



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](#)

2011年 2月
博士學位論文

행렬방식을 이용한 저항형
초전도 한류기의 전기적 특성

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

金德久

2011年
2月
博士學位論文

행렬방식을 이용한
저항형 초전도
한류기의 전기적
특성

金
德
久

행렬방식을 이용한 저항형
초전도 한류기의 전기적 특성

**Electrical Characterization of Resistive-Type Superconducting
Fault Current Limiter using the Matrix Method**

2011年 2月 25日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

金德久

행렬방식을 이용한 저항형
초전도 한류기의 전기적 특성

指導教授 曹錦培

이 論文을 工學 博士學位申請 論文으로 提出함.

2010年 10月

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

金德久

金德久의 博士學位 論文을 認准함.

委員長 朝鮮大學校 教授 李 愚 宣 印

委員 朝鮮大學校 教授 吳 金 坤 印

委員 朝鮮大學校 教授 白 亨 來 印

委員 朝鮮大學校 教授 崔 孝 祥 印

委員 朝鮮大學校 教授 曹 錦 培 印

2010年 12月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT

I. 서 론	1
II. 초전도 한류기의 개요	5
A. 초전도 한류기의 원리	5
B. 초전도 한류기의 종류	8
III. 행렬방식 초전도 한류기의 동작특성	9
A. 행렬방식 초전도 한류기의 동작원리	9
B. 구성요소 설계 및 제작	12
1. 자장인가 리액터 설계 및 제작	12
2. 삼상 구조물 설계 및 제작	15
3. 셉트 리액터 설계 및 제작	16
C. 초전도체의 임계특성 측정 및 동작특성	17
1. 초전도체의 임계특성 측정	17
2. 임계특성에 따른 각 상의 자장인가 리액터 구성	18
3. 각 상의 자장인가 리액터 동작특성	20
IV. 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 동작특성	27
A. 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 실험회로도	27

B. 1×3 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 동작특성	28
1. 등가회로도	28
2. 사고전류제한 특성	29
C. 2×3 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 동작특성	47
1. 등가회로도	47
2. 사고전류제한 특성	52
D. 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 회복특성	85
1. 5주기 사고발생 시 초전도체의 회복특성	86
2. 3주기 사고발생 시 초전도체의 회복특성	89
3. 1주기 사고발생 시 초전도체의 회복특성	92
V. 초전도체 파손에 따른 한류동작의 신뢰성 검증	95
A. 자장인가 부분의 초전도체 파손 시 동작특성	96
B. 전류제한 부분의 1개 초전도체 파손 시 동작특성	100
C. 전류제한 부분의 2개 초전도체 파손 시 동작특성	104
VI. 결 론	107

참고문헌

List of Tables

Table 3-1 Impedance values of manufactured reactors to apply the magnetic field	14
--	----

List of Figures

Fig. 2-1 Critical surfaces of a superconducting unit	6
Fig. 2-2 Schematic diagram of resistive-type SFCL	7
Fig. 2-3 Classification of the SFCL	8
Fig. 3-1 Equivalent circuit of the SFCL using the matrix method	9
Fig. 3-2 Drawing of the reactor to apply the magnetic field	12
Fig. 3-3 Reactor to apply the magnetic field and assembling	13
Fig. 3-4 Construction to assemble the three-phase SFCL using matrix method	15
Fig. 3-5 Shunt reactor bank	16
Fig. 3-6 Experimental circuit diagram to measure the critical current of a superconducting unit	17
Fig. 3-7 V-I curves of superconducting units	19
Fig. 3-8 Experimental circuit of a SFCL	21
Fig. 3-9 Voltage and current curves of a SFCL according to turn number of a reactor to apply the magnetic field	22
Fig. 3-10 Resistance curves generated in the superconducting units	26
Fig. 4-1 Experimental circuit of three-phase SFCL using matrix method	27
Fig. 4-2 Equivalent circuit of three-phase SFCL using matrix method	28
Fig. 4-3 Voltage curves of the superconducting units according to turn number of the reactors during the single line-to-ground fault	30

Fig. 4-4 Current curves of the superconducting units according to turn number of the reactors during the single line-to-ground fault	32
Fig. 4-5 Voltage and current curves of the SFCL according to turn number of the reactors during the double line-to-ground fault	35
Fig. 4-6 Voltage curves of the superconducting units according to turn number of the reactors during the triple line-to-ground fault	39
Fig. 4-7 Current curves of the SFCL according to turn number of the reactors during the triple line-to-ground fault	41
Fig. 4-8 Resistance curves generated in the superconducting units according to turn number of the reactors during the triple line-to-ground fault	45
Fig. 4-9 Equivalent circuits of three-phase resistive-type SFCL with 2×3 structure	48
Fig. 4-10 Equivalent circuit of three-phase SFCL using the matrix method with 2×3 structure	49
Fig. 4-11 Picture of three-phase SFCL using the matrix method with 2×3 structure	50
Fig. 4-12 Fault current limiting curves of resistive-type SFCL and matrix-type SFCL according to turn number	53
Fig. 4-13 Current and Voltage curves of superconducting units in the resistive-type SFCL	55
Fig. 4-14 Current and voltage curves of superconducting units in an SFCL with 380 turns	56

Fig. 4-15 Current and voltage curves of superconducting units in an SFCL with 570 turns	58
Fig. 4-16 Resistance curves generated in the superconducting unit in resistive-type SFCL and matrix-type SFCL according to turn number	61
Fig. 4-17 Fault current limiting curves of a resistive-type SFCL and a matrix-type SFCL during the double line-to-ground fault	64
Fig. 4-18 Current and voltage curves of superconducting units in the three-phase resistive-type SFCL during the double line-to-ground fault	65
Fig. 4-19 Current and voltage curves of superconducting units in the SFCL with 380 turns during the double line-to-ground fault	66
Fig. 4-20 Current and voltage curves of superconducting units in the SFCL with 570 turns during the double line-to-ground fault	68
Fig. 4-21 Resistance curves of the resistive and matrix-type SFCL according to turn number during the double line-to-ground fault	71
Fig. 4-22 Fault current limiting curves of the resistive and matrix-type SFCL according to turn number during triple line-to-ground fault	74
Fig. 4-23 Current and voltage curves of superconducting units in the three-phase resistive-type SFCL during the triple line-to-ground fault	76

Fig. 4-24	Current and voltage curves of superconducting units in the SFCL with 380 turns during the triple line-to-ground fault	77
Fig. 4-25	Current and voltage curves of superconducting units in the SFCL with 570 turns during the triple line-to-ground fault	79
Fig. 4-26	Resistance curves of superconducting units in the resistive-type SFCL during the triple line-to-ground fault	82
Fig. 4-27	Resistance curves of the matrix-type SFCL according to turn number during the triple line-to-ground fault	83
Fig. 4-28	Recovery curves of superconducting units in the resistive and matrix-type SFCL during the 5-cycle fault	87
Fig. 4-29	Recovery curves of superconducting units in the resistive and matrix-type SFCL during the 3-cycle fault	90
Fig. 4-30	Recovery curves of superconducting units in the resistive and matrix-type SFCL during the 1-cycle fault	93
Fig. 5-1	Fault current limiting curves of matrix-type SFCL during the breakdown of R-1 superconducting unit	97
Fig. 5-2	Current and voltage curves of superconducting units in the matrix-type SFCL during the breakdown of R-1 superconducting unit	98

Fig. 5-3 Current curves flowing into the magnetic field applying reactors during the breakdown of R-1 superconducting unit	99
Fig. 5-4 Fault current limiting curves of matrix-type SFCL during the breakdown of S-A superconducting unit	101
Fig. 5-5 Current and voltage curves of superconducting units in the matrix-type SFCL during the breakdown of S-A superconducting unit	102
Fig. 5-6 Current curves flowing into the magnetic field applying reactors during the breakdown of S-A superconducting unit	103
Fig. 5-7 Fault current limiting curves of matrix-type SFCL during the breakdown of T-A and T-D superconducting units	104
Fig. 5-8 Current and voltage curves of superconducting units in the matrix-type SFCL during the breakdown of T-A and T-D superconducting units	105
Fig. 5-9 Current curves flowing into the magnetic field applying reactors during the breakdown of T-A and T-D superconducting units	106

ABSTRACT

Electrical Characterization of Resistive-Type Superconducting Fault Current Limiter using the Matrix Method

Deog-Goo Kim

Advisor : Prof. Geum-Bae Cho, Ph.D.

Department of Electrical Engineering,

Graduate School of Chosun University

Due to a continuous increase in power demand and an extension of electric facilities, a capacity of the electric power system is increased and an equivalent impedance of the system is decreased. Accordingly, a fault current by a ground fault and short-circuit fault is bigger, and the fault current frequently exceeds a breaking capacity of a circuit breaker so that we are required to prepare effective measures.

Many measures against the fault current have been proposed such as the use of high-impedance devices, bus separation, increase in a breaking capacity of circuit breakers, series reactor, etc. Of those measures, the bus separation, increase in a breaking capacity of circuit breakers and the use of series reactors are used as efficient

methods. The bus separation is the method that a complex network system of the electric power system divide into a several section to prevent a breaking from spreading, and that is used mainly although the method has some problems such as a decline of power quality and reliability problem of power supply.

In order to solve the problems, a study on superconducting fault current limiter (SFCL), which can reduce a fault current by using a superconductor, is progressed energetically in the domestic and international market. The SFCL is a powered appliance using a zero-impedance behavior of a superconductor, and the superconducting unit has to satisfy three conditions of the critical behaviors, which are a critical current, critical magnetic field and critical temperature, for the state of zero-impedance. The SFCL can be applied as a lossless appliance in the normal state of the electric power system. When a current of the electric power system is increased rapidly due to a ground fault and short-circuit fault, in other words, if an excess current in a critical current of the superconducting unit is generated then the superconducting unit is quenched and reduce a fault current within 4 msec, the reduced fault current is cut off by circuit breaker. Thus, the powered appliance and electric lines can be protected by the SFCL.

A proposed SFCL in this paper is one of the resistive-type SFCLs and is directly connected to electric power system. The SFCL consists of the trigger part to apply magnetic field and the current-limiting part to limit a fault current. The resistive type SFCL limits a fault current by using a critical current and critical magnetic field of three conditions of the critical behaviors.

Existing SFCLs have only differences in operating mechanism, in the type and component of the superconductor, but they are not the SFCL to improve a behavior of the superconductor. Because critical behaviors of the superconducting units are different when those are produced, The SFCL which can improve an unbalanced quenching behavior by controlling the critical magnetic field is proposed. But we are required to miniaturize the SFCL.

The SFCL should be produced as three-phase SFCL to apply to the electric power system. Many faults such as single line-to-ground fault, double line-to-ground fault or short-circuit fault, etc, frequently occurs in the three phase system. Accordingly, the SFCL has to limit the fault current due to many faults, in addition, the SFCL need a stable operation because it can not predict that any accident occurs. In order to increase a capacity of the SFCL, several superconducting units are connected in series or in parallel, but the structure has a problem of individual damages from a mechanical impact or an electrical impact. In this circumstance, the SFCL should be operated stably. in other words, it is important to study on reliability of the SFCL. However, the study is not enough so far. The results of this study are as follows.

- We manufactured the SFCL's limiting module with 1×3 matrixes on the basis of analytical results of critical characteristics in the superconducting units, and analyzed characteristics according to variation of turn number of the reactor.

- The fault current limiting and quenching characteristics of the SFCL were analyzed according to the number of turns of the reactor and fault conditions of three phase SFCL with 1×3 matrixes.

- The fault current limiting, quenching and recovery characteristics were analyzed according to fault conditions of three phase SFCL with 2×3 matrixes for increment of power capacity.

- We evaluated the reliability and stability on three phase SFCL according to disconnection fault of superconducting units.

I. 서 론

현재 전력계통은 지속적인 전력수요의 증가로 인한 전기설비의 증설로 전력계통의 용량이 크게 늘어나고 있으며, 동시에 계통 내 등가임피던스는 감소하고 있다. 이에 전력계통에서 발생하는 지락 및 단락사고 등의 고장으로 사고전류가 증가하고 있으며, 이 전류는 전력용 차단기의 차단용량을 초과하는 경우가 빈번하게 발생하고 있어 이에 대한 효과적인 대책마련이 시급한 실정이다[1-2].

이러한 사고전류에 대한 대책으로는 현재 고 임피던스 기기사용, 모선 분리, 전력용 차단기의 차단용량 증대, 직렬 리액터 등 많은 방안이 모색되고 있다. 이러한 대책 중 현재 가장 효과적으로 사용되고 있는 방안은 모선분리와 전력용 차단기의 교체, 직렬 리액터의 사용이다. 복잡하게 구성되어 있는 망상식 전력계통을 고장파급을 방지하기 위해 일정구간으로 나누는 모선분리 방안은 전력 공급의 신뢰성 및 전력의 품질 저하 등의 문제점이 대두되고 있으나 현재 가장 많이 시행되고 있다[1-4].

또한 기존에 사용되고 있는 31.5kV급 전력용 차단기를 50kV급 차단용량을 갖는 전력용 차단기로 교체하거나, 기존의 차단용량을 갖는 전력용 차단기를 직렬로 연결하여 사용하는 방안이 시행되고 있다. 그러나 대용량의 전력용 차단기 교체는 경제적으로 많은 부담을 안고 있으며, 차단기의 구성요소들의 동작에 대한 기술적인 한계점도 드러내고 있다. 또한 기존 차단용량을 갖는 전력용 차단기의 직렬연결 사용은 차단기의 상호 동기화를 위한 많은 기술적 문제점이 야기되고 있다[3].

그 밖에 많이 사용되고 있는 방안 중 직렬 리액터의 사용은 전력계통에서 발생하는 사고전류에 대해 저감효과는 뛰어나지만, 정상상태에서 전압강하 및 전력손실을 발생시켜 효율을 저하시키는 문제가 뒤따르고 있다[4].

이와 같이 전력계통에서는 고장으로 인해 발생하는 사고전류를 제한 및 차단시키기 위한 여러 방안들이 기술적·경제적 한계점에 부딪히고 있는 실정이어서 효과적인 방안 모색이 시급한 실정이다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 국·내외에서는 초전도체를 이용하여 사고전류를 효과적으로 저감시킬 수 있는 초전도 한류기에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 초전도 한류기는 초전도체의 영저항 특성을 이용한 전력응용기기이다. 초전도체의 3가지 임계특성의 조건을 만족할 경우 초전도체는 영저항 특성을 나타낸다. 이러한 초전도체를 이용한 초전도 한류기는 정상운전 시 무손실로서 전력계통에 적용된다. 만약 지락 및 단락사고 등의 고장으로 인해 전력계통의 선로에 전류가 급격히 증가하여 초전도체의 임계전류 이상의 전류가 투입되면 초전도체는 초전도 상태에서 상전도 상태로 상전이되는 퀘치현상이 발생하여 4 [msec] 이내에 전류를 일정값 이하로 제한하게 된다. 이렇게 제한된 사고전류는 이후 전력용 차단기에 의해 차단되어 전력계통의 선로 및 전력기기들을 보호하게 된다[5-10].

이러한 초전도 한류기 중 간단한 구조와 원리를 갖는 저항형 초전도 한류기는 용량증대 시 소형화가 가능하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 초전도체는 제작시 불균일한 임계특성을 나타내고 있어 초전도 한류기의 용량증대를 위한 직·병렬 연결시 불균일한 퀘치특성을 갖는다. 이로 인해 초전도체의 전력분담이 균일하지 못하여 퀘치된 초전도체로 소비전력이 집중되는 현상이 발생하게 된다. 이러한 특성은 초전도 한류기의 용량증대를 방해하는 요인으로 고가의 초전도체를 파손시킬 수 있어 개선이 필요한 실정이다[9-11].

본 논문에서 제시하는 행렬방식의 초전도 한류기는 저항형 초전도 한류기의 일종으로 전력계통에 직접적으로 연결된다. 행렬방식의 초전도 한류기는 초전도체에 자장을 인가하기 위한 자장인가 부분과 사고전류를 직접적으로 제한하기 위한 전류제한 부분으로 구성된다. 저항형 초전도

한류기는 초전도체의 임계전류밀도, 임계자장, 임계온도 3가지의 임계특성 중 임계전류와 임계자장을 이용하여 사고전류를 제한한다. 기존에 연구된 초전도 한류기는 동작원리나 초전도체의 종류, 구성요소 등의 차이만 있을 뿐 초전도체의 특성을 개선할 수 있는 초전도 한류기는 전무하였다[12-18]. 이에 행렬방식의 저항형 초전도 한류기는 제작상 불균일한 임계특성을 갖는 초전도체의 임계자장을 조정함으로써 불균일한 퀘치특성을 개선할 수 있다. 그러나 초전도체와 자장인가 리액터의 부피가 커서 소형화를 위한 연구가 필요한 실정이다.

초전도 한류기를 전력계통에 적용하기 위해서는 3상으로 제작되어야 한다. 3상 전력계통에서는 1선 지락, 2선 지락 및 단락 등 많은 사고들이 발생한다. 어떠한 사고가 발생할지 모르는 전력계통에서 초전도 한류기는 모든 사고에 대한 사고전류를 안정적으로 제한할 수 있는 동작을 수행하여야 한다. 또한 초전도 한류기의 용량증대를 위해 초전도체는 불가피하게 직·병렬로 연결된다. 전기적·기계적 충격으로 인해 개별적인 초전도체는 파손이 발생할 수 있으며, 이러한 상황에서도 초전도 한류기는 안정적으로 사고전류제한 동작을 수행할 수 있어야 한다. 그러나 이러한 동작 신뢰성에 대한 연구는 거의 진행되지 않아 많은 연구가 필요한 실정이다.

본 논문에서는 초전도체에 자장을 인가하여 임계특성의 차이를 줄일 수 있는 행렬방식의 저항형 초전도 한류기에 대해 연구하였다. 하나의 자장인가 리액터에 자장인가 부분의 초전도체와 전류제한 부분의 2개의 초전도체를 탑재할 수 있는 모듈화된 한류소자를 설계·제작하였으며, 이에 대한 기초특성을 3장에서 분석하였다. 저항형 초전도 한류기를 전력계통에 적용하기 위해 1×3 구조를 갖는 3상 행렬방식 초전도 한류기를 제작하였으며, 각종 지락사고에 대한 동작특성을 4장에서 분석하였다. 또한 용량증대를 위해 2×3 구조의 삼상 행렬방식 초전도 한류기를 구성하여 전력계통에서 발생할 수 있는 1선 지락사고, 2선 지락사고, 3선 지

락사고에 대한 사고전류 제한특성 및 초전도체의 퀘치특성에 대해 분석하였다.

또한 초전도체는 상전이로 인해 발생된 저항으로 사고전류를 제한한 후 다시 초전도 상태로 복귀하여 2차 사고에 대한 대비를 하여야 한다. 이러한 초전도체의 회복특성을 전력계통에서 발생하는 사고주기에 따라 분석하여 초전도체의 퀘치 특성과의 상관관계를 4장에서 분석하였다.

전기적·기계적 충격으로 인한 초전도체의 파손시 초전도 한류기는 안정적으로 사고전류를 제한하여야 한다. 이에 초전도체의 파손을 모의하기 위해 삼상 행렬방식 초전도 한류기에서 자장인가 부분의 초전도체와 전류제한 부분에 있는 초전도체를 단선시킨 후 사고전류를 흘려 각 부분의 동작특성을 5장에서 분석하였다.

II. 초전도 한류기의 개요

A. 초전도 한류기의 원리

전력시스템에서 발생하는 사고전류의 이상적인 저감대책인 초전도 한류기(Superconducting Fault Current Limiter, SFCL)는 고온 초전도체의 임계특성을 이용한다. 임계특성은 임계전류밀도, 임계자장, 임계온도로 구성되어 있으며 그림 2-1과 같은 임계곡면을 가지고 있다.

초전도체가 초전도 상태를 유지하기 위해서는 3가지의 임계특성이 모두 임계곡면 내에 존재해야 한다. 이 상태를 초전도 상태라 하며, 초전도체는 영저항의 특성을 가지게 된다. 3가지의 임계특성 조건 중 한 가지라도 만족하지 못하면 초전도체는 초전도 상태에서 상전도 상태로 상전이되어 어떠한 값의 임피던스를 발생시킨다. 이를 초전도체가 퀘칭(Quench)되었다고 한다. 초전도 한류기는 이러한 초전도체의 퀘칭특성을 이용하여 평상시에는 영저항의 초전도 상태를 유지하고, 초전도 한류기가 적용된 전력시스템에 지락 및 단락사고로 인해 급격히 증가한 사고전류가 흐르게 되면 초전도체의 퀘칭로부터 임피던스가 발생하여 사고전류를 저감하게 된다.

초전도 한류기는 초전도체의 임계전류밀도를 이용하여 퀘칭을 발생시켜 수 msec 이내에 신속히 사고전류를 저감하는 기기로서 일반적인 회로차단기의 차단기능이 아닌 전류제한의 기능만을 가지고 있다. 전력용 차단기의 동작은 사고전류의 감지를 위한 CT, PT 등과 사고전류를 판단하는 OCR, OVR 등, 차단기를 동작시키기 위한 TC 등 세가지의 구성요소를 필요로 한다. 이로 인해 전력용 차단기는 전력시스템의 고장 발생시 감지에서 차단까지 3~7주기의 시간이 소비된다. 이 주기는 급격히 증가하고 있는 사고전류가 전력시스템 내의 전력기기에 고장을 유발할

수 있는 충분한 시간이다. 그러나 초전도 한류기는 외부의 제어장치나 전류 감지장치 없이 수 msec 이내에 사고전류를 저감시켜 전력시스템의 전력기기를 사고전류로부터 보호할 수 있다.

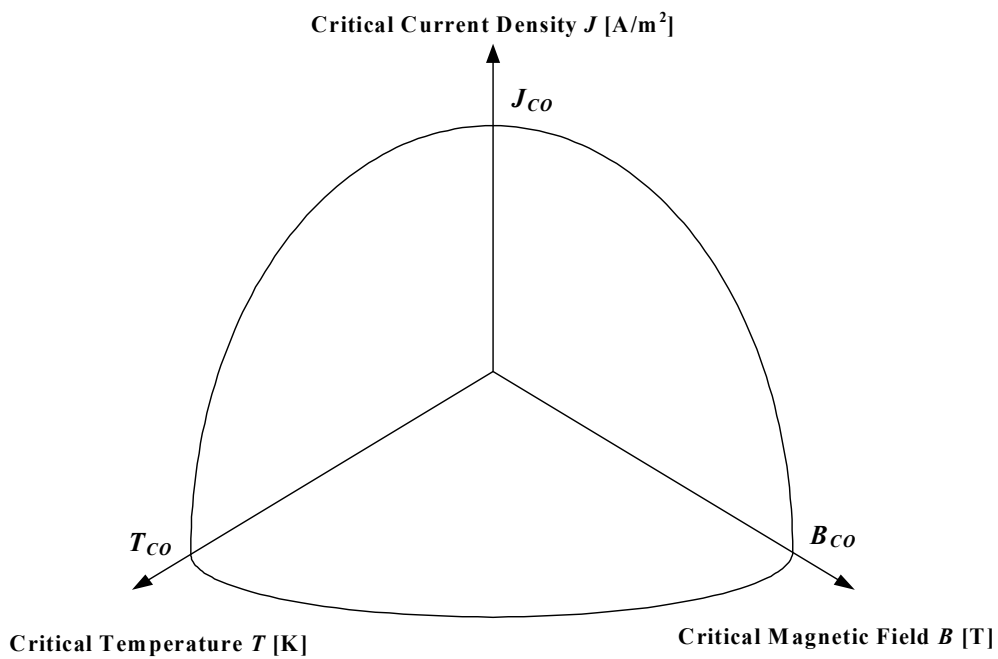


그림 2-1 초전도체의 임계곡면

Fig. 2-1 Critical surfaces of a superconducting unit

초전도체의 임계전류밀도를 이용하여 켄치를 발생시키는 초전도 한류기를 일반적으로 저항형 초전도 한류기라고 한다. 그림 2-2는 저항형 초전도 한류기의 개념도이다. R_{SC} 는 초전도체의 켄치로 인해 발생하는 저항값이다. 실험에 사용한 초전도체는 $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO)로 임계온도는 87~88K이며, 임계전류밀도는 $2\sim 3MA/cm^2$ 이다. YBCO의 초전도 상태를 유지하기 위해 저온용기 내에 냉매인 액체질소(LN_2)를 이용하여 임계온도 이하로 낮췄다. 선로에 흐르는 전류가 초전도체의 임계전류를 초과하게 되면 초전도체는 켄치되어 저항(R_{SC})을 발생시키게 되고 이 저항으로 인해 사고전류가 제한된다.

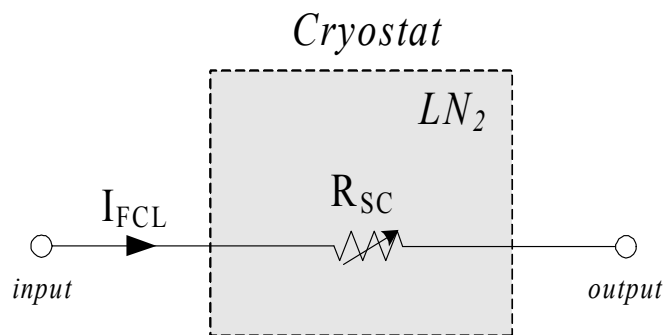


그림 2-2 저항형 초전도 한류기의 개념도

Fig. 2-2 Schematic diagram of resistive-type SFCL

B. 초전도 한류기의 종류

현재 개발되고 있는 초전도 한류기는 초전도 한류기를 퀘칭시키는 방법에 따라 그림 2-3과 같이 크게 퀘칭형과 무퀘칭형 초전도 한류기로 구분된다. 퀘칭형은 초전도체의 영저항 특성을 이용한 것으로서 정상상태에서 영저항 특성을 보이다가 사고가 발생하면 초전도 상태에서 상전도 상태로 상전이 발생하여 사고전류를 저감하는 형태이다. 대표적인 퀘칭형 초전도 한류기는 초전도체의 영저항 특성만을 이용하는 저항형과 변압기의 전자유도작용을 이용하는 자속구속형, 자속결합형, 변압기형 등으로 구분된다.

무퀘칭형 초전도 한류기는 코일형태로 제작된 초전도체의 인덕턴스를 이용하여 정상상태에서 초전도 코일에 에너지를 저장하고, 사고 발생시 사고전류의 증가를 억제한다. 이는 퀘칭특성을 이용하지 않으므로 초전도체의 성능저하를 방지할 수 있다.

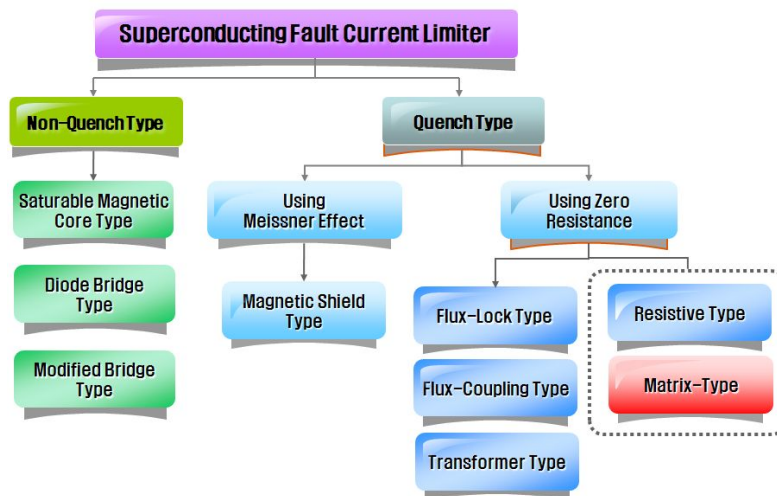


그림 2-3 초전도 한류기의 종류

Fig. 2-3 Classification of the SFCL

III. 행렬방식 초전도 한류기의 동작특성

A. 행렬방식 초전도 한류기의 동작원리

행렬방식 초전도 한류기는 그림 3-1의 등가회로도와 같이 크게 자장인가 부분(Trigger part)과 전류제한 부분(Current-limiting part)으로 구성되어 있다.

자장인가 부분은 임계전류가 낮은 초전도체와 자장인가 리액터가 병렬로 연결되어 있으며, 구조적으로 자장인가 리액터는 3개의 초전도체를 감싸고 있다. 정상상태에서는 영저항을 가지고 있는 초전도체로 전류가 흐르고, 사고가 발생하면 초전도체의 퀘칭으로 인해 발생하는 임피던스 때문에 사고전류는 자장인가 리액터로 분류되어 흐르게 된다. 이때 흐르는 전류로 인해 리액터에서는 자장이 발생하게 되어 초전도체에 인가된다. 인가된 자장은 초전도체의 임계특성 중 임계자장의 값을 조정하여 초전도체의 불균일한 임계특성의 차이를 줄이게 된다. 초전도 한류기는 용량 증대를 위해 다수의 초전도체를 직·병렬로 연결하여야 한다. 이때 인가된 자장은 불균일한 초전도체의 임계특성의 차이를 줄임으로서 초전도체의 동시적인 퀘칭을 유도하게 된다.

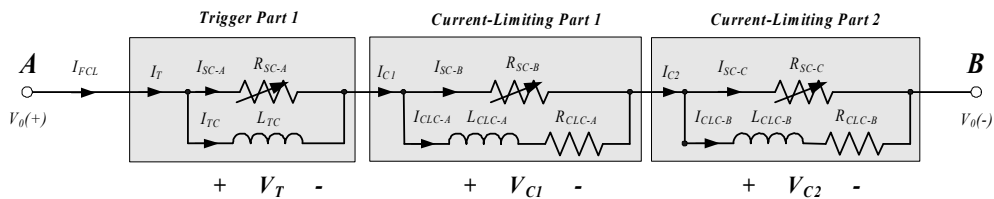


그림 3-1 행렬방식 초전도 한류기의 등가회로도

Fig. 3-1 Equivalent circuit of the SFCL using the matrix method

전류제한 부분은 직렬로 연결된 션트 리액터(Shunt reactor)와 션트 저항(Shunt resistor)이 초전도체에 병렬로 연결되어 있다. 정상상태에서는 전류가 초전도체로 흐르게 되며, 사고 발생시 초전도체에서 발생하는 저항과 병렬로 연결된 션트 리액터 및 션트 저항의 합성임피던스에 의해 사고전류는 제한된다.

자장인가 부분에서 발생하는 전압·전류를 V_T, I_T 라 하고, 두 개의 전류제한 부분이 직렬로 연결된 부분에서 발생하는 전압·전류를 각각 $V_{C1}, V_{C2}, I_{C1}, I_{C2}$ 라고 할 때 초전도 한류기의 전체 임피던스(Z_{total})와 전체 전류(I_{total})를 다음과 같은 방정식으로 표현할 수 있다. 등가회로도를 분석하기 위해 다음과 같은 가정을 만들었다.

1. 전류제한을 위한 션트 리액터 : $L_{CLC-A} = L_{CLC-B} = L_{CLC}$ 로 동일
2. 전류제한을 위한 션트 저항 : $R_{CLC-A} = R_{CLC-B} = R_{CLC}$ 로 동일
3. 초전도체에서 발생하는 저항 : $R_{SC-B} = R_{SC-C} = R_{SCC}$ 로 동일

위의 가정을 통해 다음과 같은 방정식을 구할 수 있다.

$$Z_{total} = \frac{R_{SC-A} \cdot jwL_{TC}}{R_{SCT} + jwL_{TC}} + 2 \left[\frac{R_{SCC}(R_{CLC} + jwL_{CLC})}{2R_{SCC} + R_{CLC} + jwL_{CLC}} \right] \quad (3-1)$$

$$\begin{aligned} I_{total} = I_{FCL} = I_T = I_{C1} = I_{C2} &= \frac{R_{SC-A} + jwL_{TC}}{jwL_{TC} \cdot R_{SC-A}} \cdot V_T \\ &= \left[\frac{1}{R_{SCC}} + \frac{1}{R_{CLC} + jwL_{CLC}} \right] \cdot V_{C1} \end{aligned} \quad (3-2)$$

식 (3-1)은 초전도 한류기의 전체 임피던스로서 우변의 첫째항은 자장인가 부분의 임피던스이고, 둘째항은 전류제한 부분의 임피던스이다. 사고 전에는 초전도 소자의 영저항 특성을 이용하여 아무런 손실없이 전류가 흐른다. 사고 후에는 초전도 소자의 퀘치로 발생하는 저항으로 인해 사고전류를 제한하게 된다. 이때 자장인가 부분에 연결되어 있는 셉트 리액터와 초전도체 저항의 합성 임피던스가 적기 때문에 사고전류제한의 역할을 거의 하지 못한다. 그러나 셉트 리액터가 전류제한 부분의 초전도체를 감싸고 있기 때문에 자장을 인가하게 된다. 이것은 초전도체의 퀘치 발생속도를 높여 동시퀘치를 유도하는 역할을 한다.

위의 식들로부터 각 자장인가 부분 및 전류제한 부분의 임피던스 및 전압·전류의 상호 관계를 확인할 수 있다. 여기서 각 초전도 소자에 병렬로 연결되어 있는 자장인가 리액터, 셉트 리액터 및 셉트 저항을 통해 사고전류의 제한율 및 초전도 소자의 부담을 조정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

B. 구성요소 설계 및 제작

1. 자장인가 리액터 설계 및 제작

자장인가 리액터는 자장인가 부분 및 전류제한 부분에 있는 초전도체에 자장을 인가시키기 위한 리액터로서 그림 3-2와 3-3과 같이 설계·제작하였다. 이 리액터는 중간 부분에 공극을 두어 그림 3-3과 같이 코일을 감지 않음으로써 자장인가 부분보다 전류제한 부분에 있는 초전도 소자에 더 많고 균일한 자장을 인가할 수 있는 구조를 가지고 있다.

설계된 자장인가 리액터는 자장인가 부분에 있는 1개의 초전도 소자와 전류제한 부분에 있는 2개의 초전도 소자를 동시에 위치시킬 수 있는 1×3 구조의 한류모듈이다. 또한 초전도체의 퀘칭시 발생하는 저항으로 인해 열이 발생하며, 이로 인해 주변의 LN₂를 기화시키게 된다. 이 기체 질소는 타 초전도체에 전달되어 임계온도에 영향을 줄 수 있다. 그러므로 기체질소가 잘 빠질 수 있도록 코일이 감겨있지 않은 중간 부분에 holes을 만들었다.

자장인가 리액터의 형틀에 감기는 코일은 1mm 두께의 구리선을 이용하여 190턴씩 3층으로 감았다. 표 3-1은 제작된 자장인가 리액터의 임피던스를 측정한 데이터이다.

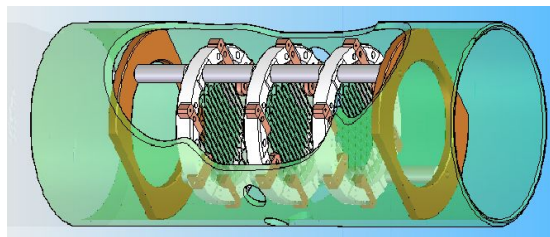
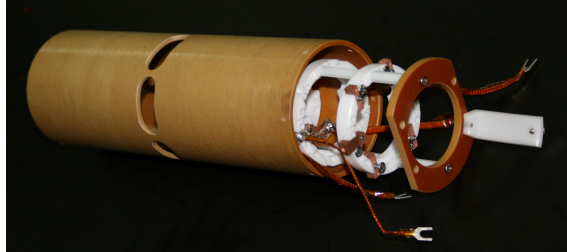
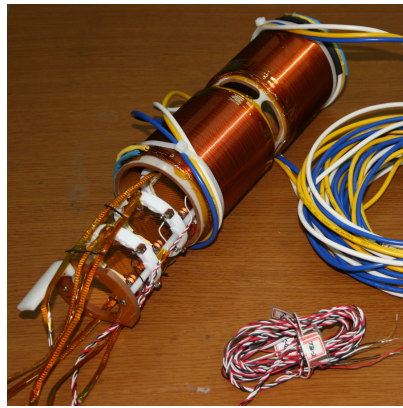


그림 3-2 자장인가 리액터의 설계도

Fig. 3-2 Drawing of the reactor to apply the magnetic field



(a) Outline of reactor to apply magnetic field



(b) Assembling of reactor to apply magnetic field and superconducting unit

그림 3-3 설계 · 제작된 자장인가 리액터 및 조립사진

Fig. 3-3 Reactor to apply the magnetic field and assembling

표 3-1 제작된 자장인가 리액터의 임피던스 값

Table 3-1 Impedance values of manufactured reactors to apply the magnetic field

	층수(턴수)	R[Ω]	L[mH]
Reactor-R1	1층(190턴)	1.52	4.52
	2층(380턴)	2.38	7.58
	3층(570턴)	3.57	13.67
Reactor-R2	1층(190턴)	1.51	4.51
	2층(380턴)	2.36	7.53
	3층(570턴)	3.55	12.56
Reactor-S1	1층(190턴)	1.52	4.53
	2층(380턴)	2.37	7.56
	3층(570턴)	3.56	12.61
Reactor-S2	1층(190턴)	1.53	4.52
	2층(380턴)	2.38	7.58
	3층(570턴)	3.58	12.70
Reactor-T1	1층(190턴)	1.51	4.50
	2층(380턴)	2.35	7.51
	3층(570턴)	3.53	12.50
Reactor-T2	1층(190턴)	1.51	4.49
	2층(380턴)	2.36	7.52
	3층(570턴)	3.50	12.32

2. 삼상 구조물 설계 및 제작

삼상 행렬방식 초전도 한류기의 실험을 위해서는 모듈화된 자장인가 리액터가 3개 이상 필요하다. 각 상 리액터의 전기적 절연을 위해 그림 3-4와 같이 구조물을 설계·제작하였다. 이 구조물은 총 12개의 자장인가 리액터를 설치할 수 있으며, 기계적 강도를 갖기 위해 10 [mm] 두께의 베이클라이트로 제작되었다.

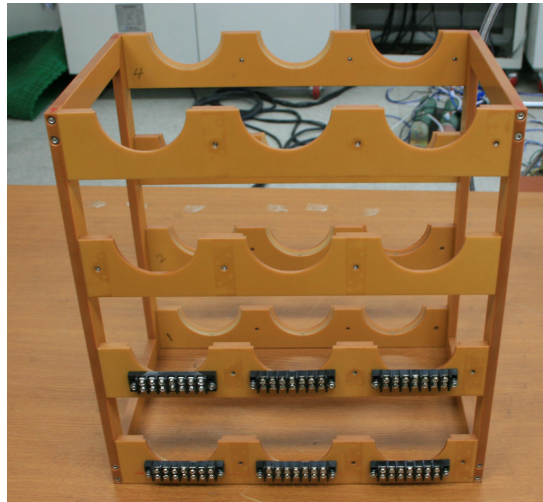


그림 3-4 행렬방식 초전도 한류기를 위해 제작된 삼상 구조물
Fig. 3-4 Construction to assemble the three-phase SFCL using matrix method

3. 션트 리액터의 설계 및 제작

그림 3-5는 전류제한 부분의 초진도 소자에 병렬로 연결되는 션트 리액터를 나타낸 것이다. 각각의 리액터는 1 [mH]의 인덕턴스 값을 가지도록 원형 철심에 2.5 [mm]의 구리선으로 감았다. 션트 리액터는 션트 저항과 직렬로 연결되어 급격히 증가하는 사고전류로부터 전류제한 부분의 초진도체를 보호하고, 초진도체의 회복특성을 개선하는 역할을 수행한다.

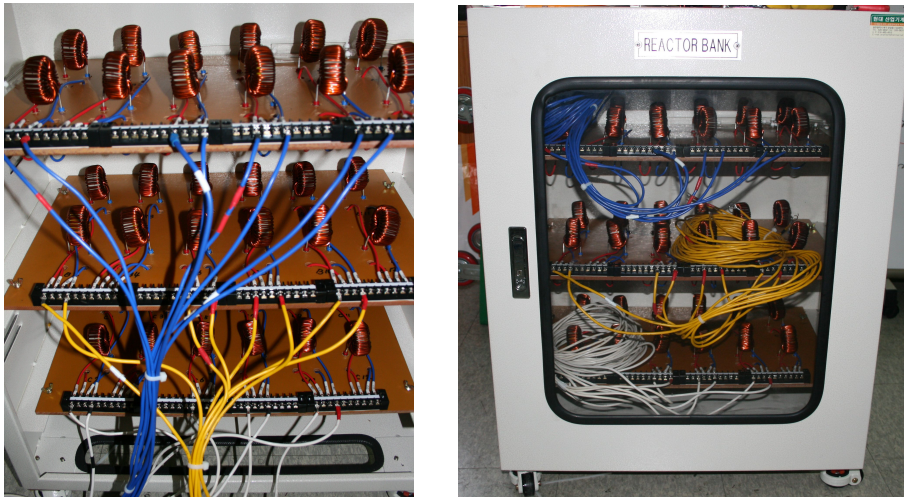


그림 3-5 션트 리액터
Fig. 3-5 Shunt reactor bank

C. 초전도체의 임계특성 측정 및 동작특성

1. 초전도체의 임계특성 측정

그림 3-6은 초전도체의 임계전류를 측정하기 위한 실험 장치도이다. *DC power supply*를 통해 일정하게 증가하는 전류를 인가하였다. 초전도체는 임계전류 값에 도달하기 이전에 영저항 특성에 의해 0 [V]의 전압을 발생시킨다. 초전도체가 임계전류 값에 도달하게 되면 초전도 상태에서 상전도 상태로 켄치되어 일정 저항이 발생하게 되며, 이때 전압이 발생한다. *X-Y Recorder*의 X축은 1 [Ω]의 *Shunt Resistance*를 통해 인가되는 전류를 측정·표시하게 되며, Y축은 초전도체의 양단에 연결하여 발생하는 전압 값을 표시하게 된다. Y축의 전압이 발생한 지점을 기준으로 1 [mV]가 되는 지점이 초전도체의 임계전류 값이 된다.

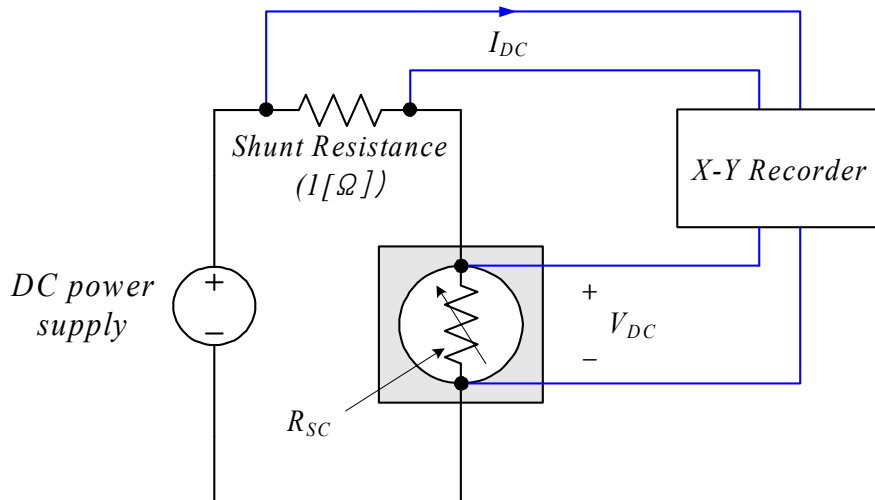


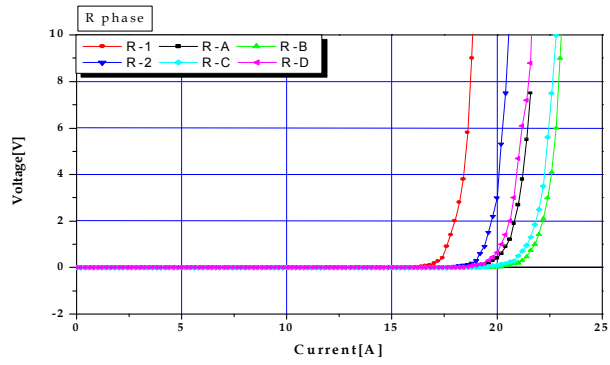
그림 3-6 초전도 임계 전류 측정을 위한 실험 회로도

Fig. 3-6 Experimental circuit diagram to measure the critical current of a superconducting unit

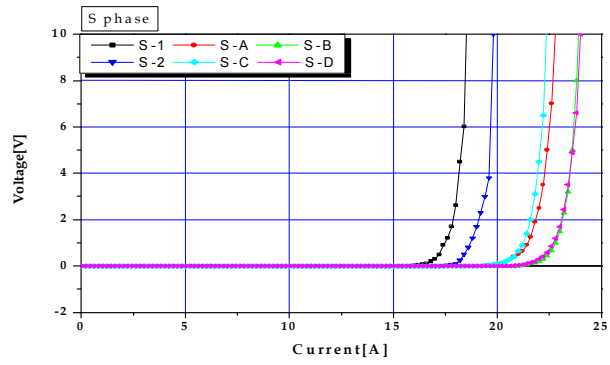
2. 임계특성에 따른 각 상의 자장인가 리액터 구성

행렬방식 초전도 한류기에 사용된 모듈은 그림 3-3과 같이 리액터 틀 내부에 초전도 소자가 위치하고 리액터 틀 외부에는 자장인가를 위한 리액터가 감긴 구조를 갖는다. 자장인가 부분에 사용되는 초전도체는 초전도체에 자장을 인가하기 위해 먼저 켜치되어 자장인가 리액터로 전류를 분류시켜야 한다. 그러므로 다른 초전도체보다 임계전류가 낮은 초전도체를 선택해야 한다. 상대적으로 전류제한 부분에 있는 2개의 초전도체는 임계전류 값이 높은 것을 선택해야 한다. 자장인가를 통해 전류제한 부분에 있는 초전도체 상호간 임계전류의 차이가 줄어드는 것을 확인하기 위해 차이가 큰 초전도체를 선택하였다.

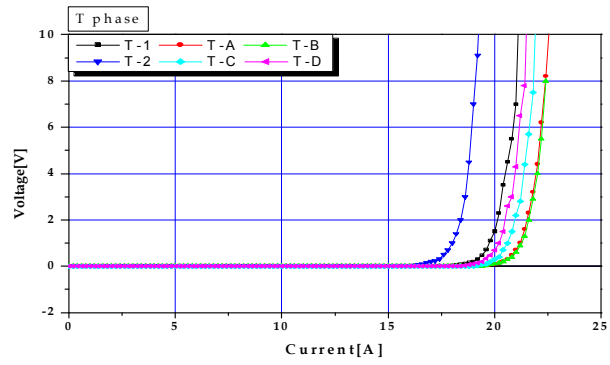
그림 3-7은 임계전류 측정 장치를 통해 측정된 각 상 초전도체의 임계전류($V-I$) 특성 곡선을 나타낸 것이다. 여기서 R-1은 자장인가 부분의 초전도체이며, R-A와 R-B는 전류제한 부분의 초전도체로서 모듈화된 자장인가 리액터의 내부에 그림 3-3과 같이 존재하게 된다. 각 상에 있는 초전도체들도 동일하게 설정하였다. 각 상에 사용된 초전도 소자들 중 임계 전류 값이 작은 것들을 자장인가 부분의 초전도체로 사용하였다는 것을 확인할 수 있다. 그림 3-7(a)의 R상에 사용된 소자를 보면 R-1과 R-2가 자장인가 부분의 초전도체로 채택하였고, R-A, R-B, R-C, R-D는 전류제한 부분의 초전도체로 사용되었다.



(a) R-phase superconducting unit



(b) S-phase superconducting unit



(c) T-phase superconducting unit

그림 3-7 각 상에 사용된 초전도체의 $V-I$ 특성 곡선
Fig. 3-7 $V-I$ curves of superconducting units

3. 각 상의 자장인가 리액터 동작특성

a. 자장인가 리액터의 사고전류 제한특성

자장인가 리액터의 사고전류 제한 실험을 위해 그림 3-8과 같이 실험 회로도를 구성하였다. 선로에 흐르는 전류를 측정하기 위한 표준저항(R_0)과 단락사고를 발생시키기 위한 부하저항(R_L)은 각각 1 [Ω]과 50 [Ω]을 사용하였다. 선로에 전압(V_0)을 인가하기 위한 SW_1 과 단락사고를 발생시키기 위한 SW_2 를 각각 사용하였다. 그림에서 A와 B에 그림 3-1의 행렬방식 초전도 한류기가 연결된다.

그림 3-9는 각 상의 자장인가 리액터 중 T상에 사용된 초전도체의 전압 및 전류 파형을 나타낸 것이다. 자장인가 리액터가 190턴의 경우는 자장인가 부분의 초전도체가 켜지지 않았고, 전류제한 부분의 두 초전도 소자는 켜졌었다는 것을 확인할 수 있다. 380턴과 570턴의 경우에는 자장인가 부분과 전류제한 부분의 모두에서 초전도체가 켜졌었다. 190턴의 경우는 자장인가 리액터의 임피던스가 너무 작아 사고 발생 초기에 사고전류가 자장인가 리액터로 분류되어 흐름으로써 자장인가 부분의 초전도체가 켜지지 않았다. 그림 3-9(b)에서 사고 초기에 자장인가 부분의 초전도체와 같이 자장인가 리액터에 전류가 흐르는 것을 확인할 수 있다. 그림 3-9(a)의 190턴인 경우에 전류제한 부분의 두 초전도체에 발생하는 전압은 각각 145 [V], 130 [V]였고, (c)의 380턴인 경우는 136 [V], 139 [V], (e)의 570턴인 경우는 130 [V], 144 [V]였다. 이 부분에서 확인할 수 있는 것은 자장인가 코일의 변화에 따라 각 초전도 소자간 전압의 차이가 변한다는 것이다. 380턴의 경우 초전도 소자에서 발생된 전압 차이가 3 [V]정도로 가장 겹이 적었다. 그림 3-9(a), (c), (e)의 최대 점을 확인했을 때도 380턴의 경우 전류제한 부분의 두 초전도체간 차이가 21[V] 정도로 가장 작은 값을 나타냈다. 켜지 후 초전도체간 전압 차이가 감소한다는 것은 사고시 각 초전도체의 전력부담이 어느 한쪽에 치

우치지 않고 잘 분배된다는 것을 의미한다.

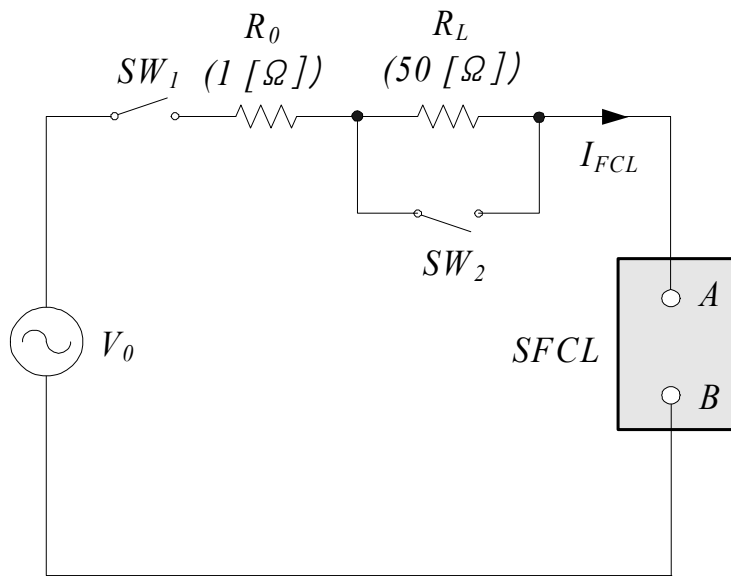
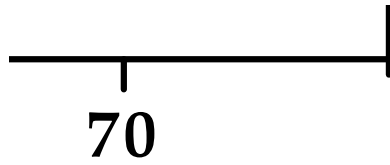
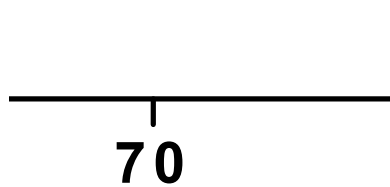


그림 3-8 초전도 한류기의 실험 회로도
Fig. 3-8 Experimental circuit of a SFCL



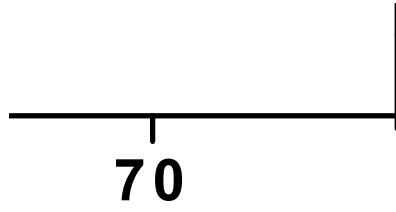
(a) Voltage curves (turn number of a reactor : 190 turns)



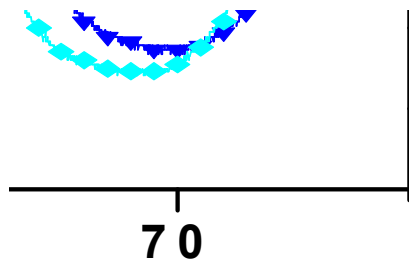
(b) Current curves (turn number of a reactor : 190 turns)

그림 3-9 차장인가 리액터의 턴수 변화에 따른 전압·전류
특성곡선(인가전압 : 360[V])

Fig. 3-9 Voltage and current curves of a SFCL according to turn
number of a reactor to apply the magnetic field
(applied voltage : 360[V])



(c) Voltage curves (turn number of a reactor : 380 turns)



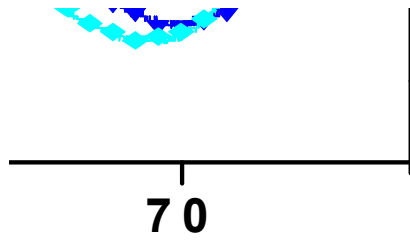
(d) Current curves (turn number of a reactor : 380 turns)

그림 3-9 (계속)

Fig. 3-9 (continued from the previous page)

70

(e) Voltage curves (turn number of a reactor : 570 turns)



(f) Current curves (turn number of a reactor : 570 turns)

그림 3-9 (계속)

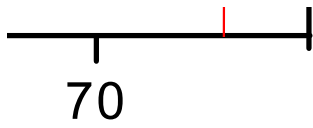
Fig. 3-9 (continued from the previous page)

b. 자장인가 리액터의 초전도체에서 발생하는 저항 특성

그림 3-10은 초전도체에서 발생된 저항 값을 나타낸다. 자장인가 리액터의 턴수 변화에 따라 전류제한 부분의 초전도체에서 발생된 저항의 크기는 큰 변화가 없었지만 자장인가 부분의 초전도체에서 발생된 저항 값은 크게 변한다는 것을 확인할 수 있다. 식 3-3을 통해서도 자장인가 리액터의 턴수 변화에 따른 자장인가 리액터의 임피던스 변화를 예측할 수도 있지만 190턴의 경우처럼 초전도체가 켜지지 않았을 경우는 식 3-3을 적용하기 어렵다. 자장인가 리액터의 턴수가 증가함에 따라 자장인가 리액터의 임피던스가 증가하기 때문에 자장인가 리액터와 병렬로 연결된 초전도체로 많은 전류가 흘러 발생하는 저항이 증가한다. 또한 자장인가 리액터의 영향으로 전류제한 부분에서 각 초전도체의 저항 값의 차이가 줄어들다는 사실도 확인할 수 있다.

$$Z_{TC} = \frac{1}{\frac{1}{R_{SCT}} + \frac{1}{j\omega L_{TC}}} = \frac{j\omega L_{TC} \cdot R_{SCT}}{R_{SCT} + j\omega L_{TC}} \quad (3-3)$$

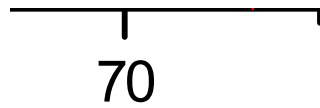
여기서 Z_{TC} 은 자장인가 부분의 전체 임피던스, R_{SCT} 은 초전도체에서 발생하는 저항, $j\omega L_{TC}$ 은 자장인가 리액터의 임피던스를 나타낸다.



'
70

(a) Turn number of a reactor
: 190 turns

(b) Turn number of a reactor
: 380 turns



(c) Turn number of a reactor
: 570 turns

그림 3-10 초전도체에서 발생하는 저항곡선 (인가전압 : 360[V])
Fig. 3-10 Resistance curves generated in the superconducting units
(applied voltage : 360[V])

IV. 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 동작특성

A. 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 실험회로도

전력시스템으로 초전도 한류기를 적용하기 위해서는 현재의 삼상 전력계통에서 발생하는 사고유형을 실험할 수 있는 회로도 구성이 중요하다. 그림 4-1은 삼상 행렬방식 초전도 한류기를 실험하기 위해 구성한 실험회로도이다. 각 상의 전압은 V_R , V_S , V_T 로 표현하였으며, Y결선되어 중선선은 접지하였다. SW_{R-1} , SW_{S-1} , SW_{T-1} 스위치를 통해 전원을 공급하였으며, $R-Load$, $S-Load$, $T-Load$ 의 50 [Ω] 부하저항을 SW_{R-2} , SW_{S-2} , SW_{T-2} 스위치로 단락시켜 지락사고를 발생시켰다. 삼상 행렬방식 초전도 한류기는 각 상의 *input*과 *output* 단자에 연결된다.

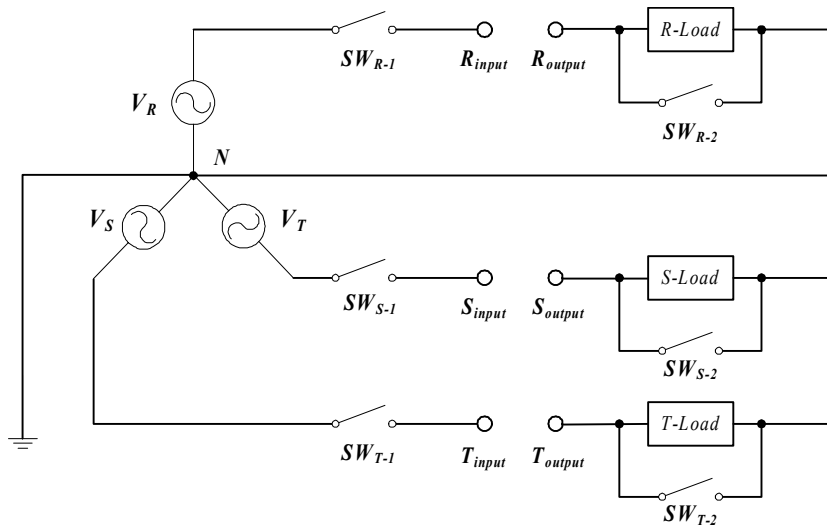


그림 4-1 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 실험회로도

Fig. 4-1 Experimental circuit of three-phase SFCL using matrix method

B. 1×3 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 동작특성

1. 등가회로도

그림 4-2는 1×3 구조를 갖는 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 등가회로를 나타낸 것이다. 각 상의 초전도체는 그림 3-7의 임계전류 곡선과 같이 설정하여 자장인가 리액터의 내부에 위치시켰으며, 자장인가 부분 및 전류제한 부분의 특성은 3장에서 설명하였다. 각 상에 흐르는 사고전류는 식 3-1과 같다. 삼상 전력시스템에서 발생하는 사고는 1선 지락사고가 전체 사고 중 70% 이상을 차지하고 있다. 본 장에서는 전력시스템에서 발생하는 1선 지락, 2선 지락, 3선 지락사고를 그림 4-1의 실험회로를 통해 모의하여 특성을 분석하였다.

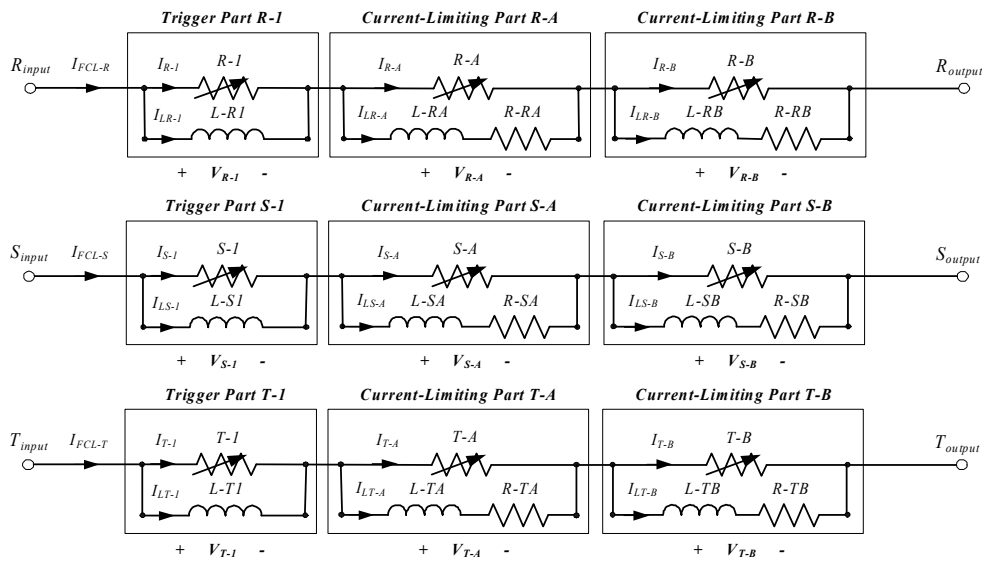


그림 4-2 1×3 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 등가회로도

Fig. 4-2 Equivalent circuit of three-phase SFCL using matrix method

2. 사고전류제한 특성

a. 1선 지락사고 시 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 특성

(1) 초전도체에서 발생하는 전압 특성

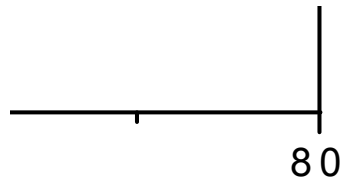
그림 4-3은 1×3구조를 갖는 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 R상 1선(R상) 지락사고 시 자장인가 리액터의 턴수 변화에 따라 초전도체에서 발생하는 전압을 나타낸 것이다. 자장인가 리액터의 턴수가 190턴인 경우 자장인가 부분의 초전도체는 켜지지 않았고, 전류제한 부분에 있는 2개의 초전도체에서는 켜치가 발생하여 전압이 각각 188.2 [V], 130.2 [V]를 나타내었다. 380턴에서는 자장인가 부분에 있는 초전도체가 켜치되어 발생한 전압이 71.13 [V]이었고, 전류제한 부분에 있는 초전도체는 각각 161.47[V], 142.32[V]를 나타내었다. 570턴의 경우는 자장인가 부분의 초전도체의 전압이 117.62[V], 전류제한 부분에 있는 초전도체에서는 각각 163.3[V], 139.8[V]를 나타내었다. 190턴의 경우는 자장인가 리액터의 인덕턴스 값이 너무 작아서 사고전류가 자장인가 리액터 측으로 분류되어 초전도체를 켜치시킬 수 있을 정도의 전류가 흐르지 않았다는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 자장인가 리액터의 턴수가 380턴과 570턴인 경우에는 리액터의 임피던스가 190턴의 경우보다 커서 초전도체는 켜치되었다. 전류제한 부분의 두 초전도체간 전압을 비교해보면, 사고 초기에 발생한 전압 차이가 380턴의 경우는 19.29 [V] 정도이고, 570턴의 경우는 24.33 [V]라는 것이다. 이것은 턴수가 증가함에 따라 자장인가 리액터의 임피던스가 증가하여 그만큼 자장인가 리액터에 흐르는 전류가 작아지게 되어 발생하는 자장의 크기가 감소한다. 이것은 초전도체의 임계자장에 영향을 주지 못하여 임계전류의 차이를 줄일 수 없게 된다. 즉, 자장인가 리액터의 턴수가 380턴의 경우에 초전도체간의 임계전류 밀도의 차이를

더 많이 줄여주게 되어 초전도체에서 발생하는 전압의 차이를 줄여준다
는 것을 알 수 있다.



(a) 190 turns

(b) 380 turns



(c) 570 turns

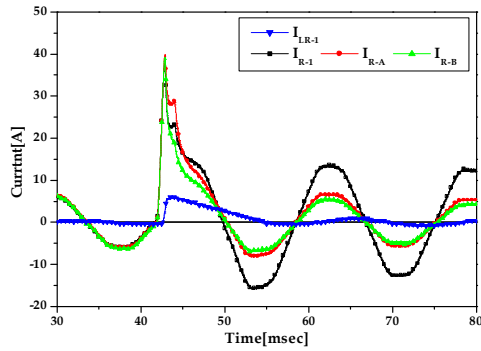
그림 4-3 1선 지락사고 시 자장인가 리액터의 턴수에 따른 초전도체의
전압특성 곡선 (인가전압 : 400[V])

Fig. 4-3 Voltage curves of the superconducting units according to
turn number of the reactors during the single line-to-ground fault
(applied voltage : 400[V])

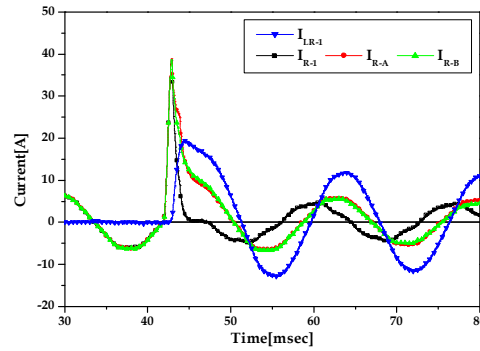
(2) 각 부분에 흐르는 전류 특성

그림 4-4는 삼상 행렬방식 초전도 한류기에 1선(R상) 지락사고가 발생한 경우 R상의 각 부분에 흐르는 전류를 나타낸 곡선이다. 자장인가 리액터에 흐르는 전류(I_{LR-1}), 자장인가 부분의 초전도 소자에 흐르는 전류(I_{R-1}) 그리고 전류제한 부분의 두 초전도체에 흐르는 전류(I_{R-A} , I_{R-B})를 나타낸다. 자장인가 리액터의 턴수가 190턴의 경우는 사고 초기에 자장인가 부분의 초전도체에 흐르는 전류가 30.9[A]로 증가하였을 때 자장인가 리액터로 사고 전류(I_{LR-1})가 분류되었다. 이것은 190턴인 리액터의 임피던스가 작기 때문에 자장인가 부분의 초전도체가 켄치 전에 리액터 측으로 전류가 분배되었다는 것을 의미한다. 이것으로 부터 사고 후에도 자장인가 부분의 초전도체에는 전류제한 부분의 초전도체보다 큰 사고 전류가 흐르는 것을 확인할 수 있다. 자장인가 리액터가 380턴과 570턴인 경우에는 사고 이후 자장인가 부분의 초전도체가 켄치되어 자장인가 리액터로의 사고전류 분배가 제대로 이루어졌다. 여기서 380턴의 자장인가 리액터에 흐르는 전류가 570턴에 비교해 큰 값을 나타내는데 이것은 자장인가 리액터의 턴수에 따른 임피던스 차이 때문이다. 이로부터 전류제한 부분의 초전도체로 큰 자장을 인가하기 위해서는 자장인가 리액터의 턴수를 높인다고 우수한 것이 아니라는 것을 입증할 수 있다. 즉 제작된 자장인가 리액터 모듈은 큰 자장을 인가하기 위해서는 리액터의 턴수가 380턴인 경우가 가장 우수하다.

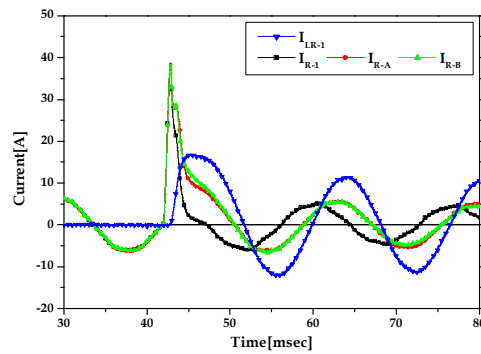
또한 자장인가 부분의 초전도체가 켄치되어 사고 발생 1주기 이후에 흐르는 전류(I_{R-1})가 더 작다는 것을 확인할 수 있다. 이것으로부터 초전도체의 전력부담을 줄일 수 있다는 것을 의미하며, 또한 전류제한 부분에 자장을 인가하여 두개의 초전도체간 임계전류의 차이를 줄여준다는 것을 의미한다. 이 결과 인가되는 자장의 크기에도 차이가 생기는 것이다.



(a) 190 turns



(b) 380 turns



(c) 570 turns

그림 4-4 1선 지락사고 시 자장인가 리액터의 턴수에 따른 초전도체의 전류특성 곡선 (인가전압 : 400[V])

Fig. 4-4 Current curves of the superconducting units according to turn number of the reactors during the single line-to-ground fault (applied voltage : 400[V])

b. 2선 지락사고시 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 특성

(1) 각 부분에 흐르는 전류 및 초전도체의 전압 특성

그림 4-5는 2선(R·S상) 지락사고 시 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 각 부분에 흐르는 전압 및 전류 곡선을 나타낸 것이다. (a), (d), (g)는 자장인가 부분의 각 상 사고전류(I_{FCL-R} , I_{FCL-S} , I_{FCL-T})의 크기 및 초전도체에 흐르는 전류(I_{R-L} , I_{S-L} , I_{T-L})를 나타낸 것이고, (b), (e), (h)는 각 상의 전류제한 부분의 초전도체에 흐르는 전류(I_{R-A} , I_{R-B} , I_{S-A} , I_{S-B} , I_{T-A} , I_{T-B})의 크기를 나타낸 것이다. (c), (f), (i)는 각 부분의 초전도체에서 발생하는 전압을 나타낸 곡선이다.

R상과 S상의 2선 지락사고이기 때문에 사고가 발생하지 않은 T상에는 정상적인 전류가 흐르는 것을 알 수 있다. 그러므로 사고전류가 흐르지 않기 때문에 T상에 있는 초전도체는 초전도 상태를 유지하게 된다. 자장인가 리액터의 턴수가 190턴일 때, R, S상의 경우 자장인가 부분의 소자가 켜치되지 않았는데도 불구하고 자장인가 리액터에 전류가 흐르는 것을 볼 수 있다. 이것은 자장인가 리액터의 임피던스가 작기 때문에 초전도체와의 임피던스 비에 따라 전류가 흐른다. 또한 자장인가 리액터가 380턴과 570턴인 경우 자장인가 부분의 초전도체가 켜치되었다를 것을 확인할 수 있다. 그리고 380턴의 경우 초전도체의 켜치로 인해 자장인가 리액터로 흐르는 전류가 더 크다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 1선 지락사고의 경우와 같다.

그림 4-5의 (b), (e), (h)에서, 자장인가 리액터의 턴수에 따라 각 상 전류제한 부분의 두 초전도체에 흐르는 전류를 비교해 보면 자장인가 리액터의 턴수가 190턴인 경우 전류의 크기가 더 크다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 자장인가 부분의 초전도체가 켜치되지 않아 큰 사고전류가 흐르기 때문이다. 반면 380턴과 570턴의 경우 거의 같은 크기의 전류가

초전도체에 흐른다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 자장인가 리액터의 턴수 변화는 전류제한 부분의 초전도체에 자장을 인가하는 역할만을 수행할 뿐 전류제한에는 거의 영향을 안준다는 것을 의미한다.

그림 4-5의 (c), (f), (i)의 각 상에 있는 9개의 초전도체에서 발생하는 전압을 비교해 보면 380턴의 전류제한 부분에 있는 두 초전도체간 전압의 차이가 가장 적다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 380턴의 경우 자장인가 리액터로 흐르는 전류로 인해 발생하는 자장의 크기가 더 크기 때문에 전류제한 부분에 있는 초전도체간 임계전류의 차이가 줄어들었다는 것을 의미한다. 이것은 자장인가 리액터의 턴수가 190턴일 때 자장인가 부분에 있는 초전도체의 무퀵치로 인해 전류제한 부분에 있는 두 초전도체간 전압차이가 크다는 것으로부터 확인할 수 있다. 초전도체의 임계특성의 차이는 제작상 불가피하게 발생한다. 행렬방식 초전도 한류기에서는 이러한 초전도체의 임계특성을 자장인가 리액터를 통해 개선할 수 있다는 것을 실험을 통해 검증하였다.

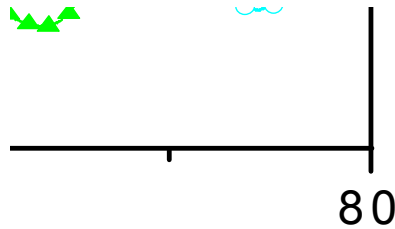
Turn ratio of the reactors : 190 turns

0 80 100

(a) Current curves flowing into
the part for generating of
magnetic field



(b) Current curves flowing into
the current limiting part



(c) Voltage curves of the
superconducting units

그림 4-5 2선 지락사고 시 삼상 행렬방식 초전도 한류기의
전압-전류특성 곡선 (인가전압 : 400[V])

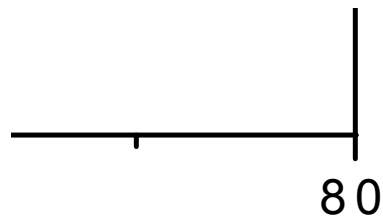
Fig. 4-5 Voltage and current curves of the SFCL according to turn
number of the reactors during the double line-to-ground fault (applied
voltage : 400[V])

Turn ratio of the reactors : 380 turns



(d) Current curve flowing into the part for generating of magnetic field

(e) Current curves flowing into the current limiting part

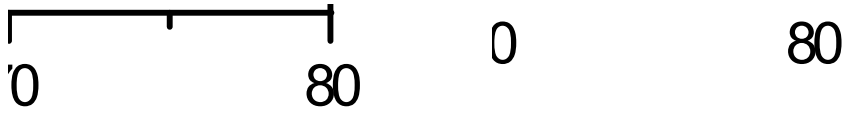


(f) Voltage curves of the superconducting units

그림 4-5 (계속)

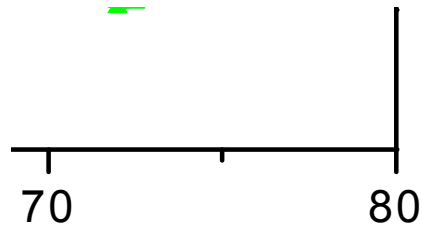
Fig. 4-5 (continued from the previous page)

Turn ratio of the reactors : 570 turns



(g) Current curve flowing into the part for generating of magnetic field

(h) Current curves flowing into the current limiting part



(i) Voltage curves of the superconducting units

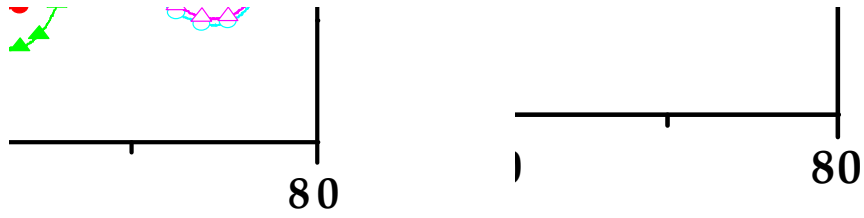
그림 4-5 (계속)

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

c. 3선 지락사고시 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 특성

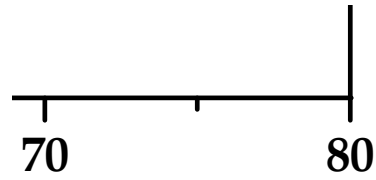
(1) 초전도체에서 발생하는 전압특성

그림 4-6은 3선(R·S·T상) 지락사고시의 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 각 상에 있는 초전도체에서 발생하는 전압특성 곡선을 나타낸 것이다. 자장인가 리액터의 턴수가 190턴인 경우는 전류제한 부분의 초전도체만이 켜치되었고, 각각의 전압은 188.15 [V]와 130.20 [V]이었다. 380턴의 경우는 자장인가 부분의 초전도체가 켜치되어 발생된 전압이 71.13 [V], 전류제한 부분의 초전도체 전압은 각각 161.47 [V], 142.32 [V]이었다. 570턴의 경우는 자장인가 부분의 초전도체가 117.62 [V], 전류제한 부분의 초전도체가 163.30 [V]와 139.8 [V]를 나타냈다. 여기서 확인할 수 있는 점은 자장인가 리액터의 턴수가 380턴의 경우 전류제한 부분의 초전도체에서 발생하는 전압의 갭이 19 [V] 정도인 반면에 570턴의 경우는 24 [V] 정도로 좀 더 큰 차이를 보인다는 사실이다. 이것은 380턴인 경우 자장인가 리액터에서 발생하는 자장이 전류제한 부분의 두 초전도체의 임계자장에 영향을 더 많이 주어 그 차이가 570턴인 경우보다 더 많이 주었다는 것을 확인할 수 있다. 자장인가 리액터가 190턴의 경우처럼 임피던스가 너무 작아 자장인가 부분의 초전도체로 전류가 적게 흘러 켜치되지 않거나, 580턴과 같은 경우처럼 각 초전도체간 전압차가 커지는 실험결과를 통해 삼상 행렬방식 초전도 한류기에서 초전도체의 임계 특성의 차이를 줄일 수 있는 최적 조건을 도출할 수 있다.



(a) 190 turns

(b) 380 turns



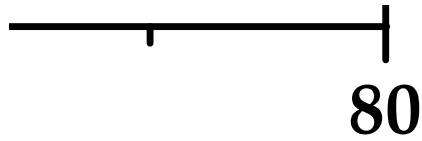
(c) 570 turns

그림 4-6 3선 지락사고 시 행렬방식 초전도 한류기의 초전도에서 발생하는 전압특성 곡선 (인가전압 : 400[V])

Fig. 4-6 Voltage curves of the superconducting units according to turn number of the reactors during the triple line-to-ground fault (applied voltage : 400[V])

(2) 각 부분에 흐르는 전류특성

그림 4-7은 3선 지락사고시 삼상 행렬방식 초전도 한류기에서 자장인가 리액터의 턴수 변화에 따른 사고전류(I_{FCL})의 크기 및 각 초전도체에 흐르는 전류(I_{R-1} , I_{R-A} , I_{R-B} , I_{S-1} , I_{S-A} , I_{S-B} , I_{T-1} , I_{T-A} , I_{T-B}), 자장인가 리액터에 흐르는 전류(I_{LR-1} , I_{LS-1} , I_{LT-1})의 크기를 나타낸 것이다. 여기서 인가되는 전압의 크기는 400[V]로 고정하였고 자장인가 리액터의 턴수는 190, 380, 570턴으로 하였다. 그림 4-7의 (a), (c), (e)에서 자장인가 리액터의 턴수가 증가함에 따라 사고전류의 크기는 각 상에서 모두 조금씩 감소하는 추이를 보였는데 이것은 자장인가 리액터의 임피던스 증가로 전체 임피던스의 증가때문이라 사료된다. 1선(R상) 지락사고와 마찬가지로 190턴의 경우는 자장인가 리액터의 작은 임피던스 때문에 자장인가 부분의 초전도체가 켜지지 못하였다. 이는 사고전류가 자장인가 부분에 있는 초전도체를 켜지시킬 수 있을 정도로 증가하기 이전에 자장인가 리액터로 전류가 분류되었기 때문이다. 각 턴수에 따라 자장인가 리액터로 흐르는 전류를 비교했을 때 380턴의 경우가 가장 크게 흐른다는 것을 확인할 수 있다. 570턴의 경우 리액터의 임피던스로 인해 전류가 덜 흐르게 된다. 이는 그림 4-7의 초전도체에서 발생하는 전압 곡선을 비교할 때 초전도체의 임계특성의 차이를 줄이는 데 380턴의 경우가 가장 적절하다는 결과를 뒷받침한다. 그림 4-7의 (b), (d), (f)에서 전류제한 부분에 있는 두 초전도체에 흐르는 전류를 비교해 보면 자장인가 리액터의 턴수가 380턴인 경우 전류의 차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 두 초전도체의 임계특성이 거의 동일하게 개선되었기 때문이다.



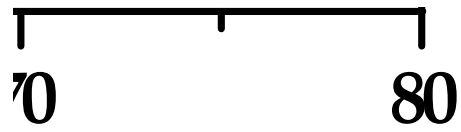
(a) Current curves flowing into the part for generating of magnetic field (190 turns)



(b) Current curves flowing into the current limiting part (190 turns)

그림 4-7 3선 지락사고 시 삼상 행렬방식 초전도 한류기 각 부분의 초전도체에 흐르는 전류특성 곡선 (인가전압 : 400[V])

Fig. 4-7 Current curves of the SFCL according to turn number of the reactors during the triple line-to-ground fault (applied voltage : 400[V])



(c) Current curves flowing into the part for generating of magnetic field (380 turns)

80

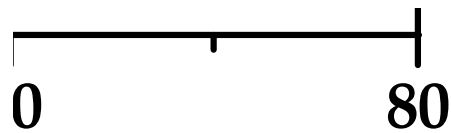
(d) Current curves flowing into the current limiting part (380 turns)

그림 4-7 (계속)

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

'
|
80

(e) Current curves flowing into the part for generating of magnetic field (570 turns)



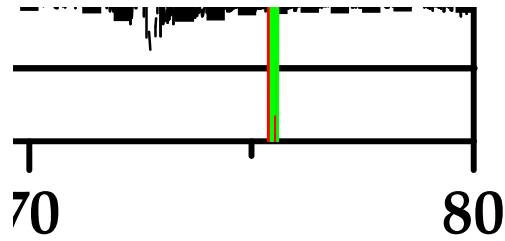
(f) Current curves flowing into the current limiting part (570 turns)

그림 4-7 (계속)

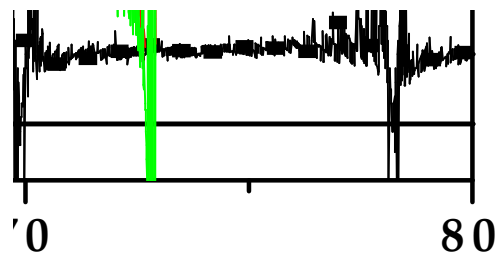
Fig. 4-7 (continued from the previous page)

(3) 각 상의 초전도체에서 발생하는 저항특성

그림 4-8은 3선 지락 사고시 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 각 부분에 있는 각 상의 초전도체에서 발생하는 저항값을 나타낸 것이다. 그림 4-8을 통해 확실히 알 수 있는 것은 각 상별로 자장인가 리액터의 턴수가 190턴의 경우는 자장인가 부분의 초전도체가 켄치되지 않았다는 것이다. 초전도체는 초전도 상태에서 영저항 특성에 의해 전력 시스템에 아무 영향을 미치지 않는다. 그러나 전력시스템 내에서 어떠한 사고가 발생하여 선로전류가 증가하여 초전도체의 임계전류를 초과하면 초전도 상태에서 상전도 상태로 상전이하여 저항을 발생시킨다. 즉 그림 4-8에서 초전도체에서 저항이 발생하지 않았다는 것은 켄치되지 않았다는 것을 의미한다. 자장인가 리액터가 190턴인 경우 리액터의 임피던스가 작아 초전도체가 켄치되기 전에 리액터로 전류가 분류하여 흐르기 때문에 초전도체의 임계전류 이상으로 사고전류가 증가하지 못한다. 각 상에서 자장인가 리액터의 턴수가 380턴과 570턴인 경우의 두 초전도체 저항을 비교하면 380턴의 경우 저항의 차이가 더 적다는 것을 확인할 수 있다. 앞에서 380턴인 경우 자장인가 리액터로 흐르는 전류의 크기가 더 크다는 것을 확인하였다. 이것은 자장인가 리액터에서 발생하는 자장이 더 크다는 것을 의미하며, 또한 전류제한 부분에 있는 두 초전도체간 임계특성의 차이가 더 많이 개선된다는 것을 의미한다. 그러므로 두 초전도체에서 발생하는 저항의 차이도 줄어들게 되는 것이다. 초전도체간 임계특성의 차이는 전력시스템에서 사고발생시 초전도체간 전력분담이 불균일하게 된다. 이는 임계전류가 낮은 초전도체로 전력부담이 집중되어 전기적 충격을 더 많이 받게 된다. 그러나 행렬방식 초전도 한류기에서는 초전도체 상호간의 임계특성 차이를 줄여줄 수 있는 구조를 가지고 있어 이러한 문제를 개선할 수 있다.



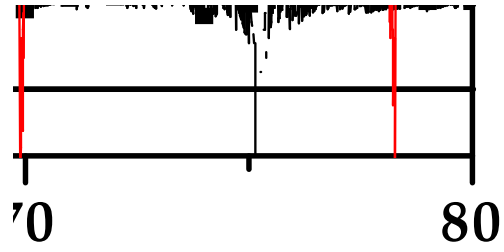
(a) Resistance of the superconducting units in the R-phase



(b) Resistance of the superconducting units in the S-phase

그림 4-8 3선 지락 사고시 자장인가 리액터의 턴수에 따라 각 상의 초전도체에서 발생하는 저항특성 곡선 (인가전압 : 400[V])

Fig. 4-8 Resistance curves generated in the superconducting units according to turn number of the reactors during the triple line-to-ground fault (applied voltage : 400[V])



(c) Resistance of the superconducting units in the T-phase

그림 4-8 (계속)

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

C. 2×3 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 동작특성

1. 등가회로도

그림 4-10은 2×3 구조를 갖는 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 등가회로도를 나타낸 것이다. 2×3 구조에서는 자장인가 부분과 두개의 전류제한 부분을 갖는 모듈화된 리액터가 각 상에 2개씩 위치하게 된다. 모듈화된 각각의 리액터는 서로 전기적 절연이 되어 있다. 그림 4-9는 비교 실험을 위한 삼상 저항형 초전도 한류기의 등가회로도를 나타낸 것이다.

그림 4-10에서 자장인가 리액터에 있는 각 상의 초전도체를 R-1, R-2, S-1, S-2, T-1, T-2라 하고, 전류제한 부분에 있는 각 상의 초전도체는 R-A, R-B, R-C, R-D, S-A, S-B, S-C, S-D, T-A, T-B, T-C, T-D라 하였다. 자장인가 및 전류제한 부분에 있는 초전도체의 전압과 전류는 그림 4-9에 나타낸 것과 같다. 각 상의 자장인가 리액터는 L-R1, L-R2, L-S1, L-S2, L-T1, L-T2로 하였고, 셉트저항 및 셉트 리액터는 R-RA, RB, RC, RD, R-SA, SB, SC, SD, R-TA, TB, TC, TD와 L-RA, RB, RC, RD, L-SA, SB, SC, SD, L-TA, TB, TC, TD로 하였다.

사고 발생 전 정상전류는 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 초전도체로 흘러 무손실로서 계통에 작용한다. 그러나 사고가 발생하여 사고전류가 초전도체의 임계전류를 초과하면 초전도체가 켄치되어 사고전류를 제한하게 된다. 이때 초전도체의 임계전류는 자장인가 부분에 있는 초전도체가 전류제한 부분에 있는 초전도체보다 적은 값이어서 먼저 켄치되고, 이로 인해 초전도체의 저항 증가로 자장인가 리액터로 사고전류가 분류되어 흐르게 된다. 이 분류된 전류에 의해 자장인가 리액터에서 자장이 발생하여 전류제한 부분에 있는 초전도체로 인가되며, 두 초전도체는 임

계자장이 증가하면서 임계전류밀도가 감소하여 임계특성의 차이가 줄어들게 된다. 이러한 특성으로 인해 초전도체의 동시퀘치를 유도할 수 있으며, 전력부담을 감소시킬 수 있다.

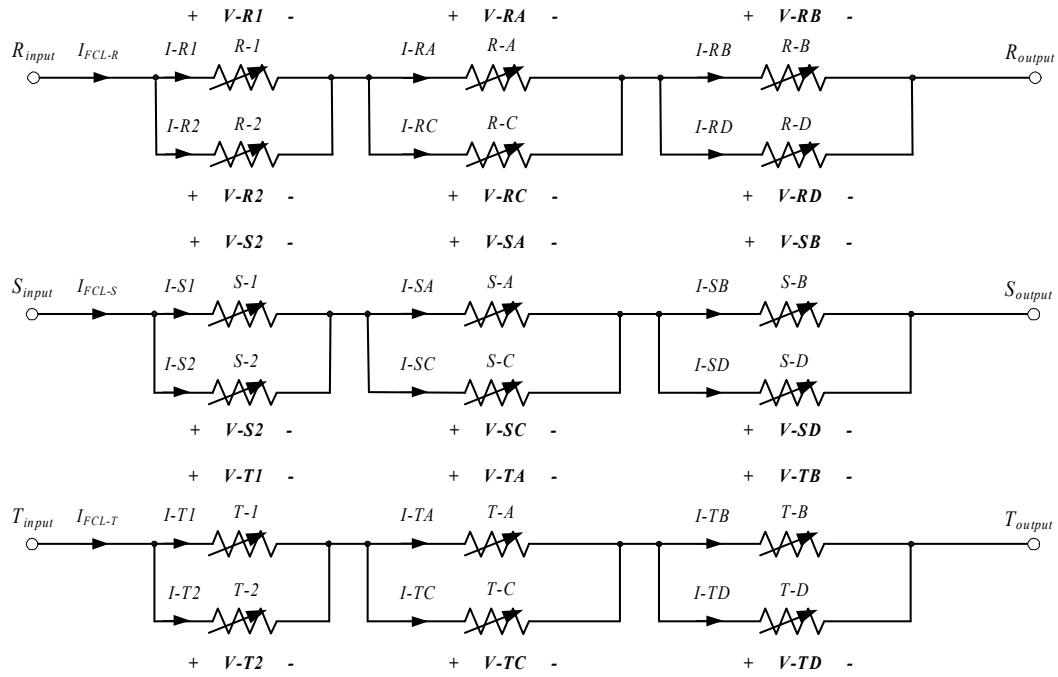


그림 4-9 2×3 구조를 갖는 삼상 저항형 초전도 한류기의 등가회로도
 Fig. 4-9 Equivalent circuit of three-phase resistive-type SFCL with 2×3 structure

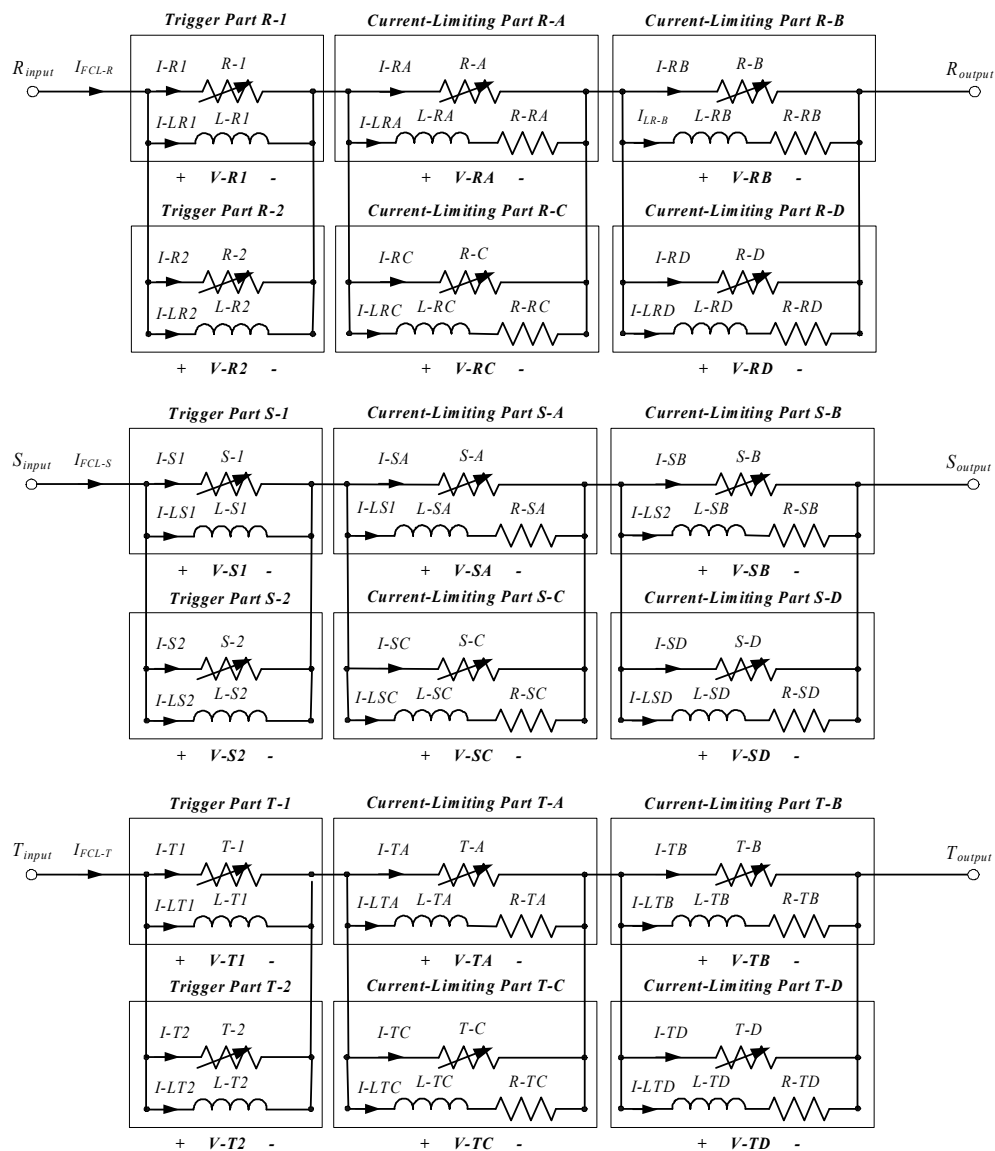


그림 4-10 2×3 구조를 갖는 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 등가회로도
 Fig. 4-10 Equivalent circuit of three-phase SFCL using the matrix method with 2×3 structure

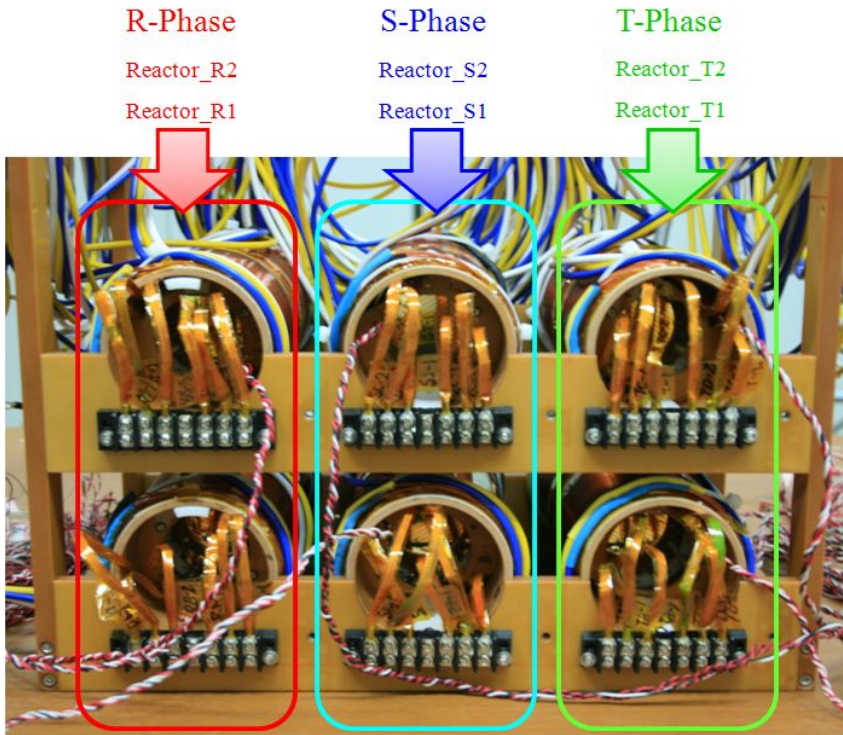


그림 4-11 2×3 구조를 갖는 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 사진
 Fig. 4-11 Picture of three-phase SFCL using the matrix method with
 2×3 structure

2×3 구조를 갖는 삼상 행렬방식 초전도 한류기에서 각 상의 전체 임피던스($Z_{total}(R, S, T)$)는 식 4-1과 같이 표현할 수 있으며, 각 상의 제한되는 사고전류($I_{FCL}(R, S, T)$)는 식 4-2와 같이 표현할 수 있다. 두 식에서 우변의 첫째항은 자장인가 부분의 임피던스이고, 두 번째 항은 전류제한 부분의 임피던스를 나타낸다. 1×3 구조를 갖는 행렬방식 초전도 한류기에서 식 3-1의 전체 임피던스와 비교할 때 1/2로 더 작다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 동일한 구조를 갖는 모듈화된 자장인가 리액터가 병렬로 연결되었기 때문이다. 즉 병렬연결로 인해 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 전류용량을 2배로 증가시켰다 할 수 있다.

$$Z_{total}(R, S, T) = \frac{R_{R1} \cdot j\omega L_{LR1}}{2(R_{R1} + j\omega L_{LR1})} + \frac{R_{RA}(R_{RRA} + j\omega L_{LRA})}{2R_{RA} + R_{RRA} + j\omega L_{LRA}} \quad (4-1)$$

$$\begin{aligned} I_{FCL}(R, S, T) &= \frac{2(R_{R1} + j\omega L_{LR1})}{R_{R1} \cdot j\omega L_{LR1}} \cdot V_{R1} \\ &= 2 \left[\frac{1}{R_{RRA} + j\omega L_{LRA}} + \frac{1}{R_{RA}} \right] \cdot V_{RA} \end{aligned} \quad (4-2)$$

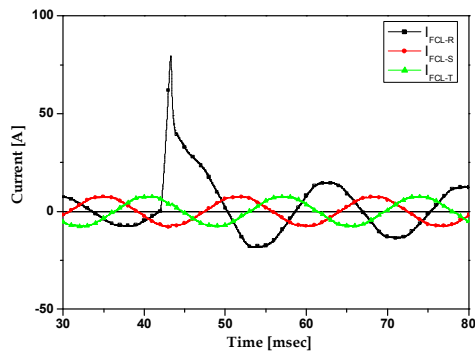
2×3 구조를 갖는 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 실험 회로도 는 그림 4-1과 같다. 셉트저항 및 셉트리액터는 각각 20 [Ω]과 1 [mH]를 사용하였고, 자장인가 리액터의 임피던스는 표 3-1과 같다. 또한 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 인가전압(V_R, V_S, V_T)은 480 [V]로 하였다. 실험은 삼상 전력계통의 사고 유형(1선 지락, 2선 지락, 3선 지락)에 따라 사고 전류제한 특성과 초전도체의 켈치 특성을 2×3구조로 초전도 소자가 연결된 삼상 저항형 초전도 한류기의 특성과 동시에 분석하였다.

2. 사고전류제한 특성

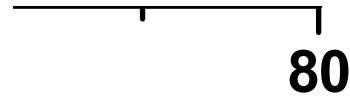
a. 1선 지락사고 시 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 동작특성

전력시스템 내에서 발생하는 1선(R상) 지락사고는 R상을 기준으로 사고를 발생시켰다. 그림 4-12는 삼상 저항형 초전도 한류기와 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 사고전류 제한특성 곡선을 나타낸 것이다. 그림 4-12(a)에서 삼상 저항형 초전도 한류기는 사고초기에 사고전류를 79.3 [A]까지 제한하였다. 또한 자장인가 리액터의 턴수가 380턴인 경우 삼상 행렬방식 초전도 한류기는 79 [A], 570턴을 갖는 경우는 78.6 [A]까지 사고전류를 제한하였다. 삼상 행렬방식 초전도 한류기에서는 자장인가 리액터와 셉트 저항 및 셉트 리액터가 가지고 있는 임피던스로 인해 사고초기에 발생하는 사고전류를 더 많이 제한한다는 것을 확인할 수 있다. 또한 사고 발생 1주기 이후 사고전류는 저항형 초전도 한류기가 더 많이 제한되었다. 사고 초기에는 초전도체의 퀘칭으로 인해 발생하는 저항이 비선형적으로 급격히 증가하기 때문에 행렬방식 초전도 한류기의 병렬로 연결된 셉트저항 및 셉트 리액터의 합성 임피던스가 저항형 초전도 한류기인 경우보다 더 많기 때문에 사고 초기에는 더 많은 사고전류를 제한하게 된다. 그러나 사고 발생 1주기 이후에는 초전도체에서 발생하는 저항이 선형적으로 증가하여 전체 합성 임피던스가 저항형 초전도 한류기가 더 크게 되어 더 많은 사고전류를 제한하게 된다. 이러한 원인으로 인해 행렬방식 초전도 한류기의 경우 셉트 저항의 크기를 조정하면 전체 임피던스를 변화시킬 수 있기 때문에 사고 발생 1주기 이후의 사고전류를 제어할 수 있다.

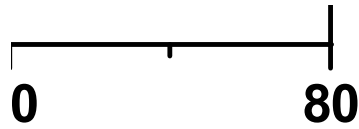
그림 4-13과 14, 15는 1선(R상) 지락사고 시 삼상 저항형 초전도 한류기와 자장인가 리액터의 턴수에 따른 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 각 상에 있는 초전도체에 흐르는 전류 및 전압의 곡선을 나타낸 것이다.



(a) A resistive-type SFCL



(b) The SFCL using the matrix method with reactors of 380 turns

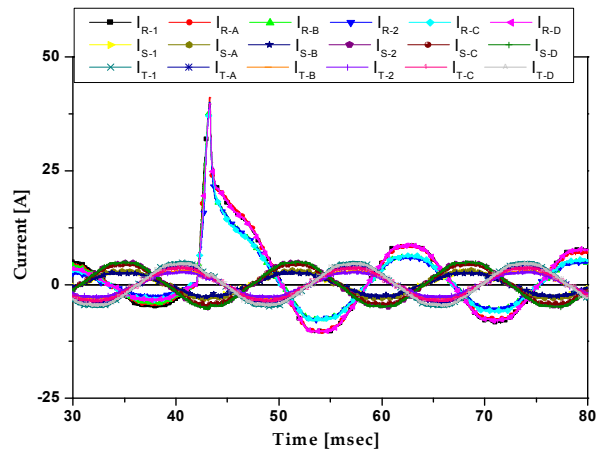


(c) The SFCL using the matrix method with reactors of 570 turns

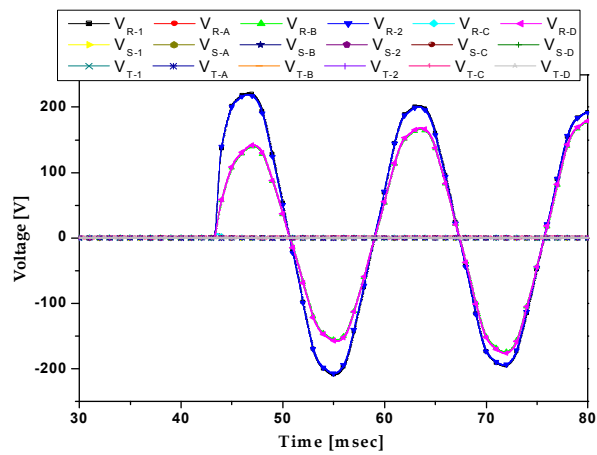
그림 4-12 저항형 초전도 한류기와 턴수에 따른 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 사고전류제한 특성 곡선

Fig. 4-12 Fault current limiting curves of resistive-type SFCL and matrix-type SFCL according to turn number

그림 4-13에서 저항형 초전도 한류기의 경우 1선(R상) 지락사고이기 때문에 R상의 6개의 초전도체 중 R-1과 R-2, R-B와 R-D만 켜치가 발생하였다. 그리고 켜치된 초전도체의 전압은 병렬로 연결되어 있으므로 각각 221.6 [V], 141.6 [V]로 같았다. 이러한 초전도체의 불균형적인 켜치 특성은 제작상 불가피하게 발생하는 임계특성의 차이 때문이다. 그림 4-14와 15에서 자장인가 리액터의 턴수가 380턴이나 570턴을 갖는 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 경우 자장인가 부분 및 전류제한 부분에 있는 6개의 초전도체가 모두 켜치되었다는 것을 확인할 수 있다. 삼상 저항형 초전도 한류기의 경우 6개의 초전도체가 모두 사고전류를 제한하는 역할을 수행한다. 그러므로 사고전류에 의해 초전도체는 6개 중 임계전류가 낮은 것이 먼저 켜치되면서 사고전류를 제한하므로 임계전류가 높은 것은 켜치가 안되는 것이다. 그러나 삼상 행렬방식 초전도 한류기에서는 임계전류가 낮은 자장인가 부분의 초전도체가 먼저 켜치되면서 발생된 저항으로 인해 병렬로 연결된 자장인가 리액터로 사고전류가 분류된다. 이것으로 자장인가 부분에 있는 초전도체는 자장인가 리액터에서 자속이 발생할 수 있도록 방아쇠 역할을 수행하게 된다. 그리고 전류제한 부분에 있는 초전도체는 사고전류를 제한하는 역할을 수행하게 된다. 이때 자장인가 리액터에서 발생하는 자속에 의해 전류제한 부분에 있는 초전도체들의 임계전류는 줄어들어 차이가 감소하게 된다. 그림 4-14의 (d)에서 자장인가 리액터의 턴수가 380턴인 경우 전류제한 부분의 초전도체에서 발생하는 전압은 각각 183.3 [A]와 158.5 [V]로 24.8 [V]의 차이를 보였다. 그러나 자장인가 리액터의 턴수가 580턴인 그림 4-15의 (d)에서는 초전도체의 전압이 각각 184.2 [V]와 155.3 [V]로 그 차이가 28.9 [V]이었다. 이것으로부터 자장인가 리액터에서 발생하는 자속에 의해 전류제한 부분에 있는 초전도체간 임계전류의 차이가 줄어들었으며, 이로 인해 초전도체가 동시에 켜치되어 발생하는 전압의 차이도 줄어들었다는 것을 알 수 있다.



(a) Current curves flowing into the superconducting units



(b) Voltage curves generated in the superconducting units

그림 4-13 저항형 초전도 한류기의 각 상에 있는 초전도체의
전류 · 전압 곡선

Fig. 4-13 Current and Voltage curves of superconducting units in the
resistive-type SFCL

0 **80**

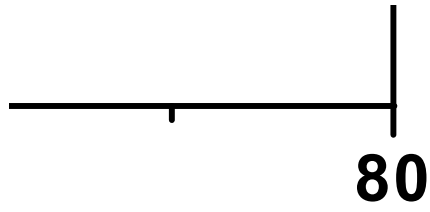
(a) Current curves flowing into the superconducting units in the part
for generating of magnetic field

0 **80**

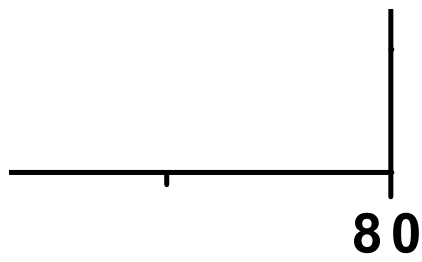
(b) Voltage curves of the superconducting units in the part for
generating of magnetic field

그림 4-14 자장인가 리액터의 턴수가 380턴인 경우 삼상 행렬방식
초전도 한류기의 전류 · 전압 곡선

Fig. 4-14 Current and voltage curves of superconducting units in an
SFCL with 380 turns



(c) Current curves flowing into the superconducting units in the current limiting part



(d) Voltage curves of the superconducting units in the current limiting part

그림 4-14 (계속)

Fig. 4-14 (continued from the previous page)

·
|
80

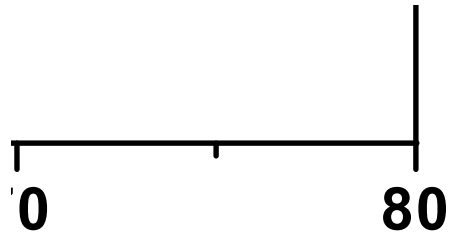
(a) Current curves flowing into the superconducting units in the part
for generating of magnetic field

| |
| |
70 **80**

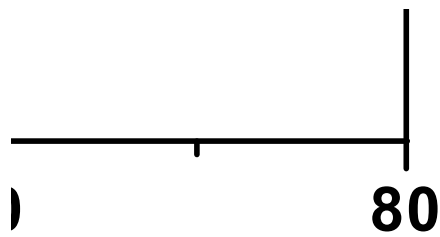
(b) Voltage curves of the superconducting units in the part for
generating of magnetic field

그림 4-15 자장인가 리액터의 턴수가 570턴인 경우 삼상 행렬방식
초전도 한류기에서 초전도체의 전류·전압 곡선

Fig. 4-15 Current and voltage curves of superconducting units in an
SFCL with 570 turns



(c) Current curves flowing into the superconducting units in the current limiting part



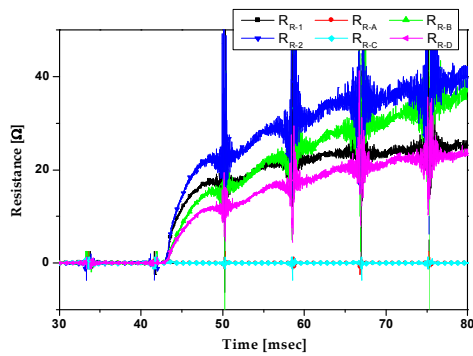
(d) Voltage curves of the superconducting units in the current limiting part

그림 4-15 (계속)

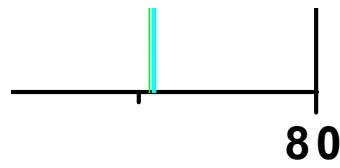
Fig. 4-15 (continued from the previous page)

그림 4-16은 삼상 저항형 초전도 한류기 및 행렬방식 초전도 한류기의 자장인가 리액터의 턴수에 따라 초전도체에서 발생하는 저항특성 곡선을 나타낸 것이다. 그림 4-16(a)에서 삼상 저항형 초전도 한류기는 R상에 있는 초전도체인 R-A와 R-C가 켜지지 않은 것을 확인할 수 있다. 그러나 그림 4-16 (b)와 (c)의 삼상 행렬방식 초전도 한류기에서는 자장인가 리액터의 턴수에 따라 자장인가 부분에 있는 초전도체인 R-1, R-2 및 전류제한 부분에 있는 R-A, R-B, R-C, R-D가 모두 켜진 것을 확인할 수 있다. 이것은 자장인가 부분에 있는 임계전류가 작은 초전도체가 먼저 켜지면서 자장인가 리액터로 사고전류가 분류되기 때문에 사고전류는 전류제한 부분에 있는 초전도체를 켜치시키면서 제한된다.

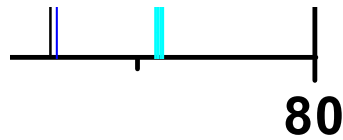
그림 4-16의 (b)와 (c)에서 사고 발생 후 초기 반주기동안 초전도체의 저항 차이를 보면 자장인가 리액터의 턴수가 380턴인 경우가 더 작아진다는 것을 확인할 수 있다. 380턴을 갖는 자장인가 리액터의 임피던스가 570턴의 경우보다 더 작아 자장인가 부분의 초전도체에서 발생하는 전압이 더 작다는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 380턴을 갖는 행렬방식 초전도 한류기의 전류제한 부분의 초전도체에서 발생하는 전압이 증가하게 된다. 자장인가 리액터에서 발생하는 자장에 의해 전류제한 부분에 있는 4개의 초전도체 중 임계전류가 큰 R-B와 R-D의 임계전류가 상대적으로 더 많이 감소하여 발생하는 저항값이 증가하게 된다. 이로 인해 전류제한 부분에 있는 초전도체 상호간 발생하는 저항값의 차이가 줄어들게 된다. 그러나 사고 발생 1주기 이후에는 초전도체에서 발생하는 저항이 거의 선형적으로 증가하기 때문에 자장인가 리액터의 턴수 변화에 따른 초전도체의 저항값 차이는 거의 없게 된다.



(a) A resistive-type SFCL



(b) The SFCL using the matrix method with a reactor of 380 turns



(c) The SFCL using the matrix method with a reactor of 570 turns

그림 4-16 저항형 초전도 한류기와 턴수에 따른 행렬방식 초전도 한류기의 초전도체에서 발생하는 저항특성 곡선

Fig. 4-16 Resistance curves generated in the superconducting unit in resistive-type SFCL and matrix-type SFCL according to turn number

b. 2선 지락사고 시 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 동작특성

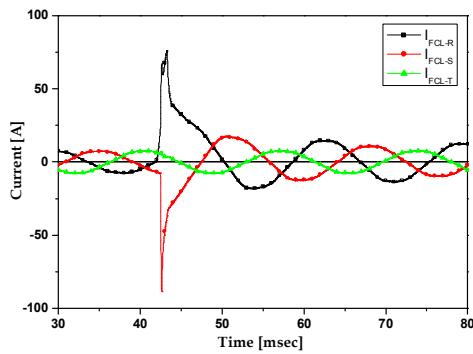
그림 4-17은 2선(R·S상) 지락사고가 발생한 경우 삼상 저항형 초전도 한류기와 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 사고전류제한 특성을 나타낸 곡선이다. 2선 지락사고는 R상을 기준(0°)으로 발생시켰으며, S상은 -120° 에서 사고가 발생하였다. 2선 지락사고가 발생한 삼상 저항형 초전도 한류기에서 R·S상의 제한된 사고전류는 각각 76.3 [A]와 -88.7 [A]이었다. 2×3 구조를 갖는 삼상 행렬방식 초전도 한류기에서 370턴의 자장인가 리액터가 적용된 경우 R상에서 76.3 [A], S상에서 -88.9 [A]로 제한되었으며, 580턴의 자장인가 리액터가 적용된 경우 사고전류는 R상에서 80.3 [A], S상에서 -88.2 [A]로 제한되었다. 2선 지락사고를 R상 기준으로 0° 에서 발생시킬 경우 S상의 사고시점은 R상과 -120° 의 위상차가 발생한 시점이 되므로, S상의 사고전류는 R상보다 더 크게 된다.

그림 4-18과 19, 20은 저항형 초전도 한류기와 자장인가 리액터의 턴수에 따른 행렬방식 초전도 한류기의 초전도체에 흐르는 전류·전압특성 곡선이다. 그림 4-18에서 2선 지락사고가 발생한 삼상 저항형 초전도 한류기의 경우 R상의 초전도체에는 38 [A]가 흐르고, 120° 의 위상차가 발생한 시점에서 사고가 발생한 S상의 초전도체에는 -43.9 [A]가 흘렀다. 그러나 R상의 초전도체 중 R-1, R-B와 R-2, R-D소자만이 켜치되었으며, S상의 초전도체는 6개 모두 켜치되었다는 것을 그림 4-18(b)를 통해 확인할 수 있다. 그러나 S상의 초전도체 중 S-B와 S-D의 전압이 점점 증가하는 것으로 보아 초전도체가 부분적으로 켜치된 것으로 보인다. 이러한 부분적인 켜치는 초전도체의 임계전류에 준하는 사고전류만이 흘러 초전도체를 완전히 켜치시키지 못하고 일부분만 켜치시키는 것을 의미한다. 부분적으로 켜치된 초전도체는 일부분에서 발생한 저항으로 열이 주변의 초전도체로 전이되어 점진적으로 전체 초전도체로 켜치를 전파하게 된다. 각 상에 있는 초전도체의 켜치특성에 차이가 있는 이유는 R상과

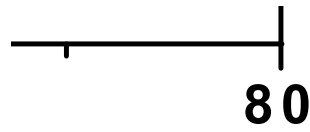
S상의 -120° 의 위상차이로 인해 사고 발생시 각 상의 사고전류가 다르기 때문이다. 이러한 현상으로 인해 삼상 전력계통에서 동작하는 초전도 한류기는 동상에 있는 초전도체에서 소비되는 전력이 서로 다르기 때문에 균일하게 전압분배가 이루어지도록 하는 것이 중요하다.

그림 4-19와 20의 (a)와 (b)의 자장인가 부분의 초전도체에 흐르는 전류를 비교해 보면 580턴의 자장인가 리액터를 갖는 경우 초전도체로 흐르는 전류가 더 크다는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 흐르는 큰 전류로 인해 켄치된 초전도체는 더 많은 전압이 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 또한 R상과 S상의 -120° 의 위상차이로 인해 제한된 전류의 크기뿐만 아니라 자장인가 부분의 초전도체로 흐르는 전류에도 차이가 발생한다는 것을 확인할 수 있다.

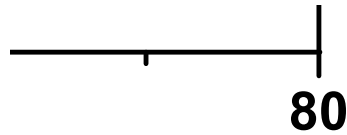
그림 4-19와 20의 (b)와 (d)에서 삼상 행렬방식 초전도 한류기는 자장인가 리액터의 턴수의 변화에 따라 자장인가 부분 및 전류제한 부분에 있는 초전도체는 모두 켄치되었다. 380턴의 자장인가 리액터를 갖는 경우 R·S상의 전류제한 부분에 있는 초전도체에 흐르는 전류는 각각 37.6과 $-44.1[A]$ 이었다. 570턴의 자장인가 리액터를 갖는 경우의 전류는 각각 39.9[A]와 $-44.2[A]$ 이었다. 또한 초전도체에서 발생하는 전압은 자장인가 리액터가 380턴인 경우 R상의 R-A와 R-C는 181.1[V], R-B와 R-D는 158.6[V]로 동일하였으며, S상의 S-A와 A-C는 $-158.7[V]$, S-B와 S-D는 $-162[V]$ 로 동일하였다. 570턴의 자장인가 리액터를 갖는 경우는 R상의 R-A와 R-C는 180.9[V], R-B와 R-D는 153.8[V]로 동일하였으며, S상의 S-A와 A-C는 $-142.6[V]$, S-B와 S-D는 $-154.3[V]$ 로 동일하였다. 이것은 동상에서 병렬로 연결된 초전도체는 동일한 전압이 발생하며, 또한 직렬연결된 초전도체는 자장인가 리액터의 턴수가 380턴인 경우에 발생한 전압의 차이가 더 작다는 것을 알 수 있었다. 이로부터 자장인가 리액터의 턴수가 많다고 해서 초전도체의 임계특성의 차이를 줄일 수 있는 것이 아니라는 것을 알 수 있다.



(a) A resistive-type SFCL



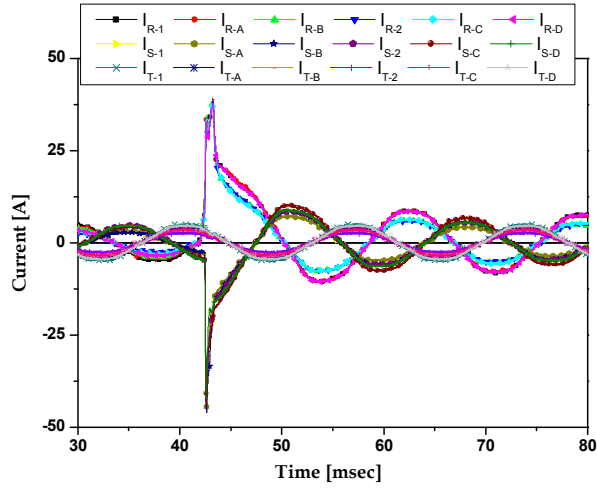
(b) The SFCL using the matrix method with a reactor of 380 turns



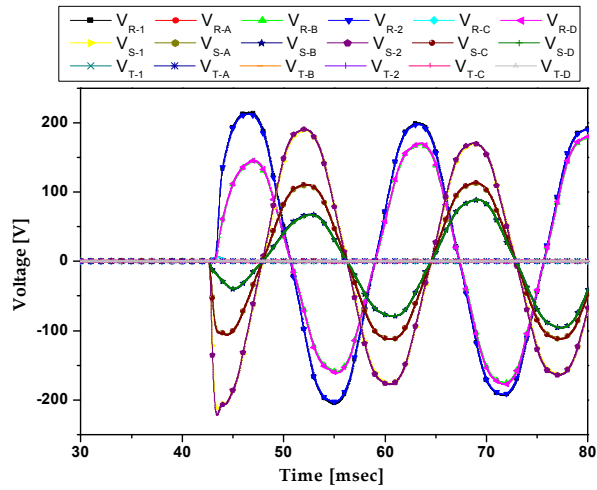
(c) The SFCL using the matrix method with a reactor of 570 turns

그림 4-17 2선 지락사고시 저항형 초전도 한류기와 턴수에 따른
행렬방식 초전도 한류기의 사고전류제한 특성 곡선

Fig. 4-17 Fault current limiting curves of a resistive-type SFCL and
a matrix-type SFCL during the double line-to-ground fault



(a) Current curves flowing into the superconducting units



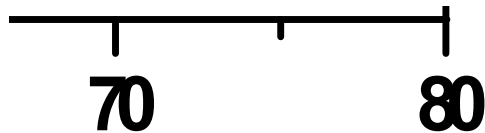
(b) Voltage curves generated in the superconducting units

그림 4-18 2선 지락사고시 삼상 저항형 초전도 한류기에 있는
초전도체의 전류·전압 곡선

Fig. 4-18 Current and voltage curves of superconducting units in the three-phase resistive-type SFCL during the double line-to-ground fault



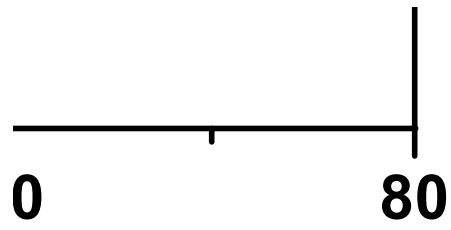
(a) Current curves flowing into the superconducting units in the part for generating of magnetic field



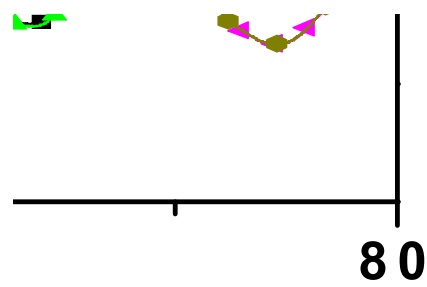
(b) Voltage curves of the superconducting unit in the part for generating of magnetic field

그림 4-19 2선 지락사고시 자장인가 리액터의 턴수가 380턴인 경우 삼상 행렬방식 초전도 한류기에서 초전도체의 전류·전압 곡선

Fig. 4-19 Current and voltage curves of superconducting units in the SFCL with 380 turns during the double line-to-ground fault



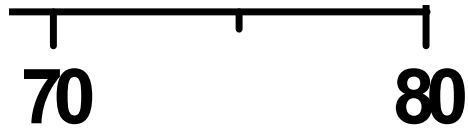
(c) Current curves flowing into the superconducting units in the current limiting part



(d) Voltage curves of the superconducting unit in the current limiting part

그림 4-19 (계속)

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



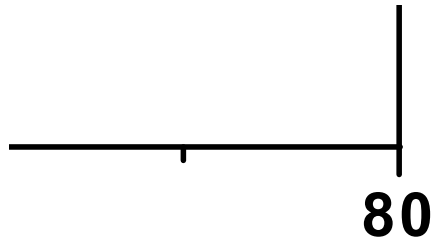
(a) Current curves flowing into the superconducting units in the part for generating of magnetic field



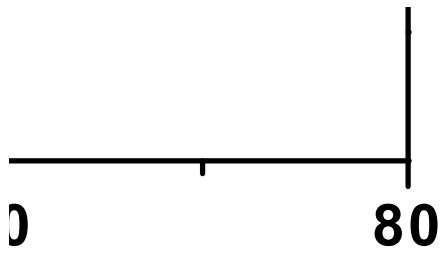
(b) Voltage curves of the superconducting unit in the part for generating of magnetic field

그림 4-20 2선 지락사고시 자장인가 리액터의 턴수가 570턴인 경우 삼상 행렬방식 초전도 한류기에서 초전도체의 전류·전압 곡선

Fig. 4-20 Current and voltage curves of superconducting units in the SFCL with 570 turns during the double line-to-ground fault



(c) Current curves flowing into the superconducting units in the current limiting part



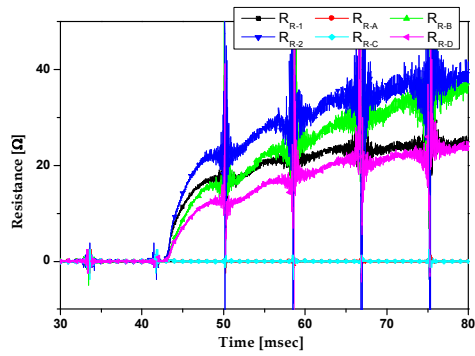
(d) Voltage curves of the superconducting unit in the current limiting part

그림 4-20 (계속)

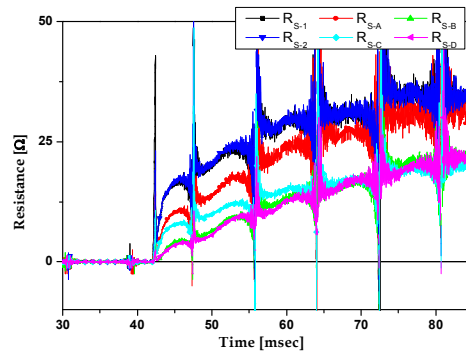
Fig. 4-20 (continued from the previous page)

그림 4-21은 삼상 저항형 초전도 한류기와 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 2선 지락사고 시 초전도체에서 발생하는 저항특성을 나타낸 곡선이다. 저항형 초전도 한류기의 경우 R상에서 6개의 초전도체 중 2개가 켄치되지 않았을 뿐만 아니라, 켄치가 발생한 초전도체라 하더라도 발생하는 저항이 크게 다르다는 것을 확인할 수 있다. 또한 S-B와 S-D의 초전도체는 부분적인 켄치가 발생하였다. 부분적으로 발생한 저항은 초전도체의 주변으로 열을 확산시켜 점진적으로 켄치를 진행시키게 된다. 이로 인해 발생하는 저항은 그림 4-21(b)와 같이 선형적인 증가곡선을 갖게 되는 것이다.

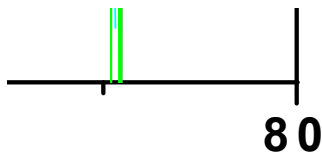
그러나 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 경우 자장인가 리액터의 턴수에 따라 각 상의 모든 초전도체가 켄치되었다는 것을 확인할 수 있다. 병렬로 연결된 초전도체간에 발생하는 저항의 차이가 380턴의 자장인가 리액터를 갖는 경우 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 행렬방식 초전도 한류기가 자장인가 리액터에서 발생하는 자장으로 인해 초전도체 간 임계특성이 개선된다는 것의 증거라 할 수 있다. 이러한 균일한 저항 발생은 초전도체의 전력부담을 감소시킬 수 있으며, 다수의 초전도체를 직·병렬로 연결할 때 균등한 전력분담으로 초전도 한류기의 시스템을 안정적으로 운용할 수 있다.



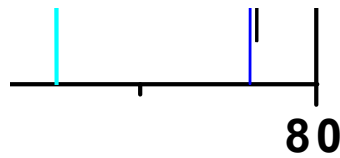
(a) R-phase (R-type)



(b) S-Phase (R-type)



(c) R-Phase (380 turns)



(d) S-Phase (380 turns)

그림 4-21 2선 지락사고시 삼상 저항형 초전도 한류기와 턴수에 따른 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 초전도체에서 발생하는 저항특성 곡선
 Fig. 4-21 Resistance curves of the resistive and matrix-type SFCL according to turn number during the double line-to-ground fault



(e) R-phase (570 turns)

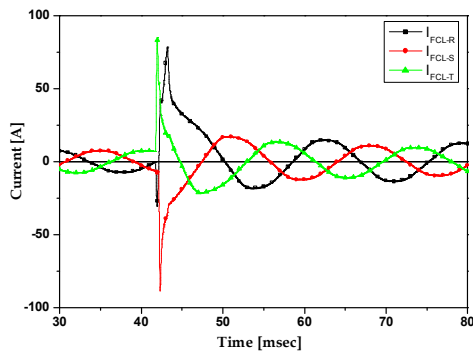
(f) S-Phase (570 turns)

그림 4-21 (계속)

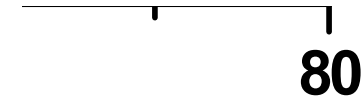
Fig. 4-21 (continued from the previous page)

c. 3선 지락사고 시 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 동작특성

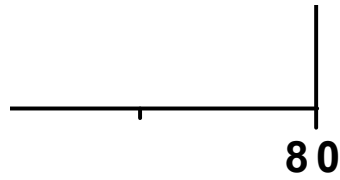
그림 4-22는 3선(R·S·T상) 지락사고시 삼상 저항형 초전도 한류기 및 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 사고전류 제한특성 곡선을 나타낸 것이다. 저항형 초전도 한류기의 각 상 제한된 사고전류는 78.7 [A], -88.3 [A], 85.4 [A]이었다. 그리고 380턴의 자장인가 리액터를 갖는 행렬방식 초전도 한류기의 경우 R, S, T상의 제한된 사고전류는 각각 78.7 [A], -89.9 [A], 86.7 [A]이었고, 570턴의 경우 78.2 [A], -88.5 [A], 86.3 [A]이었다. S상과 T상의 위상이 120°씩 차이가 발생하므로 R상 0°기준의 사고 발생시 다른 S와 T상의 사고발생 시점이 다르게 되어 각 상의 제한되는 사고전류의 값이 다르게 된다. 그러나 두 형태의 초전도 한류기 모두 각 상의 제한된 사고전류가 거의 동일하다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 사고 초기 발생하는 초전도 한류기의 임피던스가 거의 비슷하기 때문이다. 또한 사고발생 1주기 이후 제한된 전류값을 비교해 보면 저항형 초전도 한류기의 전류값이 더 작다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 행렬방식 초전도 한류기의 경우 전류제한 부분에 있는 초전도체에 병렬로 셉트리액터 및 셉트저항이 연결되기 때문에 전체 임피던스가 작아져 사고전류가 더 작게 제한되기 때문이다.



(a) A resistive-type SFCL



(b) The SFCL using the matrix method with a reactor of 380 turns



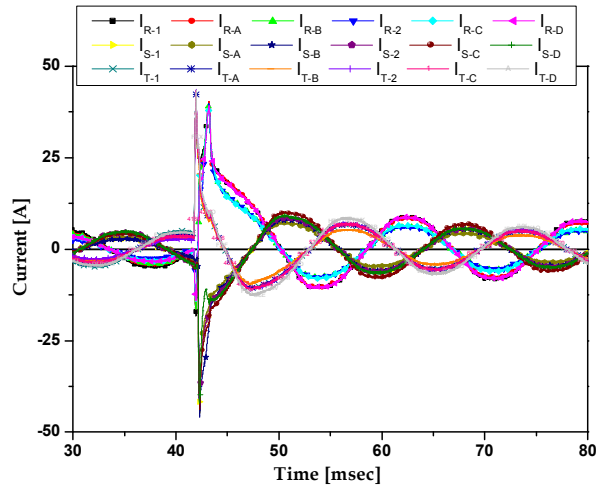
(c) The SFCL using the matrix method with a reactor of 570 turns

그림 4-22 3선 지락사고시 저항형 초전도 한류기와 턴수에 따른
행렬방식 초전도 한류기의 사고전류제한 특성 곡선

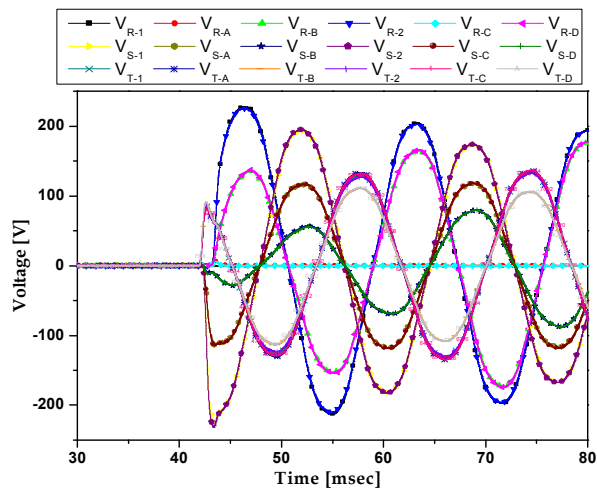
Fig. 4-22 Fault current limiting curves of the resistive and
matrix-type SFCL according to turn number during triple
line-to-ground fault

그림 4-23, 24, 25는 삼상 초전도 한류기와 행렬방식 초전도 한류기의 각 상 초전도체의 전류와 전압의 특성곡선을 나타낸 것이다. 그림 4-23에서 저항형 초전도 한류기의 경우 R상에서 R-A와 R-C의 초전도체가 켄치되지 않은 것을 확인할 수 있으며, 이로 인해 R-1, R-2에서 발생하는 전압이 227.7 [V], R-B와 R-D에서 발생하는 전압이 136.9 [V]로 큰 차이를 보였다. 이러한 초전도체의 불균형 켄치로 인해 켄치된 소자의 전력부담이 증가하게 되어 초전도체의 안정도가 저하된다. S상의 경우도 S-B 및 S-D의 초전도체가 부분적으로 켄치되었다. 각 상의 위상 차이로 인해 가장 큰 전류값에서 사고가 발생하는 T상의 경우 발생하는 사고전류가 크므로 모든 소자에서 켄치가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

그림 4-24와 25의 (d)로 부터 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 경우 사고전류제한 역할을 수행하는 전류제한 부분에 있는 각 상의 초전도체가 모두 완전히 켄치되는 것을 확인할 수 있다. 또한 전류제한 부분에 있는 초전도체에서 발생하는 전압의 차이를 자장인가 리액터의 턴수별로 비교해 보면 380턴을 갖는 경우의 전압 차이가 더 작다는 것을 확인할 수 있다. 1×3 구조를 갖는 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 경우와 같은 결과를 얻었다. 이것은 자장인가 리액터의 턴수가 증가할수록 리액터의 임피던스가 증가하여 사고전류가 적게 분류되기 때문에 발생하는 자장이 적게 되기 때문이다.



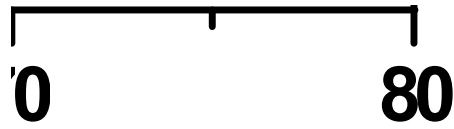
(a) Current curves flowing into the superconducting units



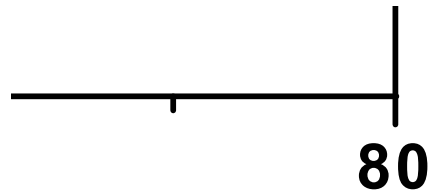
(b) Voltage curves generated in the superconducting units

그림 4-23 3선 지락사고시 저항형 초전도 한류기에 있는 초전도체의
전류 · 전압 곡선

Fig. 4-23 Current and voltage curves of superconducting units in the three-phase resistive-type SFCL during the triple line-to-ground fault



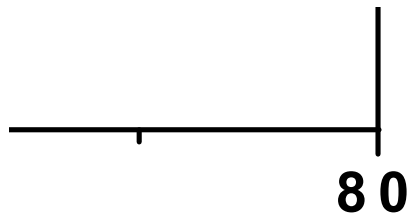
(a) Current curves flowing into the superconducting units in the part for generating of magnetic field



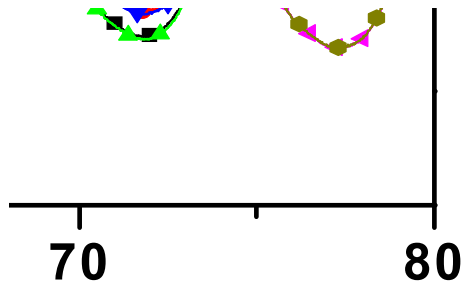
(b) Voltage curves of the superconducting unit in the part for generating of magnetic field

그림 4-24 3선 지락사고시 자장인가 리액터의 턴수가 380턴인 경우 삼상 행렬방식 초전도 한류기에서 초전도체의 전류·전압 곡선

Fig. 4-24 Current and voltage curves of superconducting units in the SFCL with 380 turns during the triple line-to-ground fault



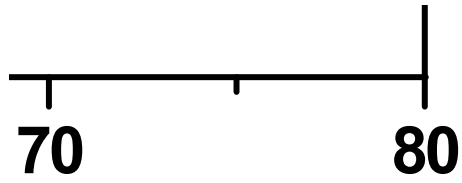
(c) Current curves flowing into the superconducting units in the current limiting part



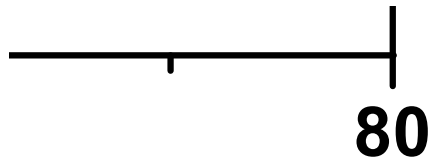
(d) Voltage curves of the superconducting units in the current limiting part

그림 4-24 (계속)

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



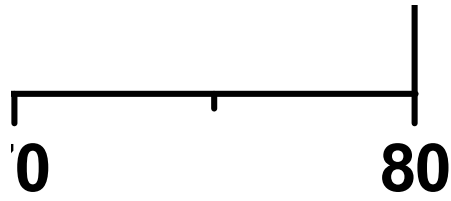
(a) Current curves flowing into the superconducting units in the part for generating of magnetic field



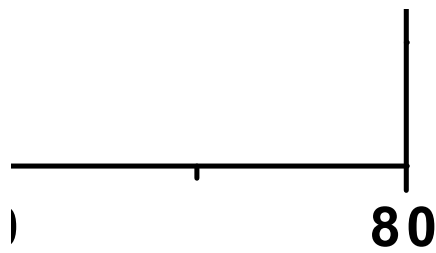
(b) Voltage curves of the superconducting units in the part for generating of magnetic field

그림 4-25 3선 지락사고시 자장인가 리액터의 턴수가 570턴인 경우 삼상 행렬방식 초전도 한류기에서 초전도체의 전류·전압 곡선

Fig. 4-25 Current and voltage curves of superconducting units in the SFCL with 570 turns during the triple line-to-ground fault



(c) Current curves flowing into the superconducting units in the current limiting part



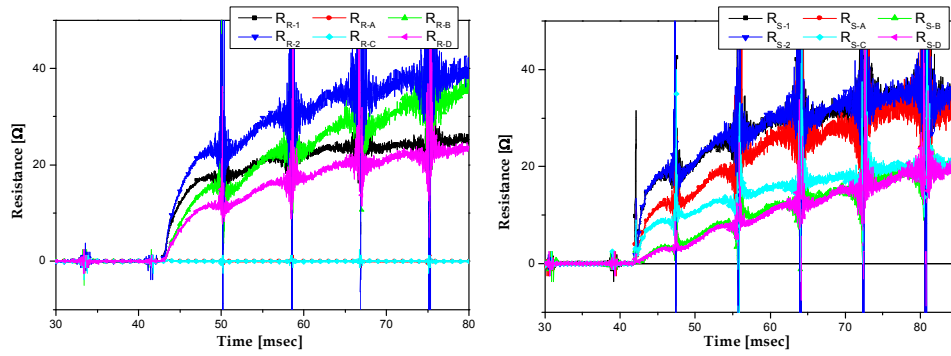
(d) Voltage curves of the superconducting unit in the current limiting part

그림 4-25 (계속)

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

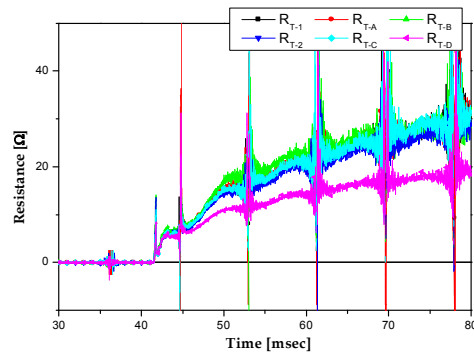
그림 4-26은 삼상 저항형 초전도 한류기의 각 상에서 발생하는 초전도체의 저항곡선을 나타낸 것이다. 저항형 초전도 한류기의 경우 R상에 있는 초전도체의 불균일한 켄치로 인해 켄치된 초전도체의 저항이 크게 상이하다는 것을 확인할 수 있다. 또한 S상의 초전도체 중 S-B와 S-D가 부분적으로 켄치되어 발생하는 저항이 거의 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 불균일한 켄치로 각 상에 있는 초전도체간 전력분담에 불균형이 발생하고, 이로 인해 사고 발생 시 초전도체의 안정도가 떨어지게 된다.

그림 4-27과 28에서 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 경우 각 상의 각 부분에 있는 모든 초전도체가 켄치되었다는 것을 확인할 수 있다. 또한 사고발생 초기 초전도체에서 발생하는 저항의 차이는 저항형 초전도 한류기의 것보다 훨씬 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 초전도체에 병렬로 연결된 셉트저항 및 셉트리액터로 인해 켄치 특성이 보완되었으며, 자장인가 리액터로 인한 자장의 인가로 초전도체간 임계특성의 차이가 줄어들어 켄치 특성이 개선된 결과라 할 수 있다. 저항형 초전도 한류기와 자장인가 리액터의 턴수에 따른 행렬방식 초전도 한류기의 T상에 있는 초전도체의 저항을 보면 사고 초기에 발생하는 저항이 다른 상에 비해 작다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 3선 지락사고가 R상 0° 를 기준으로 한 사고이므로, 이 시점에서의 T상은 $+120^\circ$ 의 위상에서 사고가 발생하여 사고전류가 급격히 증가하여 초전도체에 의해 빠르게 제한되기 때문에 초전도체의 저항이 작게 발생하게 되는 것이다.



(a) R-phase

(b) S-phase



(c) T-phase

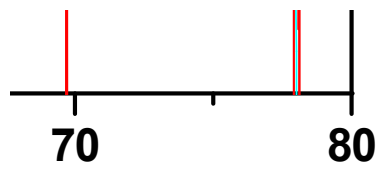
그림 4-26 3선 지락사고시 삼상 저항형 초진도 한류기의 각 상에 있는 초전도체의 저항특성 곡선

Fig. 4-26 Resistance curves of superconducting units in the resistive-type SFCL during the triple line-to-ground fault



(a) R-phase (380 turns)

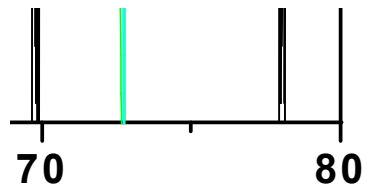
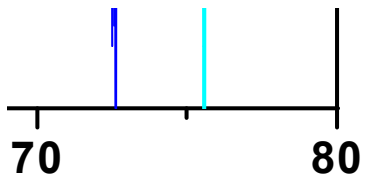
(b) S-Phase (380 turns)



(c) T-Phase (380 turns)

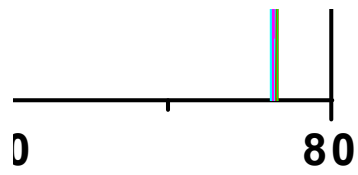
그림 4-27 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 자장인가 리액터의 턴수에 따른 각 상에 있는 초전도체의 저항특성 곡선

Fig. 4-27 Resistance curves of the matrix-type SFCL according to turn number during the triple line-to-ground fault



(d) R-phase (570 turns)

(e) S-phase (570 turns)



(f) T-phase (570 turns)

그림 4-27 (계속)

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

D. 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 회복특성

초전도 한류기는 초전도체가 초전도 상태에서 상전도 상태로 상전이되는 켄치현상을 이용하여 사고전류를 제한하게 된다. 사고전류를 제한한 초전도체는 다시 초전도 상태로 상전이되어 제 2의 사고에 대비하여야 한다. 초전도체의 회복특성은 상전도 상태로 켄치된 초전도 소자가 초전도 상태로 다시 복귀하는 정도를 나타내는 것으로 빠른 복귀특성을 가지고 있어야 전력시스템의 전력기기들과 보호 협조가 잘 이루어질 것이다.

초전도체의 회복특성은 전력계통에 발생한 사고로 인해 전력용 차단기가 동작하여 회로에 전류가 흐르지 않는 상태에서 상전도 상태로 켄치되었던 초전도체가 초전도 상태로 복귀하는 시간으로 분석한다. 초전도체가 상전도 상태에서 초전도 상태로 복귀하는 기준은 켄치시 발생하는 초전도체의 전압이 0으로 되는 시점으로 하였다. 2×3 구조를 갖는 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 회복특성은 각 상의 모든 초전도체가 켄치되는 3선 지락사고시 계통에서 발생하는 사고의 주기를 5주기, 3주기, 1주기로 하여 삼상 저항형 초전도 한류기와 비교·분석하였다.

1. 5주기의 사고 발생시 초전도체의 회복특성

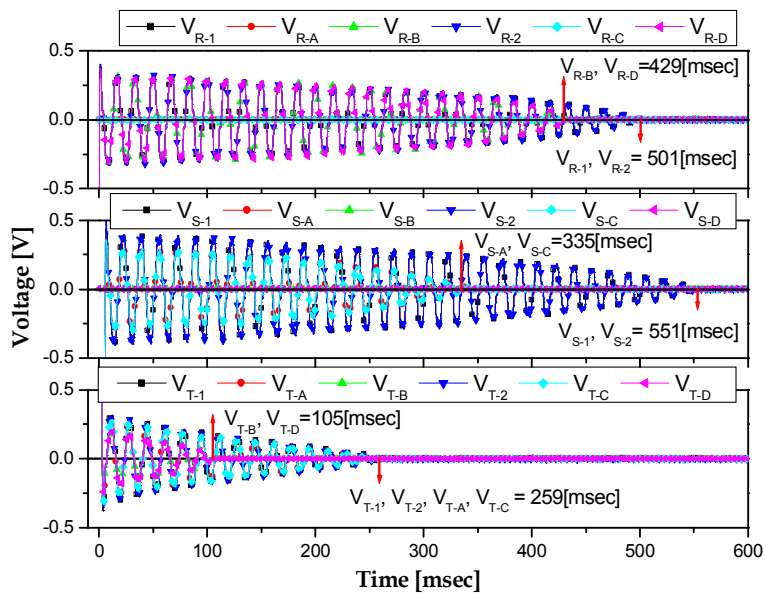
그림 4-28은 그림 4-9와 4-10과 같이 2×3구조를 갖는 삼상 행렬방식 초전도 한류기와 삼상 저항형 초전도 한류기에서 5주기의 사고전류가 유입될 때 각 상별 초전도체의 회복특성을 분석한 곡선이다.

그림 4-28(a)에서 3선 지락사고가 발생한 삼상 저항형 초전도 한류기는 모든 초전도체가 켄치되지 않았으며, 또한 부분 켄치 발생으로 각 초전도체에서 발생하는 전압이 불평형을 이룬다는 것을 앞에서 확인하였다. 그러므로 각 초전도체에서 받는 소비 전력 또한 불평형을 이루게 된다. 초전도체의 회복특성은 초전도체에서 받은 전력이 모두 소비되는 시간이므로, 불평형 소비전력을 갖는 초전도체의 회복시간은 길어진다고 할 수 있다.

그림 4-28(a)에서 알 수 있듯이 각 상 초전도체의 회복시간이 길고 그 차이가 크다는 것을 확인할 수 있다. 모든 초전도체가 켄치되지 않은 R과 S상의 초전도체는 모든 초전도체가 켄치된 T상의 초전도체보다 회복시간이 길어지는 것을 확인할 수 있다. 또한 T상의 경우 모든 소자가 켄치되었지만 T-B와 T-D소자가 부분 켄치되어 빠른 회복을 나타내고 있는 반면 T-1, T-2, T-A, T-C는 상대적으로 길어진다는 것을 확인할 수 있다. 또한 병렬로 연결된 초전도 소자간에는 회복시간이 같다는 것을 알 수 있다.

그림 4-28(b)와 (c)의 삼상 행렬방식 초전도 한류기에서는 저항형 초전도 한류기의 각 상에 있는 초전도체와 비교하였을 때 회복시간이 짧아진다는 것을 확인할 수 있다. 또한 380턴과 570턴의 자장인가 리액터를 갖는 행렬방식 초전도 한류기의 전류제한 부분에 있는 초전도체간 회복시간을 비교해 보면 570턴의 경우가 더 짧다는 것을 확인할 수 있다. 행렬방식 초전도 한류기는 병렬로 셉트저항 및 셉트리액터가 연결되므로 초전도체가 받은 전력량의 소비를 빠르게 할 수 있다. 그러므로 저항형

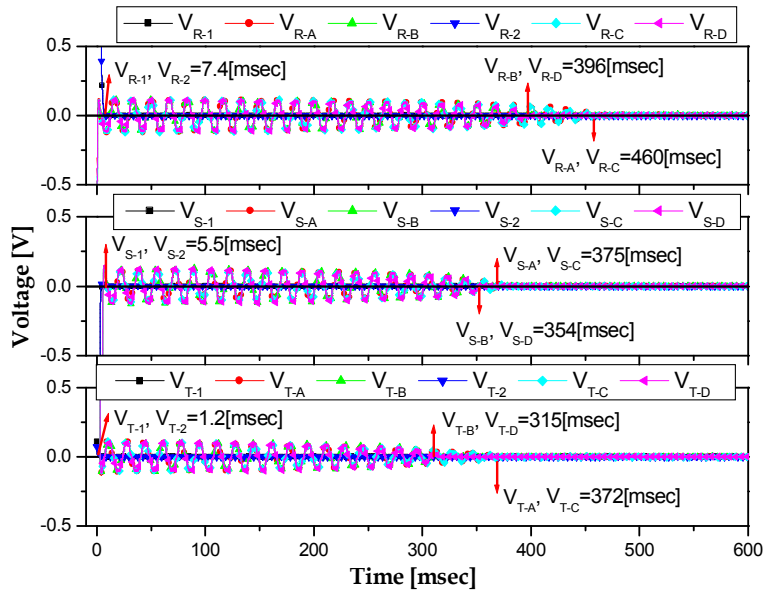
초전도 한류기보다 회복시간이 더 짧아진다. 그리고 570턴의 자장인가 리액터를 갖는 경우 380턴의 경우보다 리액터의 임피던스가 표 3-1과 같이 더 크게 제작되어 자장인가 부분의 초전도체에서 발생하는 전압이 더 크게 된다. 그러므로 전류제한 부분의 초전도체에서 발생하는 전압이 줄어들어 초전도체에서 부담하는 전력량이 감소하여, 초전도 상태로 복귀하는 소자의 회복시간이 더 짧아진다. 반면 자장인가 부분에 있는 초전도체의 회복시간은 길어지게 된다.



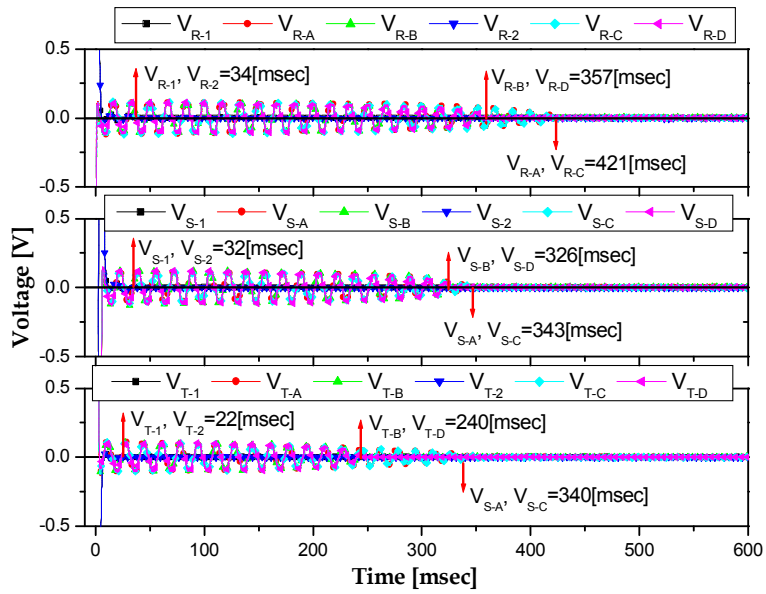
(a) Three-phase resistive-type SFCL

그림 4-28 5주기의 사고 발생시 삼상 저항형 초전도 한류기와 행렬방식 초전도 한류기에 있는 초전도체의 회복특성 곡선

Fig. 4-28 Recovery curves of superconducting units in the resistive and matrix-type SFCL during the 5-cycle fault



(b) Three-phase matrix-type SFCL with 380 turns



(c) Three-phase matrix-type SFCL with 570 turns

그림 4-28 (계속)

Fig. 4-28 (continued from the previous page)

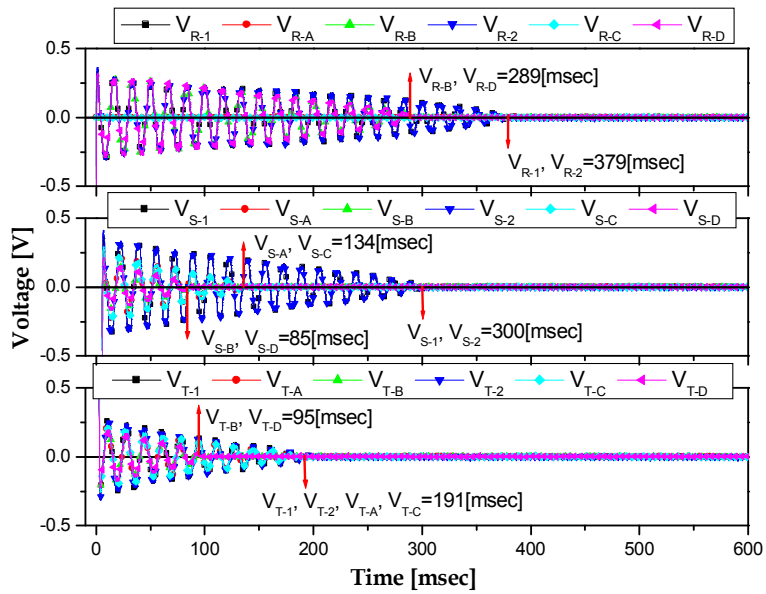
2. 3주기의 사고 발생시 초전도체의 회복특성

그림 4-29는 3주기의 3선 지락사고가 발생한 경우 2×3구조를 갖는 삼상 저항형 초전도 한류기와 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 각 상별 초전도체의 회복특성을 분석한 곡선이다.

계통에서 발생하는 사고 주기는 초전도체가 갖는 전력의 양을 결정한다. 즉, 사고 주기가 길어질수록 초전도체가 받는 소비전력이 많아지므로 초전도체의 회복시간이 길어지게 된다. 그림 4-28과 29의 사고주기별 회복특성의 비교를 통해 3주기의 사고가 발생한 경우의 회복시간이 더 짧다는 것을 확인할 수 있다.

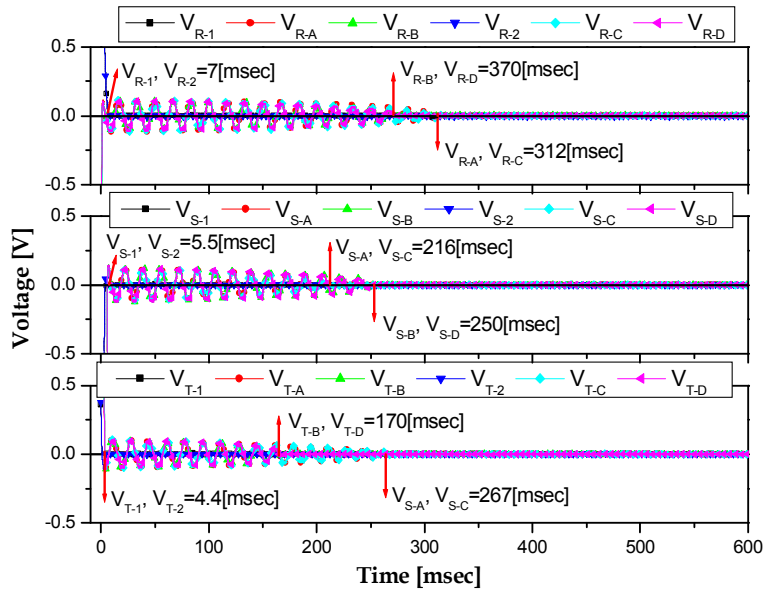
저항형 초전도 한류기로 구성된 초전도 소자는 행렬방식 초전도 한류기로 구성된 초전도 소자의 회복시간보다 더 길다. 이것은 삼상 저항형 초전도 한류기의 경우 모든 소비전력을 초전도체로만 감당하기 때문이며, 또한 초전도체의 퀘칭 특성도 불일치하여 퀘칭된 소자가 부담하는 에너지가 크기 때문이다. 그러나 삼상 행렬방식 초전도 한류기는 각 부분의 초전도체에 자장인가 리액터 및 셉트 저항, 셉트 리액터가 병렬로 연결되어 있으므로 초전도체의 퀘칭 특성도 개선시키고, 소비되는 전력도 줄여주어 회복시간이 그 만큼 짧아지게 된다.

2×3 구조를 갖는 삼상 저항형 초전도 한류기 및 행렬방식 초전도 한류기에서 병렬로 연결된 초전도체간 회복시간은 동일하다. 이것은 병렬 연결로 인해 초전도 소자의 전압과 전류의 특성이 거의 동일하게 되어 소비되는 전력량이 거의 동일하기 때문이다.

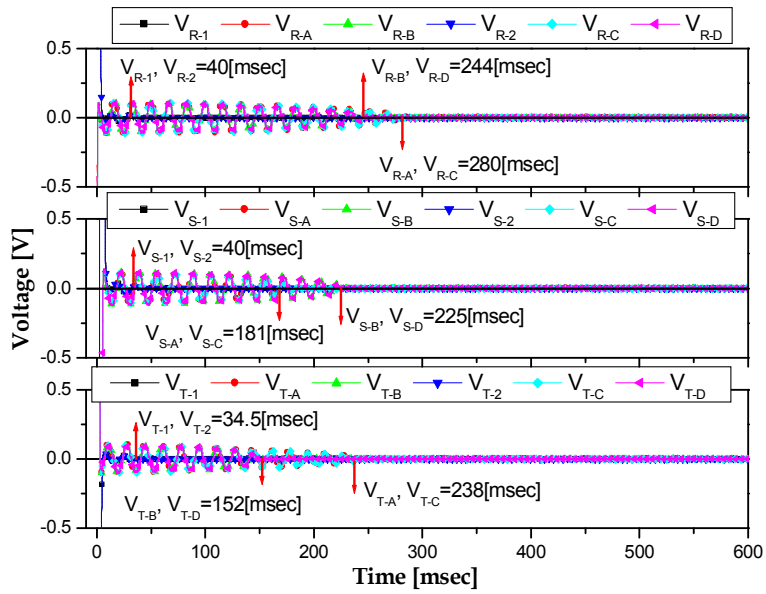


(a) Three-phase resistive-type SFCL

그림 4-29 3주기의 사고 발생시 삼상 저항형 초전도 한류기와 삼상
 행렬방식 초전도 한류기에 있는 초전도체의 회복특성 곡선
 Fig. 4-29 Recovery curves of superconducting units in the resistive
 and matrix-type SFCL during the 3-cycle fault



(b) Three-phase matrix-type SFCL with 380 turns



(c) Three-phase matrix-type SFCL with 570 turns

그림 4-29 (계속)

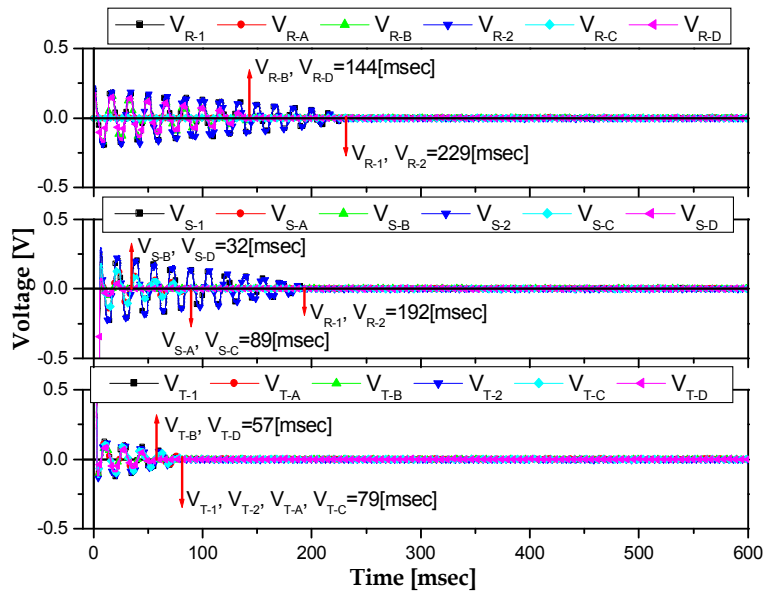
Fig. 4-29 (continued from the previous page)

3. 1주기의 사고 발생시 초전도체의 회복특성

그림 4-30은 전력계통에서 1주기 동안의 3선 지락사고가 발생한 경우 2×3구조를 갖는 삼상 저항형 초전도 한류기와 삼상 행렬방식 초전도 한류기에 있는 각 상 초전도체의 회복시간을 나타낸 곡선이다. 위의 그림 4-28과 29의 5, 3주기의 3선 지락사고가 발생한 경우 초전도체의 회복시간과 비교했을 때 1주기의 사고가 발생한 경우 초전도체의 회복시간이 가장 짧다는 것을 확인할 수 있다. 사고 주기는 초전도체에서 소비되는 전력을 결정하는 요소이기 때문에 사고 주기가 짧아질수록 소비 전력이 적어져 초전도체의 회복시간이 짧아지게 된다. 동상에 병렬로 연결된 초전도체는 발생하는 전압이 동일하므로 초전도체의 소비전력이 거의 같아져 회복시간이 거의 동일하게 되고, 직렬연결된 초전도체는 초전도체의 켄치시 발생하는 저항의 차이로 발생하는 전압이 틀리게 되어 상전도 상태로 복귀하는 회복시간에 차이가 발생하게 된다.

각 상별로 연결된 초전도체를 비교하였을 때 회복시간에 큰 차이를 나타낸다. 이것은 R상 기준으로 각 상의 위상이 $\pm 120^\circ$ 의 차이가 발생하므로 지락사고의 시점이 틀려 초전도체의 켄치 특성 및 전압 특성이 상이하기 때문이다.

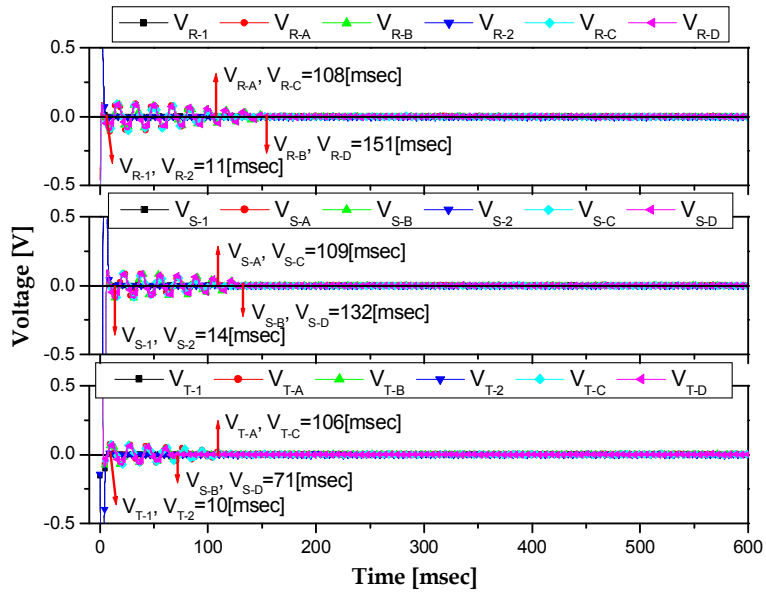
삼상 행렬방식 초전도 한류기는 5주기나 3주기의 3선 지락사고 발생의 경우 보다 1주기 동안 발생한 경우의 회복시간이 더욱 짧아진다는 것을 확인할 수 있다. 또한 자장인가 리액터의 임피던스 차이로 인해 570턴의 자장인가 리액터를 갖는 경우가 380턴을 갖는 경우보다 더욱 짧아진다. 자장인가 부분에 있는 초전도체의 켄치로 인해 전류제한 부분에 있는 초전도체의 회복시간이 저항형 초전도 한류기보다 짧아지게 되며, 또한 자장인가 리액터의 동작으로 인해 초전도체간 임계전류의 차이가 줄어들어 회복시간의 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.



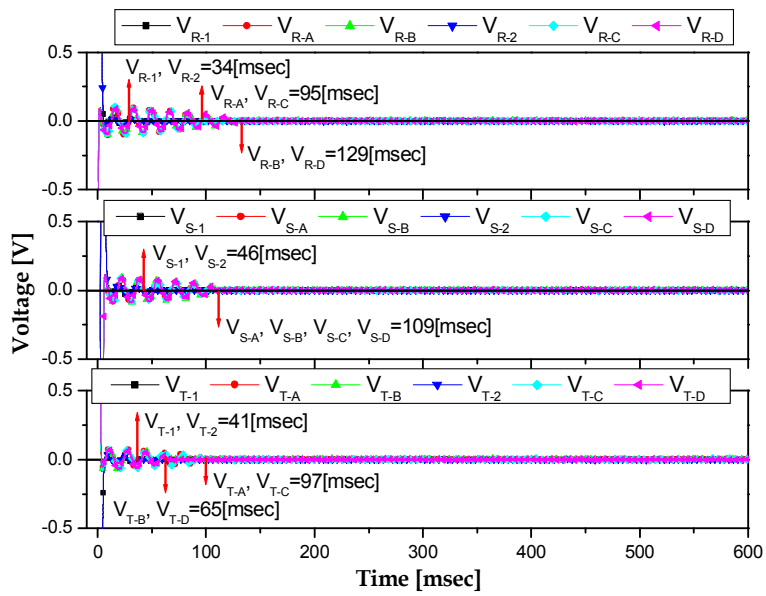
(a) Three-phase resistive-type SFCL

그림 4-30 1주기의 사고 발생시 삼상 저항형 초전도 한류기와 삼상
 행렬방식 초전도 한류기에 있는 초전도체의 회복특성 곡선

Fig. 4-30 Recovery curves of superconducting units in the resistive
 and matrix-type SFCL during the 1-cycle fault



(b) Three-phase matrix-type SFCL with 380 turns



(c) Three-phase matrix-type SFCL with 570 turns

그림 4-30 (계속)

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

V. 초전도체 파손에 따른 한류동작의 신뢰성 검증

초전도 한류기를 전력 계통에 적용하기 위해서는 초전도 한류기의 동작에 대한 신뢰성이 확보되어야 한다. 초전도 한류기를 포함한 모든 전력기기는 전력 계통내에서 어떠한 상황이 발생하더라도 초전도 한류기로서의 역할을 수행할 수 있어야 할 것이다. 본 장에서는 삼상 초전도 한류기에서 발생할 수 있는 초전도체의 파손 사고를 3가지의 경우로 설정하여 실험을 통해 동작신뢰성을 분석하였다. 이러한 분석을 통해 삼상행렬방식 초전도 한류기의 운용에 대한 안정성 및 신뢰성을 평가한다.

A. 자장인가 부분의 초전도체의 파손시 동작 특성

삼상 행렬방식 초전도 한류기는 그림 4-9와 같이 자장인가 부분 및 전류제한 부분으로 나누어진다. 2×3 구조를 갖는 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 등가회로도에서 자장인가 부분에 있는 초전도체 R-1을 단선시켜 실험하였다. 자장인가 부분은 초전도체의 켄치시 자장인가 리액터로 분류된 전류로 인해 자장을 발생시켜 전류제한 부분의 초전도체로 인가하는 역할을 수행한다. 본 가정에서는 자장인가 부분의 초전도체가 어떠한 이유로 동작하지 않더라도 자장인가 부분의 역할을 원활히 수행하고 나아가 사고전류의 제한 역할을 수행할 수 있는지를 분석하기 위한 것이다. 실험에서 인가 전압(V_0)은 280 [V]이고, 자장인가 리액터의 턴수는 570턴을 기준으로 하였으며 발생한 사고는 3선 지락사고이다. 그 외의 실험 조건은 위의 4장과 동일하다.

그림 5-1은 자장인가 부분에 있는 초전도체 R-1의 파손시 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 사고전류제한 특성 곡선을 나타낸 것이다. 3선 지락사고 발생시 S와 T상의 사고전류는 그림 4-22(c)와 거의 같은 전류제한 특성을 보였으며, R상의 경우 R-1의 단선으로 자장인가 부분에 있는 초전도체 R-2가 사고전류를 부담하게 된다. 그러므로 병렬로 연결된 자장인가 리액터와의 임피던스비에 의해 사고전류가 감소하여 흐른다는 것을 확인할 수 있다.

그림 5-2는 초전도체 R-1의 파손시 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 자장인가 부분 및 전류제한 부분에 있는 초전도체의 전류·전압 특성곡선을 나타낸 것이다. 자장인가 부분에 있는 초전도체 R-1의 파손으로 인해 동상에 있는 R-2의 초전도체에서 발생하는 전압이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 R-2만의 켄치로 인해 자장인가 부분의 전체 임피던스가 감소하기 때문이다. 하지만 그림 5-3을 통해 초전도체 R-2의 켄치로 인해 병렬로 연결된 2개의 자장인가 리액터에 전류가 흐른다는

것을 확인할 수 있다. 이로 인해 자장인가 리액터에서는 자장이 발생하므로 자장인가 리액터의 역할을 잘 수행한다는 것을 확인할 수 있다.

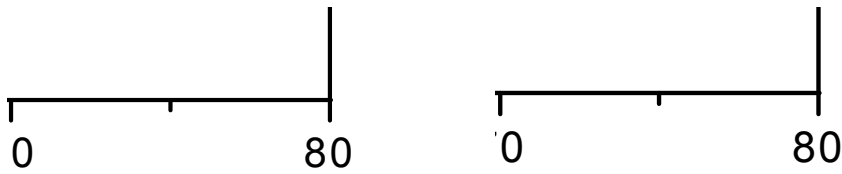
그림 5-2의 (c)와 (d)에서와 같이 전류제한 부분에 있는 초전도체에서는 특정 사고가 발생하지 않았으므로 사고전류 제한 역할을 수행한다. 그러나 T상에서 T-A와 T-C의 초전도체가 사고 발생 반주기 이후에 켜치되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 인가전압(V_0)을 증가시켰을 때 T상의 모든 초전도체가 켜치될 것으로 예상된다.

80

그림 5-1 초전도체 R-1의 파손시 사고전류제한 특성곡선
Fig. 5-1 Fault current limiting curves of matrix-type SFCL during the breakdown of R-1 superconducting unit



(a) Current curves flowing into the superconducting units in the part for generating of magnetic field
 (b) Voltage curves of the superconducting units in the part for generating of magnetic field



(c) Current curves flowing into the superconducting units in the current limiting part
 (d) Voltage curves of the superconducting units in the current limiting part

그림 5-2 R-1의 파손시 삼상 행렬방식 초전도 한류기에서 각 부분에 있는 초전도체의 전류·전압 곡선

Fig. 5-2 Current and voltage curves of superconducting units in the matrix-type SFCL during the breakdown of R-1 superconducting unit

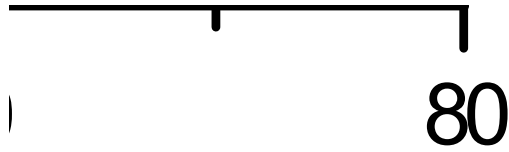


그림 5-3 R-1의 파손시 각 상의 자장인가 리액터에 흐르는 전류곡선
Fig. 5-3 Current curves flowing into the magnetic field applying
reactors during the breakdown of R-1 superconducting unit

B. 전류제한 부분의 1개 초전도체의 파손시 동작 특성

그림 4-9와 같이 전류제한 부분에는 4개의 초전도체가 직·병렬로 연결되어 있으며, 각 초전도체에는 직렬 연결된 셉트 저항과 셉트 리액터가 병렬로 연결되어 있다. 본 실험은 전류제한 부분에 있는 초전도체 중 S-A를 단선시킴으로서 파손사고를 모의하였으며, 이때 초전도 한류기의 사고전류의 제한 특성을 분석하고자 한다.

그림 5-4는 S상의 전류제한 부분에 있는 초전도체 중 S-A가 단선되었을 때의 사고전류제한 특성을 나타낸 곡선이다. 특정 사고가 발생한 S상의 사고전류가 그림 5-1과 비교하였을 때 작게 흐른다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 초전도체 S-A의 단선으로 인해 병렬로 연결된 S-C의 초전도체만이 동작하게 되어 병렬로 연결된 셉트저항 및 셉트리액터와의 임피던스비에 의해 사고전류가 감소하여 흐르기 때문이다.

그림 5-5는 S상의 전류제한 부분에 있는 초전도체 중 S-A가 단선되었을 때 각 상에 있는 초전도체의 전류·전압 곡선을 나타낸 것이다. 특정 사고가 발생하지 않은 R과 T상의 경우 자장인가 부분과 전류제한 부분의 역할에 맞는 전압 및 전류 곡선이 나타났다. 그러나 S상의 경우 초전도체 S-A의 단선으로 인해 S상의 S-C를 제외한 모든 초전도체가 켜지지 않은 것을 확인할 수 있었다. 자장인가 부분의 경우 자장인가 리액터가, 전류제한 부분의 경우 직렬 연결된 셉트 저항 및 셉트 리액터가 초전도체에 병렬로 연결되어 있다. 그러므로 사고 발생 후 초전도체가 켜지기 이전에 임피던스 비에 따라 미세한 전류분배가 이루어진다. 그러나 단선된 초전도체 S-A에 병렬로 연결된 S-C 초전도체의 경우 직렬 연결된 셉트 저항 및 셉트 리액터가 병렬로 연결되어 있지만 큰 사고전류를 감당해야 한다. 그러므로 임계전류가 낮은 자장인가 부분의 초전도체가 켜지기 이전에 초전도체 S-C가 켜져서 사고전류를 제한하게 됨으로서 다른 초전도체가 켜지지 않는다. 이것은 전류제한 부분의 초

전도체가 사고전류제한 역할을 수행하기는 하지만, 자장인가 부분의 자장인가 역할 수행을 방해할 뿐만 아니라 초전도체 S-C의 전력부담을 가중시켜 더 큰 사고전류의 발생시 초전도체의 파괴까지도 우려된다.

그림 5-5(b)와 (d)를 통해 초전도체 S-C에서 발생하는 전압이 다른 상의 초전도체에서 발생하는 전압보다 높다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 S상에 있는 나머지 초전도체가 켄치되지 않아 초전도체 S-C가 모든 전력을 부담하기 때문이다.

그림 5-6은 각 상에 설치된 자장인가 리액터에 흐르는 전류 곡선을 나타낸 것이다. 초전도체 S-A의 파손사고가 발생한 S상의 자장인가 리액터에 전류가 흐르지 않는 것을 확인할 수 있다. 이것은 초전도체 S-A의 파손으로 인해 초전도체 S-C가 모든 사고전류를 부담하게 되어 다른 초전도체가 켄치되지 않았다. 즉, 자장인가 부분에 있는 초전도체의 무켄치로 인해 자장인가 역할을 수행하지 못하게 되는 것이다.

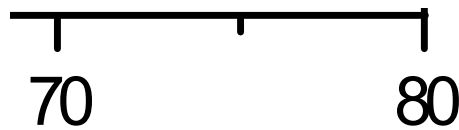
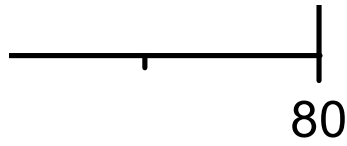


그림 5-4 초전도체 S-A의 파손시 사고전류제한 특성곡선

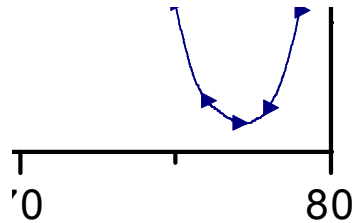
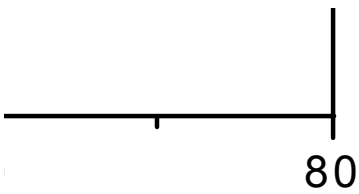
Fig. 5-4 Fault current limiting curves of matrix-type SFCL during the breakdown of S-A superconducting unit

ω



(a) Current curves flowing into the superconducting units in the part for generating of magnetic field

(b) Voltage curves of the superconducting units in the part for generating of magnetic field



(c) Current curves flowing into the superconducting units in the current limiting part

(d) Voltage curves of the superconducting units in the current limiting part

그림 5-5 초전도체 S-A의 파손시 삼상 행렬방식 초전도 한류기에서 초전도체의 전류·전압 곡선

Fig. 5-5 Current and voltage curves of superconducting units in the matrix-type SFCL during the breakdown of S-A superconducting unit

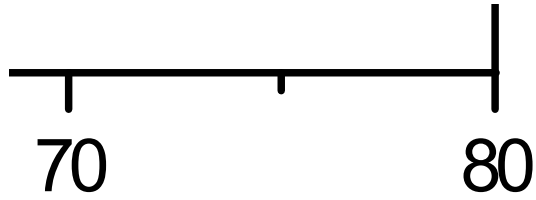


그림 5-6 초전도체 S-A의 파손시 각 상의 자장인가 리액터에 흐르는 전류곡선

Fig. 5-6 Current curves flowing into the magnetic field applying reactors during the breakdown of S-A superconducting unit

C. 전류제한 부분의 2개 초전도체의 파손시 동작 특성

위에서는 전류제한 부분에 있는 초전도체 중 1개만의 파손시 동작특성을 분석하였다. 여기서는 T상의 전류제한 부분에서 직렬연결된 초전도체 T-A와 T-D의 단선시 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 동작특성을 분석하고자 한다. 그림 4-9에서 T상에 있는 초전도체 T-A와 T-D를 단선시켜 실험하였다.

그림 5-7은 T상의 전류제한 부분에 있는 초전도체 중 T-A와 T-D를 단선시켰을 경우 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 사고전류제한 특성을 나타낸 곡선이다. 이 경우 전류제한 부분의 초전도체 T-A와 T-D의 단선으로 인해 전류제한 부분에서 발생하는 전체 임피던스가 증가하므로 제한되는 사고전류가 더 크다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 자장인가 부분에 있는 초전도체 T-1과 T-2가 퀘칭되지 않는다는 것을 그림 5-8(b)를 통해 확인할 수 있다. 이것은 자장인가 부분에 병렬로 연결된 자장인가 리액터의 임피던스에 의해 초전도체로 흐르는 전류가 퀘칭 전

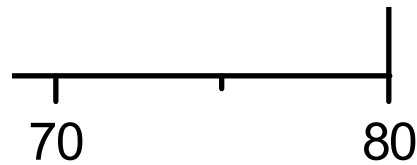
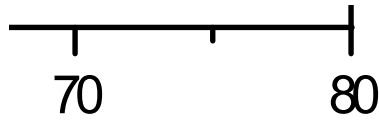
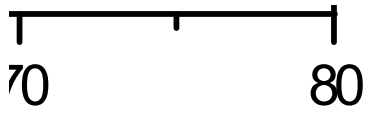
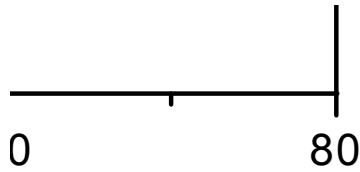
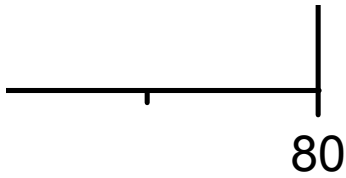


그림 5-7 초전도체 T-A와 T-D의 파손시 사고전류제한 특성곡선
Fig. 5-7 Fault current limiting curves of matrix-type SFCL during the breakdown of T-A and T-D superconducting units



(a) Current curves flowing into the superconducting units in the part for generating of magnetic field (b) Voltage curves of the superconducting units in the part for generating of magnetic field



(c) Current curves flowing into the superconducting units in the current limiting part (d) Voltage curves of the superconducting units in the current limiting part

그림 5-8 초전도체 T-A와 T-D의 파손시 삼상 행렬방식 초전도
한류기에서 초전도체의 전류·전압 곡선

Fig. 5-8 Current and voltage curves of superconducting units in the matrix-type SFCL during the breakdown of T-A and T-D superconducting units

분류되고, 반면 전류제한 부분에 있는 초전도체는 T-A 및 T-D의 단선으로 인해 임피던스가 증가하여 T-1 및 T-2가 켜치되기 전에 T-B와 T-C가 켜치되어 사고전류를 제한하기 때문이다. 그러나 자장인가 부분의 역할을 수행하지 않더라도 전류제한 부분에 있는 초전도체 T-B와 T-C는 사고전류에 의해 켜치되어 사고전류제한의 역할을 수행한다. 2×3 구조를 갖는 삼상 병렬방식 초전도 한류기는 전류제한 부분에 있는 초전도체 중 어느 하나 이상이 파손으로 인해 그 역할을 수행하지 못하는 경우 병렬로 연결된 초전도 소자가 켜치되어 사고전류제한 역할을 수행하게 된다. 그러나 파손된 초전도체와 직렬로 연결된 초전도체는 켜치되지 않으며, 또한 자장인가 부분에 있는 초전도체 역시 켜치되지 않는다. 이것은 초전도체의 단선으로 인해 이와 병렬로 연결된 전류제한 부분의 임피던스가 증가하여 초전도체로 분류되는 전류가 다른 전류제한 부분이나 자장인가 부분의 초전도체로 분류되는 전류보다 커서 빠른 켜치의 발생으로 사고전류를 제한하므로 다른 초전도체는 켜치되지 않는다.

) 80

Fig. 5-9 초전도체 T-A와 T-D의 파손시 각 상의 자장인가 리액터에 흐르는 전류곡선

Fig. 5-9 Current curves flowing into the magnetic field applying reactors during the breakdown of T-A and T-D superconducting units

VI. 결 론

본 논문에서 제시하고 있는 행렬방식 초전도 한류기는 저항형 초전도 한류기의 일종으로 초전도체의 임계자장 조정으로 임계특성의 차이를 줄일 수 있는 구조를 가지고 있다. 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 실험을 위해 하나의 자장인가 부분과 두 개의 전류제한 부분을 모듈화할 수 있는 자장인가 리액터를 설계·제작하여 특성을 분석하였다. 삼상 전력계통에 적용하기 위하여 1×3의 기본구조와 용량증대를 위한 2×3 구조의 삼상 행렬방식 초전도 한류기를 구성하여 지락사고의 유형별 사고전류 제한특성과 켄치특성에 대해 분석하였다. 또한 사고로 인한 초전도체의 켄치 후 상전도 상태로의 복귀특성을 사고주기별로 분석하였다. 전기적·기계적 충격에 약한 초전도체의 파손시 초전도 한류기의 동작 신뢰성을 분석하기 위하여 각 부분의 초전도체를 단선시킨 후 초전도 한류기의 동작특성을 분석하였다. 본 논문에서 얻은 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 행렬방식 초전도 한류기는 초전도체에 자장을 인가하기 위한 자장인가 부분과 사고전류를 저감하는 전류제한 부분으로 나눌 수 있다. 자장인가 리액터의 턴수가 190턴인 경우 리액터의 임피던스가 낮아 초전도체의 켄치전 전류의 분류로 인해 자장인가 부분의 초전도체가 켄치되지 않으므로 자장인가 리액터의 역할을 수행할 수 없다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 자장인가 리액터의 턴수가 380턴과 570턴인 경우 모두 자장인가 부분의 초전도체가 켄치되어 전류제한 부분의 초전도체로 자장이 인가되며, 380턴인 경우가 두 초전도체의 임계전류의 차이를 더 많이 줄여준다. 이러한 자장인가 리액터의 턴수별 특성분석을 통해 모듈화된 자장인가 리액터가 행렬방식 초전도 한류기의 부피를 1/3로 감소시킬 수 있으며, 초전도체로의 자장인가를 통해 임계특성의 차이를 줄여 켄치특성을 균일하게 하였다.

2. 삼상 전력계통에 1×3 구조를 갖는 삼상 행렬방식 초전도 한류기를 적용하여 지락사고의 종류에 따라 사고전류 제한특성을 분석한 결과 각 상별로 거의 동일한 특성을 보였다. 자장인가 리액터가 190턴인 경우는 자장인가 부분의 초전도체가 켄치되지 않아 전류제한 부분의 두 초전도체간 발생전압의 차이가 크다. 그러나 380턴과 570턴의 경우 자장인가 부분의 초전도체의 켄치로 인해 두 초전도체에서 발생하는 전압의 차이가 줄어들었으며, 그 차이는 380턴인 경우가 가장 작았다. 이것으로부터 자장인가 리액터에서 발생하는 자장으로 초전도체의 임계특성의 차이가 가장 많이 줄어들었다. 이는 초전도체에서 발생하는 저항의 차이가 줄어들었기 때문이다.

3. 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 용량증대를 위해 각 상에 모듈화된 자장인가 리액터를 2×3 구조로 연결하여 지락사고의 종류에 따른 동작특성을 삼상 저항형 초전도 한류기와 비교·분석한 결과 각 상의 사고전류 제한특성은 거의 동일하게 나타났다. R상 0°기준의 사고를 발생시켰으므로 1선, 2선, 3선 지락사고에 따라 S상과 T상은 $\pm 120^\circ$ 의 위상 차이를 갖는다. 그러므로 발생하는 각 상의 사고전류의 크기가 다르므로 제한된 사고전류의 크기도 다르게 된다. 그러나 행렬방식 초전도 한류기는 발생하는 초전도 소자의 저항이 거의 동일하므로 사고유형에 따라 동상의 제한된 사고전류의 크기는 거의 동일하게 된다.

4. 저항형 초전도 한류기는 초전도체의 불규칙한 켄치특성으로 인해 일부 초전도체만 켄치되어 전력부담이 가중된다. 그러나 행렬방식 초전도 한류기는 각 상의 모든 초전도체가 켄치되었을 뿐만 아니라 전류제한 부분의 초전도체로 자장을 인가하여 초전도체 간 임계특성의 차이가 줄어든다는 것을 확인하였다. 자장인가 리액터가 380턴

을 갖는 경우에 자장인가에 따른 초전도체의 임계특성의 차이를 가장 크게 줄여준다는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 초전도체에서 발생하는 저항특성의 비교를 통해서도 입증하였다.

5. 사고전류로부터 켜진 초전도체는 상전도체에서 다시 초전도체로 회복되어 제 2의 사고전류에 대비하여야 한다. 삼상 저항형 초전도 한류기의 경우 초전도체의 불규칙한 켜지특성으로 인해 켜진 초전도체의 전력부담이 가중된다. 그러므로 초전도체가 받은 소비전력이 크게 되어 상전도체로 회복되는 시간이 길어지게 된다. 그러나 삼상 행렬방식 초전도 한류기는 균일한 켜지특성으로 인해 초전도체의 소비전력이 균등하게 되어 상전도체로의 회복시간이 짧아진다는 것을 확인하였다. 초전도체가 부담하는 소비전력은 발생된 지락 사고의 사고주기가 짧을수록 작아진다. 그러므로 사고주기가 짧을수록 초전도체의 회복시간이 짧아지게 되는 것이다.

6. 전기적·기계적 요인으로 인해 초전도체가 파손될 경우 초전도 한류기의 동작 신뢰성을 분석하기 위해 2×3 구조를 갖는 삼상 행렬방식 초전도 한류기의 자장인가 부분 및 전류제한 부분의 초전도체를 단선시킨 후 동작특성을 분석하였다. 자장인가 부분의 초전도체 단선시 자장인가 리액터의 역할인 초전도체로의 자장인가를 수행하지 못한다. 그러나 전류제한 부분의 초전도체가 유입되는 사고전류를 제한하여 초전도 한류기의 동작을 수행한다는 것을 확인할 수 있었다. 전류제한 부분의 초전도체 단선시 단선된 초전도체와 병렬로 연결된 초전도체만이 켜지기 때문에 전력부담이 가중된다. 또한 자장인가 부분의 초전도체도 켜지지 않으므로 자장인가에 따른 임계특성 차이의 개선효과를 얻을 수 없다는 것을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] 김준환, 이강완, “전력계통 고장전류 증대와 대응방안”, 전기저널, Vol. 1 (1998), pp. 1-19.
- [2] Charles W. Brice, Roger A. Dougal, Jerry L. Hudgins, “Review of technologies for current-limiting low-voltage circuit breakers”, IEEE Trans. on indust. appl., Vol. 32 (1996), pp. 1005-1010.
- [3] Teng Fa Tsao , Hong Chan Chang, “Composite Reliability Evaluation Model for Different Types of Distribution Systems”, IEEE trans. on power system, Vol. 18 (2003), pp. 924-930.
- [4] 김영선, 이강완, “고장전류 저감을 위한 345kV 직렬리액터 설치 검토”, 전기저널, Vol. 1 (2000), pp. 37-45.
- [5] 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 (2001), pp. 115-119.
- [6] 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. 2002, pp. 359-364.
- [7] 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 (2001), pp. 2098-2101.
- [8] 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 (2001), pp. 120-124.
- [9] 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 (2001), pp. 415-420.
- [10] 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 (2002), pp. 1606-1609.
- [11] Lei Chen, Yuejin Tang, Jing Shi, Zheng Sun, "Simulations and experimental analyses of the active superconducting fault current limiter", Physica C, Vol. 459 (2007), pp. 27-32.
- [12] 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 (2010), pp. 1182-1185.
- [13] 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 (2010), pp. 1147-1150.

- [14] 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 (2010), pp. 1114-1117.
- [15] 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 (2006), pp. 669-702.
- [16] S. H. Lim, "Operational characteristics of flux-lock type SFCL with series connection of two coils", IEEE Trans. on appl. super., Vol. 17 (2007), pp. 1895-1898.
- [17] 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 (2010), pp. 1143-1146.
- [18] 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 (2008), pp. 729-732.

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 학문을 연마 할 수 있도록 많은 지도와 조언을 해주신 공과대학장 曹 錦培 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 바쁘신 가운데 후학 지도를 위해 논문 심사를 맡아주신 吳 金坤, 白 亨來, 李 愚宣, 崔 孝祥 교수님께도 감사를 드립니다. 또한 대학원 기간 동안 학문적 지도와 조언을 해준 金 容載, 金 南勳, 鄭 炳湖 교수님과, 신 화영, 박 형민, 정 병익, 박 주선, 류 승한, 하 경훈, 최 수근, 그리고 박사연구에 많은 도움을 주신 조 용선 대학원생께도 감사를 드립니다.

그 동안 어려운 여건임에도 불구하고 대학원 수업에 열중 할 수 있도록 많은 지원과 배려를 해주신 한국폴리텍 I 대학제주캠퍼스 嚴 俊喆 학장님과 동료 교수 여러분 그리고 교직원들께 고개 숙여 감사의 마음을 전합니다.

오늘에 있기까지 사랑과 정성으로 보살피 주시고 어려운 가정여건 속에서도 7남 2녀를 뒷바라지 하시고 한시라도 자식걱정에 노심초사 하시다 지금은 이 세상을 떠나 극락세계에서 우리가족의 건강과 행복을 보장해 주시는 부모님과 장인어른께 깊은 감사를 드리며 또한 우리를 항상 보살피 주시고 염려해 주는 장모님께도 깊은 감사를 드립니다.

그리고 박사과정 동안 경제적 어려움 속에서도 항상 웃음을 잃지 않고 가정의 대소사에 신경 쓰면서 사랑으로 내조해준 사랑하는 아내 吳 成禮, 많은 시간을 함께 해주지 못했지만 건강하고 착하게 잘 자라준 사랑하는 아들 裕根, 딸 旻美, 旻慧, 秀恩, 우리가족의 화목을 생각하면서 항상 걱정해주는 德喆 형님과 형수님, 그 외 다섯 분의 형님과 형수님, 누님과 매형, 조카들 늘 가까이에서 장인 장모처럼 관심과 사랑으로 격려해 주신 처 작은아버지와 어머니, 처가의 처남 처제, 동서 분께도 깊은 감사를 드리면서 오늘의 작은 결실의 기쁨을 함께 나누고자 합니다.

제게 오늘의 영광이 있기까지 학업에 많은 도움과 격려를 주신 모든 분들께 거듭 감사의 말씀을 드리며 새 해를 맞이하여 더욱 건강하시고 가내에 항상 행운과 행복이 함께하시길 기원 합니다.

2010년 12월 제주 산천단에서

金 德 久 올림