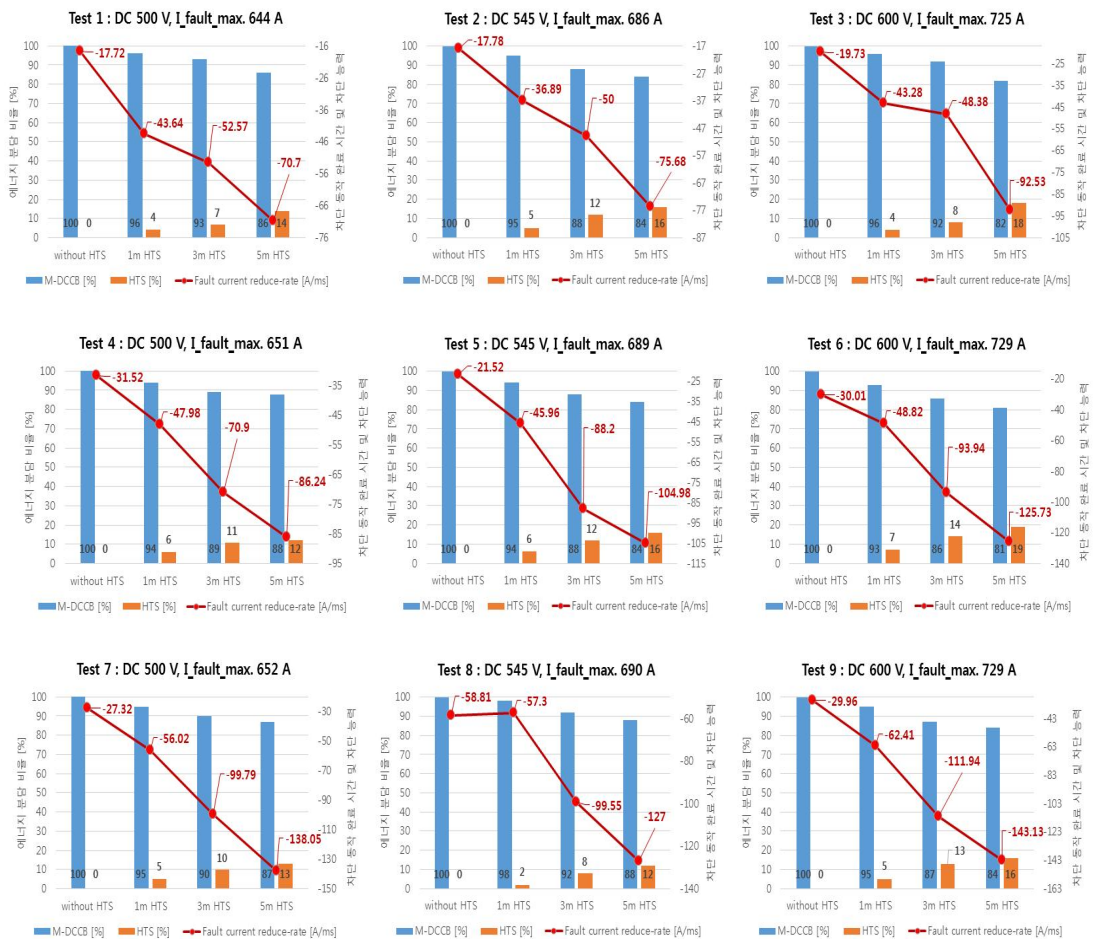


Fig. 4-31 Analysis of the interruption completion time and interruption ability according to the energy share of CLS-DCCB (Test 1~9)

그림 3-31의 Test 1~3인 16[A]용 M-DCCB에 결합된 한류형 초전도 DC 차단기의 경우 전압증가에 따라 초전도선재와 DC 차단기는 평균 90[%]:10[%]의 비율의 에너지가 분담되었다. DC 차단기만 적용된 경우에는 고장전류 감소율이 18.41[A/msec]이고 초전도선재가 결합된 한류형 초전도 DC 차단기는 57.04[A/msec]로써 시간당 고장전류의 크기가 약 3배 빠르게 감소되었다. 초전도선재의 결합 유무에 따른 고장전류 감소율은 최대 38.63[A/msec]의 차이가 발생하였다. 또한, 초전도선재 설계 당시 초전도체의 역할은 최대화하고 손상 및 과급은 최소화하기 위해 한류 임피던스의 최대 크기를 제한하였다. 실험 결과, 초전도선재의 한류 임피던스 크기는 최대 0.16[Ω]으로 설계할 때 제시하였던 최대 한류 임피던스 값 이하임을 확인하였다.

그림 3-31의 Test 4~6은 32[A]용 DC 차단기와 초전도체가 결합된 한류형 DC 차단기로 에너지 분담률은 평균 88[%]:12[%]이다. DC 차단기만 적용된 경우 차단동작을 나타내는 고장전류 감소율은 평균 27.68[A/msec]이다. 초전도선재를 결합시키자 고장전류 감소율이 평균 79.19[A/msec]로 약 2.86배 빠르게 차단동작이 완료되는 것을 확인하였다. 이때 고장전류의 크기가 감소되는 기울기의 최대 차이는 52[A/msec]이다. 또한, 초전도선재의 한류 임피던스 크기가 최대 0.19[Ω]으로 Test 1~3과 같이 초전도선재의 설계조건을 만족하였다.

그림 3-31의 Test 7~9는 50[A]용 한류형 초전도 DC 차단기로 에너지 분담률 또한 90[%]:10[%]로 DC 차단기만 적용된 경우 1[msec]당 평균 38.69[A]로 고장전류를 감소시켜 고장선로를 차단하였고 초전도선재가 결합된 한류형 초전도 DC 차단기는 DC 차단기만 적용된 경우보다 약 2.3배 빠른 기울기인 평균 89.46[A/msec]로 고장전류의 크기를 감소시켜 차단을 완료하였다. 초전도선재의 한류 임피던스 최대 크기는 0.42[Ω]까지 증가하였으며 이는 설계조건을 만족한다.

E. 초전도선재의 인덕턴스 성분을 고려한 특성실험

1. 실험조건

초전도선재의 길이를 동일하게 설정한 후 턴 수로 인덕턴스 크기를 변화시켜 인덕턴스 크기에 따른 동작특성을 분석하였다. DC에서는 전류가 일정한 방향으로 흐르므로 자장의 변화가 발생하지 않아 초전도선재의 인덕턴스에 의한 영향이 미미하다. 그러나 고장이 발생하면 차단동작으로 인해 왜형과적인 주기성을 지닌 교류파형과 같이 변하게 된다. 이로 인해 고장전류는 시간에 따른 전류의 변화가 생기므로 초전도선재의 인덕턴스에 의해 고장전류증가율이 억제되어 서서히 증가하게 된다. 초전도선재의 인덕턴스 크기는 식 (4-2)와 같이 턴 수에 비례하여 증가하고 이에 따라 고장전류 증가율이 억제된다. 고장전류 증가율이 억제될 경우 초전도선재의 임계전류 값에 도달하는 시간도 지연된다. 이에 본 절에서는 인덕턴스 크기에 따른 초전도선재의 켄치로 인한 한류특성을 분석하였다.

초전도선재의 설계 조건은 앞에서 분석한 차단기 용량에 따른 한류형 초전도 DC 차단기의 실험 조건과 동일하게 설계하였다. 단, 본 실험의 목적은 초전도선재의 인덕턴스 크기에 따른 변화분석이므로, 냉각설비 크기 및 보빈을 고려하여 인덕턴스 크기 변환이 용이한 3[m]의 초전도선재만 실험하였다. 3[m] 초전도선재의 설계 값은 표 4-16과 같다. 인가전압은 DC 500[V]이고, 고장전류 최대 크기는 625[A]이다.

Table 4-16 HTS wire design values

Turns	4.8	5	5.8
Height[mm]	340	140	90
Diameter[mm]	200	200	200
Inductance[μ H]	2.14	4.38	7.48
Contact resistance[Ω]	0.04	0.06	0.06

초전도선재의 관점에서 볼 때, 정상 시에는 거의 일정한 전류가 유입되고 고장이 발생했을 경우에도 초전도선재의 인덕턴스에 의해 고장전류의 크기가 완만하게 증가하기 때문에 그림 4-32와 같은 단순화된 등가회로를 나타내었다.

등가회로를 기반으로 고장이 발생하는 순간을 $t=0$ 으로 가정하고 이때의 고장전류(I_f) 값을 식 (4-4)와 같은 초기 조건으로 가정하였다. 이후 고장이 발생했을 경우 성립하는 1차 미분방정식인 식 (4-5)을 풀면 고장이 발생한 후 $t>0$ 선로에 흐르는 전류는 식 (4-6)과 같다. 초전도선재의 인덕턴스 크기가 커질수록 식 (4-6)의 시정수가 커지면서 식 (4-7)과 같은 역기전력에 의해 고장전류는 천천히 증가하여 증가율이 억제된다[69][74].

$$I_f(t=0) = \frac{V_{DC}}{R_F} \quad (4-4)$$

$$L \frac{dI_f(t)}{dt} + I_f(t) = V_{DC} \quad (4-5)$$

$$I_f(t) = \frac{V_{DC}}{R_F} - \frac{V_{DC}}{R_F} \frac{1}{R_F} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (t > 0) \quad (4-6)$$

$$e = -L \frac{dI}{dt} [V] \quad (4-7)$$

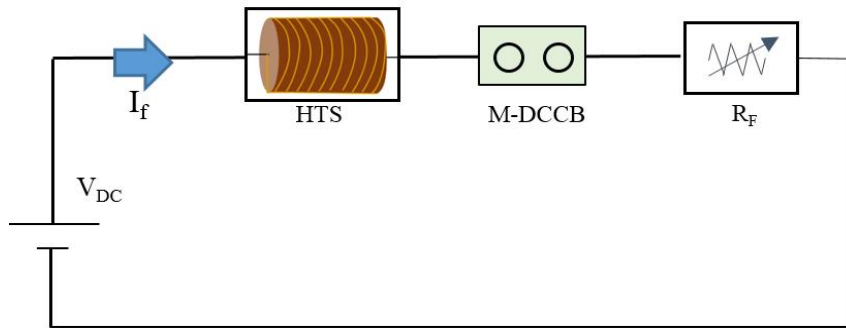


Fig. 4-32 Simplified equivalent model for characteristics analysis

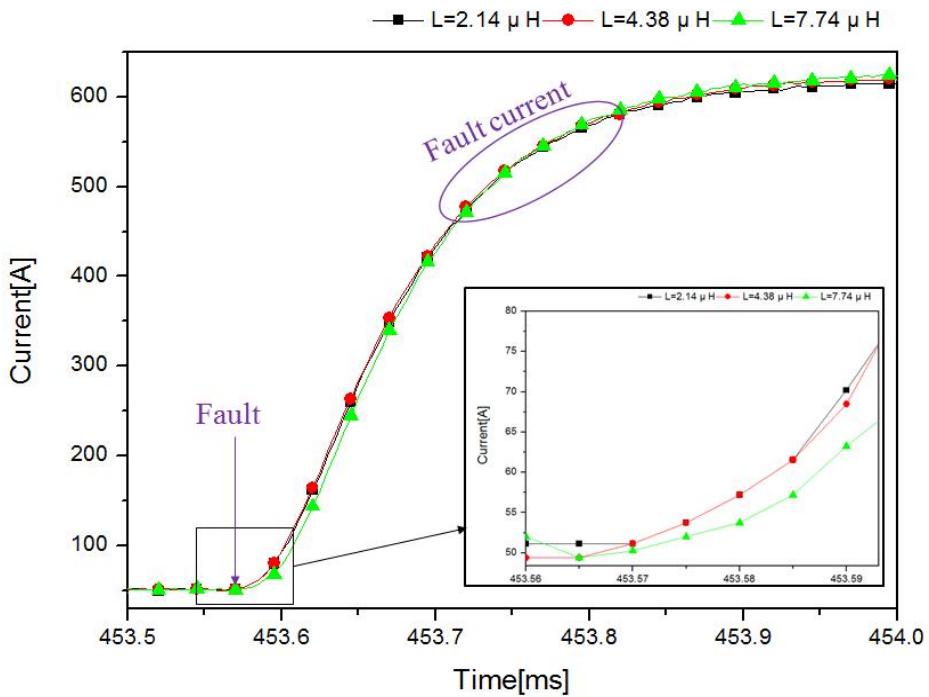


Fig. 4-33 Fault current increase-rate according to inductance magnitude of HTS wire

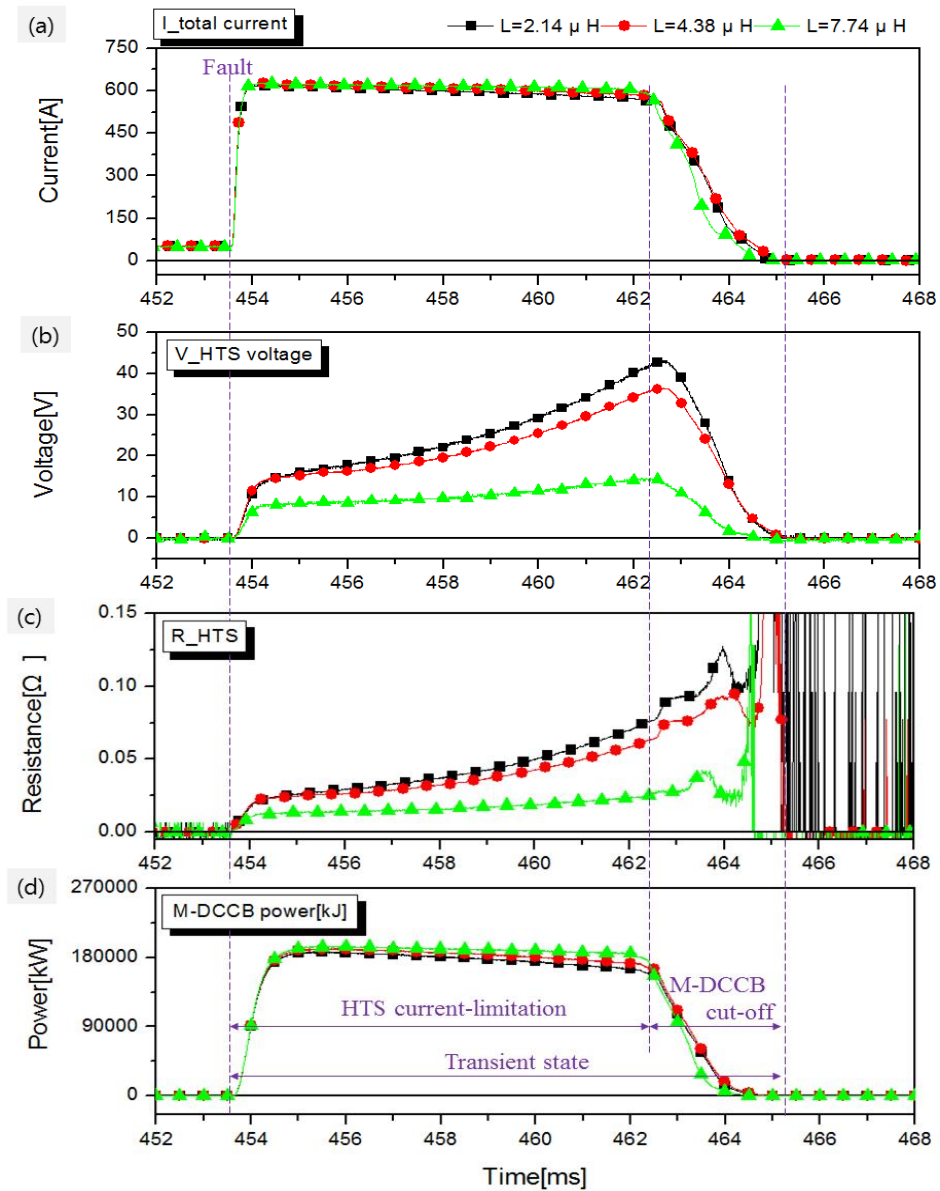
2. 실험분석

그림 4-33은 초전도선재의 인덕턴스 크기에 따른 고장전류 증가곡선을 나타낸다. 인덕턴스 크기에 따른 고장전류의 증가율을 초전도선재에 유도되는 식 (4-10)과 같은 역기전력으로 비교하였다. 고장이 발생함과 동시에 초전도선재에 유입되는 전류의 크기가 급격히 증가하였고 이로 인해 초전도선재의 내부 자속이 급격히 증가하므로 렌츠의 법칙에 의해 코일에 흐르는 전류의 반대 방향으로 역기전력이 각각 $e=-2.58 \times 10^{-3} [V]$, $e=-5.33 \times 10^{-3} [V]$, $e=-8.39 \times 10^{-3} [V]$ 가 유도되어 고장전류의 증가율을 억제하였다.

그림 4-34와 표 4-17은 3[m] 초전도선재의 인덕턴스 크기에 따른 한류형 초전도 DC 차단기의 동작특성을 나타낸다. 동작메커니즘은 인덕턴스 크기에 관계없이 III에서 분석한 바와 같다. 초전도선재의 인덕턴스 크기가 증가함에 따라 초전도선재에 유도된 역기전력 또한 증가하였다. 이로 인해 고장전류의 증가율이 억제되어 초전도선재의 임계전류 값에 도달하는 시간이 지연되었다. 초전도선재의 켄치 지연으로 인해 전류제한율 및 고장전류 감소율도 감소되었다. 즉, 같은 길이의 초전도선재를 적용하더라도 인덕턴스 크기에 따라 한류 및 차단성능이 결정되므로 용량증대가 용이하다.

Table 4-17 Results according to inductance values of HTS wire

Inductance[μH]	2.14	4.38	7.74
Max. fault current[A]	617.05	623.88	626.70
Limiting fault current[A]	551.27	563.24	588.28
Current-limiting rate[%]	11.79	9.89	5.87
$dI/dt[A/msec]$	5.85	5.34	3.51
Fault current increase-rate $e=-(dI/dt)[V]$	-2.58×10^{-3}	-5.33×10^{-3}	-8.39×10^{-3}
M-DCCB power burden $\times 10^6[kJ]$	1.63	1.68	1.70
HTS power burden $\times 10^6[kJ]$	0.14	0.13	0.06
HTS current-limiting impedance magnitude[Ω]	0.088	0.074	0.028



(a) I_{total} current (b) HTS wire voltage

(c) HTS wire resistance (d) M-DCCB power burden

Fig. 4-34 Operation characteristics according to Inductance magnitude of HTS wire CLS-DCCB

F. 결 언

본 장에서는 시뮬레이션을 활용해 해석한 한류형 초전도 DC 차단기의 동작 신뢰도를 확인하기 위해 설계 및 제작한 후 실험을 통해 한류 및 차단특성을 분석하였다.

한류형 초전도 DC 차단기 설계와 동시에 DC 전력기기의 실험이 가능하도록 필수 기기 및 장비를 제작 및 구비하여 실험실 수준의 DC 전력시험설비를 구축하였다. DC 계통 적용시기 및 신뢰도를 고려해 초전도선재와 DC 차단기를 선정하여 한류형 초전도 DC 차단기를 설계 및 제작하였고 결합된 차단기의 용량에 따른 초전도선재의 유무 및 길이를 변수로 설정하여 차단특성을 분석하였다. 또한, 한류형 초전도 DC 차단기는 한류부에 결합된 초전도선재가 핵심 기술이므로 초전도선재의 권선방법 및 인덕턴스 크기에 따른 동작특성을 분석하였다.

먼저, 차단기의 용량별 초전도선재의 유무 및 길이에 따른 실험을 분석한 결과, 9번의 실험 모두 시뮬레이션 데이터와 유사하게 고장이 발생함과 동시에 기계식 DC 차단기는 지연동작이 발생되었고, 초전도선재가 약 1[msec] 이내에 한류 임피던스를 보유한 상전도 상태로 켜치되어 고장전류의 최대 크기를 제한하였다. 초전도선재가 DC 차단기의 동작지연시간 동안 고장을 분담하고 고장전류의 최대 크기를 제한함으로써 계통에 인가되는 부담과 DC 차단기에 인가되는 전력량이 저감되어 차단시간이 단축되는 것을 확인하였다. 또한, 초전도선재의 길이가 길어질수록 한류 임피던스 크기가 증가하고 DC 차단기의 차단동작이 완료되기 전까지 켜치가 계속 진행됨에 따라 한류 임피던스 크기가 계속 증가하므로 고장전류의 크기가 더욱 낮게 제한되었다. DC 차단기 양단에 발생하는 아크의 크기는 점점 개방되기 직전에 유입되는 전류의 크기에 비례하므로 초전도선재의 길이가 길수록 DC 차단기에 가해지는 전력량이 저감되어 차단시간이 단축되었다. 뿐만 아니라, 초전도선재와 DC 차단기에 인가되는 전력량을 비율로 환산하여 분석한 결과, 고장구간 내에 초전도선재와 DC 차단기에 인가되는 전력량의 비는 평균 90[%]:10[%]이다. 이와 같이 DC 차단기에 인가되는 에너지를 초전도선재가 소량만 분담해 주더라도 시뮬레이션 데이터에서 도출한 바와 같이 실험에서도 시간당 고장전류 감소율이 28.26[A/msec]에서 75.23[A/msec]로 증가되었기에 차단동작 완료시간도 약 2.7배 단축되는 것을 알 수 있었다. 이를 기반으로

차단 능력이 약 62.43[%] 증가됨을 확인하였다.

마지막으로 초전도선재의 인덕턴스 크기에 따른 한류 특성을 분석한 결과, 인덕턴스 크기에 따라 고장전류 증가율이 억제되었고 이로 인해 초전도선재의 퀘치 동작이 지연되어 전류제한율이 11.79[%]에서 5.87[%]로 감소되었다. 또한, 시간당 고장전류 감소율이 5.85[A/msec]에서 3.51[A/msec]로 감소되어 차단능력이 저감되는 것을 확인하였다.

설계한 변수에 따른 한류형 초전도 DC 차단기의 동작특성을 분석한 결과, 시뮬레이션에서 확보한 동작특성과 같이 고장전류의 크기를 약 20[%] 낮게 제한하였으며 고장전류크기를 시간당 평균 63[%]로 감소시킴에 따라 차단시 평균 3배 단축되는 것을 확인하였다. 또한, 길이가 같은 초전도선재라 할지라도 권선타입 및 인덕턴스 크기에 따라 한류 및 차단성능이 결정되었으며 초전도선재와 DC 차단기의 전력분담 비율을 조절함으로써 차단범위 및 차단용량 조절이 가능하였다.

한류형 초전도 DC 차단기는 현재 판매되고 있는 상용 기계식 DC 차단기에 초전도선재를 결합시킴으로써 경제적인 실효성을 확보하였고 시뮬레이션 데이터와 실험데이터가 일치함에 따라 우수한 차단성능을 입증하였으며 초전도선재의 전력분담비율, 인덕턴스 크기, 권선방법 등의 방법을 통해 용량증대가 용이함을 입증하였다. 한류형 초전도 DC 차단기의 최대 장점은 임계용량 한계점이 존재하는 기존에 제안된 타 차단기술에 비해 초전도선재의 설계 값에 따라 용량증대가 용이하므로 LVDC부터 HVDC까지 폭넓게 적용이 가능하다는 것이다.

V. 결론

본 논문에서는 전 세계적으로 활발히 연구가 진행되고 있는 HVDC 시스템의 필수 수반기술인 DC 차단기술에 대한 연구를 진행하였다. 기존에 제안된 DC 차단기술의 경우 각각의 한계와 문제점을 지니고 있다. 이에 제시된 한계점과 문제점을 보완할 수 있는 새로운 차단기술로 한류형 초전도 DC 차단기술을 제안하여 동작특성을 분석하였다.

본 논문에서 도출한 연구결과를 다음과 같이 요약하였다.

첫 번째, 기존에 제안된 DC 차단기술의 한계점 및 문제점을 보완하였다. 기존에 제안된 DC 차단기술들은 용량한계, 경제적인 요소, 제작의 용이성, 관리 및 반복 동작의 신뢰도 저하, 계통연계, 차단 및 동작신뢰도 등의 문제점이 제기되었다. 이에 새로운 DC 보호기술로 한류형 초전도 DC 차단기를 제안하여 메커니즘 분석을 통해 이를 입증하였다. 초전도체와 DC 차단기가 직렬로 결합된 구조이므로 제작이 용이하고 기계식 DC 차단기 결합으로 인해 전력손실이 낮다. 또한, 초전도체를 활용하여 고장을 분담함으로써 용량한계 및 차단실패 가능성 및 동작신뢰도 측면이 보완됨을 확인하였다.

두 번째, 시뮬레이션을 활용해 동작신뢰도를 확보하였다. PSCAD/EMTDC 계통 해석 프로그램을 활용해 해석한 결과 초전도체가 결합된 경우 고장전류의 최대 크기를 약 70[%] 낮게 제한되었으며 고장전류의 크기를 약 88[%] 더 빠르게 감소시켜 고장전류 감소율이 증가함에 따라 차단동작 시간이 9배 단축되었다. 또한, DC 차단기에 인가되는 전력부담 완화로 인해 약 60[%] 이상 차단용량 저감이 가능해 경제적인 비용도 저감될 수 있을 것이라 사료된다.

세 번째, DC를 기반으로 한 계통에 연계된 경우 동작신뢰도 확보하였다. 계통연계형 PV 시스템과 VSC-HVDC 시스템을 설계한 후 한류형 초전도 DC 차단기를 적용하여 과도상태 시 동작특성을 해석하였다. 그 결과, 약 60[%] 이상의 한류율을 확보하였고 차단동작도 PV의 경우 평균 0.19[kA/msec]에서 0.58[kA/msec]로 단축되었으며, VSC-HVDC의 경우 평균 4.6×10^{-3} [kA/msec]로 고장전류를 감소시켜

차단동작을 완료하였다. 또한, 초전도체가 결합된 경우 DC 선로고장 시 AC 계통에도 통되는 고장전류의 크기 및 도통시간을 단축시켰다. 뿐만 아니라 VSC-HVDC에 적용된 경우 한류 및 차단동작으로 인해 커패시터가 완전 방전되기 전에 평균 0.19[msec]에 방전이 중단되므로 고장확대 가능성이 저감되었다. 이를 통해 계통에 적용될 경우에도 차단시간 단축 및 차단실패 가능성을 저감시켜 계통의 신뢰도 및 안정도를 확보할 수 있음을 확인하였다.

네 번째, 모의 DC 전력시험 설비를 구축하였다. DC 전원설비, 사고발생장치, 측정기기, 냉각설비, 부하 등을 설계하여 DC 시험이 가능한 모의 DC 전력시험설비를 구축하였다. 이는 환경적 및 경제적인 요건에 의해 실험실 수준의 최대용량으로 설계한 후 구축하였다.

마지막으로 한류형 초전도 DC 차단기 설계하여 실험을 통해 성능을 입증하였다. 모의 DC 전력시험설비에서 실험이 가능한 상용 DC 차단기를 선정하여 한류형 초전도 DC 차단기를 설계 및 제작하였다. 전압증가 및 차단기의 차단용량 증가에 따른 한류형 초전도 DC 차단기의 동작실험을 진행하였다. 그 결과, 초전도체가 DC 차단기에 인가되는 전력을 100[%]을 기준으로 평균 10[%] 정도만 분담해주더라도 고장전류의 크기가 약 63[%] 빠르게 감소되어 차단동작이 약 3배 빠르게 완료됨을 확인하였다. 또한, 시뮬레이션에서 도출한 바와 같이 고장전류의 최대 크기가 제한되어 DC 차단기에 인가되므로 DC 차단기에 인가되는 전력부담도 저감되었다. 게다가 초전도선재의 권선타입 및 인덕턴스 크기를 조절함으로써 차단성능 및 용량증대가 용이함을 확인하였다.

위와 같이 시뮬레이션과 실험을 통해 한류형 초전도 DC 차단기를 구축된 시험설비의 최대 용량에 맞춰 제작하여 실험 가능한 최대 범위 내에서 실험을 진행함으로써 우수한 차단 성능 및 동작신뢰도를 확인하였다. 초전도체가 결합된 기기의 경우 냉각설비 수반이 필수이고 초전도체와 냉각설비의 경우 고전압으로 증가할수록 고려해야 할 사항이 증가한다. 추후 HVDC급 DC 전력시험설비 환경이 구축된다면 초전도체의 권선 타입별, 보빈재질, 보빈설계 형태, 냉각설비 크기, 냉각매질 등을 고려하여 HVDC급 한류형 초전도 DC 차단기에 대한 추가 연구를

진행해야 할 것으로 판단된다. 이를 기반으로 100[kV]급 한류형 초전도 DC 차단기를 제작할 경우 차단 시간을 최소 10배 이상 단축시킬 수 있으며 고장전류 제한율도 최소 70[%]이상 확보 가능할 것으로 예측된다.

이때 본 논문에서 수행한 한류형 초전도 DC 차단기에 관한 연구는 기본개념 및 동작특성 정립에 대한 연구결과로써 추후 HVDC급 한류형 초전도 DC 차단기를 설계 및 제작할 때 기준 데이터로 제시되어 제작에 크게 기여할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] KISTEP, “Multi-terminal 직류 송배전 시스템 개발사업”, 예비타당성조사 보고서, 2015.
- [2] 산업통상자원부, “제 8차 전력수급기본계획”, 통상에너지소위원회보고자료, 2017.
- [3] KEEL, “재생에너지 3020 이행계획에 대한 이슈”, 에너지수급브리프, pp. 1-15, 2018.
- [4] 산업통상자원부, “2030년까지 전력생산비율의 신재생 20% 달성방안 논의”, 2017.
- [5] 이종건, “다단자 직류 그리드의 고장전류 특성 분석 결과를 기반으로 한 한류 차단 방식에 관한 연구”, 박사학위논문, 2017.
- [6] M. C. Dinh, “A study on the VSC-HVDC system connected to a HTS DC power cable”, the these of master degree, 2012.
- [7] 여서현, “VSC-HVDC 시스템 적용을 위한 경제성 평가 분석 연구”, 석사학위논문, 2016.
- [8] N. Kostoulas, V. Sitokonstantinou, M. Idris, P. Sterling, S. Sayed, P.kVraiskos, “DC circuit breakers and their use in HVDC grids”, pp. 1-11, 2012.
- [9] D. M. Larruskain, I. Zamora, A.J. Mazón, O. Abarategui, J. Monasterio, “Department of electrical engineering university of the basque country-bilbao(spain). transmission and distribution networks: AC versus DC”, 2011.
- [10] 이우영, “HVDC용 DC차단기”, 한국전기연구원 계장기술 특별기고, pp. 81-87, 2014.
- [11] 배진용, “HVDC와 BTB 컨버터 분야의 특허기술 동향”, Electric engineers magazine, vol. 387, 2014.
- [12] 허 건, “수퍼그리드 적용을 위한 멀티터미널 HVDC 및 DC 그리드”, 전기의 세계, vol. 63, no. 7, 2014.
- [13] 김찬기, “전압형 HVDC 기술 개요”, 전기의 세계, pp. 16-27, 2015.
- [14] 김효성, “직류 배전 기술”, 삼성건설기술지, no. 61, 2009.
- [15] 김효성, “직류(DC)배전과 회로차단기술”, 전력전자학회지, vol. 15, no. 5, pp. 20-28, 2010.
- [16] M. HIROSE, Y. YAMADA, T. MASUDA, K. SATO and R. HATA, “Study on commercialization of high-temperature superconductor”, Sei technical review, no. 62, 2006.

- [17] J. H. Kim, “A Study on the transient state analysis of HTS power cable for power system application”, Doctor degree thesis, 2009.
- [18] B. M. Yang, J. W. Kang, S. R. Lee, C. L. Choi, and Y. H. Moon, “Qualification test of a 80 kV 500 kW HTS DC cable for applying into real grid”, *IEEE Trans. Appl Supercond*, vol. 25, no. 3, pp. 5402705, 2015.
- [19] 김형근, “초전도 전력기술 개발 현황 및 전망”, *Journal of the electric world*, 2001.
- [20] 한국전력신문, “HVDC 기술 동향 및 전망 약 160개, 150 GW 이상 용량 프로젝트 건설 운영 중”, 2019.
- [21] Chubu Electric Power Co, “Power distribution system master plan study for ghana final report supplemental volume 3 master plan & implementation plan”, Japan international cooperation agency, 2008.
- [22] 한국전기연구원, “HVDC용 고속 직류 차단기 개발”, *계장기술*, 2013.
- [23] K. H. Park, H. Y. Lee, M. Asif, B. W. Lee, “Assessment of AC black-box arc models for DC circuit breaker”, *대한전기학회 전기물성응용부문회 추계학술대회 논문집*, pp. 62-65, 2017.
- [24] X. Pei, A. C. Smith and M. Barnes, “Superconducting fault current limiters for HVDC systems”, *Elsevier energy procedia*, pp. 47-55, 2015.
- [25] Y. Chen, X. Liu, J. Sheng, L. Cai, Z. Jin, J. Gu, Z. An, X. Yang, and Z. Hong, “Design and application of a superconducting fault current limiter in DC systems”, *IEEE Trans*, vol. 24, no. 3, 2014.
- [26] B. Xiang, Y. Tan, K. Yang, Z. Liu, “Quenched resistance effects on a superconducting current-limiting-type DC Breaker”, *IEEE Trans*, vol.26, no.7, 2016.
- [27] Q. Guo, “Analysis of multi-infeed HVDC Systems and DC circuit breaker technologies for DC grids”, Doctor degree thesis, 2016.
- [28] 조영배, “역전류 주입 방식 기반의 개선된 초고압 DC 차단기 토폴로지”, 석사학위논문, 2014.
- [29] M. M. Walter, “Switching arcs in passive resonance HVDC circuit breakers”, Ph.D. dissertation, Dept. power syst. High Voltage Laboratories, ETH Zurich, 2013.

- [30] H. Nakao, Y. Nakagoshi, M. Hatano, and T. Koshizuka, "DC current interruption in HVDC SF₆ gas MRTB by means of self-excited oscillation superimposition", IEEE Trans. Power Del, vol. 16, no. 4, pp. 687 - 693, 2001.
- [31] T. R. Eriksson, "A low loss mechanical HVDC breaker for HVDC grid applications", CIGRE, 2014.
- [32] "HVDC 자립-전력계통·송전·변환분야 기술이 먼저", 전기신문, 2019.
- [33] KERI, "Development of 80 kV 8 kA DC circuit breakers for HVDC", 2017.
- [34] L. Chen, F. Tang, and L. Ren, "Comparative study of inductive and resistive SFCL to mitigate the DC fault current in a VSC-HVDC system integrated with wind power farms", in Proc. Int. Conf. ASEMD, pp. 20-23, 2015.
- [35] B. T. Li, J. F. Jia, B. Li, and Y. K. Zhang, "Fault analysis of VSC HVDC system with saturated iron-core superconductive fault current limiter", in Proc. Int. Conf. ASEMD, pp. 20-23, 2015.
- [36] IEEE Std C37.04b, "IEEE Standard for rating structure for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis, Amendment 2: To change the description of transient recovery voltage for harmonization with IEC 62271-100", 2008.
- [37] N. A. Belda, C. Plet, C. Spallarosa, K. Tahata, F. Page, "D5.3 Fault stress analysis of HVDC circuit breakers", Ref. Ares(2016)7099241, 2016.
- [38] W. Grieshaber, J. P. Dupraz, D. L. Penache, and L. Violleau, "Development and test of a 120 kV direct current circuit breaker", CIGRE, 2014.
- [39] 한국전력공사 전력연구원, LS산전, 한국기초과학지원연구원 "저항형 고온 초전도 한류기 개발", 2004.
- [40] 김진영, "재차단이 가능한 새로운 반도체 차단기에 관한 연구", 박사학위논문, 2014.
- [41] LG산전 기술센터, "Arc소호", pp. 3-46, 2007.
- [42] Ravel F. Ammerman, "DC-Arc Models and Incident-Energy Calculations", IEEE Trans, vol. 46, no. 5, 2010.
- [43] M. M. Walter and C. M. Franck, "Improved method for direct black-box arc parameter determination and model validation", IEEE Trans. Power Del, vol. 29, no. 2, 2014.

- [44] R. P. P. Smeets and V. Kertész, “Application of a validated AC black-box arc model to DC current interruption”, in Proc. 2nd ICEPE-ST, Matsue, pp. 20-23, 2013.
- [45] P. H. Schavemaker, “An Improved Mayr-Type Arc Model Based on Current-Zero Measurements”, IEEE Trans. Power Del, vol. 15, no. 2, 2000.
- [46] Working group 13.01 of study committee 13, “State of the art of circuit-breaker modelling”, Cigre brochure, 1998.
- [47] V. Singh, “Examination of electric arc behavior in open air”, Thesis of Aalto university, 2012.
- [48] A. Balestero, L. Ghezzi, M. Popov, G. Tribulato, L. vander Sluis, “Black box modeling of low-voltage circuit breakers”, IEEE Trans. Power Del, vol. 25, no. 4, 2010.
- [49] M. H. Kim, J. C. Kim, “The study on the complex composition by SFCL and power equipments for fault detection in HVDC line”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 67, no. 8, pp. 1113-1118, 2018.
- [50] X. Pei, A. C. Smith and M. Barnes, “Superconducting fault current limiters for HVDC systems”, 12th Deep Sea Offshore Wind R&D Conference, 2015.
- [51] U. A. Khan, J. G. Lee, F. Amir, and B. W. Lee, “A novel model of HVDC hybrid-type superconducting circuit breaker and its performance analysis for limiting and breaking DC fault currents”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 25, no. 6, 2015.
- [52] J. Y. Yoon, J. Y. Kim, S. R. Le “Modeling of the HTS fault current limiter considering quenching characteristic”, 전기학회논문지, 53A(2), pp. 73-79, 2004.
- [53] L. Chen, H. Pan, C. H. Deng, and F. Zheng, “Study on the application of a flux-coupling-type superconducting fault current limiter for decreasing HVDC commutation failure”, Can. J. Elect. Comput. Eng, vol. 38, no. 1, 2015.
- [54] H. S. Choi, H. R. Kim, O. B. Hyun and S. J. Kim, “Quench properties of Y-Ba-Cu-O films after overpowering quenches”, IEEE Trans. Appl Supercond, vol. 11, no. 2, pp. 2418-2421, 2001.
- [55] M. M. Walter, “Switching arcs in passive resonance HVDC circuit breakers,” Ph.D. dissertation, Dept. Power Syst. High Voltage Laboratories, ETH Zurich,

- Zurich, Switzerland, 2013.
- [56] Thomas, J, Chaffey, G. P, Franck, C. M, “Small-scale HVDC circuit breaker”, IEEE transactions on components, Packaging and Man, vol. 7 no. 7, 2017.
- [57] M. Hasegawa, T. Tsuboi, H. Akiyama, T. Kamada, T. Uchii, “DC high-speed vacuum circuit breaker and electric motor vehicle equipped with this circuit breaker”, EP0411663A2, 2019.
- [58] S. I. Ho, J. W. Lee, K. K. Cheol, “Simple description of TRV and CZ using Cassie-Mayr equation based on EMIP simulation”, 대한전기학회 학술대회논문집, vol. 6 no. 7, 2006.
- [59] Q. L. Guo, M. H. Yoon, G. S. Jang, “Study of self-excited resonant DC circuit breaker in future DC grid”, 대한전기학회 학술대회논문집, vol. 15 no. 7, 2015.
- [60] 김슬기, 전진홍, 김은상, “PSCAD/EMTDC based modeling and simulation analysis of a grid-connected-photovoltaic generation system”, 전기학회논문지 A, 54A(3) pp. 107-116, 2016.
- [61] 전인수, “A Study on the simulation model of PV generation system for its application to real power system”, Doctor degree thesis, 2008.
- [62] 양병모, “DC 대용량 고온 초전도 전력케이블의 신뢰성 검증을 위한 성능 평가 기술 개발에 관한 연구”, 박사학위논문, 2016.
- [63] Mohammad A. S. Masoum, H. Dehbonei, and Ewald F. Fuchs, “Theoretical and explanation analysis of photovoltaic systems with voltage and current based maximum power point tracking”, IEEE Trans. on energy conversion, vol. 17, no. 4, pp. 514-522, 2002.
- [64] R. C. Campbell, Degree Thesis, “Transient modeling and analysis of grid-connected photovoltaic systems”, 2006.
- [65] 한국전력연구원, “한전전력연구원, 진도군, LS산전과 함께 직류배전망 실증사업 착수”, 계장기술, 2016.
- [66] B. G. Jang, “A study on the transient characteristics of the 154 kV class HTS AC power cable in the Geumak power system”, Master degree thesis, 2015.

- [67] S. S. Choi, “A Study on an evaluation modeling of power system performance for frequency regulation ESS based on the PSCAD/EMTDC”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 67, no. 8, pp. 1024-1030, 2018.
- [68] 유재무, 정형식, 고재웅, 김해두, “Bi계 고온초전도 선재제조 및 응용기술 현황”, 세라미스트, vol. 12, no. 5, 1997.
- [69] 오정훈, “DC 리액터형 초전도 한류기용 자기철심리액터의 설계와 특성 해석”, 석사학위논문, 2003.
- [70] 한양대학교 연구보고서, “극저온 고전압 환경을 고려한 초전도 전력기기용 154 kV prototype 부상 절연설계 및 개발”, 2012.
- [71] 장주엽, 허정, 김용남, “헬리컬 코일을 이용하는 자기 공진형 전력 전송 시스템에서 새로운 상호 인덕턴스 계산식 제안”, The journal of korean institute of electromagnetic engineering and science, vol. 23, no. 6, 2012.
- [72] H. A. Wheeler, “Simple inductance formulas for radio coils”, proc. IRE, vol. 16, pp. 1398-1400; “Discussion”, Proc, IRD, vol. 17, pp. 580-582, 1929.
- [73] J. W. Kim, H. H. Ji, Y. G. Choi, Y. H. Ynn, “Study on arrangement of self-resonant coils in wireless power transfer system based on magnetic resonance”, 한국전자과학회논문지, vol. 21, no. 6, 2010.
- [74] J. David Irwin and Chwan-Hwa Wu, “Basic Engineering Circuit Analysis,” John wiley&sons, Inc., 6th Ed., 1999.
- [75] 기초전력연구원, “분산전원이 도입된 배전계통에 초전도한류기 적용방안 연구”, 2011.
- [76] 최효상, “HVDC 시스템과 직류차단기 기술 개발 현황”, 전기의 세계, vol. 65 no. 8, 2016.