





2018年 2月

碩士學位 論文

# 분산전원 적용을 위한 MVDC 배전망용 초전도 DC 차단기 설계

# 朝鮮大學校 大學院

## 電氣工學科

金 竣 凡



# 분산전원 적용을 위한 MVDC 배전망용 초전도 DC 차단기 설계

Design of Superconducting DC Circuit Breaker for MVDC Distribution System with Distributed Generators

2018年 2月 23日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

余 埈 凡





# 분산전원 적용을 위한 MVDC 배전망용 초전도 DC 차단기 설계

# 指導教授 崔 孝 祥

# 이 論文을 工學碩士學位 申請論文으로 提出함 2017年 10月

# 朝鮮大學校 大學院

# 電氣工學科

# 金 竣 凡





# 金埈凡의 碩士學位 論文을 認准함

委員	員長	朝鮮大學校	敎授	 曺	錦	培	(印)
委	員	朝鮮大學校	敎授	 金	宰	弘	(印)
委	員	朝鮮大學校	敎授	崔	孝	祥	(印)

2017年 11月

# 朝鮮大學校 大學院

Collection @ chosun



목 차

I. 서론1
Ⅱ. 연구배경
A. 국내 현황3
1. 수요 및 발전 현황
2. 분산 전원 ······6
B. 분산 전원 시스템8
1. 분산전원 연계의 구조8
2. 분산전원 연계의 문제점9
C. 차단 기술 제안
1. DC 차단 기술10
2. 초전도 DC 차단기 제안
Ⅲ. 초전도 DC 차단기 설계 및 독작 특성12
Ⅱ. 초전도 DC 차단기 설계 및 독작 특성12 A. 초전도 DC 차단기 구조 및 동작 메커니즘
<ul> <li>Ⅲ. 초전도 DC 차단기 설계 및 독작 특성······12</li> <li>A. 초전도 DC 차단기 구조 및 동작 메커니즘·····12</li> <li>B. 초전도 DC 차단기 설계·····13</li> </ul>
<ul> <li>Ⅲ. 초전도 DC 차단기 설계 및 독작 특성······12</li> <li>A. 초전도 DC 차단기 구조 및 동작 메커니즘·····12</li> <li>B. 초전도 DC 차단기 설계·····13</li> <li>1. 한류부 설계 ·····13</li> </ul>
<ul> <li>Ⅲ. 초전도 DC 차단기 설계 및 독작 특성······12</li> <li>A. 초전도 DC 차단기 구조 및 동작 메커니즘·····12</li> <li>B. 초전도 DC 차단기 설계······13</li> <li>1. 한류부 설계 ·····13</li> <li>2. 차단부 설계·····16</li> </ul>
<ul> <li>Ⅲ. 초전도 DC 차단기 설계 및 독작 특성······12</li> <li>A. 초전도 DC 차단기 구조 및 동작 메커니즘·····12</li> <li>B. 초전도 DC 차단기 설계······13</li> <li>1. 한류부 설계 ······13</li> <li>2. 차단부 설계······16</li> <li>C. 초전도 DC 차단기 동작특성 ·····20</li> </ul>
<ul> <li>Ⅲ. 초전도 DC 차단기 설계 및 독작 특성·····12</li> <li>A. 초전도 DC 차단기 구조 및 동작 메커니즘·····12</li> <li>B. 초전도 DC 차단기 설계······13</li> <li>1. 한류부 설계 ······13</li> <li>2. 차단부 설계······16</li> <li>C. 초전도 DC 차단기 동작특성 ·····20</li> <li>1. 직류 차단 특성······20</li> </ul>
<ul> <li>Ⅲ. 초전도 DC 차단기 설계 및 독작 특성······12</li> <li>A. 초전도 DC 차단기 구조 및 동작 메커니즘·····12</li> <li>B. 초전도 DC 차단기 설계······13</li> <li>1. 한류부 설계······13</li> <li>2. 차단부 설계······16</li> <li>C. 초전도 DC 차단기 동작특성 ······20</li> <li>1. 직류 차단 특성······20</li> <li>Ⅳ. PV시스템에 적용된 초전도 DC 차단기 동작특성······24</li> </ul>
<ul> <li>III. 초전도 DC 차단기 설계 및 독작 특성······12</li> <li>A. 초전도 DC 차단기 구조 및 동작 메커니즘·····12</li> <li>B. 초전도 DC 차단기 설계······13</li> <li>1. 한류부 설계 ······13</li> <li>2. 차단부 설계······14</li> <li>C. 초전도 DC 차단기 동작특성 ······20</li> <li>1. 직류 차단 특성······20</li> <li>I. 직류 차단 특성······24</li> <li>A. 계통연계형 분산전원 PV 시스템 설계 및 동작특성······24</li> </ul>
<ul> <li>Ⅲ. 초전도 DC 차단기 설계 및 독작 특성12</li> <li>A. 초전도 DC 차단기 구조 및 동작 메커니즘12</li> <li>B. 초전도 DC 차단기 설계13</li> <li>1. 한류부 설계13</li> <li>2. 차단부 설계16</li> <li>C. 초전도 DC 차단기 동작특성</li></ul>

Collection @ chosun

	B	초전	도 I	C	차딘	킨	동즈	학 실	실험.	••••	• • • • •			• • • • •	••••		••••	•••••	35
		1. P	V 분	산전	년원	시스	:템	내	초전.	도 [	C :	차단	기별	튺성	분석	넉			35
	C.	고찰	••••	••••	••••	••••					••••	••••			••••	• • • • •		• • • • •	41
V	. 결	론		••••	• • • • •	••••		••••		••••	••••	•••••		••••			•••••		42
참	고	문	헌.				••••	••••			••••				••••			••••	43





# List of Tables

Table 2-	1 Energy consumption per capita GDP4
Table 3-	1 Typical DC circuit breaker types
Table 3-2	2 The specification of experimental circuit diagram21
Table 4-	1 Current status of power plants for energy source





Fig. 2-1 Trend of generating capacity by plant
Fig. 2-2 Greenhouse gas emissions6
Fig. 2-3 Generation rate of Renewable energy7
Fig. 2-4 The typical form of distributed generation
Fig. 2-5 Predicted fault current in distributed generation9
Fig. 3-1 Circuit diagram of a superconducting DC circuit breaker
Fig. 3-2 The critical curve of superconductivity
Fig. 3-3 The resistance and signal characteristics of superconductivity15
Fig. 3-4 Experimental circuit of a superconducting DC circuit breaker $\cdots\!\cdots\!20$
Fig. 3–5 Transient behavior of a mechanical DC circuit breaker $\cdots\cdots\cdots 22$
Fig. 3-6 Transient behavior of a superconducting DC circuit breaker
Fig. 4-1 Equivalent circuit diagram of solar cell
Fig. 4-2 PV Cell - Module (Array)
Fig. 4-3 Algorithm of IncCond MPPT
Fig. 4–4 Diagram of HVDC distribution applying DC distributed generation $32$
Fig. 4-5 Transient characteristics of PV system in the steady state
Fig. 4-6 Transient characteristics of PV system in the fault state $\cdots\cdots\cdots 34$
Fig. 4-7 Current and voltage characteristics in PV system
when mechanical DCCB has applied
Fig. 4–8 Characteristics of mechanical DC circuit breaker in PV system $\cdots\cdots$ 37
Fig. 4-9 Current and voltage characteristics in PV system
when the superconducting DC circuit breaker has applied
Fig. 4-10 Characteristics of superconducting DC circuit breaker
in PV system
Fig. 4-11 Power burden in MCCB40
Fig. 4-12 Power burden in MCCB and superconductivity
when superconducting DC circuit breaker applied



조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY



Collection @ chosun

### ABSTRACT

# Design of superconducting DC circuit breaker for MVDC distribution system with distributed generators

Jun Beom Kim

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

Demand for power of the electricity is increasing worldwide as well as domestic demand. Currently most of the equipment that people use in normal is electric devices and the usage is increasing steadily because of the superiority and convenience of electricity. In recent, by the global warming, heating and cooling facilities are increasing every year. Moreover, new technologies such as smart-phone and EVs are also actively developing as new technologies. Due to the increase in power demand, it is urgent to establish countermeasures for power supply. There is a way to increase the unclear power generation or thermal power generation, which is responsible for the existing base development. However, it causes environmental pollution. In order to meet the demand, research and development of renewable energy sources such as solar or wind power is highly available. Most of the new renewable energy sources attempt to supply power to the system in a distributed power supply system form.

Distribution power system refers to small power generation facilities utilizing new renewable energy sources to increase the simplicity and efficiency in the power systems across regions or networks. This is evaluated as a system with significant possibilities in terms of effectiveness and universality and environmental aspects. However, it is essential to secure the interruption technologies to ensure the actual application of the distributed power system. In the case of distributed power sources, the power is applied in various directions. And if the fault occurs, the fault current could generate with a overlap of various power, and it may cause a severe affect to the devices or the entire grid. Besides, most of the new renewable energies are generated in direct current. DC does not have a current zero. Therefore, in interruption operation in DC, it causes a large arc. If an unexpected arc occurs, the possibility of breaker failure will increase and it may damage circuit breaker and the contacts of it. For these reasons, DC interruption technology should be preceded by a priority to construct a stable distributed power system[1-3].

Electromagnetic transient for DC/PSCAD (EMTDC/PSCAD) program, power system analysis program, has conducted for simulation. This is made by Manitoba HVDC Research Center in Canada to analyze the DC transmission system based on CAD[4].

This paper suggests a superconducting DC circuit breaker that combines superconductor and mechanical dc circuit breaker. The superconductor is a limiting factor in the event of a fault. It limits the fault current by the quench characteristics of the superconductor. After the limitation operation, the limited fault current will flow into mechanical circuit breaker and it conducts a interruption operation. To demonstrate the superiority of the superconducting DC circuit breaker, it was applied to a single circuit to analyze the operational characteristics of the superconducting DC circuit breaker. To assure operability of the operation of the superconducting DC circuit breaker in MVDC distributed power system, grid-connected PV distributed system was applied to compare the operating characteristics.





#### I. 서론

전력수요량은 국내뿐만 아니라 전 세계적으로 증가하는 추세이다. 전기사용의 편리성과 우수성으로 인해 기존에 사용되고 있던 전력기기가 현재까지 사용되며 최근에는 지구 온난화로 인해 냉난방 부하의 사용량도 매년 증가하고 있다. 게다 가 스마트폰, EV 등 전기를 원천으로 하는 신기술들도 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 원인에 의하여 전력수요의 증가로 전력공급에 대한 대책 마련이 시 급한 실정이다. 기존의 기저발전을 담당하던 원자력 발전이나 석탄 화력의 발전 량을 늘리는 방법이 있으나 이는 환경오염에 관한 문제가 있다. 이에 수요를 충 당하기 위하여 태양광 또는 풍력 발전과 같은 신재생에너지원을 이용하여 전력을 공급하는 방법에 대한 연구개발이 활발하다. 신재생에너지원의 대부분은 분산전 원 형태로 계통에 연계하여 전력을 공급하려고 한다.

분산전원이란 지역 간 혹은 송전망의 배전 시설의 간편화와 효율성을 높이기 위해 신재생에너지원을 이용한 소규모 발전 설비를 말한다. 이는 효용성 및 보편 성, 환경적인 측면에서 큰 발전가능성을 지닌 시스템으로 평가되고 있다. 그러나 분산전원 시스템의 실제 적용시기, 신뢰성 등을 확보하기 위해서는 고 신뢰도를 지닌 차단기술에 대한 확보가 필수이다. 분산전원의 경우 전원이 다양한 방향으 로 투입이 되며, 사고 발생시 제 때에 고장을 차단하지 못할 경우 고장이 확대되 어 연계된 기기나 계통전체에 악영향을 미칠 수 있다. 뿐만 아니라 신재생에너지 의 대부분은 직류인데, 직류는 전류영점이 존재하지 않아 이로 인해 차단 시 큰 아크가 발생한다. 예상치 못한 큰 아크가 발생할 경우, 차단기 파손, 접점 손상 등 으로 차단실패의 가능성은 더욱 증가된다. 그러므로 안정적인 분산전원 시스템을 구축하기 위해서는 직류 차단기술이 우선적으로 수반되어야 한다. [1-3].

먼저, 계통해석 프로그램인 Electromagnetic transient for DC/PSCAD (EMTDC/PSCAD)를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이는 캐나다의 Manitoba HVDC Research Center에서 직류 송전계통 해석용으로 개발된 CAD 기반 프로그램이다. 위 프로그램은 국내뿐만 아니라, ALSTOM, ABB, SIMENS 등 여러기업에서 실제 사용되고 있는 프로그램이다[4].



본 논문에서는 초전도체와 기계식 직류 차단기를 결합한 초전도 DC 차단기를 제안한다. 초전도체는 한류 소자로써, 사고 발생 시 초전도체의 퀜치 특성을 이용 하여 사고 전류를 제한한다. 이후 초전도체에 의해 1차 제한된 사고 전류가 기계 식 직류 차단기로 차단동작을 수행하는 메커니즘을 가진다.

초전도 DC 차단기의 우수성을 증명하기 위해 단독회로에 적용하여 초전도체 유무에 따른 동작특성을 분석하였다. 이후 초전도 DC 차단기의 동작신뢰도를 확 보하기 위해 계통연계형 태양광 분산전원시스템에 적용하여 동작특성을 비교 분 석하였다.





## Ⅱ. 연구배경

#### A. 국내 현황

#### 1. 수요 및 발전 현황

최근 다음과 같은 이유로 전력수요량이 증가하고 있다.

첫째, 스마트폰과 같은 새로운 전력기기의 등장과 전자기기 사용 의존도 증가 이다. 기존에 개발된 전자제품은 대부분이 가정용품이었다. 그러나 현재 대부분의 사람들은 스마트폰이나 laptop computer와 같은 휴대용 전자기기를 소지한다. 이 를 사용하고 유지하기 위해서는 많은 전력이 필요하다.

둘째, 불안정한 기후 환경이다. 지구 온난화로 인해 여름과 겨울의 온도차가 극 심하다. 이에 따라 에어컨, 히터 등 냉난방 부하의 사용량이 증가하고 있다. 또한 기존에는 석탄이나 석유를 사용한 난방시설을 주로 사용하였다. 하지만 최근에는 전기를 사용한 고효율 전기제품이 다량으로 출시되었다.

셋째, 전력소비 인식의 변화이다. 80년대엔 사람들에게 '절약'이란 인식과 개념 이 보편화되었다. 그러나 최근에는 '합리적 소비'를 추구한다. 높은 가격이더라도 합리적이고 자신이 필요하면 소비를 하는 인식으로 변화되었다. 이로 인해 많은 사람들이 전기에너지를 사용하고 있으며 전기에너지에 대한 의존도가 높다[4].

다음 표 2-1 은 1인당 및 GDP 대비 전력 소비량이다. 2007년부터 2015년 까 지 1인당 전력소비량은 꾸준히 증가하였다. 반면에 GDP 대비 전력소비량은 전체 적으로 감소하였다. 즉 경제가 발전함에 따라 전력소비량 또한 비례하여 증가되 는 것을 확인할 수 있었다[5-6].

위와 같이 증가하는 전력수요량을 충족시키기 위해서는 충분한 용량의 전력공 급이 필요하다.





	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1인당 전력소비량 (kWh)	7,607	7,922	8,092	8,883	9,142	9,331	9,285	9,305	9,555
GDP 대비 전력소비량 (GWh/10억 원)	0.353	0.359	0.343	0.343	0.341	0.339	0.332	0.321	0.309

Table 2-1 Energy consumption per capita GDP

다음 그림 2-1은 2016년 8월부터 2017년 8월까지의 주요 발전원별의 발전용량 의 추세를 나타낸다. 국내의 발전설비는 총 6가지로 분류된다. 기력발전, 원자력발 전, 복합발전, 수력발전, 내연력발전이 있다. 이중 대표적인 발전원으로는 기력, 복 합, 원자력 발전이 있다. 먼저, 기력발전은 평균 36,054 MW 로 그 비중은 점점 증가하고 있는 추세이다. 다음으로 복합발전은 기력발전과 비슷한 추세를 나타낸 다. 평균 34,855 MW로 그 발전량이 증가하고 있다. 마지막으로 원자력발전은 앞 에서 언급한 기력발전과 복합발전과는 다르게 평이한 추세를 가지고 있다. 평균 21,000 MW을 유지하고 있다[7].

대부분의 평균전력을 담당하는 기력, 복합, 원자력 발전은 발전 효율이 매우 뛰 어나지만 증가시키는데 어려움이 있다. 최근 지구 온난화에 대비하여 전 세계적 으로 저탄소 배출을 중요시하고 있다. 다음 그림 2-2는 국내의 온실가스 배출량 을 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이 1998년을 제외하고는 매년마다 증가하 고 있는 것을 확인 할 수 있다. 그래서 기력이나 복합발전량을 늘리는 데에 한계 가 있다. 또한 2011년 동일본 대지진 이후 원자력발전에 대한 위험성이 전 세계 에 대두되고 있다. 이로 인하여 탈 원전 정책 및 탈원전에 대한 운동이 많아지고 있다. 전력수요량은 증가하고 있는 상황에 원자력발전이나 기타 발전설비들의 중 축이 어려운 상황이다. 그러므로 이를 해결하기 위하여 친환경적인 에너지원이 필요한 시점이다.











- 5 -





출처 : 2016 국가 온실가스 인벤토리 보고서

그림. 2-2 온실가스배출량

Fig. 2-2 Greenhouse gas emissions

#### 2. 분산전원

대표적인 친환경 에너지원은 신재생에너지가 있다. 대표 자원으로는 연료전지, 액화천연가스 가스화, 수소에너지 등의 신에너지와, 지열, 바이오, 파력, 수력, 풍 럭, 폐기물, 태양열, 태양광 등의 재생에너지가 존재한다. 이처럼 친환경적인 자원 을 사용하는 것이 일반적이다. 그러므로 그 지역 또는 나라의 지형, 날씨에 대한 영향을 많이 받는다. 대한민국뿐만 아니라 대표적인 신재생발전으로는 태양광, 풍 럭발전 등이 있다. 그림 2-3은 현재 대한민국의 신재생에너지 발전량 비율을 나 타낸다. 2015년 기준으로 현재 신재생에너지는 전체 에너지의 6.61 %를 차지하고 있다. 아직 국내 발전량에 비해 큰 비중을 차지하지는 않지만 환경문제로 인하여 신재생에너지 확대 정책과 신재생에너지 의무할당제 제도인 RPS(Renewable Energy Portfolio Standard)의 시행으로 2010년 이후로는 가파른 증가 추세를 보 이고 있다[8].







출처 : 신재생에너지보급실적조사



기존의 신재생에너지의 경우 독립형 신재생에너지가 대부분이었다. 독립형이란 자가 발전 자가 소비를 하는 발전원을 말한다. 대표적으로는 길거리의 태양광 가 로등이 있다. 하지만 발전 규모가 커짐에 따라 기존의 화력 및 원자력 발전과 같 은 대규모 집중형 전원과는 다른 형태의 전력망을 구축한다. 전력소비가 있는 지 역 근처에 분산적으로 배치가 가능한 소규모 발전 시설 형태로 계통에 연결 되게 된다. 이를 분산형 전원이라고 말한다. 분산전원은 보통 신재생에너지를 통하여 발전된다. 그러므로 환경적인 요인을 많이 받아 일정하게 공급되기 어려운 단점 이 있어 에너지 저장 시스템(ESS : Energy Storage System)과 같이 연계되어 계 통에 연결된다. 하지만 이를 통해 전력수요가 높은 시간에 배전설비의 피크부하 를 감소시키며, 안정적이고 효율적으로 전력을 공급할 수 있는 장점이 있다. 또한 발전소 입지 불균형을 해소할 수 있으며 규모가 클 경우 상시전력으로도 사용이 가능하다.





Collection @ chosun

#### B. 분산 전원 시스템

#### 1. 분산전원 연계의 구조

태양광, 풍력 발전은 분산전원의 형태로 기존 계통에 연계되게 된다. 기존의 배 전계통은 변전소 주 변압기 2차를 전원으로 하여 주 변압기로부터 나오는 다른 선로들과 폐루프를 구성하고 있다. 루프지점의 개폐기를 상시 off 운전하는 단일 전원 단방향조류 계통이었다. 그러나 기존의 배전계통에 태양광, 풍력과 같은 분 산형 전원이 다수 연계됨에 따라, 전원 방식이 단일 전원 단방향조류에서 다중전 원 복잡조류로 바뀌고 있다. 이에 따라 기존의 계통 보호협조 및 계통운영과 다 른 보호설비가 필요한 실정이다.

그림 2-4는 일반적인 분산전원의 연계구조이다. 이는 계통의 중간에서 임의적 이고 불규칙하게 다수 접속된다. 일반적인 분산전원 형태를 나타낸 그림이다. 위 그림 P<sub>DGA</sub>부터 P<sub>DGE</sub> 까지 태양광 분산전원을 나타낸다. 이는 각각 계통의 모선에 연결이 된다.



그림. 2-4 일발적인 분산전원 연계 구조 Fig. 2-4 The typical form of distributed generation

Collection @ chosun

#### 2. 분산전원의 문제점

분산전원의 사용에는 몇 가지 문제점이 존재한다.

첫째, 분산전원은 계통의 중간에 연결된다. 사고가 발생할 경우 사고전류의 중 첩, 사고전류 파급, 사고전류가 미치는 영향이 더욱 넓어진다. Fig. 2-5는 분산전 원의 사고 파급에 관한 사진이다. 그림에서 볼 수 있듯이 P<sub>DGA</sub>부터 P<sub>DGE</sub> 까지 하 나의 분산전원에서 고장이 발생할 경우 그 고장전류가 흐를 수 있는 선로가 다양 하다. 또한 기존의 차단시스템의 경우 단방향 차단을 고려한 경우가 많았지만, 전 원이 증가하고 사고전류가 중첩 또는 다양한 선로로 흐름에 따라 양방향 차단을 고려해야 한다.

둘째, 분산전원의 주요 전원인 신재생에너지는 대부분 직류로 발전이 된다. 직 류는 전류영점이 없음에 따라 차단이 AC에 비하여 어렵다. 뿐만 아니라 차단 시 발생하는 2차 피해를 초래 할 수 있다.

그러므로 분산전원 보급화시기를 앞당기고 DC 기술의 보편화를 위해서는 차단 기술 확보가 필요하다[2][9-10].



그림. 2-5 분산전원 사고파급

Fig. 2-5 Predicted fault current in distributed generation



#### C. 차단 기술 제안

#### 1. DC 차단기술

교류의 경우 1주기에 2번의 전류 영점이 존재한다. 이는 교류에는 주파수 성분 이 포함되어 있기 때문이다. 이때 발생하는 전류 영점으로 인하여 차단이 비교적 용이하게 이루어진다. 그리고 현재 교류를 주로 사용하므로 교류 차단에 관한 기 술은 이미 많은 논문들에 의해 검증된 사항이다. 하지만 직류의 경우는 다르다. 직류 전류는 전류 영점이 없기 때문에 차단에 어려움이 있다. 고압의 직류 차단 시 아크를 수반한다. 아크란 두 접점사이의 Gap을 통과하는 전류 전압 에너지로 써 부하전류가 흐르는 상황에 차단기가 동작하여 접점이 개방될 때 발생한다. 아 크의 크기는 접점이 개방되기 직전에 흐르던 전류의 크기와 비례한다. 그러므로 고장전류 차단 시 발생하는 아크는 고장전류에 비하여 매우 큰 전류가 발생한다. 아크가 발생할 경우 접점의 손상이나, 기기의 발열로 인해 차단이 실패할 수 있 다. 최악의 경우 차단 실패로 인한 cascading 현상이 일어나 계통 전체에 마비가 올 수 있다. 직류 차단 시 아크 발생은 필연적이다. 차단기 설계 시 발생하는 아 크를 견딜 수 있도록 설계를 하여야 한다.

대표적인 DC 차단 방법으로 크게 4가지가 있다.

#### 1) Current Commutation Method (전류 전환 방식)

전류 전환방식은 아크 현상의 전류 제한효과에 의해 저항이나 커패시터를 사용 하여 유도성 회로에 저장된 에너지를 이용하는 방식이다. 무 충전 콘덴서를 상시 보조로 사용하여 높은 아크전압 상승률을 이용하여 전류 영점을 유도한다.

2) Inverse Voltage Generating Method (역 전압 발생 방식)

역전압 발생 방식은 아크 전압을 전원전압보다 높게 상승시킴으로써 차단하는 방식이다. 일반적으로 3 kV 이하 전기철도 및 제철소용 전기 회로 차단부로 사용 되고 있다. 차단부만 이용하는 매우 이상적인 방식으로 고압, 초고압 분야에는 적 용이 불가하다.



3) Inverse Current Injecting Method (역 전류 주입 방식)

역전류 주입방식은 초기에 충전된 커패시터를 인덕터를 통해 방전시킨다. 이때 초기에 충전된 커패시터와 인덕터가 방전을 하며 발생하는 역전류를 사고 전류에 중첩시켜 전류 영점을 생성하는 방식이다. 소호부가 저장된 에너지를 소산시킬 필요성이 없다. 기존의 교류 차단기에 이 방식을 적용하기 쉬운 장점이 있다. 하 지만 커패시터를 사전에 상시 충전해야 하므로 충전을 위한 보조 전원이 필요하 고, 이에 따라 회로 구성이 복잡한 단점이 있다.

4) Divergent Current Oscillation Method(발산 전류 진동 방식)

발산전류 진동방식은 병렬로 연결된 LC 회로와 아크 자체로 구성된 전환 루프 안에서 고주파 진동전류의 크기를 확대시킴으로써 인위적인 영점을 발생시키는 방식이다. 차단 시 발생하는 아크전압의 변화를 이용하여 발산진동 전류를 발생 시키고, 이를 고장전류에 중첩시켜 전류 영점을 발생시킨다[11].

#### 2. 초전도 DC 차단기 제안

일반적으로 차단기가 동작하기 위해서는 릴레이에서 사고 전류를 감지한 후 트 립 코일에 신호를 인가하여 차단기가 동작하는 것이 일반적인 동작 순서이다. 이 때 차단기가 동작하기까지는 수 ms 의 시간이 소요된다. 이 시간동안 사고 전류 는 단락전류의 피크 값으로 상승된다. 이후 차단기가 동작하여 단락전류를 차단 함으로써 안정적으로 차단 동작을 완료한다. 하지만 사고를 감지하고 동작하기까 지는 계전시간으로 인한 지연이 발생하므로 이때 발생하는 단락전류 값은 막대하 다. 이에 초전도 기술을 적용하여 초기에 사고 전류를 제한하는 차단시스템을 제 안하고자 한다. 분산전원 보호를 위하여 안정적인 직류 차단 방식과 다양한 전류 투입의 변수를 보호할 수 있는 차단방식을 제안하였다.





# Ⅲ. 초전도 DC 차단기 설계 및 동작 특성

## A. 초전도 DC 차단기 구조 및 동작 메커니즘

본 논문에서는 초전도 DC 차단기를 제안한다. 그림 3-1은 초전도 DC 차단기의 간이 등가회로도이다. 초전도 DC 차단기는 크게 한류부와 차단부로 구성되어 있 다. 한류부에는 초전도체를 적용하였고, 차단부에는 LC 회로가 있는 기계식 직류 차단기를 적용하였다.

초전도 DC 차단기는 두 가지의 메커니즘을 가지고 있다. 먼저, 발생하는 사고 전류를 한류부에서 먼저 제한한다. 이후, 1차 제한된 사고 전류를 차단부에서 차 단하는 역할을 한다. 이때 기계식 차단기는 3가지 회로로 구성된다. 차단 접점이 있는 Breaking 회로, L 과 C 로 구성된 Commutation 회로 그리고 피뢰기로 구 성된 Absorber 회로로 이루어져있다.





Fig. 3-1 Circuit diagram of a superconducting DC circuit breaker



#### B. 초전도 DC 차단기 설계

#### 1. 한류부 설계

한류부는 전력계통에 고장이 발생할 경우 고속도로 임피던스를 투입하여 고장 전류를 적정한 값 이하로 제한해주는 역할을 한다. 한류동작으로 인해 전력기기 는 기계적, 열적 스트레스가 감소되고 계통신뢰도도 향상된다.

위에서 언급한 바와 같은 고성능 효과를 나타낼 한류부에 초전도체를 적용하였 다. 초전도체는 특정온도 이하에서 초전도 현상을 나타낸다. 초전도체의 대표적인 특징으로 반자성 특성과 영저항 특성이 있다. 반자성이란 물질이 나타내는 자성 의 하나로 외부에서 자기장을 작용시키면 자기장에 비례하는 약한 자기모멘트가 자기장과 반대방향으로 생기는 성질이다. 이 성질로 인하여 자기부상열차나 도체 가 뜨는 현상을 볼 수 있다. 또 다른 대표적인 성질은 영 저항이 있다. 초전도체 는 초전도상태에서 도체의 저항이 0이 된다. 이를 이용하여 초전도케이블이나 다 양한 기기에 적용하고 있는 상황이다. 일반적인 초전도체는 이러한 영 저항이 되 는 성질을 이용하여 사용한다. 하지만 초전도체를 차단기술에 접목시키기 위해서 는 위 성질을 역으로 이용한다.



그림. 3-2 초전도체 임계 곡선

Fig. 3-2 The critical curve of superconductivity



다음 그림 3-2는 초전도 임계 곡선 그래프이다. 초전도체는 3개의 임계점이 있 다. 임계온도(Tc), 임계 전류(Hc) 그리고 임계 전류 밀도(Jc) 이다. 위 세 가지 조 건이 모두 충족되어야 초전도 상태를 유지할 수 있다. 다시 말하자면 위 세 가지 임계조건중 하나라도 만족하지 못할 경우 초전도성을 잃게 된다. 초전도성을 읽 게 되면 순간 고저항체로 전이되어 영 저항 특성을 잃게 된다. 이처럼 저항이 영 인 초전도 상태에서 임의의 고 임피던스를 지닌 상전도 상태로 전이되는 현상을 Quench 라고 한다.

이에 초전도체의 Quench 특성을 차단기술에 접목시키고자 한다. 정상 시에 영 저항 특성을 가지며 제로 임피던스로 회로에 도통된다. 이때 선로에 아무런 영향 을 미치질 않는다. 하지만 사고 발생시, 급격히 상승한 사고전류가 초전도체의 임 계전류를 초과할 경우 임계조건을 초과하여 초전도현상이 깨지게 된다. 이때 수 ms 이내에 초전도체는 고 저항을 발생시킨다. 선로에 없던 저항이 생기므로 사고 전류는 발생되는 저항 값만큼 전류가 제한되게 된다[12-14].

정상상태에서는 임계값 이하의 전류가 도통되므로 임피던스가 0인 초전도 상태 를 유지한다. 그러나 사고가 발생하여 고장전류가 임계전류를 초과할 경우 수 ms 이내에 Quench 되어 임의의 임피던스가 발생된다. 이때 발생되는 임피던스에 의 해 고장전류가 1차 제한된다. 다음 식 (3-1)는 초전도체의 퀜치 특성 식을 나타낸 다[15].

$$R_{SFCL}(t) = \begin{pmatrix} 0 & (t_0 > t) \\ R_m [1 - \exp(-\frac{t - t_0}{T_{sc}})] (t_0 \le t) \end{pmatrix}$$
(3-1)

여기서 R<sub>m</sub> 은 초전도체의 최대 저항 값을 의미한다. Tsc 는 시간 변수로 초전 도상태로 변위되는 시간 변수를 의미한다. t<sub>o</sub>는 초전도체가 Quench를 시작하는 시간이다. 초전도체 구현을 위하여 R<sub>m</sub>은 3Ω T<sub>sc</sub>는 0.75 ms를 입력하였다.

- 14 -







그림. 3-3 초전도 저항 특성 및 신호 곡선

Fig. 3-3 The resistance and signal characteristics of superconductivity

다음 그림 3-3은 EMTDC/PSCAD 내에 초전도체의 특성 그래프이다. 사고를 2 초에 발생하였을 경우 저항형 초전도체에 발생하는 시그널이 0에서 1로 바뀐다. 이때 저항이 0에서 3옴까지 급격히 quench 되는 것을 확인할 수 있다.



### 2. 차단부 설계

다음 표 3-1 대표적인 직류 차단기의 분류이다. 기계식 차단기, 반도체식 차단 기 그리고 기계식과 반도체를 결합한 하이브리드식 차단기로 나뉠 수 있다[16]. 기계식 차단기 같은 경우 경제적이며 쉽게 설치가 가능한 장점이 있으나, 다른 차단기에 비해 차단 속도가 느리다는 단점이 있다. 반도체를 사용하는 반도체형 차단기나 하이브리드 식 차단기는 매우 빠른 속도를 가진 장점이 있으나 가격이 굉장히 높다는 단점이 있다. 본 논문에서 제안하는 초전도 DC 차단기는 분산전원 에 연계하는 것을 그 목적으로 둔다.

조리	기계식	반도체식	하이브리드		
ठम	직류 차단기	직류 차단기	직류 차단기		
기본 회로도	Control circuit Detect circuit Commutation Absorber	Control circuit Detect circuit Conmutation Commutation Absorber	Control circuit Detect Control Circuit Breaking Commutation Absorber		
특징	<ul> <li>일반적으로 3가지 회로로 구성됨</li> <li>구조가 간단함</li> <li>설치가 용이함</li> <li>다른 기기와 연계성이 우수함</li> </ul>	<ul> <li>반도체 소자</li> <li>사용으로 인해</li> <li>비용이 고가임</li> <li>차단 속도가 빠름</li> <li>무소음</li> <li>발열에 대비한</li> <li>별도의 냉각장치</li> <li>필요함</li> </ul>	<ul> <li>기계식 차단기와 반도체식 차단기가 결합된 기기임</li> <li>수명이 길고 손실이 적음</li> <li>차단 속도가 빠름</li> <li>가격이 매우 고가</li> </ul>		

Table 3-1 Typical DC circuit breaker types



분산전원의 경우 다 방향으로 전원투입이 가능하기에 사고가 발생할 경우 사고 전류의 중첩 및 다양한 변수가 발생한다. 이를 보호하기 위해서는 선로가 연계되 는 각 노드마다 차단기가 위치하여야 한다. 이때 기계식 차단기를 사용하여 계통 에 연결하는 것이 보다 경제적이고 무엇보다 한류기술을 접목하여 보다 낮은 차 단기 용량으로 큰 사고를 보호 할수 있다는 장점으로 기계식 차단기를 선정하였 다.

기계식 직류 차단기는 3가지 회로로 구성된다. Breaking회로, Commutation 회 로, Absorber 회로로 구성된다.

1) Breaking 회로

Breaking 회로는 정상 시 정상전류의 통전과 차단 시 주 차단 접점이 선로 개 방역할을 하는 회로이다. Breaking 회로에는 기계식접점과 Arc box로 이루어졌 다. Arc box 는 차단기 내에 아크 특성을 적용하기 위해 존재한다. 교류는 1 cycle 에 2회씩 전류 영점이 생성되어 비교적 용이하게 차단이 이루어진다. 하지 만 직류는 전류 영점이 존재하지 않아 차단 시 아크가 발생한다.

직류 차단에서는 아크거동에 대한 고려가 필수적이다. 대표적인 아크 모델링은 크게 두 가지가 있다. Cassie model 과 Mayr model 이 있다. 이 두 모델의 아크 특성은 아크 컨덕턴스의 변화를 기준으로 발생한다. 아크 컨덕턴스란 플라즈마 채널에 공급되는 전력 함수로서 플라즈마 채널에서 플라즈마 채널로 전달된 냉각 과 복사 시간에 의해 설정된다.

먼저 Cassie 모델은 고전류와 아크로 인하여 발생하는 플라즈마 온도가 8000 K 이거나 그 이상일 때 주로 사용한다. Cassie 모델은 다음 식 (3-2)와 같다.

$$\frac{1}{g_c} \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left( \frac{U_{\rm arc}^2}{u_c^2} - 1 \right)$$
(3-2)

 $g_c$  : arc conductance,  $\tau_c$  : the arc time constant,

 $u_{\rm arc}$  : the arc voltage across the breaker



Mayr 모델은 전류 영점 근처와 아크로 인하여 발생하는 플라즈마 온도가 8000 K 이하일 때 주로 사용한다. 또한 고전압과 저전류에 적합하다. Mayr arc Model 은 다음 식 (3-3) 과 같다.

$$\frac{1}{g_m}\frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{U_{\rm arc}i_{\rm arc}}{P_o} - 1\right) \tag{3-3}$$

 $g_c$ : The arc conductance,  $\tau_c$ : The arc time constant,  $i_{\rm arc}$ : the arc current,  $P_0$ : The cooling power constant,  $u_{\rm arc}$ : the arc voltage across the breaker

본 논문에서 제안하는 초전도 직류 차단시스템 내 arc modeling은 고전압 저전 류에 적합한 Mayr arc model을 사용하였다. Arc modeling에 적용한 아크 시간 정수는 0.3 µs, Arc cooling power는 50 MW를 적용하였다[17-18].

2) Commutation 회로

Commutation 회로는 Breaking 회로의 차단 동작을 보조한다. 기계식 차단기 가 차단 동작을 시작할 때 인위적인 영점을 유도하는 회로로서, L과 C로 구성된 다. 차단기의 접점이 개방된 순간 Commutation 회로에 전류가 도통되어 Oscillation current가 발생한다. Oscillation current가 발산 진동하여 차단기 회로 전류에 영점이 유도된다. 식 (3-4)는 차단기 접점사이 발생되는 아크전류이고, 식 (3-5)는 차단 시 발생된 주파수 이다. 본 Commutation 회로의 L 값은 300 mH, C는 30 µF 로 설정하였다.

$$I_s = I_o \left(1 + e^{-0.5L \frac{du_{arc}}{di_{MCB}}t} \sin\left(\sqrt{\frac{1}{LC}}t\right)\right) \tag{3-4}$$

$$w_c = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{LC}}} \tag{3-5}$$





4) Absorber 회로

마지막 Absorber circuit 은 ZnO(Gap less type) lightening Arrestor가 위치한 다. 차단기 내 잔류전류 및 전압을 피뢰기를 통해 방전한다. 피뢰기의 Arrester voltage rating 은 120 kV로 설정하였다.

앞에서 설계된 초전도 DC 차단기는 발산전류진동 방식을 이용해 차단동작을 수행한다. 앞에서 언급한 차단동작을 정리하면 다음과 같다[19-21].

- 1. DC 선로의 지락 사고에 의해 DC 전류가 증가하여 차단 트립 전류까지 도달한 다.
- Breaking 회로는 차단기가 개방될 때 아크부특성에 의해 내부 임피던스가 점 차적으로 증가하게 된다. Commutation회로에 흐르는 전류는 점차적으로 증가하 게 되고 커패시터와 인덕터에 의해 발산진동 전류가 발생한다. 고장전류의 진동 은 시간이 지나면서 진폭이 커지면서 Breaking 회로에서의 영점을 생성한다.
- 3. 생성된 영점으로 인해 Breaking 회로는 완전히 개방된다. 이후 잔류 전압 및 전류는 Absorber 회로의 피뢰기를 통해 방전된다.



## C. 초전도 DC 차단기 동작 특성

#### 1. 직류 차단 특성

그림 3-4는 초전도 직류 차단시스템의 실험 회로도이다. 차단과 동작 성능을 객관적으로 분석하기 위해 회로구성은 전원부, 선로 정수 그리고 부하저항으로 최소 설계하였다. 사고는 스위칭 동작으로 지락 사고를 모의하였다. 사고발생은 1 sec 이다. 차단기의 동작은 Signal time delay를 10 ms 정도 고려하였다. 사고 발 생 후 10 ms 이후에 차단기가 동작한다. 선로정수 및 내부 설계 조건은 표 3-1에 나타내었다.



그림. 3-4 초전도 직류 차단기 실험 회로도 Fig. 3-4 Experimental circuit of a superconducting DC circuit breaker



7]	ই	데이터	단위
DC S	ource	120	kV
선로	R0	2.5	Ω
정수	LO	0.01	mH
Arc	Box	Mayr arc model	_
ามค	L	20	mH
서게	С	20	μF
~ ~ 거	ZnO	80	kV
1 2 2	Load	37.2	Ω

Table 3-2 The specification of experimental circuit diagram

초전도체의 유무에 따라 두 번의 모의실험을 하였다. 첫 번째는 기계식 직류 차단기만을 설치하였을 때이다. 두 번째는 초전도 DC 차단기를 적용하였을 때이 다.

그림 3-5는 기계식 직류 차단기만 적용하였을 때 전압 전류 특성 곡선을 나타 낸다. 정상 시 2.68 kA 의 정상전류가 도통된다. 사고가 발생할 경우 초전도체가 없으므로 사고전류가 18.2 kA 까지 증가한다. 10 ms의 지연시간이 있은 후 2.010 sec 에 차단기의 동작이 시작된다. 이후 LC 회로의 공진작용으로 인해 약 28.4 ms 이내에 차단 동작을 수행한다.

마지막으로 그림 3-6은 초전도 직류 차단 시스템을 적용하였을 경우의 전압 전 류 특성 곡선이다. 초전도 직류 차단시스템은 두 가지 메커니즘을 가지고 있다. 초전도체의 한류 작용과 이후 차단기의 차단 작용을 수행한다. 정상 시 정상전류 가 도통되다가 1 sec에 사고가 발생한다. 이때 초전도체가 Quench 되어 사고전류 를 제한한다. 이로 인해 13.53 kA 로 사고전류가 제한된 것을 확인할 수 있다. 10 msec이후 기계식 직류 차단기가 동작한다. 차단기 접점이 열림과 동시에 LC회로 에서 발생하는 발산 진동 전류로 인해 영점이 유도된다. 인위적인 영점생성으로 약 18.3 ms 이내에 차단 동작을 수행하였다.

모의 회로가 이상적인 회로이며 변수를 최소화 시킨 회로를 사용하였다. 초전도



직류 차단시스템을 적용하였을 때 기계식 직류 차단기만 적용하였을 때 보다 약 10.1 ms 빠르게 차단되었다. 또한 기계식 직류 차단기 양단에 발생하는 전압이 현저하게 줄어드는 것을 확인하였다. 사고전류도 초전도체에 의해 제한되어 발산 진동전류의 진폭과 발생시간 또한 단축된 것을 확인하였다. 이에 따라 초전도 DC 차단기를 사용함으로써 더 빠르고 안정적인 차단동작을 수행할 수 있다고 판단된 다.



그림. 3-5 기계식 직류 차단기 단독 적용 시 과도특성

Fig. 3-5 Transient behavior of a mechanical DC circuit breaker









Fig. 3-6 Transient behavior of a superconducting DC circuit breaker





# Ⅳ. PV 시스템에 적용된 초전도 DC 차단기 동작특성

#### A. PV 분산전원 시스템 설계

분산전원(DG : Distributed generation) 이란 전력수요자 인근지역에서 설치 가 능한 소규모 발전설비를 이용하여 수요자에게 필요한 전력을 공급하거나 이미 사 용 중인 중앙 집중식 전력공급 체계의 단점을 보완하기 위한 용도로 적용한 발전 방식이다. 지역적이며 소규모 발전을 위해 대부분의 분산전원 발전은 신재생에너 지를 사용한다[22].

표 4-1은 신재생 에너지원 별 발전소 현황이다. 분산전원에 적용되는 신재생에 너지는 크게 태양광, 풍력, 수력, 연료전지, 바이오, 폐기물이 대표적이다. 이중 태 양광, 풍력, 연료전지를 이용한 발전이 계통과 연계하기에 용이하다. 세 가지 에너 지원의 발전소 수와 용량을 비교해 보았을 때, 태양광이 19,016개소, 3200 MW로 가장 높았으며, 다음으로 발전소 53개, 용량 802 MW를 지닌 풍력, 마지막은 29개 소의 발전소를 지니고 171 MW의 용량을 지닌 연료전지이다[23].

에너지 원별	발전소수 (개소)	용량(MW)
태양광	17,996	2,982
풍력	52	788
수력	131	759
연료전지	29	171
바이오	81	1,521
폐기물	33	799
계	18,322	7,022

Table 4-1. Current status of power plants for energy source





가장 많은 발전소 수와 용량을 지닌 태양광 에너지원은 연평균 지구에 입사되는 태양광 에너지가 연간 세계 에너지 소비량의 약 10,000배 이다. 태양광 에너지 원과 계통을 연계할 경우, 약 1,050 kWh의 전력량이 입력되면 모듈 및 스트링에 서 발생하는 DC 손실, 인버터에서 발생하는 전력변환 손실 등 약 28 %의 손실을 제외하면 최종적으로 756 kWh의 전력량을 얻을 수 있다.

그러므로 본 논문에서는 전력계통과 연계한 분산전원으로 태양광 발전을 선정 하였다.

#### 1. PV 분산전원 시스템 설계

1) PV 시스템 구성

태양광발전을 이용한 시스템은 사용 장소, 시스템의 크기, 입지조건, 부하의 종 류 등 여러 조건에 따라 다르게 설계되지만 기본적인 구성은 동일하다. 태양광 시스템의 메인인 태양 전지 어레이에 발생되는 직류 전력은 일사량, 기후조건 등 에 따라 변동량이 크기 때문에 전원과 부하 사이의 조화를 고려해야 한다. 태양 광 시스템은 크게 특수 전원용으로 사용되는 독립형과 사용 전력계통과 연계하여 사용하는 계통연계형으로 구분된다. 또한 용도에 따라서는 주택, 낙도전원, 대규모 전력공급 등으로 분류 가능하다.

본 논문에서는 계통연계형 태양광 시스템을 사용하였다. 계통연계형 태양광 시 스템은 일사량과 온도를 계측하여 시간별 전압, 전류 및 전력을 출력하는 태양광 어레이를 사용한다. 이후 항상 최대 전력 점에서 동작하여 출력전압이 일정하게 유지되게 하는 MPPT software를 이용하고, DC-DC컨버터, 그리고 DC를 AC로 변환하는 인버터 마지막으로 변환된 전력이 전송되어 안정적으로 소비되어지는 계통을 구성하였다.

계통연계형 태양광 발전시스템은 EMTDC/PSCAD 계통해석프로그램을 이용하 여 설계한 후 분석하였다.

2) 태양광어레이 설계

그림 4-1은 태양전지의 등가회로도이다. 태양으로부터 에너지를 흡수하는 전원 과 다이오드, 저항(R<sub>sr</sub>)으로 이루어진다. 회로에 병렬로 R<sub>sh</sub>가 존재하지만 이는 수



십 kΩ이므로 해당 선로는 개방 상태로 간주한다.

태양전지 어레이에서 출력되는 전류 값은 다이오드의 비선형 특성을 고려해서 산출하면 식 (4-2)과 같고, 부하 전압은 식 (4-3)과 같다. 태양전지의 일사량과 온 도를 입력받아 출력되는 전류 값은 (4-4)와 같이 산출되고 기준온도에서의 다이 오드 포화전류 값과 다이오드 포화전류의 온도, 밴드 에너지 갭의 온도에 대한 특성 식은 식 (4-1) ~ 식 (4-7)과 같다.



그림. 4-1 태양전지 등가회로도

Fig. 4-1 Equivalent circuit diagram of solar cell

$$I = I_{sc} - I_d \ [A] \tag{4-1}$$

 $I_{sc}$ : 태양전지 단락전류 [A],  $I_d$ : 다이오드 전류 [A]

$$I = I_{sc} - I_0 \left( \exp\left[\frac{V + IR_{sr}}{nV_T}\right] - 1 \right) [A]$$
(4-2)

*I*<sub>0</sub>: 다이오드 포화전류 [A], *n*: 다이오드 이상 정수, *V<sub>T</sub>*:열전위차 [V]
 *V*: 부하전압 [V], *R<sub>sr</sub>*: 직렬저항 [Ω]





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

$$\tag{4-3}$$

$$I_{sc} = I_{sc(ref)} \left(\frac{S}{1000}\right) + J(T - T_{ref}) [A]$$
(4-4)

 $I_{sc(ref)}$  : 기준온도에서 태양전지 단락전류 [A], S : 일사량 [W/m<sup>2</sup>], J : 단락전류 온도계수 [A/K], T : 절대온도 [K],  $T_{ref}$  : 기준온도 [K]

$$I_{0(ref)} = I_{sc(ref)} \frac{1}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{nV_T}\right) - 1} \approx I_{sc(ref)} \cdot \exp\left(-\frac{V_{oc}}{nV_T}\right) [A]$$
(4-5)

#### *V<sub>oc</sub>* : 태양전지 개방전압 [V]

$$I_0 = A T^{\gamma} \exp\left(\frac{-E_g}{nkT}\right) [A] \tag{4-6}$$

$$E_g = 1.16 - 7.02 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T - 1108} \left[ e V \right] \tag{4-7}$$

태양전지 어레이는 그림 4-2와 같이 셀이 모듈을 이루고, 이를 연결하여 제작 한다.

태양전지 어레이의 최소 단위는 Cell이다. 전기를 일으키는 최소 단위인 1 cell 은 출력량이 너무 작아 여러 개를 연결시킨 모듈로 사용한다. 모듈은 전기를 출 력할 수 있는 최소 단위로써, 설계 및 사용하고자 하는 시스템에 적합하게 여러

- 27 -

Collection @ chosun

개의 모듈을 직·병렬로 연결하여 어레이를 형성하여 사용한다.

태양전지 어레이의 설계 값은 식 (4-8)~(4-14)에서 산출된 값을 기반으로 설계 하였고 태양전지의 변수 및 데이터는 표 4-1에 나타내었다.

태양전지의 단락전류는 520 A이고, 다이오드 포화전류는 1E<sup>-9</sup>, 기준온도에서 태양전지의 단락전류는 2.5 A, 셀 온도는 50° 직렬저항은 0.02 Ω, 다이오드 이상 정수는 1.5, 온도의존인자는 동일하게 3, 밴드 에너지 갭은 1.103 eV으로 설정하 였다. 태양전지 어레이는 20개의 셀로 구성된 모듈 20개를 직렬로 연결하고 100 개의 모듈을 병렬로 연결하여 설계하였고, 일사량은 1000 W/m<sup>2</sup>, 포화전류 온도 계수는 0.001 A/K, 기준온도는 25 ℃를 설정하였다[24-25].



태양전지어레이개방전압
$$(V) = N V[V]$$
 (4-10)

(4 - 8)

(4 - 9)

태양전지어레이단락 전압
$$(V_{oca}) = N_s V_{oc} [V]$$
 (4-11)





태양전지 어레이 직렬 저항 
$$(R_{sa}) = \left(\frac{N_s}{N_p}\right) \times R[\Omega]$$
 (4-12)

$$\frac{I_a}{N_p} = \frac{I_{sca}}{N_p} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{\frac{V_a}{N_s} + \frac{I_a}{N_p} \cdot \frac{N_p}{N_s} \cdot R_{sa}}{nV_T}\right) - 1 \right]$$
(4-13)

$$I_a = I_{sca} - N_p I_0 \left[ \exp \left( \frac{V_a + I_a R_{sa}}{n N_s V_T} \right) - 1 \right] [A]$$

$$(4-14)$$

3) 제어 및 변환부 설계

태양광의 최대 출력량을 산출하기 위해 MPPT(Maximum power point tracking) 제어가 반드시 필요하다.

MPPT 란 하나 혹은 여러 개의 태양 발전 모듈이 최대의 순시전력을 얻도록 인버터 출력전류를 조절하는 기술이다. 태양광 발전셀은 일사량(W/m2) 온도와 전체 저항 등에 복잡한 연관성이 존재한다. 이를 I-V 곡선으로 나타나는 비선형 출력 효율을 나타낸다. 이 시스템은 태양열 소자의 출력과 적절한 부하를 얻어 최대 전력을 만들도록 하는 것이 그 목적이다.

대표적인 MPPT 방법으로는 세 가지 방법이 있다. 첫 번째 직접제어 방식이다. 이는 부하를 직접 프로그램적으로 조달할 수 있도록 구성된 인버터 회로의 부하 제어 입력을 MPOP가 변화하는 파라미터인 온도나 일사량을 입력하여 가변시켜 최대 전력 전달점을 찾아낸다. 예를 들어 온도 보상의 경우 상온에서의 최대 전 력 전달점에 부하를 맞추어 놓고 온도가 변화하는 양에 비례하여 제어한다. 구성 이 가장 간단하며 외부의 상황에 대하여 별다른 Processing 동작 없이 즉각적이 대응이 가능하지만 성능은 가장 떨어지는 편이다.

두 번째 Perturb & Observe (P&O) 방법이다. 이 방법은 태양전지 어레이의 출 력전압을 주기적으로 증감하며 변화를 준다. 또한 최대 전력 동작점을 이전의 출 력전력과 현재의 출력전력을 비교를 통하여 찾는다. 이 기법은 알고리즘이 간단 하여 다양하게 사용된다. 또한 태양전지 어레이에 발생하는 손실이 적은 편이다. 이는 일사량이 서서히 변화하는 일사량에 따라 최대 전력점이 안정되기 때문이





다. 하지만 일사량이 급격하게 변화하는 경우엔 태양전지 어레이 출력전압이 급 격하게 MPOP에서의 전압과 일치하지 않게 된다. 이에 P&O방식의 단점으로는 최대전력 추종제어가 정확하지 않다는 점이 있다.

마지막으로 Incremental Conductance (IncCond) 기법이 존재한다. 태양전지 출 력의 컨덕턴스와 증분 컨던턱스를 비교하여 최대 전력 동작점을 추종하는 방법이 다. 장점으로는 출력전력이 다른 제어기법들과는 다르게 매우 안정적이다. 또한 일사량 급변 시 태양전지 어레이 출력전압이 항상 최대 전력 동작점 전압에 추종 하도록 함으로써 최대전력추종제어에서 벗어나지 않는 장점이 있다. 또한 일사량 급변 시 태양전지 어레이 출력전력이 항상 최대 전력 동작점 전압에 추종하도록 함으로써 최대 전력추종제어에서 벗어나지 않는 장점이 있다. 하지만 단점으로는 나눗셈 연산이 필요하며 이에 따른 계산량 증가 및 변환시간이 길다. 이에 빠른 연산처리를 담당하는 프로세서가 필요하다.

본 태양광 발전 시스템은 IncCond 기법을 사용하였다. 그러므로 본 연구팀은 태양 전지 어레이의 출력 컨덕턴스와 증분 컨덕턴스를 비교하여 최대 전력점을 추종하는 그림 4-3과 같은 IncCond 제어방식을 선택하였다. 이는 최대 출력점 도 달 시 태양 전지 어레이의 출력 전력 특성이 안정적인 장점이 있다. 또한, 이 제 어 방식은 앞에서 언급한 P&O 제어법의 환경조건이 급변할 경우 출력 변동의 단 점을 보완한 방식이다.

MPPT IncCond 기법으로 태양 전지 어레이에서 연결된 부하를 컨버터가 제어 하여 최대 전력점(Pmax) 근처에서 동작하도록 제어한다. DC-DC 컨버터는 Insulated Gate Bipolar Transistor(IGBT), 다이오드, 인덕터와 커패시터로 구성된 다. 인덕턴스 크기는 10 mH로 설정하였고, 전단부에 적용되는 커패시터 C1은 10000 μF, 후단부에 적용되는 커패시터 C2를 80000 μF으로 설정하였다[26-27].











#### 2. PV 분산전원형 시스템 동작 및 과도특성

그림 4-4는 태양광 분산전원을 활용한 MVDC 배전망 회로도이다. Boost converter에 연결된 태양광 Cell 모듈을 수십개를 연결하였다. 이후 연결된 어레 이를 수십개를 연결하여 거대한 DC Distributed Generation(DG)를 구축하였다. DC DG 가 MVDC load에 전력을 공급하고 잉여 전력은 AC 계통에 연결된다. 하지만 MVDC load에서 사용하는 부하량이 급증하여 분산전원으로 전력공급이 불 가능할 경우, AC계통을 통해 전력을 수급하다. 이 과정에서 DC 선로에 차단기가 필요하다. 이 지점에 초전도 DC 차단기를 적용하여 과도특성을 확인하였다. 출력 전압을 13.8 kV로 최적화하여 최대 출력 점에서 동작 가능하도록 제어하였다. 이 후 0.3 sec에 Booster converter의 변환동작으로 인해 전류(IpvHV)가 증가되었고, 증가된 전류(IpvHV)와 인버터 입력부 양단전압(VDC2)을 식 (4-15)~식 (4-16)과 같이 제어 출력함으로써 그림 4-5와 같이 태양전지 어레이에서 2.3 kA의 출력 전 류 발생한다. 그림 4-5는 정상 시 태양광 분산전원시스템의 특성 그래프를 나타 낸다[28].



그림. 4-4 태양광 분산전원을 활용한 HVDC 배전망 회로도 Fig. 4-4 Diagram of HVDC distribution applying DC distributed generation

Collection @ chosun



$$Q(t) = Q(t - \Delta t)e^{\frac{-\Delta t}{T}} + X(t)\left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{T}}\right)$$
(4-15)

$$Y(t) = G(t)Q(t) \tag{4-16}$$

Y(t) = 출력 신호, X(t) = 입력신호, G(t) = 이득인자, T = 시정수

태양광 분산전원 시스템 내에 과도 특성을 확인하기 위하여 모의사고를 발생시 켜 그 특성을 확인해 보았다. 사고는 단락사고를 모의 하였다. 사고는 1 sec에 발 생되도록 하였다 사고주기는 0.5 sec를 설정하였다. 그 외의 설계조건은 앞에서 설계한 조건과 동일하게 적용하였다.



그림. 4-5 정상시 PV 분산전원 시스템의 과도특성 Fig. 4-5 Transient characteristics of PV system in the steady state

Collection @ chosun





그림. 4-6 사고발생시 PV 분산전원 시스템의 과도특성 Fig. 4-6 Transient characteristics of PV system in the fault state

그림4-6는 단락 사고시 태양광 분산전원 시스템 특성 그래프이다. 정상시 2.3 kA의 정상전류가 도통된다. 발생하는 전압은 약 110 kV 이다. 1 sec에 단락사고 를 모의하였을 때 사고전류는 최대 20.8 kA 까지 발생하는 것을 볼 수 있다. 초전도 DC 차단기의 분산전원 내에 동작특성 및 신뢰성을 판단하기 위하여 이

와 같이 설계된 태양광 분산전원 시스템에 적용하여 특성을 확인해 보았다.



#### B. 초전도 DC 차단기 동작 실험

#### 1. PV 분산전원 시스템 내 초전도 DC 차단기 특성 분석

초전도 DC 차단기의 동작 신뢰성을 확보하기 위해 태양광 분산전원시스템에 적용하여 차단특성을 확인하였다. 초전도 DC 차단기의 직류 차단 우수성을 입증 하고자 기계식 차단기가 단독으로 연결 하였을 경우와 비교 하였다. 적용 위치와 초전도 DC 차단기 설계조건은 앞에서 언급한 값과 동일하게 적용하였다. 기계식 차단기의 차단동작은 기계식 접점임을 고려해 사고 발생의 약 10 ms 이후 동작 하도록 계전시간을 설정하였다. 태양광 분산전원 시스템 용량은 약 200 MW 급 태양광 시스템이다. 1 sec에 단락 사고를 모의 하였다.

그림 4-7은 분산전원 PV시스템에 기계식 차단기를 적용하였을 때의 선로 전압, 전류 그리고 부하 측 전류를 나타낸 그래프이다. 전체적인 분산전원 PV 시스템 내의 과도 특성을 나타내기 위하여 전체 시간을 2 sec 로 설정하였다. 그림 4-8 은 분산전원 PV 시스템 내 차단기의 특성 곡선이다. 기계식 직류 차단기의 차단 동작을 확인하기 위하여 시간 설정을 60 ms로 설정하였다. 정상시 2.3 kA의 정상 전류가 도통된다. 이때 걸리는 전압은 약 110 kV 이다. 1 sec에 사고발생시 약 20.8 kA 의 사고전류가 발생하였다. 기계식 차단기는 계전기의 지연시간을 고려 하여 10 ms 이후 동작하였다. Breaking 회로에 차단기 접점이 개방됨과 동시에 Commutation 회로의 LC 소자로 인한 진동전류로 전류 영점을 생성하여 약 40 ms 이후에 차단이 완료되었다. 사고전류는 그림 4-8의 2번과 같이 30 ms 이내에 전류 차단이 되었다. 하지만 그림 4-8의 1번 차단기 양단의 전압을 나타내는 그 래프를 보면 차단기 양단에 걸리는 전압이 40 ms 까지 감쇄진동 파형을 나타내 었다. 차단기의 용량에 비하여 큰 사고 전류가 발생하여 잔류 전류를 완전히 방 전시키는데 약 40ms 이상의 시간이 소요되는 것을 확인하였다.

그림 4-9는 분산전원 PV 시스템 내 초전도 DC 차단기의 특성 곡선이다. 그림 4-10은 분산전원 PV시스템에 초전도 DC 차단기를 적용하였을 때 선로 전압, 전 류 그리고 부하 측 전류를 나타낸 그래프이다. 위 두 개의 그래프는 앞선 그림 4-7, 4-8과 동일한 시간 조건을 사용하였다. 정상 시엔 동일하게 2.3 kA의 정상 전류가 도통된다. 1 sec에 사고가 발생하였을 경우, 초전도체가 사고 전류에 의하





여 quench된다. 이때 사고전류는 15.2 kA로 제한되었다. 10 ms 이후 기계식 차단 기가 제한된 전류를 차단한다. 위에서 언급했던 차단동작으로 약 22.4 ms에 차단 동작을 완료하였다. 초전도체로 인하여 한류된 사고전류를 차단함으로써 기계식 차단기를 사용하였을 때보다 17.6 ms 빠르게 차단동작을 수행하였다. 이를 사용 할 경우 더 큰 그리드에 적용하거나 큰 사고전류가 발생시 초전도체로 인하여 사 고범위 및 사고 용량을 확대 할 수 있을 것이라 판단된다.













그림 4-11은 기계식 직류 차단기에 걸리는 전력 부담을 산출한 그래프이다. 전 력부담이란 차단기에 걸리는 전압과 사고 전류의 양으로 산출을 하여 차단기에 걸리는 에너지의 양을 나타낸다. 차단기에 큰 용량의 부담이 걸릴 경우 이는 차 단동작의 지연 및 실패 그리고 차단기의 수명을 단축시킬 수 있다. 전력 부담 관 련 된 식은 식 (4-17)과 같다. 기계식 차단기만 적용하였을 경우 큰 사고 전류로 인하여 약 36.59 MVA의 전력 부담이 발생한다. 그림 4-12는 초전도 DC 차단기 를 사용하였을 경우 초전도체와 기계식 직류 차단기에 가해지는 전력부담 곡선이 다. 사고 발생시, 초전도체의 한류 작용으로 인하여 보다 낮은 전류를 제한함으로 차단기에 약 22.0 MVA의 전력부담이 발생하였다. 그리고 이때, 초전도체가 부담 하는 용량은 약 3.20 MVA 이다. 이는 기계식 차단기만을 적용하였을 경우에 비





해 약 40 %의 적은 전력이 부담됨을 의미한다. 또한 초전도체에 부담되는 전력을 시뮬레이션으로 산출이 가능하므로 실제 실험에 앞서 초전도체 용량 선정에 대한 데이터 확보를 할 수 있었다.

$$Power\_Burden = \oint_{t_0} E_S I_S dt \tag{4-17}$$



 $E_s$ : 극간 전압,  $I_s$ : 사고전류,  $t_0$ : 동작시간









그림. 4-10 초전도 DC 차단기를 적용한 PV 분산전원 시스템 내 차단기 특성 Fig. 4-10 Characteristics of superconducting DC circuit breaker in PV system







그림. 4-11 기계식 직류 차단기 적용시 차단기에 가해진 전력부담 Fig. 4-11 Power burden in MCCB



그림. 4-12 초전도 DC 차단기 적용시 초전도체와 직류차단기에 부담된 전력부담 Fig. 4-12 Power burden in mechanical DC circuit breaker and superconductivity when superconducting DC circuit breaker applied





#### C. 고찰

분산전원 보호를 위한 차단기술에는 크게 2가지 기술이 필요하다. 대부분의 분 산전원은 직류로 발전되기에 직류 차단에 관한 기술이 필요하다. 그 다음으로는 분산전원이 계통에 연계 되어 사용될 것을 감안하고 사고전류의 중첩을 적용하면 빠른 차단 능력과 계통에 용이하게 연계 될 수 있는 간단한 구조가 필요하다. 본 논문에서는 분산전원 적용을 위하여 초전도 DC 차단기를 제안하였다. 그리고 분산전원 내 동작 특성을 확인하기 위하여 태양광 분산전원 시스템을 적용하여 과도특성을 확인하였다.

그 결과, 초전도 DC 차단기의 한류작용을 통하여 기계식 차단기만을 적용하였 을 때보다 약 17 ms 이상 빠른 차단 속도를 확인하였다. 또한 차단기에 걸리는 전력부담 또한 약 40 % 이상 감소하는 것을 확인하였다. 이에 분산전원 시스템 내에서 안정적으로 차단동작을 수행하는 것으로 판단된다.





Collection @ chosun

## V. 결 론

본 논문은 분산전원에 적용을 위한 차단기술에 관한 연구로 초전도 DC 차단 기를 제안하였다. 초전도 DC 차단기를 설계하고 이를 분산전원에 적용하기 위하 여 태양광 분산전원 시스템을 설계하였다. 그리고 태양광 분산전원 시스템 내 기 계식 직류 차단기와 초전도 DC 차단기의 과도특성을 확인하였다. 그 결과 초전도 DC 차단기의 차단속도가 약 17 ms 이상 빠르게 차단되며, 차단기에 걸리는 전력 부담 또한 40 %이상 감소되는 것을 확인할 수 있었다.

분산전원을 적용하여 안정적인 전력계통을 구성하기 위해서는 간단한 설치, 사 고 파급에 따른 큰 사고 전류에 대한 안정적인 차단 및 고속도 차단 능력이 필요 하다. 초전도 DC 차단기는 한류부와 차단부로 간단한 구조를 지니며, 쉽게 계통 에 적용하기에 용이하다고 판단된다. 또한 초전도체의 한류작용을 통해 사고전류 가 1차적으로 제한된 전류를 차단함으로써 보다 빠르게 차단동작을 수행하며, 사 고 전류가 낮아짐을 고려하여 차단기에 걸리는 부담 또한 현저히 감소되는 장점 이 있다. 마지막으로 커져가는 직류 그리드에 적용하기에 앞서 차단기의 용량보 다 그리드가 커질 경우에도 사고범위 및 보호범위 확대가 가능하므로 더 큰 계통 에도 적용될 수 있을 것이라 판단된다.

태양광 발전 이외에 풍력 발전, 폐기물 발전 등 다양한 분산전원 적용에 관한 연구와 계통과 계통 연계에 따른 다양한 변수를 고려한 추가적인 연구가 필요할 것이라 사료된다.



# 참 고 문 헌

- [1] Frede Blaabjerg, Zhe Chen, Soeren Baekhoeh Kjaer, "Power electronics as efficient interface n dispersed power generation system", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.19, No.5, Sep 2004.
- [2] W R Leon Garcia, A Bertinato, P Tixador, B Raison, B Luscan, "Full-selective protection strategy for MTDC grids based on R-type superconducting FCLs and mechanical DC circuit breaker", Renewable Power Generation(RPG) 2016, 5th IeT international Conference on, 10.1049/cp.2016.0564
- [3] Chinmay Jain, Bhim Singh, "Solar energy used for grid connection : A detailed assessment including frequency response and algorithm comparison for energy conversion system", IEEE Industry Applications Magazine, Vol23, Issue 2, 2017.
- [4] Shan Jiang, Report-PSCAD component Breaker Arc. Canada : Manitoba HVDC Research Centre, 2013.
- [5] 에너지경제연구원, 에너지수급통계, 2016.
- [6] 한국은행, 한국의 국민계정, 2016.
- [7] 온실가스종합정보센터, 2016년 국가 온실가스 인벤토리 보고서, 2016.
- [8] 한국에너지공단, 신재생에너지보급실적조사, 2015.
- [9] Frede Blaabjerg, Zhe Chen, Soeren Baekhoeh Kjaer, "Power electronics as efficient interface n dispersed power generation system", IEEE Transactions





on Industrial Electronics, Vol.19, No.5, Sep 2004.

- [10] Frede Blaabjerg, Zhe Chen, Soeren Baekhoeh Kjaer, "Power electronics as efficient interface n dispersed power generation system", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.19, No.5, Sep 2004.
- [11] 이성민, 직류배전에 적용하기 위한 회로차단기에 관한 연구, 공주대학교 석사 학위논문, 2013.
- [12] W R Leon Garcia, A Bertinato, P Tixador, B Raison, B Luscan, "Full-selective protection strategy for MTDC grids based on R-type superconducting FCLs and mechanical DC circuit breaker", Renewable Power Generation(RPG) 2016, 5th IeT international Conference on, 10.1049/cp.2016.0564.
- [13] Bin Xiang, Zhiyuan Liu, Chuanchuan Wang, Zhenle Nan, Yingsan Geon, Jianhua Wang, Satoru Yanabu, "DC interrupting with self-excited oscillation based on superconducting current limiting technology", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol PP, Issue 99, JUN 2017.
- [14] Ran Ou, Xian-Yong Xiao, Zhi-Ce Zou, Yi Zhang, and Yu-Hong Wang, "Cooperative control of superconductor and reactive power for improving the transient voltage stability of grid- connected wind farm with DFIGs", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 6, No.7, Oct 2016.
- [15] Feng Zheng, Changhong Deng, Lei Chen, Shichun Li, Yang Liu, Yuxiang Liao, "Transient Performance Improvement of Microgrid by a Resistive Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, VOL.25, Jan 2015.



- [16] Zheng Ganhao, "Study on DC circuit Breaker", Intelligent Systems Design and Engineering Applications(ISDEA), 2017 Fifth International Conference on, 10.1109/ISDEA.2014.208
- [17] N.S Mahajan, K.R. Patil, S.M. Shembekar, "Electric Arc model for High Voltage Circuit Breakers Based on MATLAB/SIMULINK", Interantional Journal of Science, Spritualty, Business and Technology (IJSSBT), Vol. 1, No.2, FEB 2013.
- [18] LLing Yuan, Lin Sun, Huaren Wu, "Simulation of Fault Are Using Conventional arc model", Energy and Power Engineering. Vol.5, 2013.
- [19] Ataollah Mokhberdoran, Adriano Carvalho, Helder Leite and NunoSilva "A review on HVDC circuit breakers," Renewable Power Generation Conference (RPG 2014), 10.1049/cp, 2014.
- [20] Jong-Geon Lee, Umer Amir Khan, Ho-Yun Lee, Bang-Wook Lee, "Impact of SFCL on the four types of HVDC circuit breakers by simulations", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol 26, Issue 4, JUN 2016.
- [21] Bin Xiang Zhiyuan, Liu Yingsan Geng, Satoru Yanabu, "DC Circuit Breaker Using Superconductor for Current Limiting," IEEE transactions on applied superconductivity, vol.25 no.2, 2015.
- [22] Ryan C. Campbell, Degree Thesis, "Transient Modeling and Analysis of Grid-connected Photovoltaic Systems", 2006.
- [23] 하광호, 태양광 및 풍력복합발전시스템의 모델링 및 운전 방식에 관한 연구, 성 균관대학교 석사학위논문, 2009.





[24] KPX, 제주 전력계통 해석을 위한 Matlab 기반 순시치 해석용 모델 개발, 2015.

- [25] 전인수, 학위논문, "A Study on the Simulation Model of PV Generation System for its Application to Real Power System", 2008.
- [26] 류권종, 김기현, 정영석, 김영석, "MPPT 제어 알고리즘 고찰 및 효율시험 평가 법", 전기학회논문지, pp. 164-172, 2001.
- [27] 정상혁, 최세완, "계통연계형 인버터의 LCL필터 최적 설계기법", The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 18, No. 1, 2013.
- [28] Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems, IEEE Std. 1547.2–2008.

