



2012年 **2**月 博士學位論文

전력계통용 자속결합형 한류기의 특성 연구

朝鮮大學校大學院

電氣工學科

高晟弼

전력계통용 자속결합형 한류기의 특성 연구

A Study on Operating Characteristics of Flux-Coupling Type Current Limiter for Power System

2012年 2月 24日

朝鮮大學校大學院

電氣工學科

高晟弼

전력계통용 자속결합형 한류기의 특성 연구

指導教授 曺 錦 培

이 論文을 工學 博士學位申請 論文으로 提出함.

2011年 10月

朝鮮大學校大學院

電氣工學科

高晟弼

高晟弼의 博士學位 論文을 認准함.

委員	長	朝鮮大學校	教授 _	<u>白亨來</u>	印
委	員	朝 鮮 大 學 校	教授 _	李愚宣 6	印
委	員	朝 鮮 大 學 校	教授 _	崔孝祥	訂
委	員	瑞 永 大 學 校	教授 _	林亮壽 [Ц:
委	員	朝 鮮 大 學 校	教授 _	<u> 唐 錦 培</u>	印

2011年 12月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT		viii
----------	--	------

I.서 론1
A. 연구 배경
B. 초전도 한류기 개발 동향4
C. 연구 목표 및 내용6
Ⅱ. 이론적 배경8
A. 초전도 한류기 특징8
1. 초전도 원리
2. 초전도 한류기 동작원리
Ⅲ. 실험 구성 및 방법
A. 실험장치 제작 및 구성15
1. 초전도 한류 소자
1) 초전도 한류 소자
2) 임계 전류 측정
2. 실험 장치의 구성
1) 삼상 변압기의 설계

2) 부하 설비의 설계 및 제작
3. 측정 및 분석 방법
Ⅳ. 초전도 한류기 동작 특성
A. 초전도 한류기 삼상 적용 실험 회로도
B. 초전도 한류기 전압 및 전류 특성
1. 1선 지락사고
1) 코일 권수에 따른 전류 특성
2) 코일 권수에 따른 전압 특성35
2. 2선 지락사고
1) 코일 권수에 따른 전류 특성
2) 코일 권수에 따른 전압 특성43
3. 3선 지락사고45
1) 코일 권수에 따른 전류 특성45
2) 코일 권수에 따른 전압 특성
4. 인가전압에 따른 사고전류 제한 특성 분석
C. 초전도 한류기의 전력 부담 특성
1. 인가전압에 따른 초전도 한류소자 전력부담
2. 변압기 권수에 따른 초전도 한류 소자 전력곡선61
1) 1선 지락사고

2) 2선 지락사고64
3) 3선 지락사고67
D. 초전도 한류기의 퀜치시간 및 회복시간 비교70
1. 변압기 권수에 따른 퀜치 시간
2. 사고 유형별 초전도 한류기 회복시간 비교71
E. 초전도 한류기의 저항곡선 추이 및 재폐로 동작특성…78
1. 인가전압 및 사고유형에 따른 저항곡선
1) 1선 지락사고
2) 2선 지락사고81
3) 3선 지락사고83
2. 재폐로 동작 특성85
F. 초전도 한류기의 신뢰성 평가91
1. 건전 상의 초전도 소자 제거 후 동작특성 분석92
1) 1선 지락사고
2) 2선 지락사고94
V. 결 론 ······96

참고문헌		9	9
------	--	---	---

List of Tables

Table	3-1	Parameters of a superconducting element15
Table	3-2	Inductance values of three-phase transformer21
Table	3-3	Experimental design parameters of experiment25
Table	3-4	Power burden of superconducting element
		(a single line-to-ground fault)61
Table	3-5	Power burden of superconducting element
		(a double line-to-ground fault)62
Table	3-6	Power burden of superconducting element
		(a triple line-to-ground fault)66
Table	3-7	Recovery time of superconducting element
Table	3-8	Compare the recovery time of superconducting element

List of Figures

Fig.	2 - 1	Critical surface of a superconducting element
Fig.	2-2	Quenching operation of a superconducting element
Fig.	2-3	Fault current limitation characteristics of a SFCL10
Fig.	2-4	Experimental circuit of single-phase SFCL
Fig.	2-5	The concept diagram of flux-coupling type SFCL
Fig.	3-1	Superconducting elements
Fig.	3-2	Schematic diagram of experimental device measuring
		the critical current value of superconducting elements17
Fig.	3-3	Critical current curves of superconducting elements
Fig.	3-4	Experimental devices of a superconducting fault current limiter19
Fig.	3-5	Manufactured three-phase transformer20
Fig.	3-6	Power supply22
Fig.	3-7	SCR switching device 23
Fig.	3-8	Phase controller and fault generation device23
Fig.	3-9	Load modules of each phase24
Fig.	3-10) shunt reactors24
Fig.	4-1	Experimental circuit diagram of the three-phase SFCL
Fig.	4-2	Fault current curves of the SFCL
Fig.	4-3	Current curves of superconducting elements
Fig.	4-4	Current curves in a secondary coils in s transformer
Fig.	4-5	Voltage of superconducting elements
Fig.	4-6	Fault current curves of the SFCL
Fig.	4-7	Current curves of superconducting elements 40
Fig.	4-8	Current curves in a secondary coils of a transformer

Fig. 4-9 Voltage of superconducting elements44
Fig. 4-10 Fault current curves of the SFCL
Fig. 4-11 Current curves of superconducting elements
Fig. 4-12 Current curves in a secondary coils of a transformer
Fig. 4-13 Voltage curves of superconducting elements
Fig. 4-14 Fault current curves of the SFCL according to applied voltage
(A single line-to-ground fault)55
Fig. 4-15 Fault current curves of the SFCL according to applied voltage
(A double line-to-ground fault)56
Fig. 4-16 Fault current curves of the SFCL according to applied voltage
(A triple line-to-ground fault)57
Fig. 4-17 Power consumption of superconducting elements according to
increase of the applied voltage60
Fig. 4-18 Power consumption of superconducting elements according to
increase of turn number of primary coil
(A single line-to-ground fault)63
Fig. 4-19 Power consumption of superconducting elements according to
increase of turn number of primary coil
(A double line-to-ground fault)66
Fig. 4-20 Power consumption of superconducting elements according to
increase of turn number of primary coil
(A triple line-to-ground fault)69
Fig. 4-21 Quench time of superconducting elements according to turn ratio 70
Fig. 4-22 Comparison of Recovery time of superconducting elements
(Turn ratio : 2:1, applied voltage : 200[V])73
Fig. 4-23 Comparison of Recovery time of superconducting elements
(Turn ratio : 3:1, applied voltage : 200[V])75

Fig. 4-24 Comparison of Recovery time of superconducting elements
(Turn ratio : 4:1, applied voltage : 200[V])77
Fig. 4-25 Resistance curves of superconducting elements in each phase
(A single line-to-ground fault, applied voltage : 200[V])80
Fig. 4-26 Resistance curves of superconducting elements in each phase
(A double line-to-ground fault, applied voltage : 200[V])82
Fig. 4-27 Resistance curves of superconducting elements in each phase
(A triple line-to-ground fault, applied voltage : 200[V])
Fig. 4-28 Reclosing operation sequence of the SFCL86
Fig. 4-29 Reclosing operation characteristics of the SFCL
(Turn ratio : 2:1, applied voltage : 200[V])88
Fig. 4-30 Fault current curves of the SFCL after removing of the sound phase
(A single line-to-ground fault, applied voltage : 200[V])
Fig. 4-31 Fault current curves of the SFCL after removing of the sound phase
(A double line-to-ground fault, applied voltage : 200[V])

ABSTRACT

A Study on Operating Characteristics of Flux-Coupling Type Current Limiter for Power System

Ko Sung-Pil

Advisor : Prof. Cho Geum-Bae, Ph.D. Department of Electrical Engineering, Graduate School of Chosun University

The power demand is rapidly increasing in Korea, especially in the urban areas that include the metropolitan area. The increase in the power demand requires the extension of power facilities, but it is difficult to secure spaces for equipment installation in the limited space of urban areas. In addition, the transmission system in Korea has a short transmission distance, and is a network structure that ensures the high reliability and stability of power supply. Accordingly, the fault current rapidly increases in the case of a system fault, due to the decrease in the line impedance.

With the continuous increase in the power demand and large capacity of power facilities, the fault current increases and eventually exceeds the breaking capacity of the circuit breaker. Where the breaking capacity of the circuit breaker is exceeded, breakers must be maintained or replaced. There are many economic and technical problems, however, to prepare for the increasing power demand. For example, if high capacity of circuit breaker is replaced, the low capacity of circuit breakers must also be replaced. This leads to an enormous economic burden. In addition, a large-capacity of circuit breaker must also be developed, which requires additional efficient measures. Air-core reactors are being applied to some systems as a fault current limiting measure, but it involves continuous loss due to the increase in the line impedance during normal operation. It also requires larger installation space and the consideration of its effect on the surrounding devices. The bus separation is also being used, but it is not effective because it reduces the power quality and reliability due to the overload on the adjacent system and excessive voltage fluctuation.

The superconducting fault-current limiter (SFCL) was devised to solve these The fault-current limiting existing problems. technology using the superconductor is being actively studied around the world. The SFCL in the system does not affect the surrounding equipment without loss during normal operation, but if the fault current exceeds the critical current of the superconductor in the case of a fault in the system, it is quenched and it provides high impedance to quickly limit the fault current. Because the SFCL limits the fault current below the breaking capacity, the existing breaker can stably operate and the system is effectively protected against the fault, without the need for replacing or increasing the capacity of the existing breaker. In particular, the smart-grid-based future power system, which is recently drawing attention as a next-generation power grid, requires high-quality stable power supply. Therefore, it is expected that the introduction of the SFCL for the system protection will be an essential technology.

Based on the simple resistive-type SFCL, this study addressed the SFCL with a three-phase transformer. To apply the existing resistive-type SFCL to the actual system, the serial or parallel connection of SFCL elements was essential, and individual SFCL elements showed the ununiform quench

ix

characteristic due to the manufacturing problems. Accordingly, the burden from the fault was not uniformly distributed, but concentrated on a specific element, which may lead superconducting to the breakage of the superconducting element. The SFCL in this study could reduce the use of superconducting elements by reducing the burden expensive on the superconducting elements in the case of a system fault, and control the fault current magnitude by changing the primary-secondary turn ratio of the transformer. This study examined the performance and operating characteristics of the current limiter that were required by the system, considering the expected coordination with the protective devices in the actual power system.

I.서 론

A. 연구 배경

현재 국내의 전력 시장은 산업화와 경제 발전에 따른 생활환경의 변화로 대도시 인구 밀집지역의 전력 수요가 급증하고 있다. 특히 수도권을 비롯한 도심지역의 수요증가는 기하급수적으로 증가하여 주요 전력 전송 수단인 지중 케이블의 대용 량화와 복수 회선 등의 신설 및 증설의 필요성이 커지고 있는 실정이다. 2011년 수립된 5차 전력 수급 계획에 따르면 국내 최대전력수요는 2001년 실적치 43.13[GW] 대비 연평균 4%씩 증가하여 2015년에는 약 2배 정도 증가되는 80[GW]에 이를 것으로 전망되고 있다[1-3]. 전력 사용량의 증가는 각종 전력설비 들의 증설을 필요로 하고 있지만 도심지의 경우는 제한된 공간에 설비 증설 공간 확보에도 큰 어려움을 겪고 있다. 또한, 국내 154[kV]나 345[kV]의 송전계통의 구 조는 송전거리가 짧고, 전력공급 신뢰성과 안정도 향상을 위해 망상구조로 되어 있다. 이러한 구조는 계통 사고시 임피던스 감소로 인해 사고전류의 크기가 크게 증가하는 결과를 가져오게 된다[4-7].

계속되는 전력수요 증가 추세 속에서 대용량 전력 설비들이 늘어갈수록 계통사 고시 사고전류의 크기는 증가하게 되고, 결국 기존 차단기의 차단내력을 초과하게 된다. 차단기의 차단 용량을 초과한 개소는 차단기의 보수 및 교체가 이루어져야 하지만 앞으로 계속 증가하게 될 전력수요를 대비하기에는 많은 경제적, 기술적 문제가 따른다. 예를 들어, 상위의 차단기 교체가 이루어지면 그 하위에 있는 차단 기들의 교체도 함께 이루어져야 한다. 하지만 이럴 경우 엄청난 경제적 부담을 안 을 수밖에 없는 것이 사실이다. 또한 대용량의 차단기 개발도 선행되어야 하는 문 제점을 안고 있어 효과적인 다른 해결 대책들이 마련되어야 한다[8-16].

다른 형태의 사고전류 제한 방안으로 공심리액터를 몇몇 계통에 적용하고 있지 만 이 경우는 상시 운전 중 선로의 임피던스 증가로 인해 계속적인 손실이 발생하 고 있고, 설치공간의 증대 및 공심리액터로 인한 주변기기의 영향 등을 고려해야 하는 문제점을 가지고 있다. 그밖에 계통의 모선분리 방식을 채택하고 있지만 이 방법 또한 인접 계통에 대한 과부하 및 전압변동이 심하여 전력 품질 및 공급 신 뢰도를 저하시키고 있어 효과적인 해결책이 되지 못하고 있다.

이와 같은 기존 방식의 문제들을 해결하기 위한 방안으로 고안된 것이 초전도 한류기이다. 초전도체를 이용한 사고전류 제한 기술은 국·내외적으로 활발히 진행 중에 있다. 초전도 한류기가 계통에 적용되면 정상 운전 중에는 주변 설비에 영향 을 주지 않고, 선로에 아무런 손실 없이 동작하게 되고, 계통내 사고 발생시 사고 전류의 크기가 초전도체의 임계 전류값을 초과하게 되면 퀜치되어 고임피던스로 동작해 신속하게 사고전류의 크기를 제한하게 된다. 초전도 한류기는 사고전류의 크기를 차단용량 이하로 제한하여 기존 차단기의 교체나 용량을 늘리지 않더라도 기존 차단기가 안정적으로 동작할 수 있게 하여 사고로부터 계통을 효과적으로 보 호할 수 있게 된다. 특히, 최근 들어 이슈가 되고 있는 차세대 전력망인 스마트 그 리드 기반의 미래 전력계통에서는 안정적인 고품질의 전력 공급을 요구하고 있는 실정으로 계통 보호를 위한 초전도 한류기의 도입은 필수적인 기술이 될 것으로 전망된다[16-21].

이처럼 초전도 한류기는 기존 기술의 문제점을 해결하고 미래 전력계통의 변화 에 능동적으로 대처할 수 있는 가장 확실한 대안이다. 현재 전 세계적인 연구개발 추세에 발맞춰 국내에서도 지난 10여 년간 관련 기술에 집중하여 세계적 수준의 기술 경쟁력을 확보하고 있고, 여러 형태의 초전도 한류기 관련 연구와 개발이 진 행 중에 있다. 앞으로도 실계통 적용을 위해서는 해결해야 할 많은 문제들이 산적 해 있기 때문에 지속적인 연구와 투자가 이루어져야 한다[22-23].

본 논문에서는 여러 형태의 초전도 한류기 중 그 구조가 간단한 저항형 초전도 한류기를 기본으로 하고, 여기에 3상 변압기를 접목한 형태의 초전도 한류기에 대 한 연구를 진행하고자 한다. 기존 저항형 초전도 한류기의 실계통 적용을 위해서 는 초전도 한류 소자의 직·병렬연결이 필수가 되어야 하나, 개개의 초전도 한류 소 자는 제작상의 문제로 인해 불균일 퀜치특성을 보인다. 이러한 특성으로 사고의 부담이 고루 분배되지 못하게 되고 결국 특정한 초전도 소자에 부담이 집중되는 현상으로 인해 소자가 파괴되는 경우도 발생하게 된다. 이러한 문제점을 개선한 본 초전도 한류기는 계통 사고시 초전도 한류 소자의 부담을 변압기를 이용하여 경감시킴으로써 고가의 초전도 한류소자 사용을 줄일 수 있고, 변압기의 1, 2차측 권수비를 조절함으로써 사고전류의 크기도 조절할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 실계통 적용시 예상되는 계통내 보호기기와의 협조를 고려하여 계 통에서 요구하는 한류기의 성능 및 동작특성 등을 도출하고자 한다.

B. 초전도 한류기 개발 동향

초전도 한류기의 계통 적용은 기존의 전력망이 요구하는 용량 증대나 효율증대 손실 감소 등의 측면에서 효과적인 역할을 수행할 수 있을 것으로 보인다. 이러한 초전도 한류기는 현재 다양한 구조로 연구 개발되고 있다. 그 종류로는 크게 저항 형, 유도형, 하이브리드형 등으로 나눌 수 있다.

국내의 경우를 살펴보면 과학기술부 '21세기 프론티어연구개발사업' 중 하나인 차세대 초전도 응용기술개발사업단에서 이룬 성과가 대표적이다. 먼저 3상, 22.9[kV], 630[A] 급 선로변경형 하이브리드 초전도 한류기를 개발하였고, 차세대 초전도 선을 이용한 단상 22.9[kV], 630[A] 급 초전도 한류기 개발에 성공하였다. 이러한 기술은 세계 최초이며 최고의 성능을 갖추었다고 할 수 있다. 특히, 하이브 리드형 초전도 한류기는 초전도 소자만 사용했던 기존 저항형 초전도 한류기의 단 점인 용량 문제를 해결하는 획기적인 기술이었다. 일반적으로 초전도 소자만 사용 한 저항형 초전도 한류기의 경우는 실계통 적용을 위해서 많은 양의 초전도 소자 가 필요하다. 초전도 소자의 제작 공정이 개선되어 가격이 떨어지긴 했지만 여전 히 다른 재료에 비하면 고가이므로 이것의 사용을 최소화 하는 것이 현실적으로 가장 큰 문제였다. 또한 다수의 초전도 소자를 사용할 경우 각각의 초전도 소자를 동시 퀜치시키는 기술이 문제가 되었다. 이러한 문제를 하이브리드형 초전도 한류 기를 통해 해결할 수 있었다. 하이브리드형 초전도 한류기 기술은 지속적인 연구 를 통해 2010년 22.9[kV]/3000[A]급의 세계최대 용량으로 개발되었다. 이 초전도 한류기는 실계통 적용 시험을 위해 한전 고창전력시험장에 설치되어 시험 중에 있 다

국외의 경우를 살펴보면, 먼저 미국의 경우는 에너지성(DOE)의 지원으로 2007 년부터 AMSC-Siemens팀이 115[kV]급의 3상 초전도 한류기를 개발하여 실계통 적용시험을 수행하였다. Superpower consortium은 138[kV] 3상 초전도 한류기를 개발하여 실증 시험 과제에 착수했고, 2008년에 단상, 2010년에 3상을 제작하여 변 전소 설치 시험을 하였다. 일본의 경우는 한때 66[kV]급 정류형 한류기를 개발했 지만 현재는 중단했고, 저항형 초전도 한류기로 방향을 돌렸다. 독일의 경우는 CURL 10 project와 INES110 project 등 초전도 한류기 관련 사업을 진행하면서 2003년부터 10[kV]/800[A]급 3상 저항형 한류기, 110[kV]/1.8[kA]급 단상 초전도 한류기 등 초전도 한류기 개발에 있어 많은 성과를 창출했다. 한류기 기술 개발에 있어서 기술적으로 가장 앞서 있다고 평가되고 있다.

이렇듯 세계적으로 다양한 종류의 초전도 한류기가 개발 되었고, 현재는 송전급 적용을 위한 기술 개발이 진행 중에 있다.

C. 연구 목표 및 내용

현재 다양한 형태의 초전도 한류기가 개발되고 있고, 일부는 실계통 적용을 위 한 실증시험을 준비 중이다. 초전도 한류기는 사고시 계통 내에서 저항성분으로 작용하기 때문에 실계통 적용시 주변 기기에 미치는 영향에 대한 연구는 계속 이 루어져야 한다. 다양한 종류의 한류기가 개발 중에 있지만 본 연구에서는 3상 변 압기와 초전도 소자를 접목한 형태인 한류기의 구조를 제시하여 계통 내에서의 동 작 성능 및 특성 등에 대한 연구를 진행하였다.

본 연구에 사용된 초전도 한류기는 그 구조로 보면 저항형 초전도 한류기의 또 다른 형태라고 할 수 있겠다. 본 초전도 한류기는 초전도 한류소자의 한류용량을 분담하기 위해 변압기와 연결하여 초전도 소자의 부담을 줄이는데 주안점을 두었 다. 현재 초전도 한류 소자가 제작이 쉬워지고 있기는 하지만 아직까지도 고가의 재료인 것은 분명한 사실이다. 이러한 이유로 본 연구에서는 초전도 한류 소자의 사용을 최소화 하고, 대신 전체적인 한류기의 용량을 증대시킬 수 있는 구조의 초 전도 한류기를 제안하였다.

본 연구에서는 초전도 한류기의 전력계통 적용시 다음과 같은 동작 특성을 살펴 보았다.

① 사고전류 제한 특성

전력계통 내에서 발생할 수 있는 1선, 2선, 3선 지락 사고를 모의하여 이때의 사 고전류 제한 특성을 분석하였다. 또한 3상 변압기의 코일 권선수 변화에 따른 사 고전류의 제한률을 비교하였다.

② 초전도 한류 소자의 퀜치 시간 비교

실험 변수에 따른 초전도 소자의 퀜치 시간을 비교하였다. 초전도 소자의 퀜치 시간은 초전도 한류기 동작 시간과 같은 의미를 가짐으로 매우 중요한 요소이다.

③ 초전도 한류 소자 회복 시간 비교

초전도 한류기의 회복 시간은 기존 계통의 전력용 재폐로 차단기와 보호 협조를 위해서 꼭 살펴 보아야할 부분이다.

④ 초전도 한류기의 재폐로 동작 특성 비교

초전도 한류기는 계통내에서 기존 차단기 용량을 보조하는 개념으로 적용되게 되는데 이때 차단기의 재폐로 동작에 맞춰 안정적으로 동작되어야 하므로 한류기 의 재폐로 동작 특성을 살펴보았다.

Ⅱ. 이론적 배경

A. 초전도 한류기 특징

1. 초전도 원리

초전도 현상은 여러 금속이나 합금을 일정 온도 이하의 저온으로 충분히 냉각 시키면 그 금속의 전기비저항이 갑작이 0 [Ω]이 되는 현상이다. 이러한 초전도 현 상은 1911년 최초로 발견된 이후 좀 더 높은 임계온도(critical temperature)를 갖 는 초전도체의 발견을 위해 노력 중이다.

초전도 한류기는 초전도체의 영저항 특성을 이용한 것으로써 초전도 소자가 임 계값 이하에서 저항이 없는 상태를 유지하고, 임계값을 초과하게 되면 상전도 상 태로 천이되어 저항을 발생시킨다. 이때 초전도체가 초전도 상태에서 상전도 상태 로 천이되는 것을 퀜치(quench)라고 한다.

초전도체의 임계값은 임계전류, 임계자장, 임계온도로 나눌 수 있는데 우선 초전 도 상태를 유지하기 위해서는 초전도체의 온도가 매우 중요한 요소이다. 본 연구 에 사용된 초전도체는 YBa₂Cu₃O₇(YBCO)로 87~88 [K] 이하에서 초전도 특성을 갖는다. 초전도 한류기는 초전도체의 임계값 중 전류 특성을 이용한 것으로써, 전 력계통 사고 발생시 사고전류의 크기가 초전도 소자의 임계 전류값을 초과하게 되 면 초전도체가 퀜치되어 저항을 발생함으로써 사고전류를 제한하게 된다.

초전도 한류기의 사고전류 제한동작은 사고 발생 후 반주기(8 [msec]) 이내로써 사고전류가 최대치에 이르기도 전에 사고전류를 제한한다. 이러한 빠른 사고전류 제한 동작은 주변기기에 대한 사고의 파급을 최소화할 수 있어 계통의 공급 신뢰 도 및 안정도를 향상시킬 수 있다. 그림 2-1은 초전도체의 임계 곡면을 나타낸 것 으로써 온도, 자장의 세기, 전류밀도의 크기가 임계곡면 내부에 존재하여야만 초전 도체는 초전도 상태를 유지하게 된다. 3가지 요소 중 하나라도 임계값을 초과하게 되면 초전도 성질을 잃어버리고 상전도 상태로 된다.

그림 2-2는 초전도 상태의 초전도체가 인가된 전류(I_{SC})에 의해 상전도 상태로 퀜치되는 동작을 개념화 하였다.

그림 2-3은 초전도 한류기가 적용된 경우와 적용되지 않은 경우의 사고전류 제 한 동작에 대한 예시이다. 그림 2-3에서 보듯이 초전도 한류기가 적용되지 않은 계통에서는 100 [A]정도의 사고전류가 흘렀고, 적용된 경우는 20 [A]정도로 줄어 드는 것을 볼 수 있다. 이처럼 초전도 한류기의 동작을 통해서 사고전류의 크기를 획기적으로 줄일 수 있다.





Fig. 2-1 Critical surface of a superconducting element



Fig. 2-2 Quenching operation of a superconducting element



그림 2-3 초전도 한류기의 한류 동작 특성

Fig. 2-3 Fault current limitation characteristics of a SFCL

2. 초전도 한류기의 동작 원리

그림 2-1은 변압기와 초전도 한류소자를 적용한 단상 초전도 한류기의 실험회로 도이다. 그림 2-1은 초전도 한류 소자를 1개만 이용한 것으로써 용량 증대를 위해 초전도 소자의 수는 증가시킬 수 있다. 변압기 1차측은 N₁, 2차측은 각각 N₂₋₁, N₂₋₂, N₂₋₃로 권선되어 선로에 직렬 연결된다. 초전도 한류소자인 2인치 YBCO박막 이 변압기 2차측 코일에 병렬 연결되며 이 초전도 한류 소자는 액체질소가 채워진 저온 용기에 담겨진다. 본 연구에 사용된 초전도 한류소자는 임계온도 77 [K]에서 초전도 특성을 갖기 때문에 액체 질소로 냉각시켰다. 본 구조의 한류기의 동작 원 리를 살펴보면 계통의 정상상태에는 초전도 한류소자의 양단전압이 0 [V]가 되고 이와 병렬로 연결된 변압기 2차측 코일의 전압도 0 [V]가 된다. 2차측 코일에서 발생되는 전압이 없기 때문에 식 (2.1)에서 N₁±N₂≠0이므로 dφ/dt=0가 항상 성



그림 2-4 단상 초전도 한류기 단상 실험 회로도 Fig. 2-4 Experimental circuit of single-phase SFCL

립 된다. 따라서 계통의 정상 동작 상태에서는 변압기 1, 2차측 각각의 코일에서는 전압이 유기되지 않아 철심에 의한 손실이 거의 없다는 것을 알 수 있다. 하지만 계통에 사고가 발생하여 초전도 소자 임계전류 이상의 사고 전류가 초전도 한류소 자를 흐르게 되면 초전도 한류소자가 퀜치되어 저항으로 동작한다. 초전도 한류소 자가 퀜치되는 순간 변압기 2차측 코일에도 전압이 유기되게 되고, 이로 인해 1차 측 코일과 2차측 코일의 쇄교 자속에서 시간적인 변화가 생기게 되어 변압기 코일 양단에 전압이 유기된다. 이러한 원리를 통해 계통 사고시 초전도 한류소자와 변 압기 코일이 연계하여 계통내 사고전류를 신속하게 제한하게 된다.

$$(N_1 + N_2)\frac{d\phi}{dt} = V_T \tag{2.1}$$

자속결합형 초전도 한류기의 구조에서 두 코일 사이의 자기인덕턴스를 L₁과 L₂ 라 하고, M₁₂는 두 코일 간에 유도되는 상호인덕턴스라고 하자. 또한 각 코일간의 누설자속이 없다는 가정 하에서 코일의 저항크기는 무시하였다.

그림 2-2(a)의 등가회로(가극 결선의 경우)부터 식 (2.2)에서 식 (2.4)과 같은 관 계식을 얻을 수 있다. 한류소자(Rsc)와 변압기 2차 측으로 흐르는 전류는 I₂, 초전 도 소자로 흐르는 전류는 I_{sc}이며, 전체 사고전류는 I_{FCL}(=I₁)이다.

$$I_{FCL}(I_1) = I_2 + I_{SC}$$
(2.2)

$$V_1 = j\omega L_1 \bullet j\omega M_{12} I_2 \tag{2.3}$$

$$V_2 = j\omega M_{12} \bullet I_1 + j\omega L_2 I_2 = R_{SC} \bullet I_{SC}$$
(2.4)



(a) 가극 결선된 초전도 한류기



(b) 감극 결선된 초전도 한류기그림 2-5 자속결합형 초전도 한류기 개념도Fig. 2-5 The concept diagram of flux-coupling type SFCL

이 식들로부터 한류기의 임피던스와 전류에 관한 식을 전개할 수 있다.

$$I_{SC} = \frac{j\omega L_2 + j\omega M_{12}}{R_{SC} + j\omega L_2} \bullet I_1$$
(2.5)

$$Z_T = \frac{j\omega R_{SC}(L_1 + L_2) + j^2 \omega M_{12} R_{SC}}{R_{SC} + j\omega L_2}$$
(2.6)

이러한 식으로부터 전력 계통의 사고 발생 직후에 고온초전도 소자에 흐르는 전 류가 임계 전류값 (I_q) 에 도달되었을 때, 초기 제한되는 전류를 I_{ini} 으로 정의하고 $R_{SC}=0, I_{SC}=I_q$ 을 대입하여 정리하면 식 (2.6)을 유도할 수 있다. 여기서, 상호인덕 턴스 $M_{12}=k\sqrt{L_1L_2}$ 에서 결합계수 k=1로 가정하였다.

$$\left|1 \pm \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}\right| = \frac{I_q}{I_{ini}} \tag{2.7}$$

L = √L₁ ± √L₂ 이고 + 또는 - 부호는 1, 2차 코일에 의한 자속의 증감에 따라 결정된다. 식(2.7)에서 나타나는 바와 같이 초기 제한되는 선로전류 크기를 변압기 코일 1차측과 코일 2차측의 인덕턴스 값을 조절함으로써 초전도 한류기 동작을 설 정할 수 있음을 확인하였다.

Ⅲ. 실험 구성 및 방법

A. 실험장치 제작 및 구성

1. 초전도 한류 소자

1) 초전도 한류소자

현재까지 개발된 초전도 한류소자의 종류로는 벌크형, 선재형, 박막형으로 크게 나눌 수 있다. 벌크형의 경우는 n-value값이 낮은 특성이 있고, 선재와 박막형의 경우는 n-value값이 커서 전력계통 사고시 사고전류를 빠른 시간내 제한할 수 있 는 특성을 갖는다. 본 연구에서는 박막형의 YBa₂Cu₃O₇(YBCO)을 meander-line 형 태로 식각하여 사용하였다. 표 3-1은 본 연구에 사용된 초전도 한류소자의 사양을 나타낸 것이고, 그림 3-1은 식각된 초전도 한류소자이다.

표 3-1 초전도 소자 설계 사양

Parameter	Value	Unit	
소자 직경	2	inch	
스트립폭	2	mm	
전체길이	540	mm	
YBCO층 두께	0.3	μm	
금층 두께	0.1~0.2	μm	

Table 3-1 Parameters of a superconducting element





그림 3-1 초전도 한류소자 Fig. 3-1 Superconducting elements

2) 임계전류 측정

그림 3-2는 본 연구에 사용된 초전도 한류소자의 임계 전류값을 측정하기 위한 실험 회로도이다. 측정 방법은 우선 DC power supply를 통해 초전도 한류소자에 전류를 인가한다. 이 전류의 크기를 일정한 간격으로 증가시키면 초전도 한류소자 의 임계 전류를 초과한 전류값에서 초전도 소자는 퀜치되어 전압이 발생된다. 임 계 전류값 이하에서는 0[V]를 나타내고, 임계 전류를 넘어서게 되면 초전도 성질 을 잃고 상전도로 상전이가 이루어지면 전압을 발생시키는 것이다. X-Y recorder 는 이러한 인가된 전류의 크기와 발생한 전압을 표시해 주는 역할을 수행한다. Shunt resistance 1 [Ω]은 인가된 전류와 전압을 측정하기 위해서 연결하였다. 그 림 3-3은 본 연구에 사용된 초전도 한류 소자의 임계전류 특성을 보여준다. 초전 도체의 제작상의 문제로 인해 임계 전류값에 차이가 있음을 알 수 있지만 실험의 정확성을 위해서 최대한 비슷한 크기의 초전도 한류 소자를 적용하였다.



그림 3-2 초전도 한류소자 임계 전류값 측정 실험 회로도

Fig. 3-2 Schematic diagram of experimental device measuring the critical current value of superconducting elements



그림 3-3 초전도 한류 소자 임계 전류 곡선 Fig. 3-3 Critical current curves of superconducting elements

2. 실험 장치의 구성

본 초전도 한류기 적용 실험을 위해서는 전원 장치와 사고발생 모의 장치 및 각 종 측정 장비들이 필요하다. 특히 3상 변압기가 중요한 역할을 담당하는 필수 구 성 요소가 된다.

그림 3-4는 본 실험의 전체적인 구성도를 보여준다. 각각의 기기 구성을 간단히 정리하였고, 실험 가능 용량은 200 [kVA]로 실제 송·배전 용량과 비교할 수 없이 작지만 전체적인 동작 메커니즘은 대용량의 실제 계통과 거의 같게 동작특성을 보 인다. 이러한 실험을 통해서 실계통 적용시 발생하게 될 문제점들을 도출하고 해 결해 나갈 수 있다.



그림 3-4 초전도 한류기 실험 장치

Fig. 3-4 Experimental devices of a superconducting fault current limiter

1) 삼상 변압기의 설계

그림 3-5는 본 논문에 적용된 삼상 변압기로 초전도 한류 소자와 직·병렬로 연 결되게 된다. 실험을 위해 실제 제작하였고, 표 3-2는 본 3상 변압기의 각 코일의 권수에 따른 인턱턴스 크기를 나타내었다.



그림 3-5 제작한 3상 변압기 외형 Fig. 3-5 Manufactured three-phase transformer

А		В		С	
	Inductance	Τ	Inductance	T	Inductance
1 ap	[mH]	I ap	[mH]	Тар	[mH]
1	8.172	1	8.148	1	8.139
2	8.168	2	8.147	2	8.136
3	8.164	3	8.146	3	8.132
4	8.166	4	8.147	4	8.134
5	8.175	5	8.148	5	8.141
6	8.174	6	8.151	6	8.143
7	8.186	7	8.159	7	8.147
8	8.197	8	8.172	8	8.166
0-1	8.172	0-1	8.148	0-1	8.139
0-2	32.97	0-2	32.90	0-2	32.86
0-3	73.30	0-3	73.12	0-3	73.00
0-4	127.4	0-4	127.0	0-4	126.9
0-5	198.7	0-5	198.3	0-5	198.0
0-6	285.6	0-6	284.9	0-6	284.5
0-7	387.9	0-7	387.0	0-7	386.5
0-8	505.7	0-8	504.6	0-8	503.7
1-2	8.172	1-2	8.150	1-2	8.137
1-3	32.98	1-3	32.89	1-3	32.83
1-4	73.28	1-4	73.17	1-4	73.02
1-5	127.3	1-5	127.0	1-5	126.8
1-6	198.6	1-6	198.2	1-6	198.0
1-7	285.5	1-7	284.9	1-7	284.5
1-8	387.9	1-8	387.0	1-8	386.5

표 3-2 제작된 3상 변압기의 인덕턴스 값
2) 부하 설비의 설계 및 제작

그림 3-6은 본 연구를 위한 전원인가 장치이다. 절체 스위치를 통하여 인가전압 의 크기를 조절할 수 있게 제작되었고, 조절 범위는 40V~440 [V]까지 40 [V]단위 로 조절이 가능하다. 그림 3-7은 전원 전압 인가와 사고 발생 모의를 위한 SCR 스위칭 장치이고, 그림 3-8은 SCR 스위칭 동작과 위상을 제어하는 위상 제어기이 다. 이 제어기를 이용해 각 유형별 사고 주기와 사고시 위상각 및 초전도 한류기 의 재폐로 동작 주기를 설정할 수 있다. 그림 3-8과, 3-9는 각 상에 부하로 사용된 load bank와 shunt reactor이다.



그림 3-6 전원 공급 장치 Fig. 3-6 Power supply



그림 3-7 SCR 스위칭 장치 Fig. 3-7 SCR switching device



그림 3-8 위상 제어 및 사고 발생기 Fig. 3-8 Phase controller and fault generation device



그림 3-8 각상 부하 모듈 Fig. 3-8 Load modules of each phase



그림 3-9 션트 리액터 Fig. 3-9 Shunt reactors

3. 측정 및 분석 방법

본 연구에서는 변압기와 초전도 한류 소자를 접목한 초전도 한류기에 대한 연구 로서 본 구조의 한류기를 3상 전력계통에 직접 적용한 경우의 동작 특성에 관한 측정을 실시하였다. 전력계통내의 사고유형 통계를 살펴보면 1선 지락사고가 계통 사고의 80 [%]정도를 차지하고 있다. 선간 단락이나 3선 단락 등의 사고가 나머지 를 차지하고 있다. 본 연구에서도 계통의 사고유형 중 1선, 2선, 3선 단락 사고를 모의하여 그 동작 특성을 파악하였다. 각 구간의 전류와 전압의 크기를 측정하여 동작 특성을 파악하였고, 측정된 데이터를 바탕으로 각 구간의 초전도 한류 소자 의 전력 부담과 발생된 저항의 크기를 구하였다.

표 3-2는 본 실험을 위해 설정된 실험 조건들이다.

표 3-3 실험 설계 사양초전도 소자 설계 사양

Parameter	Value		
Applied voltage[V]	200	280	360
	A single	A double	A triple
Fault type	line-to-ground	line-to-ground	line-to-ground
	fault	fault	fault
Turn's ratio of a transformer $(N_1 : N_2)$	2:1	3:1	4:1

Table 3-3 Experimental design parameters of experiment

Ⅳ. 초전도 한류기 동작 특성

A. 초전도 한류기의 삼상 적용 실험 회로도

그림 4-1은 본 연구를 위해 구성된 초전도 한류기의 삼상적용 실험 회로도이다. 그림 4-1의 power source switch (SW_{R-1}, SW_{S-1}, SW_{T-1})는 계통에 전력 공급을 위한 스위치로 각 상에 같은 크기의 전압을 인가한다. 그림 4-1의 fault switch (SW_{R-2}, SW_{S-2}, SW_{T-2})는 각 상에 사고발생 모의를 위한 스위치이다. 또한 각상 *Rinupt, Routput, Sinupt, Soutput, Tinupt, Toutput*에 연결된 기기가 본 연구의 핵심인 초전 도 한류기로 변압기와 초전도 한류 소자가 융합된 모듈이다. 각 상에 연결된 변압 기 코일들은 그림 3-5에서 보는 바와 같이 하나의 철심을 공유하는 구조이다. 이 런 삼상 변압기는 정상 상태에서는 3상이 평형이기 때문에 벡터적 합성 전압의 크 기가 같아 각 상에 불평형 전류가 흐르지 않는다. 하지만 계통 사고시 사고상의 전류는 건전상에도 영향을 주어 건전상의 정상 전류가 증가하게 된다. 본 연구에 사용된 구조의 초전도 한류기는 사고상의 전력 부담을 건전상에서 분담하여 부담 하기 때문에 초전도 한류기 자체의 부담을 줄일 수 있다.

실험에서 사용된 각 상 부하(*R-Load*, *S-Load*, *T-Load*)는 50 [Ω]으로 설정 하였고, 표준 저항(R₀)으로 1 [Ω]을 연결하여 사고시 사고전류의 크기 및 전압의 크 기를 측정하였다.



그림 4-1 3상 초전도 한류기 실험 회로도

Fig. 4-1 Experimental circuit diagram of the three-phase superconducting fault current limiter (SFCL)

B. 초전도 한류기의 전압 및 전류 특성

1. 1선 지락 사고

1) 코일 권수에 따른 전류 특성

그림 4-2는 1선(R상) 지락사고시 변압기 코일 권선수에 따른 R, S, T 각 상 사 고 전류(I_{FC})의 크기를 비교한 그래프이다. 그래프의 가로측은 사고 발생 전 1 [cvcle]과 사고 발생 후 3 [cycle]을 [msec] 단위로 표현하였고, 세로측은 사고전류 의 크기를 나타내며 단위는 [A]를 사용하였다. 이때 변압기 코일의 권선비는 2:1. 3:1, 4:1로 하였고, 인가된 전압의 크기는 200 [V]였다. 그림 4-2(a) 2:1인 경우, 사 고상인 R상의 경우 사고 발생 반주기까지는 26.03 [A]까지 증가하였고, 반주기 이 후 더욱 제한되어 13.7 [A]까지 제한되는 것을 확인할 수 있었다. 초전도 한류기가 적용되지 않은 경우는 표준저항 1 [Ω]에 의해 약 200 [A] 정도의 사고전류가 흐 르게 되는데 이에 비해 초전도 한류기가 적용된 경우가 약 87 [%]정도 감소된 값 을 나타내었다. 이때 건전상인 S, T상의 전류의 크기는 사고상(R상)의 영향으로 인해 각각 2[A]정도 증가된 값을 보였다. 그림 4-2(b)의 3:1인 경우는 사고 초기 반주기까지는 20.3[A]까지 증가했고, 반주기 이후에는 11.9 [A]까지 감소했다. 건전 상은 사고 전에 비해 각각 1.7 [A]정도 증가하는 경향을 보였다. 그림 4-2(c)의 4:1 에서 사고상(R상)의 경우는 초기 반주기 동안은 16.12 [A], 반주기 이후는 10.76 [A]로 감소하였다. 이러한 결과, 변압기 1차측 코일 권수가 증가함에 따라 사고전 류 제한률이 증가함을 확인할 수 있었다.



(a) Turn's ratio – N_1 : N_2 = 2 : 1



(b) Turn's ratio – N_1 : N_2 = 3 : 1

그림 4-2 사고전류 제한 곡선 (인가전압 : 200[V]) Fig. 4-2 Fault current curves of the SFCL



Fig. 4-2 (continued from the previous page)

그림 4-3은 1선 지락 사고시 초전도 한류 소자에 흐르는 전류(I_{SC}) 곡선을 나타 낸다. 그림 4-3(a)의 경우 사고전에 R, S, T 상에 흐르는 전류의 크기는 각각 7.5, 9.5, 9.3 [A] 정도였고, 사고 후에는 36.3, 37.5, 36.8 [A]로 거의 비슷한 크기를 나 타냈다. 1선(R상) 지락 사고임에도 불구하고 건전상(S, T상)의 초전도 소자에도 큰 전류가 흐름을 확인할 수 있었다. 또한 초전도 소자에 흐르는 전류의 크기도 사고 반주기 이후 각 상 모두 5 [A]정도까지 감소하였다. 그림 4-3(b), (c)의 경우, 정상 상태에 흐르는 전류의 크기는 그림 4-3(a)에서 권수비 2:1인 경우보다 각각 2 [A], 4 [A]정도 증가하는 경향을 보였고, 사고 후 초전도 소자에 흐르는 전류의 크기는 거의 변하지 않았음을 확인하였다. 이러한 결과는 사고상(R상)에 의해 유도된 전 류가 건전상에도 영향을 미쳤고, 이 전류의 크기가 각 상 초전도 한류소자의 임계 전류를 초과하여 퀜치되었음을 보여준다. 초전도 한류소자가 퀜치되면 저항이 발 생되는데 그 크기는 선형적으로 증가한다. 따라서 초전도 소자에 흐르는 전류의 크기도 차츰 감소하게 된다.



(a) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 2 : 1 그림 4-3 초전도 한류소자 전류 곡선(인가전압 : 200[V]) Fig. 4-3 Current curves of superconducting elements



(b) Turn's ratio – N_1 : N_2 = 3 : 1



(c) Turn's ratio – N_1 : N_2 = 4 : 1

그림 4-3 (계속)

Fig. 4-3 (continued from the previous page)

그림 4-4는 1선 지락사고시 변압기 2차측 코일에 흐르는 전류(L₂)의 크기를 보여 준다. 그림 4-4(a)를 살펴보면 사고상인 R상의 2차측 코일에 가장 먼저 사고전류 가 유입됨을 확인할 수 있다. 이것은 R상 2차측 코일에 병렬 연결된 초전도 한류 소자가 가장 먼저 퀜치되고, 이로 인해 유기된 저항으로 사고전류가 흐르지 못하 고 2차측 코일로 우회하여 흐르게 되어 증가한 것이다. S상과 T상의 경우도 초전 도 한류소자가 퀜치된 순서대로 사고전류가 증가함을 확인할 수 있다. 그림 4-4(b), (c)에서 변압기 2차측 코일 권수가 증가함에 따라서 전류의 크기가 감소하 는 경향을 보였고, 전류 파형은 세 경우 모두 같은 성향을 보였다.



(a) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 2 : 1 그림 4-4. 변압기 2차측 코일 전류 곡선 (인가전압 : 200[V]) Fig. 4-4 Current curves in a secondary coil of a transformer



Fig. 4-4 (continued from the previous page)

2) 코일 권수에 따른 전압 특성

그림 4-5는 1선 지락사고시 초전도 한류소자의 전압(V_{SC}) 곡선을 보여준다. 초 전도 한류 소자 양단에 전압이 발생되었다는 것은 사고전류로 인해 초전도 한류 소자가 퀜치 되어 저항이 발생되었다고 할 수 있겠다. 그림 4-5(a)에서 사고상인 R상에서 먼저 퀜치가 되었고, S상, T상의 순서로 퀜치가 되었음을 보여준다. 사고 반주기 이후 전압 최대값은 각각 45.5, 53.6, 63.4 [V]를 나타냈다. 그림 4-5(b), (c) 의 경우도 R, S, T 상 순으로 퀜치되었고, 이때 반주기 이후 최대값은 각각 34.3, 38.6, 48.9 [V], 28.3, 33.0, 34.7 [V]였다. 그리고 사고 발생 반주기 이후에는 변압기 권수비가 커짐에 따라 사고 전류와 마찬가지로 전압의 크기도 감소하였다.



(a) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 2 : 1 그림 4-5. 초전도 한류 소자 전압 곡선 (인가전압 : 200[V]) Fig. 4-5 Voltage curves of superconducting elements



(b) Turn's ratio – N_1 : N_2 = 3 : 1



(c) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 4 : 1 그림 4-5. (계속)

Fig. 4-5 (continued from the previous page)

2. 2선 지락 사고

1) 코일 권수에 따른 전류 특성

그림 4-6은 2선 지락 사고시 각 상 사고 전류(I_{FC})의 크기를 비교한 그래프이다. 2선 지락 사고의 경우는 1선 지락사고에 비해 상당히 큰 사고 전류가 흐름을 확인 할 수 있다. 그림 4-6(a)에서 권수비가 2:1인 경우의 사고전류 크기를 보면 사고상 인 R, S상은 각각 83.0, 79.8 [A]를 나타내었다. 2선 지락사고의 경우는 사고전류 제한율이 60 [%] 정도로 감소함을 확인할 수 있었다. 그림 4-6(b), (c)의 경우는 사고상(R, S상)의 사고전류의 크기가 각각 64.8, 61.7 [A], 50.4, 47.7 [A] 정도로 변 압기 1차측 코일 권수가 증가함에 따라 사고전류 제한률이 75~76[%]까지 증가함 을 확인하였다. 이렇듯 본 연구에 사용된 초전도 한류기는 변압기의 코일 권수를 조절함으로써 사고전류의 크기를 조절할 수 있었다.



(a) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 2 : 1
 그림. 4-6 사고전류 제한곡선(인가전압 : 200[V])
 Fig. 4-6 Fault current curves of the SFCL



(b) Turn's ratio – N_1 : N_2 = 3 : 1



(c) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 4 : 1 그림. 4-6 (계속)

Fig. 4-6 (continued from the previous page)

그림 4-7은 2선 지락사고시 초전도 한류 소자에 흐르는 전류(I_{SC})의 크기를 나타 낸다. 2선 지락 사고 모의는 R상의 전류 위상이 0°의 지점에서 발생되는데 이때 또 다른 사고상인 S상의 위상은 90°가 조금 안되는 위치에서 발생되게 된다. 이러 한 이유로 S상의 사고에서 전류의 파형이 첨예하게 증가하는 것을 볼 수 있었다. 건전상인 T상의 초전도 한류소자에 흐르는 전류는 사고 1/4주기 이후 사고상의 전류가 유입되어 점차 증가하다 가장 나중에 퀜치되고, 사고 발생 1주기 이후에는 각 상의 전류가 같은 크기로 제한된다. 그림 4-7(b), (c)에서 변압기 1차측 권수가 증가함에 따른 특성은 사고전류의 크기가 1 [A]정도 감소하는 경향을 보였고, 건 전상(T상)의 전류 추이가 점점 완만해지는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 2 : 1
그림. 4-7 초전도 한류소자의 전류 곡선 (인가전압 : 200[V])
Fig. 4-7 Current curves of superconducting elements



(b) Turn's ratio – N_1 : N_2 = 3 : 1



(c) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 4 : 1 그림. 4-7 (계속)

Fig. 4-7 (continued from the previous page)

그림 4-8은 2선 지락사고시 변압기 2차측 코일에 흐르는 전류(I₂)의 크기이다. 2 차측 코일에 흐르는 전류는 초전도 한류 소자와 병렬 연결되어 있기 때문에 초전 도 한류소자의 임피던스와 2차측 코일이 갖는 각각의 임피던스에 반비례된 전류의 크기가 흐른다. 사고 반주기 이후 초전도 한류소자가 퀜치되어 비교적 큰 저항을 발생시켜서 2차측 코일에 흐른 전류가 초전도 한류소자의 전류보다 상대적으로 컸 다. 그림 4-8(a)에서 각상(R, S, T상) 전류의 크기는 각각 76.5, 84.2, 24.0 [A]였고, (b)의 경우는 각각 61.2, 65.9, 20.9 [A], (c)의 경우는 47.8, 51.9, 18.2 [A]이었다.



(a) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 2 : 1 그림. 4-8 변압기 2차측 전류 곡선 (인가전압 : 200[V])
Fig. 4-8 Current curves in a secondary coil of a transformer



(b) Turn's ratio – N_1 : N_2 = 3 : 1



(c) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 4 : 1 그림. 4-8 (계속)

Fig. 4-8 (continued from the previous page)

2) 코일 권수에 따른 전압 특성

그림 4-9는 2선 지락사고시 초전도 한류소자의 전압 곡선(V_{SC})을 나타낸다. 그 림에서 보듯이 S상 소자의 전압이 가장 먼저 발생한 것을 볼 수 있다. 이것은 사 고 순간에 S상에 유입되는 사고전류의 위상이 가장 앞서 있었고, 이것으로 인해 초전도 한류 소자에 흐른 전류의 크기도 그 순간 가장 컸기 때문에 먼저 퀜치된 것으로 사료된다. 또 다른 사고상인 R상의 경우는 위상차만큼 지연된 것을 확인할 수 있고, 건정상인 T상은 두 사고상 2차측 코일 전류에 의해 유기된 전압 때문에 2차 전류가 증가하여 퀜치 되었다. 가장 먼저 퀜치된 S상에서 초전도 소자에 발생 하는 전압이 가장 큰 것을 볼 수 있는데 이것은 구조상 중앙에 위치한 S상에 각상 불평형 전압이 집중된 것으로 사료된다. 그림 4-9(b), (c)에서 변압기 1차측 코일이 증가하는 경우도 사고 전류와 마찬가지로 초전도 한류소자의 전압도 감소하는 것 을 확인할 수 있다.



(a) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 2 : 1
그림. 4-9 초전도 한류소자의 전압 곡선 (인가전압 : 200[V])
Fig. 4-9 Voltage curves of superconducting elements



(b) Turn's ratio – N_1 : N_2 = 3 : 1



(c) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 4 : 1 그림. 4-9 (계속)

Fig. 4-9 (continued from the previous page)

3. 3선 지락 사고

1) 코일 권수에 따른 전류 특성

그림 4-10은 3선 지락사고시 사고전류(I_{FC})의 크기를 나타낸다. 3선 지락사고는 평형 사고이기 때문에 사고 이후에도 120°의 위상차를 갖는 일정한 전류 특성을 보인다. 사고 초기 위상이 앞서 있는 R상과, S상의 사고전류는 비슷한 크기로 증 가하는 것을 볼 수 있지만 T상의 전류의 크기는 다른 사고상에 비해 현저히 적은 사고전류가 흐름을 확인할 수 있었다. 이것은 사고의 부담을 R, T상에서 대부분 분담했기 때문으로 보인다. 전체적인 전류 제한 특성은 2선 지락사고의 경우와 비 슷했고, 다만 T상에 흐르는 사고전류의 크기가 조금 증가하는 경향을 보였다. 이 것으로 보아 좀 더 큰 사고에 대해서 각 상이 사고의 부담을 적당히 분담함으로써 안정적인 사고전류 제한 동작을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

그림 4-10(b), (c)의 경우는 각 상에 흐르는 사고 전류의 크기가 변압기 1차측 권수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. T상의 경우는 사고 초기 반주기와 반주기 이후의 전류 차이가 감소하여 거의 비슷한 값을 나타내는 것도 확인 할 수 있었다.



(a) Turn's ratio – N_1 : N_2 = 2 : 1



(b) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 3 : 1
그림. 4-10 사고전류 제한곡선(인가전압 : 200[V])
Fig. 4-10 Fault current curves of the SFCL





Fig. 4-10 (continued from the previous page)

그림 4-11은 3선 지락사고 사고시 초전도 한류 소자에 흐르는 사고전류(I_{SC})의 크기를 나타낸다. 3선 지락 사고에서는 변압기 코일 권수와 상관없이 거의 일정한 크기의 전류가 흐름을 확인하였다. 모두 사고 후 반주기까지 전류가 증가한 후 반 주기 이후에는 감소하는 경향을 보였고, 그 크기를 살펴보면 그림 4-11(a)에서 권 수비 2:1인 경우는 각 상 전류의 크기가 36.5, 42.5, 41.8 [A], 4-11(b) 3:1인 경우는 35.6, 40.5, 40.6 [A], 4-11(c) 4:1의 경우는 각각 35.6, 40.8, 40.3 [A]로 세 경우 모 두 크게 감소하거나 증가하지는 경우는 없었다. 이것으로 3선 지락사고시 초전도 소자에 흐르는 전류의 크기는 변압기 권수와 크게 연관이 없음을 확인하였다.



(a) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 2 : 1 그림. 4-11 초전도 한류 소자 전류곡선(인가전압 : 200[V]) Fig. 4-11 Current curves of superconducting elements



(b) Turn's ratio – N_1 : N_2 = 3 : 1



(c) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 4 : 1 그림. 4-11 (계속)

Fig. 4-11 (continued from the previous page)

그림 4-12는 초전도 한류 소자와 병렬 연결된 2차측 코일에 흐르는 전류(L)의 크기를 나타낸다. 이 경우는 권수가 증가함에 따라 전류의 크기가 감소함을 확인 할 수 있었다. 이것은 그림 4-11의 초전도 한류 소자에 흐르는 전류가 거의 비슷 한 경우와는 다른 특성이다. 1선 지락사고나 2선 지락사고의 경우에서도 그랬듯이 사고시 초전도 소자에 흐르는 전류의 크기는 변압기 권수에 상관없이 거의 일정한 값을 보임을 확인하였다. 이것은 초전도 한류 소자가 가지고 있는 임계 전류값에 의해 권수가 변하더라도 초전도 한류 소자에는 그 이상 흐르지 못하고 2차측에 증 가되거나 감소된 전류는 모두 2차측 코일에 흐른다는 것을 알 수 있었다.



(a) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 2 : 1 그림. 4-12 변압기 2차측 전류 곡선 (인가전압 : 200[V]) Fig. 4-12 Current curves in a secondary coils of a transformer



(b) Turn's ratio – N_1 : N_2 = 3 : 1



(c) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 4 : 1 그림. 4-12 (계속)

Fig. 4-12 (continued from the previous page)

2) 코일 권수에 따른 전압 특성

그림 4-13은 3선 지락 사고시 초전도 한류 소자의 전압 곡선(V_{SC})을 나타낸 것 이다. 그림 4-13(a)에서 권수비 2:1인 경우 사고 초기 반주기까지의 R, S, T 각 상 전압이 27.2, 36.9, 35.6 [V]였고, 반주기 이후에는 36.2, 46.3, 42.3 [V]로 증가하는 경향을 보였다. 이것은 사고 반주기 이후 초전도 한류 소자와 병렬 연결된 2차측 코일의 전류가 증가하게 되어 전압이 증가하게 되고, 병렬 연결된 초전도 한류 소 자에도 같은 크기의 전압이 유기되는 것이다. 그림 4-13(b), (c)의 경우는 변압기 1 차측 코일 권수가 증가함에 따라 초전도 한류 소자에서 2차측 코일로 우회되어 흐 르는 전류의 크기가 감소하기 때문에 각 상 2차측에 유도되는 전압의 크기도 감소 한다. 따라서 병렬 연결된 초전도 한류소자도 감소된 전압이 유기됨을 확인할 수 있었다.



(a) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 2 : 1 그림. 4-13 초전도 한류소자의 전압 곡선 (인가전압 : 200[V]) Fig. 4-13 Voltage curves of superconducting elements



(b) Turn's ratio – N_1 : N_2 = 3 : 1



(c) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 4 : 1 그림. 4-13 (계속)

Fig. 4-13 (continued from the previous page)

4. 인가전압에 따른 사고전류 제한 특성 분석

그림 4-14, 15, 16은 1선, 2선, 3선 지락 사고시 인가전압에 따른 사고전류(I_{FC})의 크기를 나타낸 곡선이다. 그림 4-14는 1선 지락사고의 경우로 인가전압이 증가함 에 따라 각 상 사고전류(I_{FC})의 크기가 일정하게 증가됨을 확인할 수 있었다. 반면 에 그림 4-15의 2선 지락사고의 경우, 360 [V]를 인가했을 때의 사고전류(I_{FC}) 파 형이 200, 280 [V]를 인가한 경우의 사고전류(I_{FC}) 파형과 다른 형태를 보였다. 이 것은 사고상인 R, S상의 전류로 인해 건전상인 T상의 전류가 크게 상승한 것이다. 하지만 순시 전류값의 크기는 크게 변하지 않았다. 이것은 건전상이 사고의 부담 을 분담함으로써 사고상의 사고 부담을 줄여주는 것으로 볼 수 있다. 그림 4-16의 3선 지락사고의 경우는 인가전압이 증가함에 따라 각 상의 사고전류(I_{FC})의 크기가 일정하게 증가함을 확인하였다.



그림. 4-14 인가전압에 따른 사고전류 제한 곡선 (1선 지락사고) Fig. 4-14 Fault current curves of the SFCL according to applied voltage (a single line-to-ground fault)



그림. 4-15 인가전압에 따른 사고전류 제한 곡선 (2선 지락사고) Fig. 4-15 Fault current curves of the SFCL according to applied voltage (a double line-to-ground fault)



그림. 4-16 인간전압에 따른 사고전류 제한 곡선 (3선 지락사고) Fig. 4-16 Fault current curves of the SFCL according to applied voltage (a triple line-to-ground fault)
C. 초전도 한류기의 전력 부담 특성

1. 인가전압에 따른 초전도 한류소자 전력부담

그림 4-17은 1선 지락사고시 전압 증가에 따른 초전도 한류 소자의 전력곡선을 보여준다. 각 상의 전력값은 초전도 한류 소자에 유기된 전압의 크기와 유입된 전 류의 크기를 가지고 산출하였다. 사고 반주기까지는 건전상인 T상의 전력 부담이 크게 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것은 먼저 퀜치된 R상과 S상의 우회 전류로 유기된 2차측 코일 전류에 의해 건전상인 T상의 초전도 소자에 순간적인 큰전류 가 유입되었기 때문으로 보인다. 사고 반주기 이후에는 각 상의 코일에서 대부분 의 사고전류를 제한하고 초전도 소자의 부담을 감소시키는 것을 확인할 수 있다. 반주기 이후에는 건전상인 T상의 부담이 가장 작아졌음을 볼 수 있다. 그림 4-17(b), (c)의 경우는 전압이 증가함에 따라 또 다른 건전상인 S상의 초전도 한류 소자에 부담이 증가함을 알 수 있었다. 본 구조의 초전도 한류기는 각 상이 받는 사고의 부담을 분담함으로써 한 상에 집중되는 현상을 피하고 있다.



(a) Applied voltage : 200 [V]



 (b) Applied voltage : 280 [V] 그림. 4-17 전압 증가에 따른 초전도 한류소자 전력 곡선 (1선 지락사고)
 Fig. 4-17 Power consumption of superconducting elements according to increase of the applied voltage





Fig. 4-17 (continued from the previous page)

2. 변압기 권수에 따른 초전도 한류 소자 전력 곡선

1) 1선 지락사고

그림 4-18은 1선 지락사고시 변압기 코일 권수에 따른 초전도 한류 소자의 전력 부담을 비교한 그래프이다. 그림 4-18(a)에서 권수비가 2:1인 경우는 사고 초기 반 주기 동안 사고상(R상)과 건전상(S, T상)의 전력 크기에 크게 차이가 있음을 알 수 있다. 하지만 변압기 1차측 코일 권수비가 증가한 그림 4-18(b), (c)의 경우를 보면 사고 초기 반주기 동안 전력 차이가 줄어들었음을 알 수 있다. 이것은 변압 기 1차측 코일 권수가 증가함에 따라 사고시 초전도 한류기의 전체 임피던스 증가 로 인해 사고전류가 줄어들고 또한 초전도 한류 소자에 유입되는 전류의 크기도 감소하여 각 상에 미치는 부담이 감소하였기 때문으로 사료된다. 표 3-4는 1선 지 락사고시 각 상 변압기의 권수에 따른 사고 후 반주기와 반주기 이후의 전력 최대 값을 나타낸다.

표 3-4 초전도 한류소자의 전력부담 (1선 지락사고)

Table 3-4 Power burden of superconducting elements (A single line-to-ground fault)

Unit [W]	After fault					
		Half cycle After half-cycle			After half-cycle	
Turn ratio	2:1	3:1	4:1	2:1	3:1	4:1
N_1 : N_2						
R-phase	625.0	516.8	515.1	269.6	182.2	142.0
S-phase	1212.5	993.1	868.5	357.2	266.6	208.0
T-phase	1703.7	1095.7	566.6	208.4	127.9	97.8



Fig. 4-18 Power consumption of superconducting elements according to increase of turn number of primary coil (a double line-to-ground fault)





Fig. 4-18 (continued from the previous page)

2) 2선 지락사고

그림 4-19는 2선 지락사고시의 변압기 코일 권수 변화에 따른 초전도 한류 소자 의 전력부담 곡선이다. 2선 지락사고의 경우는 사고 초기 반주기 동안 S상의 부담 이 가장 크게 증가하였다. 반면에 사고 반주기 이후에는 사고상(R, S상)의 전류가 병렬 연결된 코일로 우회하여 흐르게 되고, 결국 이 전류에 의해 유기된 전압에 때문에 건전상인 T상에 정상 전류가 증가하게 되어 부담이 가중된 것이다. 그림 4-19의 2선 지락사고의 경우, 각 상 변압기 1차측 코일 권수가 증가함에 따라 사 고 초기 최대값은 물론 사고 반주기 이후의 전력 부담이 크게 감소한 것을 확인할 수 있었고, 3상 중 중앙에 위치한 S상의 전력 부담이 가장 크다는 것도 확인 하였 다. 표 3-5는 2선 지락 사고시, 사고 발생 반주기와 반주기 이후의 각 상 전력 최 대값을 나타낸다.

표 3-5 초전도 한류소자 전력부담 (2선 지락사고)

Table 3-5 Power burden of superconducting elements (A double line-to-ground fault)

	After fault					
		Half cycle		After half-cycle	cle	
Turn ratio	2:1	3:1	A : 1	2:1	3:1	A : 1
N_1 : N_2		0.1	4 · 1	2 • 1	0.1	4.1
R-phase	592.6	555.5	769.7	168.9	164.8	148.3
S-phase	1226.3	929.8	444.4	485.5	378.5	296.5
T-phase	1123.4	670.8	304.8	127.7	98.9	98.7



(a) Turn's ratio – N_1 : N_2 = 2 : 1



(b) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 3 : 1 그림. 4-19 변압기 1차측 권수 증가에 따른 초전도 한류소자의 전력 곡선 (2선 지락사고)

Fig. 4-19 Power consumption of superconducting elements according to increase of turn number of primary coil (a double line-to-ground fault)





Fig. 4-19 (continued from the previous page)

3) 3선 지락사고

그림 4-20은 3선 지락사고시 변압기 코일 권수에 따른 초전도 한류 소자의 전력 부담 곡선이다. 3선 지락사고의 경우는 사고 지점에서 R상의 경우는 위상이 0°이 었고, 이때 S상의 위상각은 양의 방향으로 90°에 가까웠고, T상의 경우는 음의 방 향으로 위상이 90°에 가까웠다. 이러한 이유로 사고 초기 S상과 T상의 초전도 한 류소자에 사고의 부담이 집중되는 것을 확인할 수 있었고, R상의 경우는 전력 부 담이 감소함을 확인할 수 있었다. 또하 변압기 1차측 코일 권수가 증가함에 따라 서는 초전도 한류소자의 각 상 부담이 감소하는 특성을 보였고, 특히 부담이 컸던 S, T상의 전력 부담이 눈에 띄게 감소하는 것을 알 수 있었다. 표 3-6은 3선 지락 사고시 변압기 코일 권수에 따른 사고 반주기 전후의 최대 전력값을 보여준다.

표 3-6 초전도 한류소자의 전력부담 (3선 지락사고)

Table 3-6 Power burden of superconducting elements (A triple line-to-ground

	After fault					
	Half cycle			After half-cycle		cle
Turn ratio	2:1	3:1	4:1	2:1	3:1	4:1
N_1 : N_2	2 • 1	5 · 1	1 · 1	1 1	0.1	1 2 1
R-phase	561.8	506.0	508.9	232.2	196.4	165.0
S-phase	1273.0	962.5	788.5	433.4	359.5	277.3
T-phase	1295.2	991.6	873.4	388.8	306.8	236.2

fault)



(a) Turn's ratio – N_1 : N_2 = 2 : 1



(b) Turn's ratio - N₁ : N₂ = 3 : 1 그림. 4-20 변압기 1차측 권수 증가에 따른 초전도 한류소자의 전력 곡선 (3선 지락사고)

Fig. 4-20 Power consumption of superconducting elements according to increase of turn number of primary coil (a triple line-to-ground fault)





Fig. 4-20 (continued from the previous page)

D. 초전도 한류기의 퀜치시간 및 회복시간 비교 1. 변압기 권수에 따른 퀜치시간 비교

그림 4-21은 사고유형에 따른 초전도 한류 소자의 퀘치 시간을 나타낸 것이다. 사고 발생시점부터 초전도 한류 소자에서 전압이 유기된 시점까지의 시간을 보여 준다. 인가된 전압의 크기는 200 [V]이고, 변압기 1, 2차측 권수비는 2:1, 3:1, 4:1로 설정하였다. 1선 지락사고의 경우를 보면 권수비가 2:1인 경우 퀜치 시간이 1.00 [msec], 3:1인 경우 1.1 [msec], 4:1인 경우 1.1 [msec]로 1차측 권수비가 증가할수 록 퀜치 시간이 길어지는 경향을 보였다. 2선 지락 사고의 경우는 변압기 1차측 코일 권수가 증가함에 따라 각각 1.5, 1.5, 1.5 [msec]로 거의 차이가 없었다. 3선 지락사고의 경우에는 각각 1.4, 1.3, 1.3 [msec]로 짧아졌다.

본 논문의 초전도 한류기는 사고발생 반주기(8 [msec]) 이내에 퀜치되어 사고전 류 제한 동작을 수행함으로 사고 유형과 변압기 권수비에 따른 퀜치 시간의 미세 한 차이는 초전도 한류기 동작에 있어서 크게 영향을 미치지 않을 것으로 보인다.



그림. 4-21 변압기 권수비에 따른 초전도 한류소자 퀜치의 시간 곡선(200[V]) Fig. 4-21 Quench time of superconducting elements according to turn's ratio

2. 사고 유형별 초전도 한류기 회복시간 비교

초전도 한류기는 계통의 사고시 사고전류의 크기가 초전도 한류 소자의 임계 전 류값 이상이 되면 초전도 성질을 잃고 상전도 상태로 상전이 되어 저항을 발생시 킴으로써 사고전류를 제한한다. 이때 계통내 사고가 복구되면 초전도 한류기는 별 다른 조작 없이 바로 초전도 상태로 돌아오게 된다. 이러한 초전도 한류기의 특성 을 회복특성이라 부른다. 초전도 한류기가 회복되는 시간은 한류 동작에 있어서 매우 중요한 요소로 작용한다. 만약, 초전도 한류기가 계통의 사고가 복구된 후에 도 초전도 상태로 회복하지 못할 경우 초전도 한류기 자체가 선로의 손실로 작용 하게 되고, 이로 인해 공급 신뢰도 저하와 계통 안정도 측면을 저하시킬 우려가 있다. 따라서 초전도 한류 소자의 회복 시간 비교 분석은 매우 중요하다.

본 장에서는 1선 지락사고시 200 [V]를 인가한 경우를 기준으로 초전도 한류기 의 변압기 1차측 코일 변화에 따른 회복 시간을 비교하였다.

그림 4-22, 23, 24는 변압기 코일 권수에 따른 각 상 초전도 한류 소자의 회복 시간을 나타낸 것으로 각각의 권수비는 2:1, 3:1, 4:1이다. 회복 시간의 측정은 사고 전류(I_{FC})를 개방한 시점을 시작으로 초전도 한류 소자의 전압(V_{SC})이 0 [V]인 지 점까지의 시간을 측정하였다. 표 3-7은 각각의 회복 시간을 측정한 값을 나타내었 다. 그 결과 1차측 코일 권수가 증가함에 따라 R상의 경우는 약 9~10 [msec], S 상의 경우는 약 7~10 [msec], T상은 10~20 [msec] 정도 짧아지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 전력용 차단기와의 보호 협조시 설정값을 조절하여 계 통의 요구를 맞추는데 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

표 3-7 초전도 한류 소자 회복시간

Table 3-7 Recovery time of superconducting elements

	Recovery time [msec]				
Turn ratio	2:1	3:1	4:1		
R-phase	35.5	25.0	15.6		
S-phase	35.8	25.7	19.3		
T-phase	34.0	15.0	4.4		



(a) R-phase

그림. 4-22 초전도 한류 소자의 회복 시간 비교(N₁:N₂ = 2:1, 200[V]) Fig. 4-22 Comparison of recovery time of superconducting elements



Fig. 4-22 (continued from the previous page)



그림. 4-23 초전도 한류 소자 회복 시간 비교(N₁:N₂ = 3:1, 200[V]) Fig. 4-23 Comparison of recovery time of superconducting elements



Fig. 4-23 (continued from the previous page)



그림. 4-24 초전도 한류 소자의 회복 시간 비교(N₁:N₂ = 4:1, 200[V]) Fig. 4-24 Comparison of recovery time of superconducting elements



Fig. 4-24 (continued from the previous page)

E. 초전도 한류기의 저항곡선 추이 및 재폐로 동작특성1. 인가전압 및 사고유형에 따른 저항곡선

초전도 한류기의 사고전류 제한 동작은 초전도 소자가 퀜치 되어 저항이 발생하 면서 시작된다. 그림 4-25, 26, 27은 각 사고 유형에 따른 초전도 한류 소자의 저 항 발생 추이를 보여준다. 각 상의 저항 발생은 선형적으로 증가하여 일정크기에 다다르는 것을 확인할 수 있었다.

1) 1선 지락사고

그림 4-25는 1선 지락사고시 초전도 한류기의 각 상에서 발생된 저항의 크기를 나타낸 곡선이다. 그림 4-25(a)에서 변압기 권수비가 2:1인 경우는 사고상인 R상이 가장 먼저 퀜치되어 저항을 발생 시켰고 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다. 또한, 건전상의 S상과 T상의 초전도 소자도 퀜치된 후 사고상과 같은 저항 발생 추이를 보임을 확인할 수 있었다. 변압기 권수비 증가에 따른 각 상 저항의 크기 는 그림 4-25(b), (c)에서 알 수 있듯이 1차측 권수비가 증가할수록 발생된 저항의 크기가 감소함을 확인할 수 있었다. 저항의 크기가 감소한 것은 변압기의 권수비 가 증가함에 따라 전체 사고전류의 크기가 감소하여 변압기 2차측에 흐르는 사고 전류의 크기가 감소했기 때문이다.



그림 4-25 각 상 초전도 한류소자의 저항 곡선 (1선 지락사고, 200V) Fig. 4-25 Resistance curves of superconducting elements in each phase



Fig. 4-25 (continued from the previous page)

2) 2선 지락사고

그림 4-26은 2선 지락사고시의 초전도 한류기에 대한 각상의 저항곡선이다. 이 경우 R, S상에서 사고가 발생하였는데 S상의 초전도 한류소자 저항이 먼저 발생 한 것을 확인할 수 있다. 이것은 R상 0°를 기준으로 한 사고이기 때문에 사고 시 점에 S상의 -120°에서 위치하게 되어 더 과도한 사고가 되기 때문에 가장 먼저 퀜 치된 것으로 보인다. 그리하여 발생된 저항의 크기도 가장 큰 것을 확인할 수 있 었다. 2선 지락사고의 경우도 변압기 1차측 권수가 증가함에 따라 저항의 크기가 감소하였는데 특히, 가장 큰 저항을 발생시킨 S상의 저항값의 감소가 가장 컸다. 그림 4-26(c)에서 보듯이 S상의 저항이 감소하여 결국 두 사고상(R, S상)의 저항 값이 거의 같은 값을 갖게 됨을 알 수 있었다.





Fig. 4-26 Resistance curves of superconducting elements in each phase



Fig. 4-26 (continued from the previous page)

3) 3선 지락사고

그림 4-27은 3선 지락사고시 초전도 한류기의 저항곡선이다. 그림에서 3선 지락 사고의 경우는 위상이 ±120° 위치에 있는 S상과 T상에서의 저항이 먼저 발생했 고, R상의 경우가 가장 늦게 발생했다. 또한 변압기 구조상 철심의 반대편에 위치 한 T상에서 발생된 저항의 크기가 가장 컸다. 이것은 R, S상에 의해 중첩된 자속 이 T상에 영향을 주었기 때문으로 보인다. 3선 지락 사고의 경우는 변압기 1차측 권수가 증가함에 따라 각 상 저항값의 크기가 감소함을 확인할 수 있었고, 발생된 저항이 가장 컸던 T상의 저항 감소율이 가장 큼을 확인할 수 있었다. 또한 각 상 에서 발생된 저항의 차이가 점점 줄어드는 것도 확인할 수 있었다.







Fig. 4-27 (continued from the previous page)

2. 재폐로 동작 특성

송배전 계통에서 낙뢰나 수목의 접촉과 같은 사고가 발생하면 사고 전류가 흐르 게 되는데, 이때 계통에 접속된 각종 전기 설비들이 전기적 및 기계적인 손상을 받게 된다. 이러한 사고의 파급을 최소화하기 위해서는 최대한 빨리 계통을 분리 하여 사고 구간을 제거해 주어야 한다. 전력계통의 사고 통계에 의하면 대부분의 사고는 1선 지락사고와 같은 일시적인 사고가 많으며, 이러한 경우의 사고는 구간 을 점검하고, 수리하지 않아도 재폐로 동작을 통해서 송전을 계속할 수 있는 경우 가 많다[20-25]. 보통 고속도 차단에 요구되는 차단기의 차단시간은 계전기 동작에 2~3 [cycle], 차단기 동작에 3~5 [cycle]이 필요하므로 고장발생 후 5~8 [cycle] 정도의 동작 시간에 차단기가 동작한다. 사고의 차단 후 재폐로 할 때까지의 무전 입 시간은 계통의 신뢰성과 과도 안정도 향상 측면에서는 가능한 짧게 하는 것이 바람직하지만 고장 지점의 절연이 회복되기까지는 어느 정도 시간이 필요하므로 일정 한계 이하로 하기는 어렵다. 이러한 재폐로 차단기와 초전도 한류기를 접목 하기 위해서는 두 기기의 보호협조가 필요하다. 따라서 계통에 적용될 초전도 한 류기의 재폐로 동작 특성 파악은 매우 중요하다.

그림 4-28은 차단기 동작책무에 맞춘 초전도 한류기의 재폐로 동작 과정의 개념 을 구성한 것이다. 그림 4-28의 switching signal의 첫번째 ON은 전원이 투입되고 정상 상태에서 동작하다 사고를 발생하기까지를 모의하기 위한 스위치이고, OFF 는 사고를 감지하여 전원 자체를 차단한 상태를 나타낸다. 두번째, 세번째 ON은 사고의 재투입을 나타낸다. CO-t-CO-t-CO의 동작 주기는 5-10-7-20-5 [cycle]로 설정하였다. 이러한 설정 주기 동안 사고전류 제한 동작과 재폐로 동작이 안정적 으로 이루어질 때 기존 전력용 차단기와의 보호 협조가 순조로울 것으로 보인다.



그림 4-28. 초전도 한류기의 재폐로 동작 과정 Fig. 4-28 Reclosing operation sequence of the SFCL

그림 4-29는 본 연구에 사용된 초전도 한류기의 사고 유형에 따른 재폐로 동작 특성을 보여준다. 인가된 전압의 크기는 200 [V]로 변압기 권수비는 2 : 1로 고정 하였다. 그림 4-29(a)는 1선 지락사고시의 각 상 사고전류의 크기를 보여준다. 1선 지락 사고시 사고상인 R상의 사고전류의 크기는 26 [A]까지 증가하였고, 반주기 이후 14[A]까지 감소하여 안정적인 사고 전류 제한 동작을 수행함을 확인할 수 있 었고, 무전압 상태(OFF)를 지나 재폐로(두번째 ON) 되었을 때도 첫번째 사고 주 기와 같은 제한 특성을 보였다. 건전상인 S, T상의 경우는 사고상(R상)의 영향으 로 전류의 크기가 1~2 [A] 증가한 형태를 보였고, 재폐로 동작에서도 첫번째 사 고 주기와 같은 파형을 보임을 알 수 있었다. 이렇듯 초전도 한류기가 적용된 계 통의 1선 지락사고의 경우 안정적인 재폐로 동작을 수행함을 확인할 수 있었다.

그림 4-29(b)는 2선 지락사고시의 사고전류 파형이다. 앞에서 설명했듯이 2선 지 락의 경우는 1선 지락사고에 비해 대단히 큰 사고전류가 흐름을 확인할 수 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 큰 사고전류가 흐른 경우에도 안정적인 재폐로 동작이 이루어짐을 확인할 수 있었다. 그림 4-29(c)의 3선 지락사고의 경우는 T상의 영향 으로 S상의 사고전류 크기가 조금 증가하는 경향을 보였다. 이 경우 또한 안정적 인 재폐로 동작을 수행하였다.



(a) 1선 지락사고

그림 4-29. 초전도 한류기의 사고전류 재폐로 동작 특성 $(N_1 : N_2 = 2 : 1, 200[V])$ Fig. 4-29 Reclosing operation characteristics of the SFCL



Fig. 4-29 (continued from the previous page)



Fig. 4-29 (continued from the previous page)

F. 초전도 한류기의 신뢰성 평가

삼상 초전도 한류기의 각 상 개별 동작에 따른 사고전류 제한 동작을 비교하기 위하여 3상 중 임의의 1상에서 기계적 고장 발생시 사고전류 제한 동작을 비교하 였다. 이러한 경우는 흔하진 않겠지만 수많은 조건들 중 하나라고 할 수 있겠다. 이러한 수행 과정을 통해 안정적인 동작의 신뢰성을 찾고자 한다. 조건으로는 건 전상의 코일에 병렬 연결된 초전도 한류 소자가 없는 경우에도 사고전류 제한 동 작이 이루어지는지를 살펴봄으로써 동작 신뢰성을 검토하고자 한다. 1선(R상) 지 락 사고의 경우 건전상인 S, T상의 초전도 소자를 제거하였고, 2선(R, S상) 지락 사고시에는 건전상인 T상의 초전도 소자를 제거하여 실험을 진행하였다. 표 3-8은 각각의 경우에 따른 사고 전류(I_{FC})의 크기를 보여준다. 1선 지락사고의 경우는 사 고상인 R상의 크기만 나타내었고, 2선 지락사고의 경우는 R상과 S상의 크기를 나 타내었다. 괄호안의 수치가 S상의 사고전류 크기이다.

표 3-8 초전도 한류 소자의 회복시간

SFCL		Fault current [A]			
State	Fault type	2 : 1	3:1	4:1	
	A single	69.0	170	24.9	
Broken	line-to-ground fault	06.0	47.0	04.2	
SFCL	A double	99.2(70.9)	C = 2(C2, 2)	51.2(48.1)	
	line-to-ground fault	02.3(19.0)	03.3(02.2)		
	A single	26.3	20.5	16.0	
Normal	line-to-ground fault	20.3	20.0	10.0	
SFCL	A double	920(70.8)	618(62.2)	51.9(47.5)	
	line-to-ground fault	03.0(79.0)	04.0(02.2)	01.2(47.0)	

Table 3-8 Recovery time of superconducting elements

1. 건전 상의 초전도 소자 제거 후 동작특성 분석

1) 1선 지락사고

그림 4-30의 1선 지락사고에서 건전상의 초전도 한류 소자를 제거한 경우 사고 전류(I_{FC})의 크기는 68.1 [A]로 정상 동작했을 경우의 26.3 [A]에 비해 2배 이상 증 가한 것을 확인할 수 있었다. 하지만 이 경우도 초전도 한류기가 적용되지 않은 경우인 200 [A]에 비해 65[%]정도 제한된 것을 알 수 있다. 이 경우도 변압기 1차 측 권수가 증가함에 따라 그 크기가 감소함을 확인하였다.







Fig. 4-30 Fault current curves of the SFCL after removing of sound phase



Fig. 4-30 (continued from the previous page)
2) 2선 지락사고

그림 4-31의 2선 지락사고시의 경우는 건전한 초전도 한류기가 적용된 경우와 마찬가지로 사고상인 R상과 S상에서 대부분의 사고를 분담하므로 T상의 유무는 크게 영향을 미치지 않은 것으로 보인다.

초전도 한류기의 고장시 즉시 교체하거나 보수가 이루어져야 하지만 부득이하게 사용할 경우에도 사고 전류 제한 동작이 안정적으로 이루어짐을 확인할 수 있었 다.







Fig. 4-31 (continued from the previous page)

Ⅴ.결 론

수도권을 중심으로 한 대도시의 부하 집중 현상은 해를 거듭할수록 증가하고 있 고, 이러한 전력 수요 증가에 대비하기 위해 꾸준한 전력 설비 증설이 이루어지고 있다. 설비 용량의 증대는 차단 용량이 뒷받침 되지 않는다면 광역 정전으로 인해 큰 경제적 손실을 초래할 수 있다. 초전도 한류기는 보호기기의 차단용량 증대 문 제를 해결하기 위해 고안되었고, 기존 전력용 차단기와 협조하여 안정적으로 사고 전류를 차단하여 계통에 미치는 사고의 파급을 최소화 할 수 있어 현재 가장 효과 적인 대안으로 평가되고 있다.

본 논문에서는 변압기와 초전도 한류 소자를 접목한 형태의 삼상 초전도 한류기 를 제안하였다. 실험을 위해 삼상 변압기와 사고발생 모의 장치 등을 제작하였고, 삼상 전력 계통 적용시 사고 전류 제한 동작과 회복 특성, 보호 협조를 위한 재폐 로 동작 특성 등을 분석하였다.

그 결과 본 구조의 초전도 한류기는 계통 적용시 고가의 초전도 소자의 사용을 최소화함으로써 경제적 부담을 줄일 수 있었고, 변압기 코일 권수를 조절함으로써 사고전류의 크기를 임의로 조절할 수 있음을 확인하였다. 또한 안정적인 재폐로 동작을 수행하는 것으로 보아 추후 전력용 차단기와의 보호협조시 문제없이 동작 할 것으로 사료된다. 이러한 본 논문의 결과들을 아래와 같이 요약했다.

1. 사고전류 제한동작

제작된 삼상 변압기를 접목한 초전도 한류기를 삼상 전력 계통에 적용하였 다. 각 사고유형별로 보면 1선 지락사고의 경우가 사고 전류 제한률이 90[%]정 도로 가장 큼을 확인하였고, 2, 3선의 경우는 1선 지락사고시의 사고 전류 제한 률에 비해 20%이상 감소함을 확인하였다. 2, 3선 지락 사고의 경우 사고전류 제한률이 감소하긴 하였지만 안정적인 한류 동작이 이루어짐을 확인하였다. 또 한, 각각의 사고(1, 2, 3선 지락사고)시 변압기의 1, 2차측 권수비를 바꾸어 적 용한 경우의 사고전류 제한 특성을 살펴보면, 삼상 변압기 1차측 코일 권수가 증가함에 따라 사고전류의 크기가 점차 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 세가지 권수비만으로 실험을 진행하였지만 무수히 많은 변수가 가 능할 것이다. 이러한 결과는 추후 계통 용량에 맞는 초전도 한류기 선정시 중 요한 자료로 활용될 수 있다.

2. 초전도 한류 소자이 전력 부담

본 구조의 초전도 한류기는 일반 저항형 초전도 한류기에 비해 초전도 한류 소자의 사고 부담을 감소 시켰다. 이 때 사고의 부담은 사고 발생 반주기 이내 가 가장 큰 것을 확인할 수 있었고, 반주기 이 후에는 일정한 크기로 안정되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 변압기의 코일 권수를 조절함으로써 그 부담의 크기를 조절할 수 있었고, 사고의 부담이 감소함에 따라 초전도 한류기의 회복 시간이 짧아지며 그 특성이 개선됨을 확인할 수 있었다. 이러한 특성들은 수용 가의 요구에 맞춘 한류기 설계시 중요한 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 초전도 한류 소자의 사고 부담은 한류기 자체의 수명에 직접적 인 영향을 미치게 되는데 전력 부담 감소로 인해 한류기의 수명을 연장시킬 수 있게 된다.

3. 초전도 한류기의 재폐로 동작 특성

전력용 차단기의 재폐로 동작은 고장 시간을 최소화하여 계통의 안정도 및 신뢰도 향상을 위해 적용된다. 이러한 계통에 적용되는 초전도 한류기는 기존 보호기기와의 보호협조를 위해 안정적인 재폐로 동작이 이루어져야 한다. 본 논문의 초전도 한류기는 1, 2, 3선 지락사고 시에 3번의 재폐로 동작을 실시하 여 각 재폐로 구간에서 모두 안정적인 재폐로 동작이 이루어짐을 확인할 수 있었다.

4. 신뢰성 평가

초전도 한류기의 안정적인 동작 특성을 확인하기 위하여 건선상의 초전도 한

류 소자를 제거한 후 실험을 진행하였다. 1선 지락사고의 경우에 제한된 사고 전류의 크기는 조금 증가하긴 했지만 65[%]이상의 전류 제한률을 보였다. 2선 지락사고의 경우는 사고상의 전력 부담이 커서 건전상의 영향을 거의 받지 않 아 건전상 제거 전과 비슷한 제한률을 보였다. 이러한 결과로 혹시 모를 초전 도 한류기 자체의 기계적 고장시에도 안정적인 사고전류 제한 동작이 이루어 짐을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 김준환, 이강완, "전력계통 고장전류 증대와 대응방안", 전기저널, Vol. 1, pp. 1-19, 1998.
- [2] 초전도응용기술개발사업단, "초전도한류기 적용가능성 분석", 2006.
- [3] 초전도응용기술개발사업단, "국내계통 단락용량 고찰 및 대책", 2006.
- [4] 제5차 전력수급기본계획(2010-2024), 지식경제부, 2010.
- [5] 그린에너지 전략 로드맵: 초전도, 에너지기술평가원, 2009.
- [6] 2010 미국 DOE(Department of Energy) Advanced Cables and Conductors Program peer review 자료, 2010.
- [7] 전기의 세계, "미래 에너지 공급과 초전도기술", 2006.
- [8] S. J. Lee, C. J. Lee, T. K. Ko, O. B. Hyun, "Stability analysis of a power system with superconducting fault current limiter installed", IEEE Trans. on appl. super., Vol. 11, pp. 2098–2101, 2001.
- [9] T. Hoshino, M. Nishikawa, K. Mohammad Salim, T. Nakamura, I. Muta, " Preliminary studies on characteristics of series-connected resistive type superconducting fault current for system design", Physica C, Vol. 354, pp. 120–124, 2001.

- [10] H. S. Choi, O. B. Hyun, H. R. Kim, " Quench characteristics of resistive superconducting fault current limiters based on YBa₂Cu₃O₇ films", Physica C, Vol. 351, pp. 415–420, 2001.
- [11] Lei Chen, Yuejin Tang, Jing Shi, Zheng Sun, "Simulations and experimental analyses of the active superconducting fault current limiter", Physica C, Vol. 459, pp. 27–32, 2007.
- [12] M. Yagami, S. Shibata, T. Murata, J. Tamura, "Improvement of power system transient stability by superconducting fault current limiter", Trans. and Distri. Conf. and Exhi., pp. 359–364, 2002.
- [13] S. H. Lim, J. C. Kim, B. W. Lee, "Improvement of recovery characteristics of a flux-lock type SFCL using a superconductor's trigger", IEEE Trans. on appl. super., Vol. 20, pp. 1182–1185, 2010.
- [14] B. C. Sung, J. W. Park, "Optimal parameter selection of resistive SFCL applied to a power system using eigenvalue analysis", IEEE Trans. on appl. super., Vol. 20, pp. 1147–1150, 2010
- [15] B. W. Lee, S. B. Rhee, "Test requirements and performance evaluation for both resistive and inductive superconducting fault current limiters for 22.9 kV electric distribution network in Korea", IEEE Trans. on appl. super., Vol. 20, pp. 1114–1117, 2010.
- [16] S. W. Yim, S. H. Sohn, S. D. Hwang, O. B. Hyun, S. H. Lim, Kohji Kishio, "Application of resistive type SFCL to protect Bi-2223/Ag tape

against AC over-currents", IEEE Trans. on appl. super., Vol. 16, pp. 669-702, 2006.

- [17] S. H. Lim, "Operational characteristics of flux-lock type SFCL with series connection of two coils", IEEE Trans. on appl. super., Vol. 17, pp. 1895–1898, 2007.
- [18] Lei Chen, Yuejin Tang, Zhi Li, Li Ren, Jing Shi, Shijie Cheng, "Current limiting characteristics of a novel flux-coupling type superconducting fault current limiter", IEEE Trans. on appl. super., Vol. 20, pp. 1143–1146, 2010.
- [19] S. H. Lim, J. C. Kim, "Quench and recovery characteristics of series-connected resistive type SFCLs with magnetically coupled shunt-reactors", IEEE Trans. on appl. super., Vol. 18, pp. 729–732, 2008
- [20] H. R. Kim, H. S. Choi, H. R. Lim, I. S. Kim, O. B. Hyun, "Resistance of superconducting fault current limiters based on YBa₂Cu₃O₇ thin films after quench completion", Physica C, Vol. 372–376, pp. 1606–1609, 2008.
- [21] K. Kaiho, H. Yamaguchi, K. Arai, M. Umeda, M. Yamaguchi, T. Kataoka, "A current limiter with superconducting coil for magnetic field shielding", Physica C, Vol. 354, pp. 115–119, 2001.

[22] 녹색기술 개발전략 및 로드맵, 한전 기술기획처, 2009.

[23] 한전 장기 송변전 설비 계획(2008-2022), 송변전계획처, 부록 1, 2009.

감사(感謝)의 글

본 논문이 완성되기까지 각별한 지도와 배려를 아끼지 않으신 공과대학장 조금 배 교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다. 그리고 충실한 논문이 되도록 세심 하게 구체적인 부분까지 지적과 조언을 해 주시며 심사 · 검토하여 주신 오금곤 교수님, 백형래 교수님, 이우선 교수님, 최효상 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

또한, 학위과정 동안 학문적으로 지도와 조언을 아끼지 않으신 김용재 교수님, 김남훈 교수님과 조용선, 하경훈, 최수근, 류승한 그리고 박사연구에 많은 도움을 주신 정병익 대학원생께도 감사를 드립니다.

그 동안 어려운 여건 속에도 불구하고 학문을 연구할 수 있도록 많은 지원과 배 려를 아끼지 않으신 한국폴리텍 I 대학 제주캠퍼스 김덕호 학장님, 엄준철 학장님 과 동료 교수님, 교직원들께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

오늘 이 자리에 있기까지 항상 변함없이 따뜻한 마음으로 염려와 격려를 아끼지 않으신 부모님, 장인 장모님, 처남 내외분, 또한 멀리 부산에서 늘 마음속으로 용 기와 힘을 주시는 형님과 형수님 그리고 늘 가족을 먼저 생각하는 여동생, 남동생, 매제, 조카들에게도 오늘의 작은 결심을 함께 나누고자 합니다.

언제나 변함없는 마음으로 좋은 결심을 맺을 수 있도록 늘 묵묵히 옆에서 자리 를 지켜준 아내와 사랑하는 우혁, 진혁에게 고마움과 사랑의 마음을 전하며 오늘 의 작은 결실의 기쁨을 함께 나누고자 합니다.

또한, 오늘의 이 자리에 오기까지 많은 격려와 도움을 주신 모든 분들께 다시금 감사의 말씀을 드리며, 늘 건강하시고 가내 행복과 행운이 가득하길 기원합니다.

2011年 12月

高晟弼