

2012年 2月  
碩士學位論文

초전도 한류기의 과도상태시  
전력망 동작특성

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

河景薰

2012年  
2月  
碩士學位論文

초전도 한류기의  
과도상태시  
전력망 동작특성

河  
景  
薰

# 초전도 한류기의 과도상태시 전력망 동작특성

**Operational Characteristics of a SFCL under Transient  
States in Power Grid**

2012 年 2 月 24 日

朝鮮大學校 大學院

電 氣 工 學 科

河 景 薰

# 초전도 한류기의 과도상태시 전력망 동작특성

指導教授 崔 孝 祥

이 論文을 工學 碩士學位申請 論文으로 提出함.

2011年 10月

朝鮮大學校 大學院

電 氣 工 學 科

河 景 薰

# 河景薰의 碩士學位 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 曹 錦 培 印

委 員 朝鮮大學校 教授 崔 孝 祥 印

2011年 11月

朝鮮大學校 大學院

# 목 차

## ABSTRACT

I. 서 론 .....	1
II. 3상 자속결합형 초전도 한류기의 특성 .....	4
A. 3상 자속결합형 초전도 한류기의 구조 및 동작원리 .....	4
B. 3상 자속결합형 초전도 한류기의 동작특성 .....	9
1. 실험장치 구성 .....	9
2. 사고유형별 동작특성 .....	14
III. 초전도 한류기의 보호협조 특성 .....	26
A. 초전도 한류기의 회복특성 분석 .....	26
B. 두 개의 피더를 갖는 전력시스템 구성 .....	30
1. 한류기를 적용하지 않은 경우 .....	31
2. Feeder에 적용한 경우 .....	35
3. 주변압기 2차측에 적용한 경우 .....	40
IV. 결론 .....	45
참고문헌 .....	47

## List of Tables

Table 1 Specifications of a transformer .....	11
Table 2 Comparison of the current in each feeder with or without the SFCL in feeder .....	36
Table 3 Comparison of the current in each feeder with or without the SFCL in the back of Tr. ....	41

## List of Figures

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of flux-coupling type SFCL .....	4
Fig. 2 Equivalent circuit diagram of integrated three-phase flux-coupling type SFCL .....	6
Fig. 3 YBCO thin film type superconducting element and the waveforms of the critical current .....	10
Fig. 4 Integrated three-phase transformer .....	11
Fig. 5-1 Experimental circuit diagram .....	12
Fig. 5-2 Composition of experimental devices .....	13
Fig. 6 Waveforms of limited fault current in the case of single line-to-ground fault .....	15
Fig. 7 Voltage and current waveforms of flux-coupling type SFCL in the case of single line-to-ground fault .....	17
Fig. 8 Waveforms of limited fault current in the case of double line-to-ground fault .....	19
Fig. 9 Voltage and current waveforms of flux-coupling type SFCL in the case of double line-to-ground fault .....	21
Fig. 10 Waveforms of limited fault current in the case of triple line-to-ground fault .....	23
Fig. 11 Voltage and current waveforms of flux-coupling type SFCL in the case of triple line-to-ground fault .....	25
Fig. 12 Equivalent circuit diagram of flux-coupling type SFCL with two superconducting elements .....	27
Fig. 13 Voltage waveforms of superconducting element after the end of the fault .....	29

Fig. 14 Experimental circuit diagram with the two feeders .....	30
Fig. 15 Fault current waveforms in the case of single line-to-ground fault without the SFCL .....	32
Fig. 16 Fault current waveforms in the case of double line-to-ground fault without the SFCL .....	33
Fig. 17 Fault current waveforms in the case of triple line-to-ground fault without the SFCL .....	34
Fig. 18 Fault current waveforms in the case of single line-to-ground fault with the SFCL in feeder .....	37
Fig. 19 Fault current waveforms in the case of double line-to-ground fault with the SFCL in feeder .....	38
Fig. 20 Fault current waveforms in the case of triple line-to-ground fault with the SFCL in feeder .....	39
Fig. 21 Fault current waveforms in the case of single line-to- ground fault with the SFCL in the back of Tr. ....	42
Fig. 22 Fault current waveforms in the case of double line-to- ground fault with the SFCL in the back of Tr. ....	43
Fig. 23 Fault current waveforms in the case of triple line-to- ground fault with the SFCL in the back of Tr. ....	44



# ABSTRACT

## **Operational Characteristics of a SFCL under Transient States in Power Grid**

Ha Kyoung-Hun

Advisor : Prof. Choi Hyo-Sang, Ph.D.

Department of Electrical Engineering,

Graduate School of Chosun University

The superconducting fault current limiter (SFCL) is a fault current limiter that uses the characteristic of the superconductor, which operates without loss under the normal state but quickly generates impedance to limit the fault current under the transient state after a fault occurrence. To apply the SFCL to the distribution or transmission system, the capacity problem should first be addressed. Studies are being conducted to improve the capacity of the SFCL using a transformer.

This study examined the operation and application characteristics of the flux-coupling type SFCL with an integrated three-phase transformer under the transient state of the power system. The integrated three-phase flux-coupling type SFCL limits the fault current dividing into faulted and sound phases in the system. According to this characteristic, in the case of a single, double or triple line-to-ground fault, all superconducting elements in the faulted and sound phases were quenched, and approximately 60% or more of the fault current was limited. In the case of a double or triple line-to-ground fault,

however, the fluxes from faulted phases were crossed, and the limiting rate of fault current was decreased from that of the single line-to-ground fault.

To apply the SFCL to the power system, the capacity improvement, coordination with the protection system and SFCL application positions should be considered. In this study, the coordination with the reclosing duty cycle of the power system was examined by analyzing the recovery characteristic of the superconducting element depending on the application of simultaneous quench when the capacity of the integrated three-phase flux-coupling type SFCL was increased. In addition, the fault current patterns were analyzed according to the SFCL application positions in a distribution system. The analysis results showed that the decrease in the rated current induced to the sound feeder was improved when the SFCL was installed on the feeder. When the SFCL was installed on the secondary side of the main transformer, the system protection range became wider, but the rated current in the feeder further decreased, making the stable power supply impossible.

# I. 서 론

국내 전력계통은 계통운영의 유연성을 위하여 변전소간에 상호 연결되는 망상식 형태를 채택하고 있다. 이러한 구조는 전력공급의 효율성은 향상시켰지만, 지속적인 전력수요 증가로 인해 전기설비가 증설됨에 따라 계통 내 임피던스는 감소하게 되었다. 이는 지락사고 또는 단락사고로 인해 발생하는 고장전류의 크기를 증가시켰다. 증가된 고장전류는 현재 전력계통의 주 보호장치인 전력용 차단기의 차단내력 한계를 위협하고 있으며, 기타 전력기기의 고장 및 파괴, 대규모 정전 사태 등으로 이어져 막대한 경제적 손실을 발생시킨다. 현재 고장전류로부터 전력망을 보호하고자 하는 대책으로 고용량 전력용 차단기로의 교체 방안, 모선분리, 직렬리액터 설치 방안 등이 일반적으로 적용되고 있다. 하지만 차단기 교체 방안은 고비용 및 기술적 어려움이 따르며 추후 그 용량을 넘어선 고장전류 발생시 재 교체가 요구될 수 있는 문제가 있다. 모선분리 및 직렬리액터 설치 방안은 계통안정도 저하 및 상시 임피던스 투입으로 인한 전력손실 발생의 문제점을 안고 있다. 결과적으로, 고장전류로부터 계통의 안정도 및 신뢰도를 확보함에 있어 기존 대안들의 한계에 부딪힘으로 인해, 새로운 대책마련이 요구되고 있다[1-3].

초전도 한류기는 초전도체의 특성을 이용한 사고전류 제한장치로써, 계통 내 정상상태에서는 무손실 전력기기로 동작하고, 고장발생 후 과도상태에서는 빠르게 임피던스를 투입하여 사고전류를 일정값 이하로 제한시키는 동작을 한다. 국내·외에서는 초전도 한류기를 전력망에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다[4-8].

배전급 또는 송전급 전력망에 초전도 한류기를 적용시키기 위해서는 용량 증대 문제가 우선적으로 해결되어야 한다. 기본적인 방법으로 여러 초전도 소자를 직·병렬 연결하여 용량을 증대시키는 방법이 있으나, 비용 상승 및 초전도 소자들의 상이한 임계 전류 값으로부터 발생하는 불균일 켄치 문제가 야기될 수 있다. 이러한 용량증대 문제 해결을 도모할 수 있는 방안으로, 현재 변압기를 이용하여 초전도 한류기의 용량증대 문제를 해결하고자 하는 연구사례가 제시되어 왔다. 변압기형

초전도 한류기, 자속구속형 초전도 한류기, 자속결합형 초전도 한류기 등을 그 예로 들 수 있다[9-13].

본 논문에서는 자속결합형 초전도 한류기의 사고유형별 동작특성을 분석하였다. 자속결합형 초전도 한류기는 앞서 기술한 바와 같이 초전도 소자와 변압기를 응용한 사례이며, 3상의 자속결합형 초전도 한류기는 사용되는 변압기에 따라 3상 분리형 및 3상 일체형 자속결합형 초전도 한류기로 분류할 수 있다. 단상 변압기를 이용하여 구성된 자속결합형 초전도 한류기를 각 상에 독립적으로 적용하는 3상 분리형의 경우, 사고가 발생한 상의 초전도 소자만이 켜치되어 사고전류를 제한시키게 된다. 반면 단일철심 3상 변압기를 이용하는 3상 일체형 자속결합형 초전도 한류기는 단일철심을 매개로 각 상의 코일 및 초전도 소자가 자속을 공유하게 된다. 이러한 특성으로 인해, 임의의 상에서 사고가 발생할 경우 사고상의 초전도 소자뿐만 아니라 건전상의 초전도 소자도 켜치가 발생하게 된다. 이는 사고전류에 의한 자속을 건전상의 코일과 초전도 소자가 단일철심을 통해 공유한 결과이며, 사고상 및 건전상에서 사고전류를 분담하여 제한하는 것으로 해석할 수 있다. 물론 건전상에 사고전류를 분담하는 특성이 장점으로만 해석될 수는 없지만, 현재 3상의 전력망에서 사용되는 변압기는 비용, 부피, 효율성 등을 고려해 3상 일체형 변압기가 주로 사용되고 있다. 본 논문에서는 3상 일체형 변압기를 이용한 자속결합형 초전도 한류기의 사고유형별 동작특성을 분석하였다.

국내 전력망의 주보호장치인 전력용 차단기는 순간사고와 지속사고를 구분하여 전력공급의 신뢰성을 확보하기 위해 고속 재폐로 동작책무( $\text{Open} - t_1 - \text{Closed} / \text{Open} - t_2 - \text{Closed} / \text{Open} - \text{Open}$ )에 의해 운용되고 있다. 전력망 적용을 목표로 하는 초전도 한류기 역시 이 동작책무를 만족해야 하며, 초전도 소자의 회복특성은 이를 위한 중요한 요소로 작용한다. 초전도 소자의 회복시간은 상전도 상태로 켜치된 초전도 소자가 사고종료 후 다시 초전도 상태로 복귀하는 시간을 의미하며, 초전도 소자가 받게 되는 전력부담이 클 수록 그 회복시간은 지연된다. 이와 같은 문제는 초전도 한류기의 용량증대를 위해 다수의 초전도 소자를 사용하였을 경우 발생할 수 있다. 초전도 소자의 임계값이 서로 상이함에 따라 동시켄치가 이

루어지지 않을 경우, 켄치가 발생한 초전도 소자에서만 사고전류에 의한 전력부담이 가중되어 회복시간이 지연될 수 있다. 또한 그로 인해 초전도 소자가 파손될 우려가 있다. 본 논문에서는 두 개의 초전도 소자를 사용한 자속결합형 초전도 한류기의 동시켄치 유도과 그에 따른 초전도 소자의 회복특성을 분석하였다.

국내 배전계통의 경우 급속한 경제성장과 더불어 전력수요량 및 수용가가 급격하게 증가하면서 집약적인 형태로 되고 있다. 초전도 한류기를 전력망에 적용함에 있어, 우선적으로 고려해야할 사항은 앞서 기술한 초전도 한류기의 용량증대 문제와 전력시스템에서의 보호협조 문제라 할 수 있다. 본 논문에서는 두 개의 피더를 갖는 3상 실험회로를 구성하여 초전도 한류기의 적용위치에 따른 과도상태 특성을 분석하였다[14-23].

## II. 3상 자속결합형 초전도 한류기의 특성

### A. 3상 자속결합형 초전도 한류기의 구조 및 동작원리

3상의 전력망에 초전도 한류기를 적용할 경우, 용량 증대 문제가 우선적으로 해결되어야 한다. 이를 해결하기 위해서는 초전도 소자의 직·병렬 연결이 필수적이나 비용 상승의 문제가 따른다. 자속결합형 초전도 한류기는 앞서 기술한 바와 같이 초전도 소자와 변압기의 자속결합을 이용하는 구조를 갖기 때문에 한류기의 용량 증대 측면에서 장점을 갖는다. 또한 초전도 소자만으로 구성되는 일반 저항형 초전도 한류기는 초전도 소자의 특성상 제작됨과 동시에 임계전류 값, 임피던스 값 등의 성질이 불변한 반면 자속결합형 초전도 한류기는 1, 2차측 코일의 권선비 ( $N_1:N_2$ ) 조절에 의해 한류기의 전류 제한 임피던스 값 설정이 가능하다.

그림 1에서 자속결합형 초전도 한류기의 등가회로도를 나타내었다. 변압기의 1차측과 2차측 코일은 직렬연결 되어 있고, 초전도 소자는 2차측 코일에 병렬연결된 구조를 갖는다. 1, 2차측 코일의 결선방향에 따라 가극형 및 감극형의 구조로 구분할 수 있으며, 본 논문에서는 가극형 결선방향을 기준으로 한다.

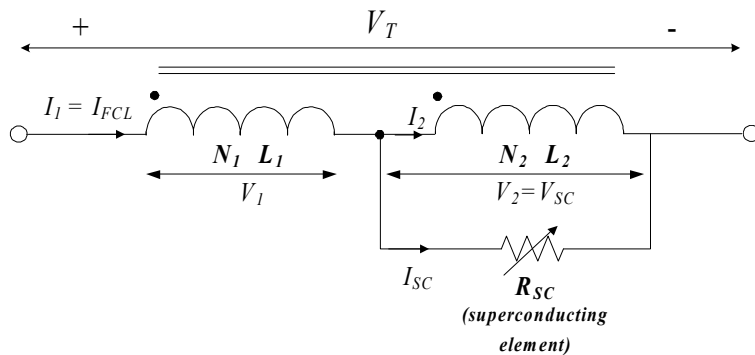


그림 1 자속결합형 초전도 한류기 등가회로도

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of a flux-coupling type SFCL

식 (1), (2), (3)에서 자속결합형 초전도 한류기의 전압, 전류 관계식을 나타내었다. 정상상태에서 초전도 소자는 영저항 상태를 유지하게 되며, 이때 초전도 소자의 전압은  $V_{SC}=0$ 을 만족하게 된다. 초전도 소자와 병렬연결 관계인 2차측 코일의 전압은 이 조건을 만족해야 하므로  $N_1+N_2 \neq 0$ 일 경우  $d\phi/dt=0$ 이 성립하게 되며, 이로부터 정상상태에서 전력손실이 발생하지 않는 초전도 한류기의 특성을 증명할 수 있다.

$$I_1(=I_{FCL})=I_2+I_{SC} \quad (1)$$

$$V_1=N_1\frac{d\phi}{dt}, V_2=N_2\frac{d\phi}{dt}=V_{SC} \quad (2)$$

$$V_T=V_1+V_2=(N_1+N_2)\frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

위의 식 (1), (2), (3)으로부터 자속결합형 초전도 한류기의 임피던스 값을 도출하기 위해 식 (4), (5), (6)으로 전개한 후, 한류기의 전류 제한 임피던스 값을 식 (7)과 같이 나타내었다.

$$I_1(=I_{FCL})=I_2+I_{SC} \quad (4)$$

$$V_1=j\omega L_1 I_1+j\omega M I_2 \quad (5)$$

$$V_2=j\omega L_2 I_2+j\omega M I_1=I_{SC} \cdot R_{SC}=V_{SC}=0 \quad (6)$$

$$Z_T=\frac{j\omega R_{SC}(L_1+L_2)+j\omega 2MR_{SC}}{R_{SC}+j\omega L_2} \quad (7)$$

본 논문에서는 3상이 하나의 철심을 매개로 자속결합하여 초전도 소자와 함께 사고전류를 제한시키는 3상 일체형의 자속결합형 초전도 한류기에 대한 동작특성을 분석하였다. 그림 2에서 단일철심 3상 변압기를 이용한 3상 일체형 자속결합형 초전도 한류기의 등가회로도를 나타내었다.

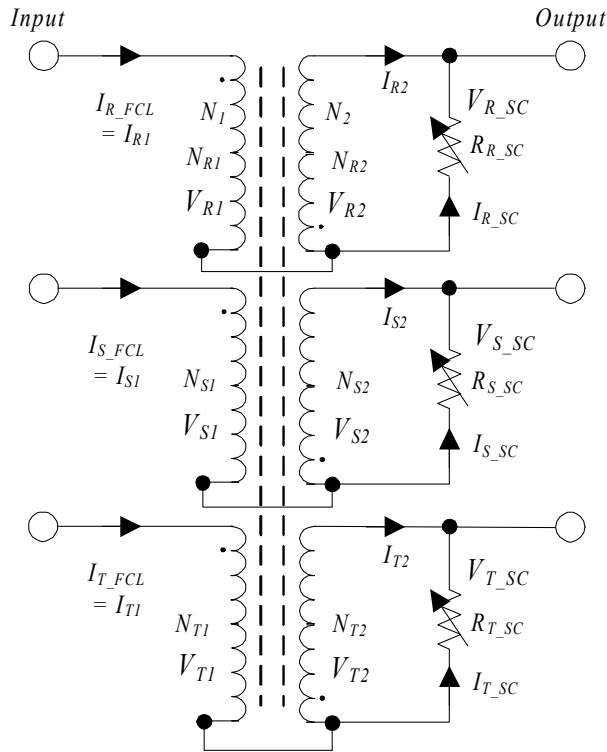


그림 2 3상 일체형 자속결합형 초전도 한류기 등가회로도

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of an integrated three-phase flux-coupling type SFCL

이 경우 역시 사고발생 전 각 상의 선로전류( $I_{R1}$ ,  $I_{S1}$ ,  $I_{T1}$ )는 영저항( $R_{SC}=0$ ) 상태를 유지하기 때문에 초전도 소자 양단 전압( $V_{R\_SC}$ ,  $V_{S\_SC}$ ,  $V_{T\_SC}$ )은 0 V을 만족하게 되며, 전력손실( $W_{SC}=I_{SC}^2 \cdot R_{SC}=V_{SC} \cdot I_{SC}$ )이 발생하지 않는 초전도 한류기의 기본



성질을 증명할 수 있다. 이 때 초전도 소자와 병렬 관계인 2차측 코일의 전압도 0 V를 만족하므로 식(8), (9), (10)의 1, 2차측 코일을 채교하는 자속  $\phi_M = 0$ 임을 유도할 수 있다. 위 식에서 각 상의 코일에서 발생하는 1차 누설자속과 2차 누설자속인  $\phi_{11}, \phi_{22}$  는 극히 작은값이며 본 논문에서는 0으로 가정하였다.

$$\begin{aligned}
 V_{R_{SC}} &= I_{R_{SC}} \cdot R_{R_{SC}} = V_{R2} = 0 \\
 V_{R1} &= N_{R1} \frac{d\phi_M}{dt} \\
 V_{R2} &= N_{R2} \frac{d\phi_M}{dt}
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 V_{S_{SC}} &= I_{S_{SC}} \cdot R_{S_{SC}} = V_{S2} = 0 \\
 V_{S1} &= N_{S1} \frac{d\phi_M}{dt} \\
 V_{S2} &= N_{S2} \frac{d\phi_M}{dt}
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 V_{T_{SC}} &= I_{T_{SC}} \cdot R_{T_{SC}} = V_{T2} = 0 \\
 V_{T1} &= N_{T1} \frac{d\phi_M}{dt} \\
 V_{T2} &= N_{T2} \frac{d\phi_M}{dt}
 \end{aligned} \tag{10}$$

지락사고 및 단락사고 등이 발생하여 초전도 소자의 임계전류 값을 초과하는 사고전류가 발생하게 되면, 초전도 소자는 초전도성을 잃고 급격히 저항을 발생하게 된다. 이때 초전도 소자와 2차측 코일에 전압이 발생하면서 상쇄하던 철심 내의 자속이 결합하여 1차측 코일에 전압이 유기되고, 자속결합형 초전도 한류기의 전체 임피던스에 의해 사고전류는 일정 값 이하로 제한된다. 임의의 상에서 사고가 발생할 때, 사고상의 초전도 소자가 켄치됨에 따라 상쇄하던 자속이 채교하게 된

다. 3상(R, S, T)은 단일철심을 매개로 자속을 공유하게 되어, 임의의 사고상에서 발생하는 사고전류는 건전상의 초전도 소자 및 1, 2차 코일에서도 자속의 영향을 준다. 유도되는 전류가 건전상의 초전도 소자의 임계전류 값을 초과하게 되면 건전상의 초전도 소자도 켜치되는 현상이 발생하게 된다. 이는 사고상에서 발생한 사고전류를 사고상 및 건전상의 초전도 소자가 함께 제한동작 하는 것으로 해석할 수 있다. 3상 일체형 자속결합형 초전도 한류기의 각 상의 전압 관계식을 식(11), (12), (13)와 같이 나타내었다. 정상상태와는 달리 사고발생 후 각 상의 1, 2차측 코일에 유기되는 전압은 다른 상으로부터 발생하는 자속  $\pm \phi_\alpha$ 의 영향을 받게 된다.

$$\begin{aligned}
 V_{R\_SC} &= I_{R\_SC} \cdot R_{R\_SC} = V_{R2} \\
 V_{R1} &= N_{R1} \frac{d}{dt}(\phi_M \pm \phi_\alpha) \\
 V_{R2} &= N_{R2} \frac{d}{dt}(\phi_M \pm \phi_\alpha)
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 V_{S\_SC} &= I_{S\_SC} \cdot R_{S\_SC} = V_{S2} \\
 V_{S1} &= N_{S1} \frac{d}{dt}(\phi_M \pm \phi_\alpha) \\
 V_{S2} &= N_{S2} \frac{d}{dt}(\phi_M \pm \phi_\alpha)
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
 V_{T\_SC} &= I_{T\_SC} \cdot R_{T\_SC} = V_{T2} \\
 V_{T1} &= N_{T1} \frac{d}{dt}(\phi_M \pm \phi_\alpha) \\
 V_{T2} &= N_{T2} \frac{d}{dt}(\phi_M \pm \phi_\alpha)
 \end{aligned} \tag{13}$$

## B. 3상 자속결합형 초전도 한류기의 동작특성

### 1. 실험장치 구성

#### a. 초전도 소자 및 변압기 제작

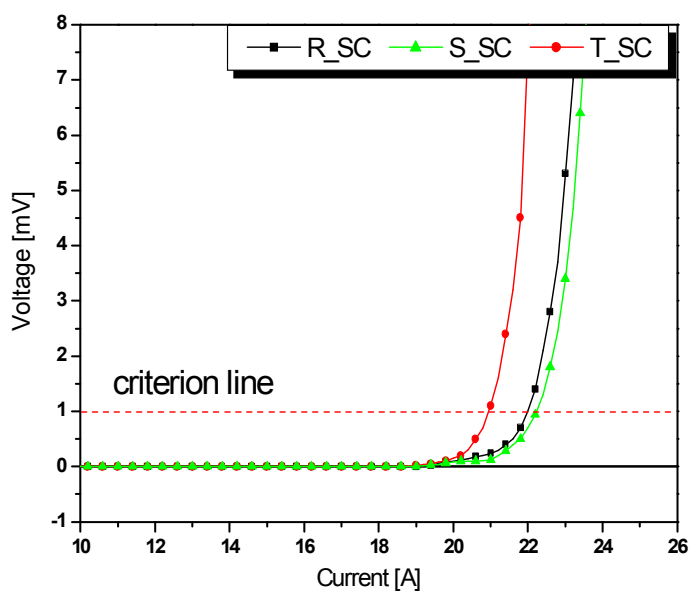
초전도 한류기에 사용되는 초전도 소자는 여러 재료와 형태가 존재한다. 그 중에서 현재 YBCO계와 BSCCO계의 초전도체가 주로 사용되고 있으며, 그 형태에 따라 박막형, 벌크형, 선재형 등으로 제작된다.

그림 3-(a)에 본 실험에서 사용된  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  재료의 박막형 초전도 소자를 나타내었다. 직경 2 inch의  $\text{Al}_2\text{O}_3$  기판 위에 증착되어 있으며, 초전도 소자의 두께 불균일로 인한 hot spot에서 발생하는 열을 분산시켜 초전도 소자를 보호하기 위한  $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 의 금박막층이 증착되어 있고, 전류의 경로는 meander-line 패턴으로 식각되어 제작되었다. 그림 3-(b)는 실험에 사용된 초전도 소자의 임계전류 파형을 나타낸 것이다. 회로에 흐르는 전류가 초전도체의 임계전류 값을 넘어서게 되면, 초전도체가 초전도 상태에서 상전도 상태로 전이되어 저항을 발생하게 되는 퀸치 현상이 발생한다.

그림 4는 실험에 사용된 3상 일체형 변압기의 외형을 나타낸다. 각 변압기의 철심은 여자전류를 감소시키기 위해 G9급 규소강판을 성층하여 제작하였다. 표 1에서 변압기의 제원을 나타내었다.



(a) YBCO 박막형 초전도 소자



(b) 초전도 소자의 임계전류 파형

그림 3 YBCO 박막형 초전도 소자와 임계전류 파형

Fig. 3 YBCO thin film type superconducting element and the waveforms of the critical current

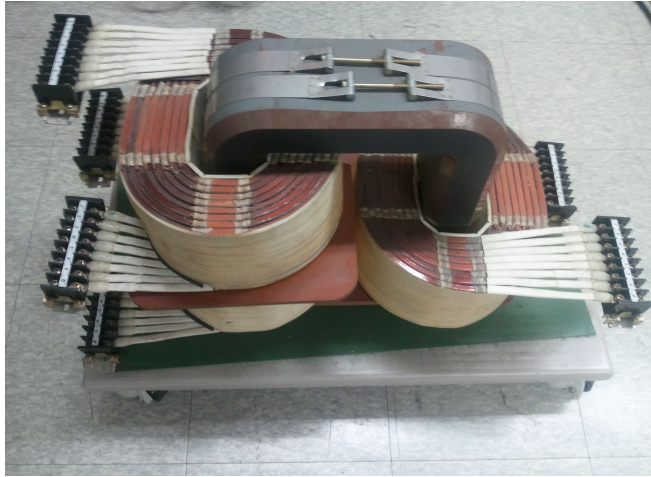


그림 4 3상 일체형 변압기

Fig. 4 Integrated three-phase transformer

표 1 변압기 제원

Table 1 Specifications of a transformer

Iron core	Size	Unit
외측 수평길이	331	mm
외측 수직길이	415	mm
내측 수평길이	191	mm
내측 수직길이	274	mm
두께	130.1	mm
1차측 코일의 권선수	42	Turns
인덕턴스	32.9	mH
2차측 코일의 권선수	21	Turns
인덕턴스	8.1	mH

## b. 실험장치 및 구성

본 논문에서는 전력망에서 발생할 수 있는 1선, 2선 및 3선 지락사고시 초전도 한류기의 동작특성을 분석하기 위해 그림 5-1과 같은 3상의 실험회로도를 구성하였다. 각 상의  $SW_{R1}$ ,  $SW_{S1}$ ,  $SW_{T1}$ 은 전원스위치,  $R_0$ 는 사고발생 전·후의 실험회로에 흐르는 전류 변화를 측정하기 위한 표준저항으로써 1  $\Omega$ 의 저항을 사용하였다. 각 상의 R-Load, S-Load, T-Load는 부하로써 50  $\Omega$ 의 저항을 사용하였으며, 각 부하에 병렬 연결된 스위치  $SW_{R2}$ ,  $SW_{S2}$ ,  $SW_{T2}$ 를 ON, OFF 동작하여 1선, 2선, 3선 지락사고 등의 과도상태를 모의하였다. 그림 5-2에서 실험에 사용된 실험장비를 보여주고 있다. 전원장치(power supply)는 40~480 V의 전원을 공급할 수 있으며, 위상제어장치(phase controller)로부터 사고각 또는 사고주기를 설정하여 다양한 조건에서의 실험이 가능하다.

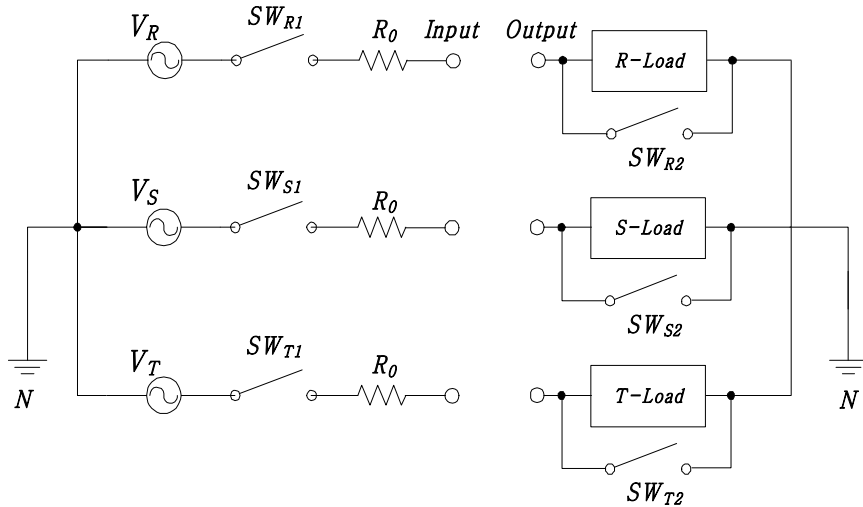


그림 5-1 3상 실험회로도

Fig. 5-1 Experimental circuit diagram



그림 5-2 실험장비 구성

Fig. 5-2 Composition of experimental devices

## 2. 사고유형별 동작특성

### a. 1선 지락사고

그림 6에서 1선 지락사고시 실험전압 증가에 따른 제한된 사고전류 파형을 나타내었다. 자속결합형 초전도 한류기의 1, 2차측 코일의 권수비( $N_1:N_2$ )는 2:1이며, 실험전압은 160, 240, 320 V이다. 3상의 실험회로에 흐르는 전류는  $120^\circ$ 의 위상차와 함께 평형상태를 유지하고 있으며, 각 실험전압에서 2.4, 3.8, 5.2 A의 정상전류가 흐르고 있다. 그림 5의 실험회로에서 1선(R-phase) 지락사고가 발생하게 되면, 그 선로에는 약 1  $\Omega$ 의 임피던스만이 존재하게 된다. 그로 인해 R상에서는 각 실험전압에 따라 160, 240, 320 A의 사고전류가 발생하게 되지만, 사고전류는 자속결합형 초전도 한류기에 의해 24.3, 29.1, 33.9 A로 제한되었다. 측정된 실험결과로부터 약 85% 이상의 사고전류가 자속결합형 초전도 한류기에 의해 제한되었음을 확인할 수 있다. 또한, 건전상인 S상과 T상에 흐르는 전류가 각 실험전압에서 4.2, 7.0, 9.2 A로 증가하는 결과를 보였다. 이것은 단일철심 3상 변압기를 이용한 3상 일체형 자속결합형 초전도 한류기의 특징으로 인한 결과로써, 각 상의 코일이 하나의 철심을 통해 자속을 공유하였기 때문이다. 그로 인해 1선 지락사고시 건전상(S-phase, T-phase)의 초전도 소자에 자속에 의한 전류가 유도되었으며, 이 전류가 건전상 초전도 소자의 임계전류 값을 초과하게 되면, 건전상의 초전도 소자는 켄치되어 사고전류를 분담하여 제한하게 된다. 그림 7에서 1선 지락사고시 각 상의 자속결합형 초전도 한류기의 전압 및 전류 파형을 (a), (b), (c)에서 실험전압별로 나타내었다. 그림 7-(a), (b), (c)의 (1)은 각 상 초전도 소자의 전압을 나타내고 있다. 초전도 소자의 임계전류 값 이상의 사고전류가 회로에 흐르게 되면, 초전도 소자는 켄치되어 저항을 발생하게 된다. 따라서 초전도 소자의 켄치 특성은 전압 발생 유무에 의해서 확인할 수 있다. 그림 (1)로부터 사고발생 후 사고상 및 건전상의 모든 초전도 소자가 켄치된 것을 확인할 수 있다. (2)와 (3)은 초전도 소자의 전류와 2차측 코일에 흐르는 전류 파형을 나타낸 것이다. 사고전류는  $1/2$ 주기 이내



에 제한되었으며, 제한된 사고전류는 초전도 소자와 2차측 코일의 임피던스 비에 의해 나뉘어 흐르게 된다.

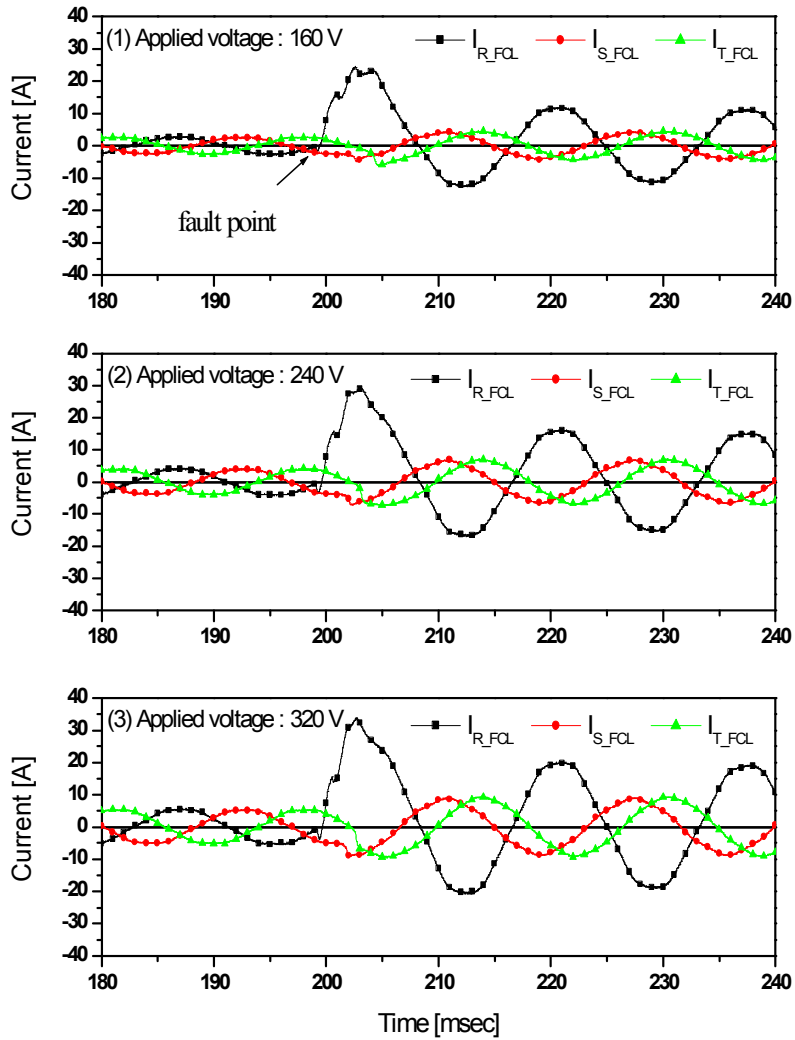
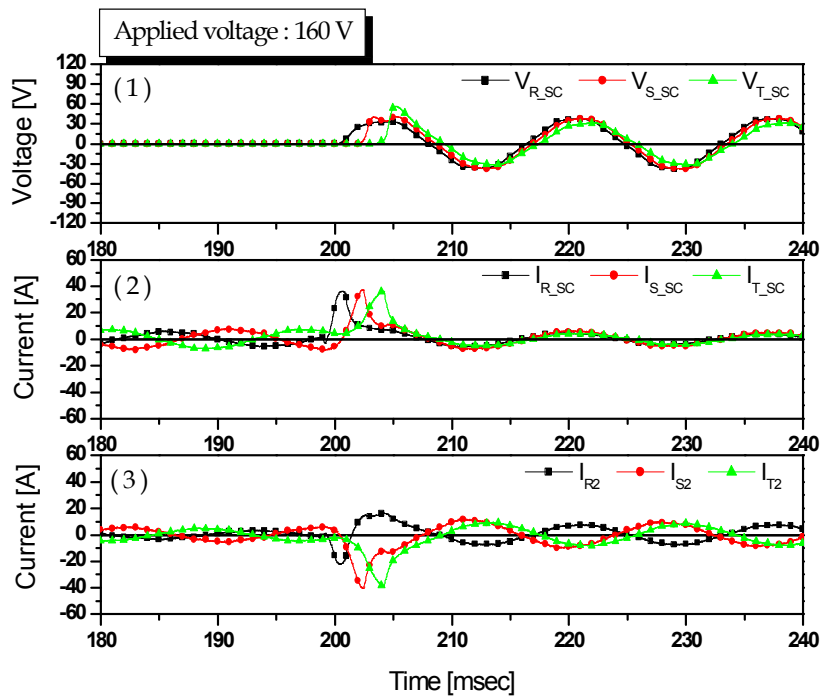


그림 6 1선 지락사고시 제한된 사고전류 파형

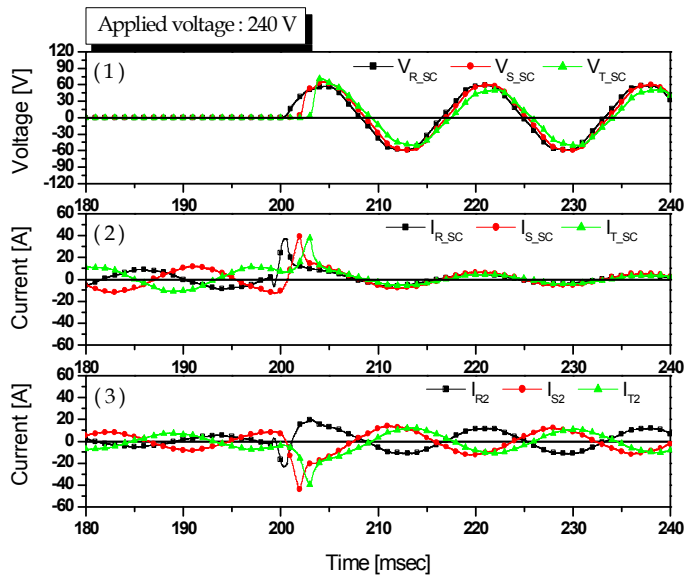
Fig. 6 Waveforms of limited fault current in the case of single line-to-ground fault



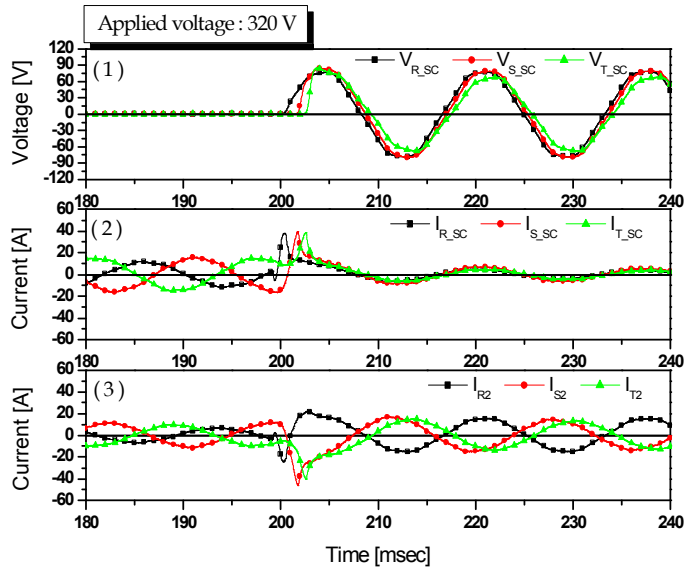
(a) Applied voltage : 160 [V]

그림 7 1선 지락사고시 자속결합형 초전도 한류기의 전압·전류 파형

Fig. 7 Voltage and current waveforms of flux-coupling type SFCL in the case of single line-to-ground fault



(b) Applied voltage : 240 [V]



(c) Applied voltage : 320 [V]

그림 7 (계속)

Fig. 7 (continued from the previous page)

## b. 2선 지락사고

그림 8은 2선 지락사고시 각 상의 제한된 사고전류 파형을 나타내고 있다. 지락사고가 발생한 R상과 S상에 흐르는 사고전류는 실험전압 160 V에서  $I_{R\_FCL} = 65.8$  A,  $I_{S\_FCL} = -55.1$  A, 240 V에서  $I_{R\_FCL} = 99.9$  A,  $I_{S\_FCL} = -85.2$  A, 320 V에서  $I_{R\_FCL} = 134.4$  A,  $I_{S\_FCL} = -113.4$  A로 각각 제한되었다. 사고전류의 약 60%를 제한하였으며, R상의 0°를 기준으로 S상에서 지락사고가 발생하였기 때문에, S상의 사고전류는 -방향으로 발생하게 된다. 하지만 측정된 결과로부터 1선 지락사고시와 비교할 때 사고전류 제한율이 저하된 것을 확인할 수 있다. 이는 R상은 다른 사고상인 S상으로부터 발생하는 자속이, 그리고 S상은 R상 사고로부터 발생하는 자속이 상호 결합하여 초전도 소자로 유도되었기 때문이다. 이로 인해 1선 지락사고와는 달리 사고전류 제한률은 저하된다.

그림 9에서 2선 지락사고시 각 상의 자속결합형 초전도 한류기의 전압 및 전류 파형을 (a), (b), (c)에서 실험전압별로 나타내었다. 2선 지락사고 역시 사고발생 후 각 상의 모든 초전도 소자가 켜치되었음을 (a), (b), (c)의 (1)의 전압 파형으로부터 확인할 수 있다. 반면 사고 주기동안 S상 초전도 소자의 전압이 다른 사고상인 R상과 건전상인 T상의 초전도 소자 전압에 비해 높은 결과를 보였다. 실험에 사용된 3상 일체형 변압기는 R상과 S상이 동일한 편에 위치하고 T상은 반대편에 위치한 구조이며, 자속이 이동하는 자로가 하나이기 때문에 R상과 T상의 중간에 위치해 있는 S상의 코일에서는 R상과 T상에서 결합된 자속이 유도되었다. 이러한 결과로부터 2선 지락사고의 경우도 1선 지락사고와 같이 사고상 및 건전상의 모든 초전도 소자가 사고전류를 분담하여 제한하였지만, 그 분담률은 차이가 있음을 확인하였다. 그림 9-(a), (b), (c)의 (2)와 (3)은 초전도 소자의 전류와 2차측 코일에 흐르는 전류 파형을 나타낸 것이며, 사고전류는 사고발생 후 1/2주기 이내에 제한된 후, 초전도 소자와 2차측 코일의 임피던스 비에 의해 나뉘어 흐르게 되는 것을 확인할 수 있다.

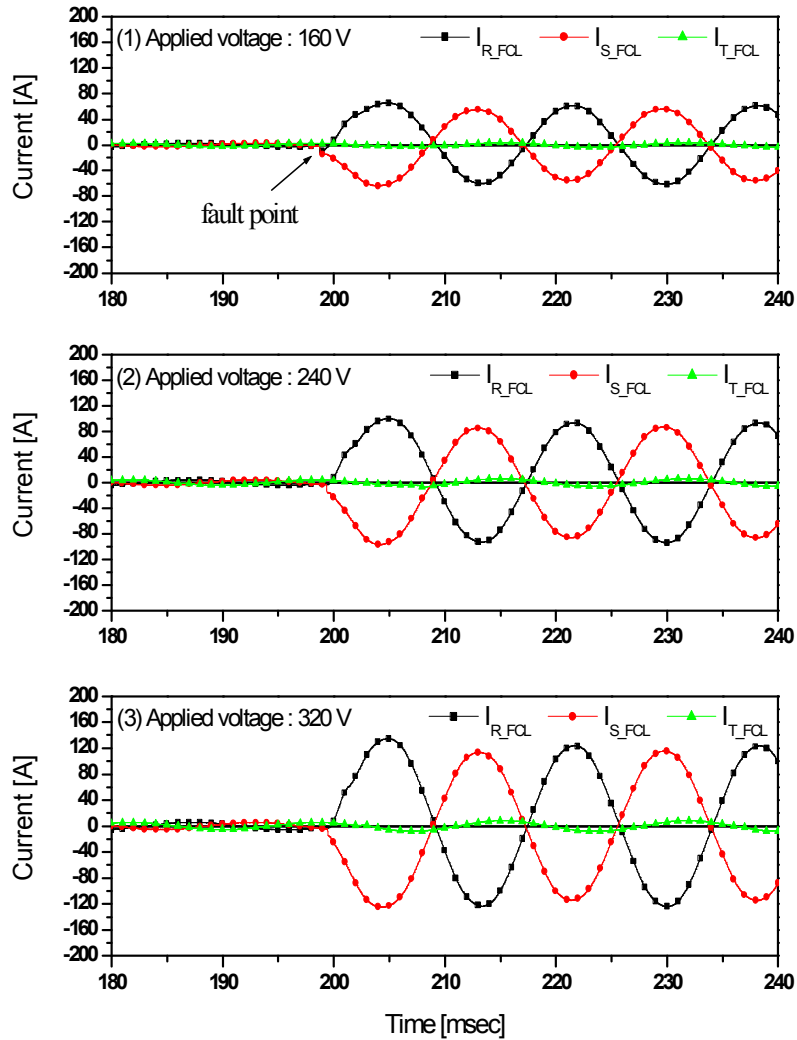
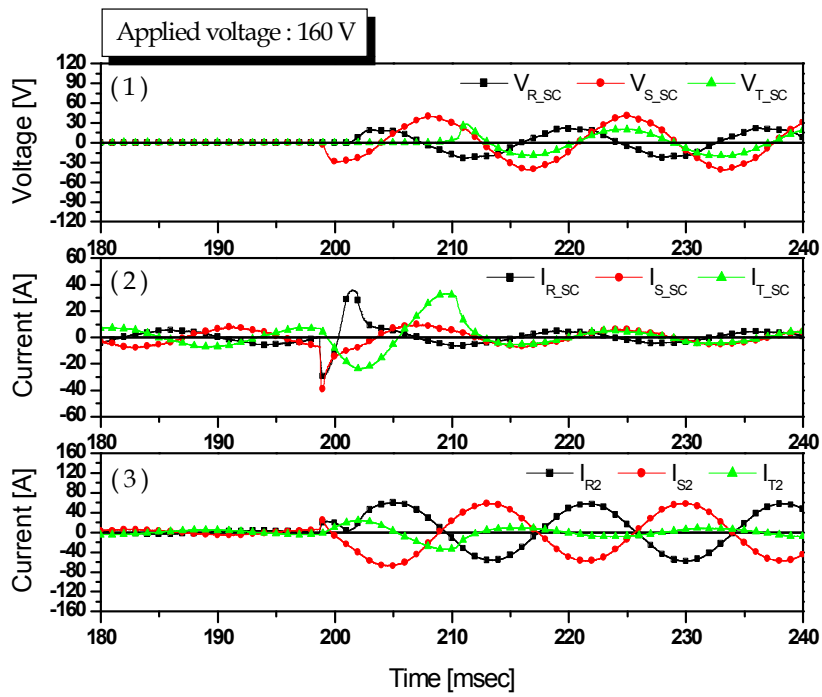


그림 8 2선 지락사고시 제한된 사고전류 파형

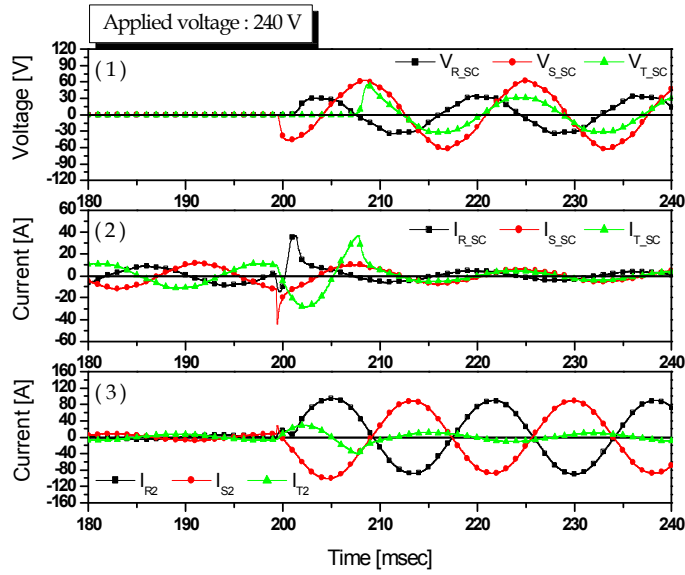
Fig. 8 Waveforms of limited fault current in the case of double line-to-ground fault



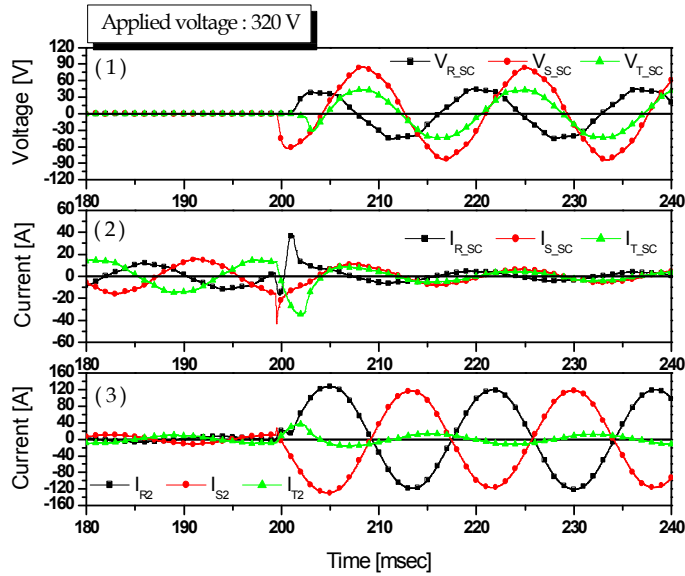
(a) Applied voltage : 160 [V]

그림 9 2선 지락사고시 자속결합형 초전도 한류기의 전압·전류 파형

Fig. 9 Voltage and current waveforms of flux-coupling type SFCL in the case of double line-to-ground fault



(b) Applied voltage : 240 [V]



(c) Applied voltage : 320 [V]

그림 9 (계속)

Fig. 9 (continued from the previous page)

### c. 3선 지락사고

그림 10에서 3선 지락사고시 각 상의 제한된 사고전류 파형을 나타내었다. 실험 전압 160, 240, 320 V일 때, 각 상의 사고전류는 160 V에서  $I_{R\_FCL} = 66.2$  A,  $I_{S\_FCL} = -62.7$  A,  $I_{T\_FCL} = 16.4$  A, 240 V에서  $I_{R\_FCL} = 101.4$  A,  $I_{S\_FCL} = -98.5$  A,  $I_{T\_FCL} = 26.4$  A, 320 V에서  $I_{R\_FCL} = 133.6$  A,  $I_{S\_FCL} = -132.2$  A,  $I_{T\_FCL} = 35.4$  A로 각각 제한되었다. 사고전류 제한율은 2선 지락사고시의 결과와 크게 다르지 않다. 회로에 흐르는 3상의 전류는  $120^\circ$  씩의 위상차가 있으며, 3선 지락사고는 R상  $0^\circ$ 를 기준으로 발생하였다. 때문에 3상에서 지락사고가 발생하였을 때 각 상의 사고전류가 제한되는 시점을 살펴보면, T상에서 먼저 사고전류 제한동작을 수행하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 S상과 R상의 차례로 사고전류 제한동작이 이루어 질 때, 우회하는 자속의 영향으로 인해 T상에 흐르는 전류의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 11에서 3선 지락사고시 각 상의 자속결합형 초전도 한류기의 전압 및 전류 파형을 (a), (b), (c)에서 실험전압별로 나타내었다. 초전도 소자의 전압 파형인 (a), (b), (c)의 (1)로부터 사고발생 후 각 상의 모든 초전도 소자가 켜치 되었음을 확인할 수 있다. (2), (3)에서 초전도 소자와 2차측 코일에 흐르는 전류를 나타내고 있다.



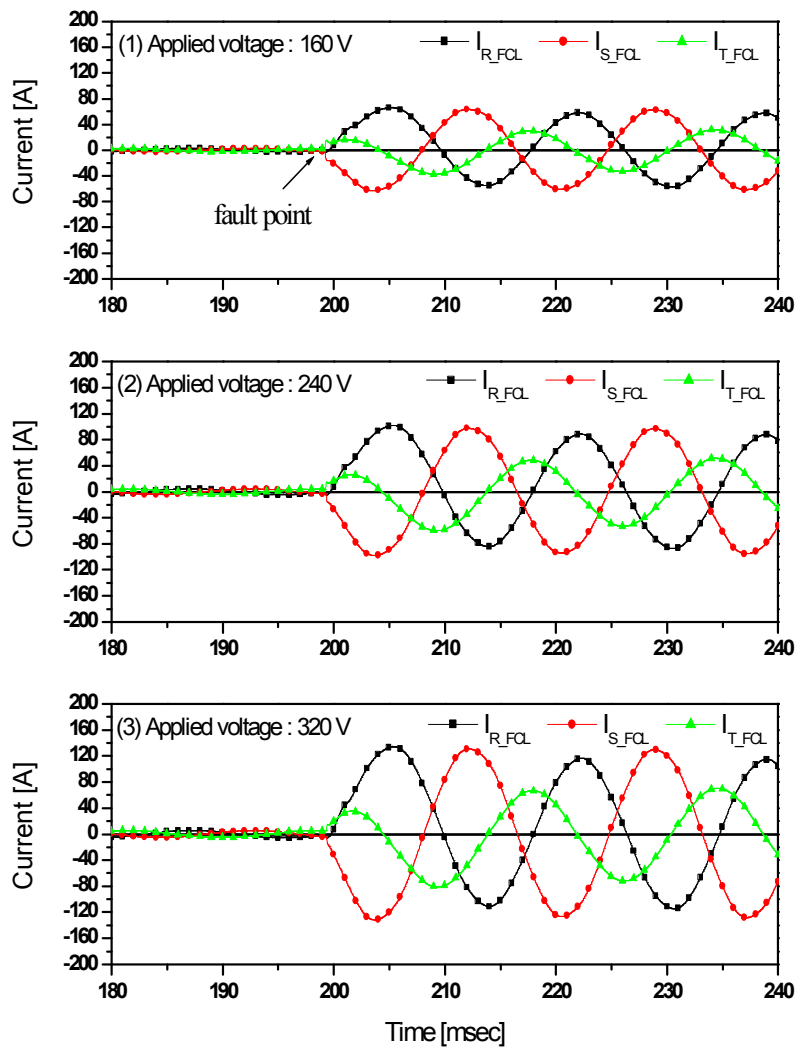
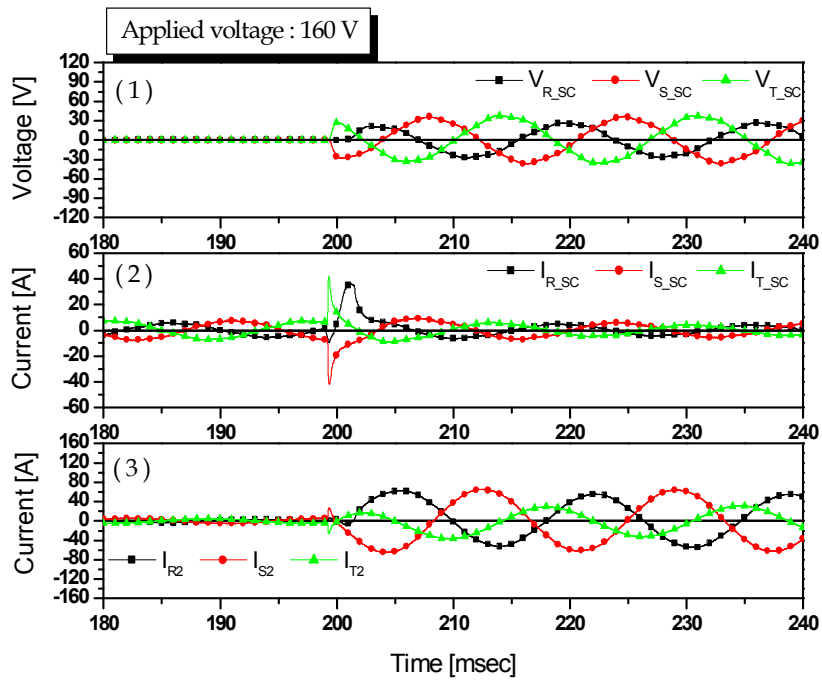


그림 10 3선 지락사고시 제한된 사고전류 파형

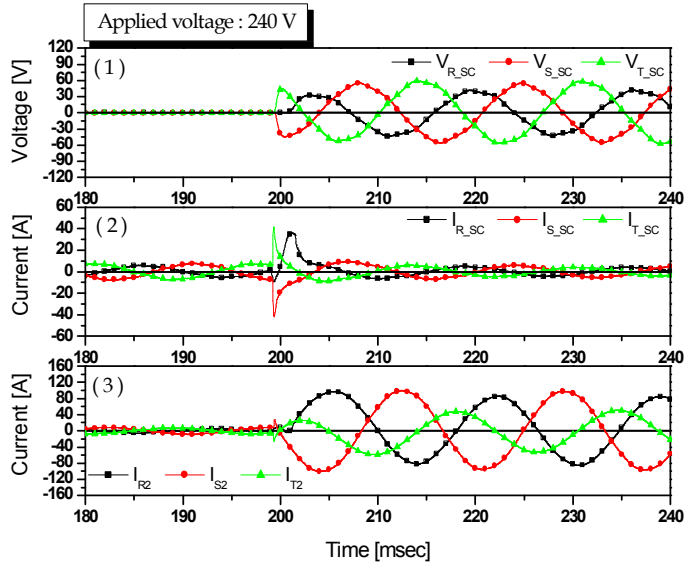
Fig. 10 Waveforms of limited fault current in the case of triple line-to-ground fault



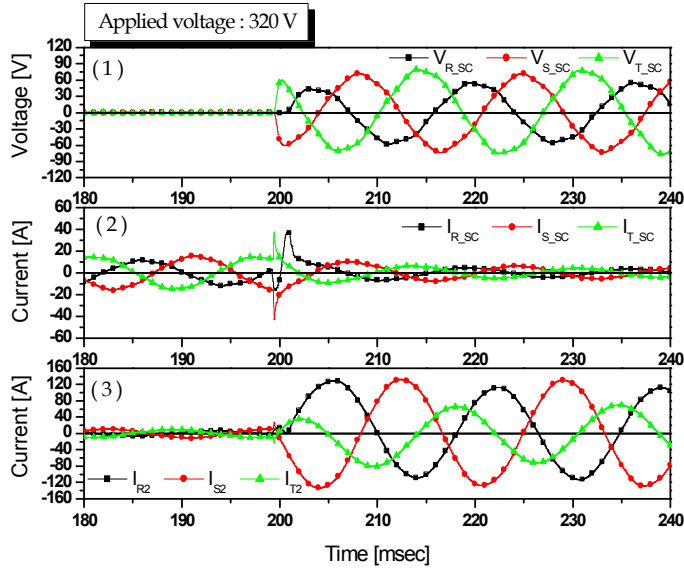
(a) Applied voltage : 160 [V]

그림 11 3선 지락사고시 자속결합형 초전도 한류기의 전압·전류 파형

Fig. 11 Voltage and current waveforms of flux-coupling type SFCL in the case of triple line-to-ground fault



(b) Applied voltage : 240 [V]



(c) Applied voltage : 320 [V]

그림 11 (계속)

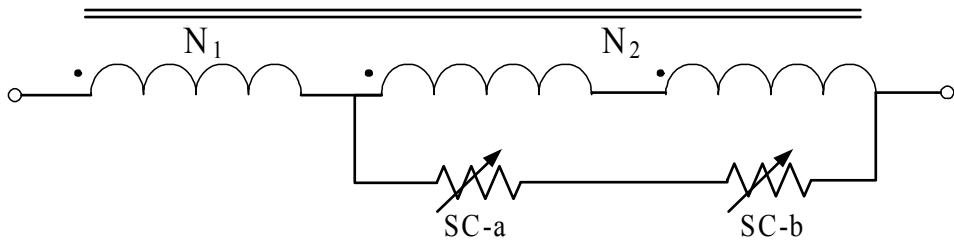
Fig. 11 (continued from the previous page)

### III. 초전도 한류기의 보호협조 특성

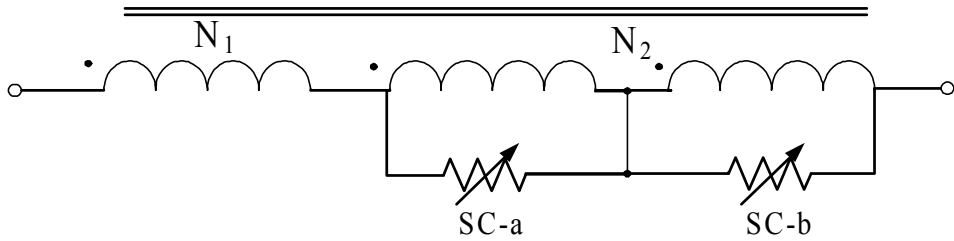
#### A. 초전도 한류기의 회복특성 분석

초전도 한류기의 용량증대 문제를 해결하기 위해 자속결합형 초전도 한류기와 같은 변압기를 이용한 사례들이 제시되어 왔다. 하지만 이들의 방법은 직·병렬 연결되는 초전도 소자의 개수를 줄이기 위한 방법의 일환일 뿐, 다수의 초전도 소자를 직·병렬 연결하여 한류기의 용량을 증대시키는 전제조건은 동일하다. 따라서 초전도 소자의 불균일한 임계전류 값의 상이함으로부터 발생하는 불균일 켄치 문제를 고려해야할 필요가 있다. 초전도 소자간 동시켄치가 유도되지 않을 경우, 켄치가 발생한 초전도 소자로의 전력부담이 가중되어 파손될 우려가 있다. 또한, 전력부담이 가중될 경우 초전도 소자의 회복시간을 지연시키게 된다. 초전도 소자의 회복시간이란 상전도 상태로 전이된 초전도 소자가 사고 종료 후 다시 초전도 상태로 회복하는 시간을 말하며, 초전도 소자의 회복특성 문제는 전력망의 재폐로 동작책무와의 협조에 있어 매우 중요한 요인으로 작용한다. 전력망의 주보호장치인 전력용 차단기는 재폐로 동작책무에 의해 운용된다. 이는 계통내에서 발생하는 사고를 순간사고와 지속사고로 구분하여 전력공급의 신뢰성 및 안정성을 확보하기 위함이다.

따라서 본 논문에서는 두 개의 초전도 소자를 직렬연결한 자속결합형 초전도 한류기의 초전도 소자간 동시켄치 유무에 따른 초전도 소자의 회복특성을 분석하기 위해 그림 12-(a)와 (b)의 구조를 갖는 자속결합형 초전도 한류기를 구성하였다. (a)의 구조에서는 두 초전도 소자의 임계전류 값이 다를 경우, 동시켄치가 유도되지 않고 임계전류 값이 작은 초전도 소자에서만 켄치되어 사고전류를 제한할 가능성이 크다. 반면 (b)는 2차측 코일과 두 초전도 소자의 사이에 중성선이 연결된 구조로 이루어져 있다. 이 경우, 초전도 소자의 임계전류 값이 다르다 하더라도 동시켄치가 유도될 수 있다.



(a) The case without a neutral line

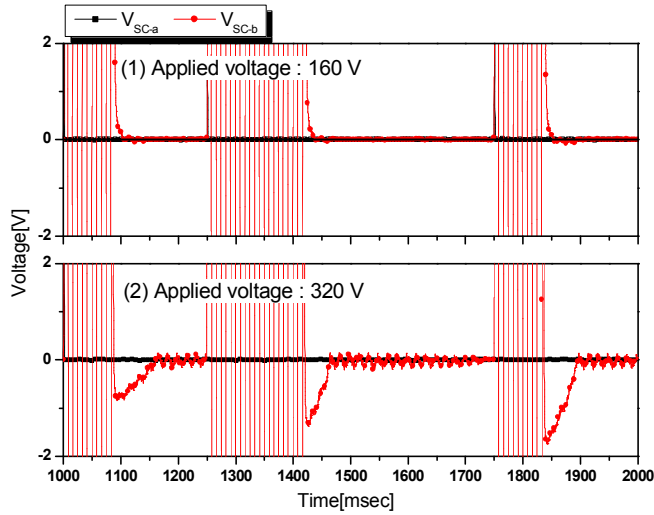


(b) The case with a neutral line

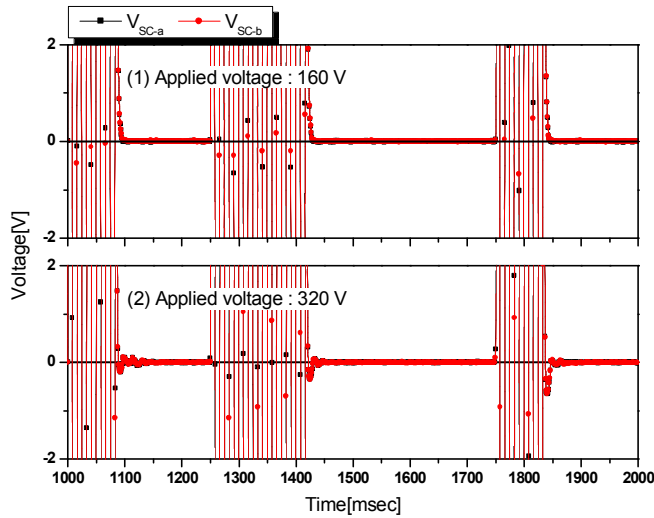
그림 12 두 개의 초전도 소자를 갖는 자속결합형 초전도 한류기 등가회로도  
 Fig. 12 Equivalent circuit diagram of a flux-coupling type SFCL with two superconducting elements

그림 13에서 그림 12-(a), (b) 각 구조에 따른 초전도 소자의 회복시간을 나타내었다. 초전도 소자의 회복시간은 사고발생 후 상전도 상태로 전이된 초전도 소자가 다시 초전도 상태로 회복되는 시간을 뜻한다. 즉 켜치된 초전도 소자의 전압이 사고종료 후 다시 0 V가 되기까지의 시간을 측정함으로써 그 회복시간을 확인할 수 있다. 실험전압 160 V, 320 V에서 각 초전도 소자의 회복시간을 비교·분석하였으며, 재폐로 동작책무 (Open -  $t_1$  - Closed/Open -  $t_2$  - Closed/Open - Open)에 따른 초전도 소자의 회복성능 여부를 판별해 보기위해 5-10-10-20-5 (close-open-close-open-close)cycle의 재폐로 동작주기를 설정하여 각각 3번의 사고와 차단동작을 순차적으로 수행하였다. 그림 13-(a)에서 중성선이 없는 경우 초전도 소자의 회복시간을 나타내고 있다. (a) 구조의 경우, 사고발생시 두 개의 초전도 소자는 임계전류 값의 상이함으로 인해 동시켄치가 유도되지 않았다. 이때 켜치된 초전도 소자 SC-b에서 사고전류에 의한 전력부담이 가중되었으며, 그 회복시간은 실험전압 160 V에서 첫 번째 사고종료 후 61 msec, 두 번째 사고종료 후 48 msec, 세 번째 사고종료 후 63 msec로 측정되었으며, 실험전압 320 V에서 첫 번째 사고종료 후 10주기(160 msec) 이내에 초전도 소자는 회복되지 않았으며, 두 번째와 세 번째 사고종료 후 317, 238 msec로 측정되었다. 실험전압이 160 V에서 320 V로 증가하였을 때 초전도 소자의 회복시간은 5배 정도 지연되는 결과를 보였다. 특히 320 V에서 첫 번째 사고발생 후 초전도 소자가 회복되지 않은 상태에서 두 번째 사고가 발생하게 되어, 두 번째 회복시간이 더욱 지연된 것을 확인할 수 있다. 반면 2차측 코일과 두 개의 초전도 소자 사이에 중성선을 연결한 (b) 구조의 경우 두 개의 초전도 소자는 동시켄치가 유도되었다. 초전도 소자 SC-a, SC-b의 회복시간은 실험전압 160 V에서 첫 번째 사고종료 후 14 msec, 16 msec, 두 번째 사고종료 후 12 msec, 14 msec 세 번째 사고종료 후 19 msec, 16 msec로 측정되었으며, 실험전압 320 V에서 첫 번째 사고종료 후 57 msec, 88 msec, 두 번째 사고종료 후 45 msec, 51 msec, 세 번째 사고종료 후 38 msec, 60 msec의 회복시간 결과를 보였다. 동시켄치 유도로 인해 약 70 %의 회복시간이 짧아짐으로써 재폐로 동작 책무에 따른 전력용 차단기의 차단 동작주기 이내에 안정적으로

회복된다는 것을 확인할 수 있다.



(a) The case without a neutral line



(b) The case with a neutral line

그림 13 사고종료 후 초전도 소자의 전압 파형

Fig. 13 Voltage waveforms of superconducting element after the end of the fault

## B. 두 개의 피더를 갖는 전력시스템 구성

국내 전력망은 계통운영의 유연성 및 신뢰성을 위해 단일 배전계통간을 연결하는 망상식 형태를 채택하고 있으며, 전력수요가 계속적으로 증가함에 따라 계통 내 사고발생시 과도한 사고전류로 인해 대규모 정전 등의 경제적 피해가 발생하고 있다. 초전도 한류기는 사고전류를 효과적으로 저감시키는 전력기기로써, 전력망의 안정성 향상을 목표로 하고 있다. 초전도 한류기를 전력계통에 적용하기 위해서는, 초전도 한류기의 용량증대 문제와 계통 내 보호시스템과의 협조 문제 등과 더불어 초전도 한류기의 적용 위치에 대한 문제도 고려되어야 한다. 본 논문에서는 그림 14와 같은 두 개의 피더를 갖는 전력시스템을 구성하여 3상 일체형 자속결합형 초전도 한류기의 적용 위치에 따른 계통 내 전류 변화를 분석하였다. 각 feeder의 부하 (Load)는 25 Ω 썩이며, feeder 1에서 지락사고를 발생시켰다.

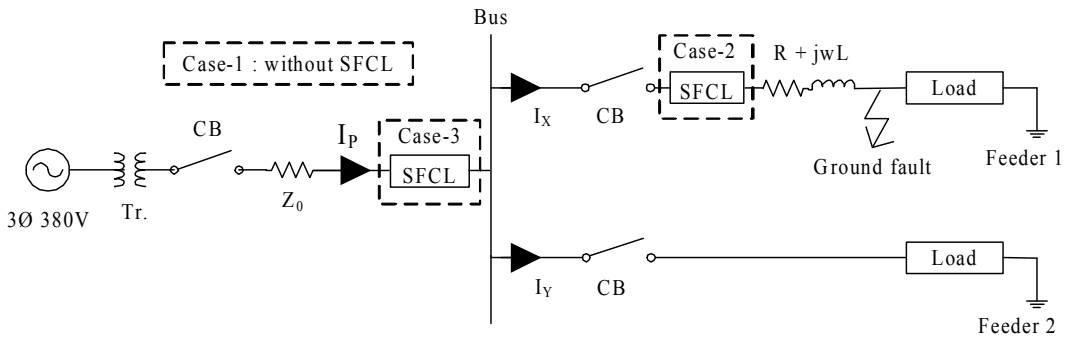


그림 14 두 개의 피더를 갖는 전력시스템

Fig. 14 Experimental circuit diagram with two feeders

그림 14의 실험회로에서 1선, 2선, 3선 지락사고 발생시 3상 자속결합형 초전도 한류기 적용위치에 따른 사고전류 제한특성과 각 피더에 흐르는 전류 특성을 분석하기 위해 다음과 같은 적용 위치에 따라 실험하였다.



Case-1) 한류기를 적용하지 않은 경우

Case-2) Feeder 1에 적용한 경우

Case-3) 변압기(Tr.) 2차측에 적용한 경우

## 1. 한류기를 적용하지 않은 경우 (Case-1)

그림 15에서 한류기를 적용하지 않은 경우 1선 지락사고시 사고전류 파형을 나타내었다. 실험전압 160, 240, 320 V에서 feeder 1의 R상 지락사고를 모의하였다. (a)에서 각 feeder에는 4.6 A( $I_{XR}$ ), 4.7 A( $I_{YR}$ )의 정상전류가 흐르고 있다. feeder 1의 R상에서 지락사고가 발생하였을 때, 94.6 A의 사고전류( $I_{PR}$ )가 발생하였으며, 각 feeder에 흐르는 전류는 86.9 A( $I_{XR}$ ), 1.9 A( $I_{YR}$ )로 증감했다. (b), (c)에서는 144 A, 182.8 A의 사고전류( $I_{PR}$ )가 발생하였으며, 사고가 발생한 feeder 1의 전류는 급격히 증가하고 건전한 feeder 2의 정격전류는 감소하는 결과를 보였다. 즉, 사고가 발생한 feeder에서는 과도한 사고전류로 인해 전력기기의 절연파괴 및 고장이 유발될 수 있으며, 건전한 feeder에서는 정격전류가 감소하게 되어 전압강하로 인한 전력품질 저하 또는 도미노식 정전이 발생할 수 있다. 2선 지락사고 및 3선 지락사고의 경우 역시 같은 결과를 나타내고 있으며, 그림 16, 17에서 사고전류 파형을 나타내었다.

본 실험에서는 사고전류로부터 전력망을 보호하기 위한 3상 일체형 자속결합형 초전도 한류기를 feeder와 주변압기 2차측에 설치하여 각 피더에 흐르는 전류 패턴을 분석하였다. 초전도 한류기를 어느 위치에 적용하는가에 따라서 전력망의 보호범위가 결정되며, 이로 인해 초전도 한류기의 용량이 결정된다.

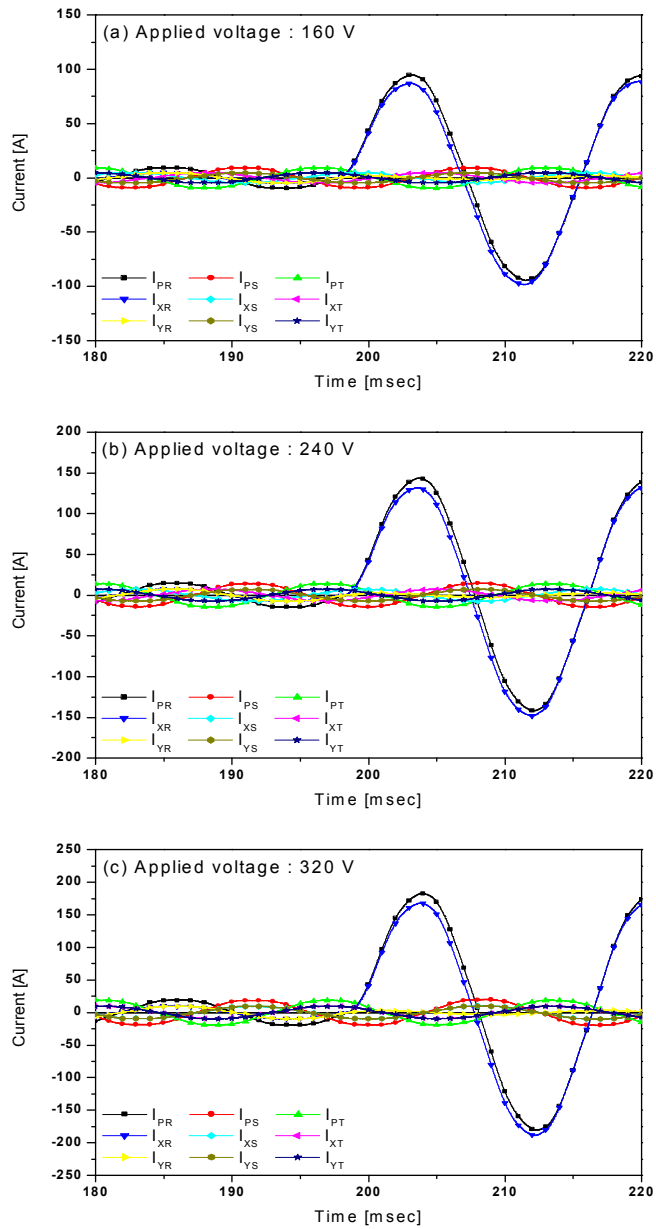


그림 15 한류기를 적용하지 않은 경우 1선 지락사고시 사고전류 파형  
 Fig. 15 Fault current waveforms in the case of single line-to-ground fault without the SFCL

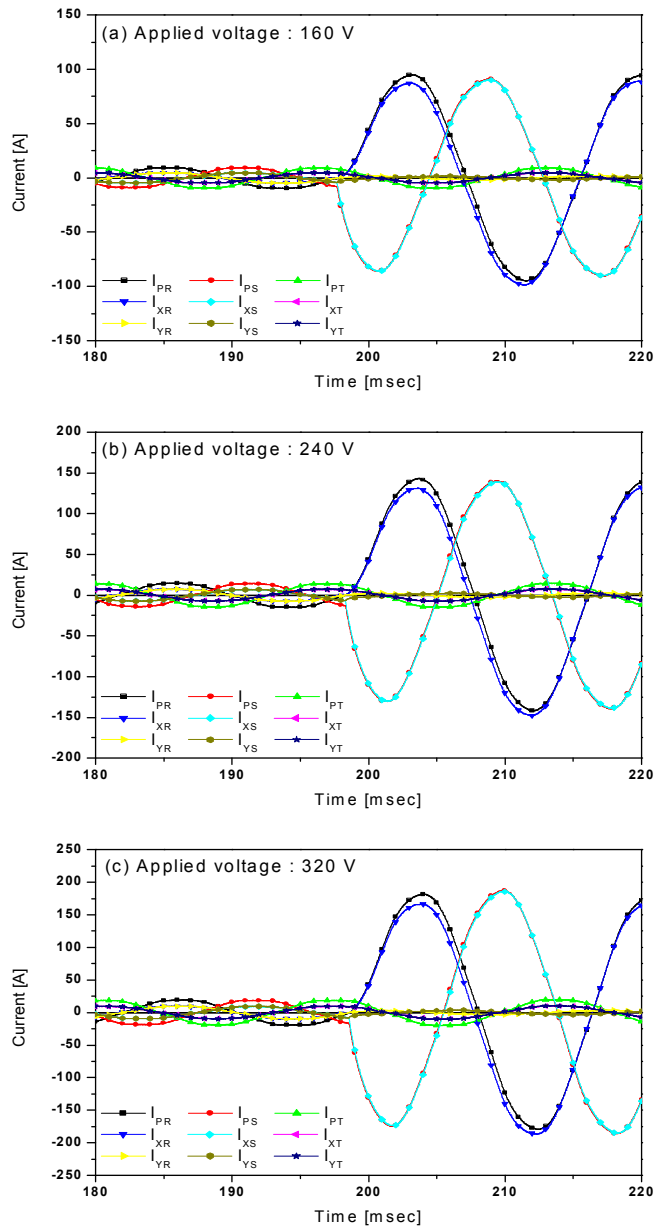


그림 16 한류기를 적용하지 않은 경우 2선 지락사고시 사고전류 파형  
 Fig. 16 Fault current waveforms in the case of double line-to-ground fault without the SFCL

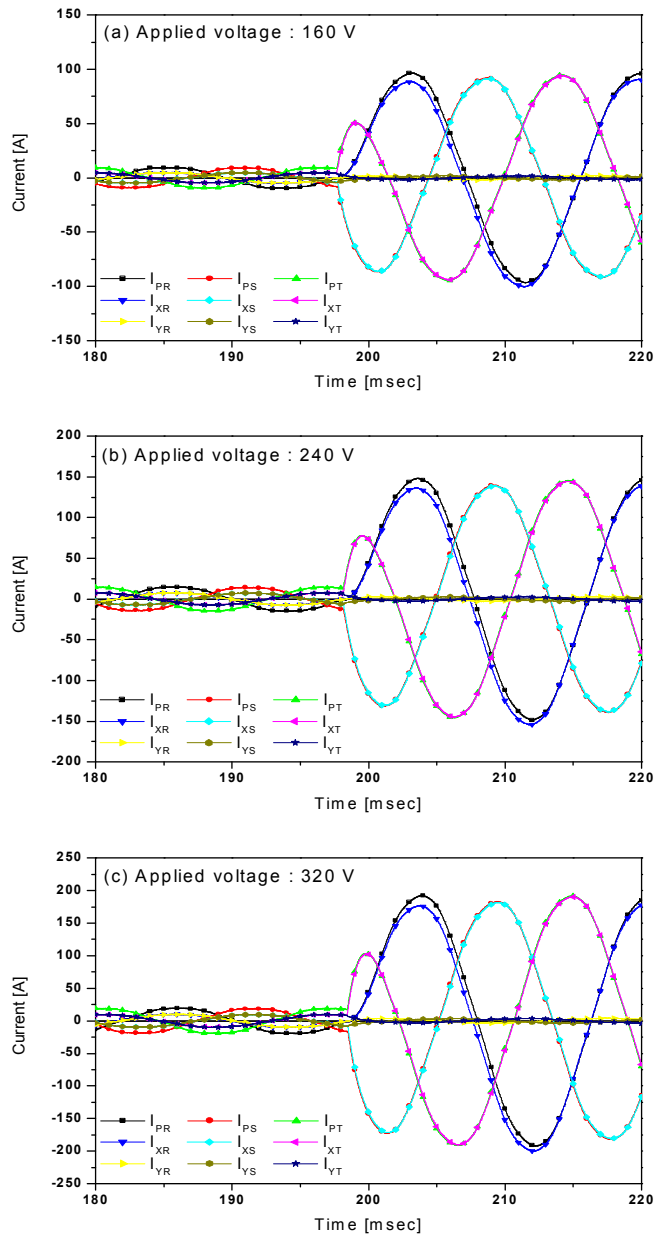


그림 17 한류기를 적용하지 않은 경우 3선 지락사고시 사고전류 파형  
 Fig. 17 Fault current waveforms in the case of triple line-to-ground fault  
 without the SFCL

## 2. Feeder에 적용한 경우 (Case-2)

그림 18은 사고가 발생한 feeder에 초전도 한류기를 적용했을 경우 1선 지락사고시 제한된 사고전류 파형을 나타낸 것이다. 앞선 실험결과에서 한류기를 설치하지 않은 경우 회로에 흐르는 사고전류( $I_{PR}$ )의 크기는 실험전압 160, 240, 320 V에서 94.6 A, 144 A, 182.8 A 이었다. 그러나 초전도 한류기를 feeder에 설치함으로써 회로에 흐르는 사고전류( $I_{PR}$ )는 28.5 A, 38.5 A, 46 A로 제한되었다. 약 70 % 이상의 사고전류가 제한되는 것을 재차 확인하였다. 또한 사고발생시 각 feeder에 흐르는 전류는 실험전압 160 V에서  $I_{XR} = 23.7$  A,  $I_{YR} = 3.9$  A, 240 V에서  $I_{XR} = 30$  A,  $I_{YR} = 6.4$  A, 320 V에서  $I_{XR} = 36$  A,  $I_{YR} = 8.8$  A로 측정되었으며, 표 2에서 초전도 한류기를 설치하지 않은 경우와 feeder에 설치한 경우, 1선 지락사고시 각 피더에 흐르는 전류 패턴 비교를 위해 그 결과값들을 나타내었다. 측정된 결과들로부터 계통 내 흐르는 사고전류의 크기가 증가함에 따라 사고전류 제한율과 건전한 feeder에 흐르는 정격전류 감소율이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

그림 19, 20에서는 2선 및 3선 지락사고시 제한된 사고전류 파형을 나타내고 있다. 지락사고 발생시 각 피더에 흐르는 전류 패턴은 1선 지락사고시와 동일하지만, 본 논문에서 제시하는 3상 일체형 자속결합형 초전도 한류기의 사고전류 제한특성으로 인해 사고전류 제한율은 감소하였다. 그러나 국내 배전계통에서는 주로 3상 일체화된 변압기를 이용하여 수용가에 전력을 공급하고 있기 때문에 1선 또는 2선 지락사고 발생시 건전상에서도 영향을 받게 되며, 하나의 철심을 매개로 사고전류에 의한 자속을 공유하여 사고상 및 건전상에서 상호보완하며 사고전류를 제한하는 3상 일체형 자속결합형 초전도 한류기의 특성은 장점으로 부각될 수 있다.

표 2 Feeder에 초전도 한류기 적용 유·무에 따른 각 feeder의 전류 비교

Table 2 Comparison of the current in each feeder with or without the SFCL in feeder

Single line-to-ground fault				
[A]	without the SFCL		with the SFCL in feeder	
	before	after	before	after
$I_{PR}$				
Applied voltage : 160 V	9.3	94.6	9.3	28.5
240 V	14.6	144	14.6	38.5
320 V	19.2	182.8	19.2	46
$I_{XR}(\text{Feeder 1})$				
Applied voltage : 160 V	4.6	87	4.6	23.7
240 V	7.1	132.2	7.1	30
320 V	9.5	167.9	9.5	36
$I_{YR}(\text{Feeder 2})$				
Applied voltage : 160 V	4.7	1.9	4.7	3.9
240 V	7.5	2.5	7.5	6.4
320 V	9.7	3.1	9.7	8.8

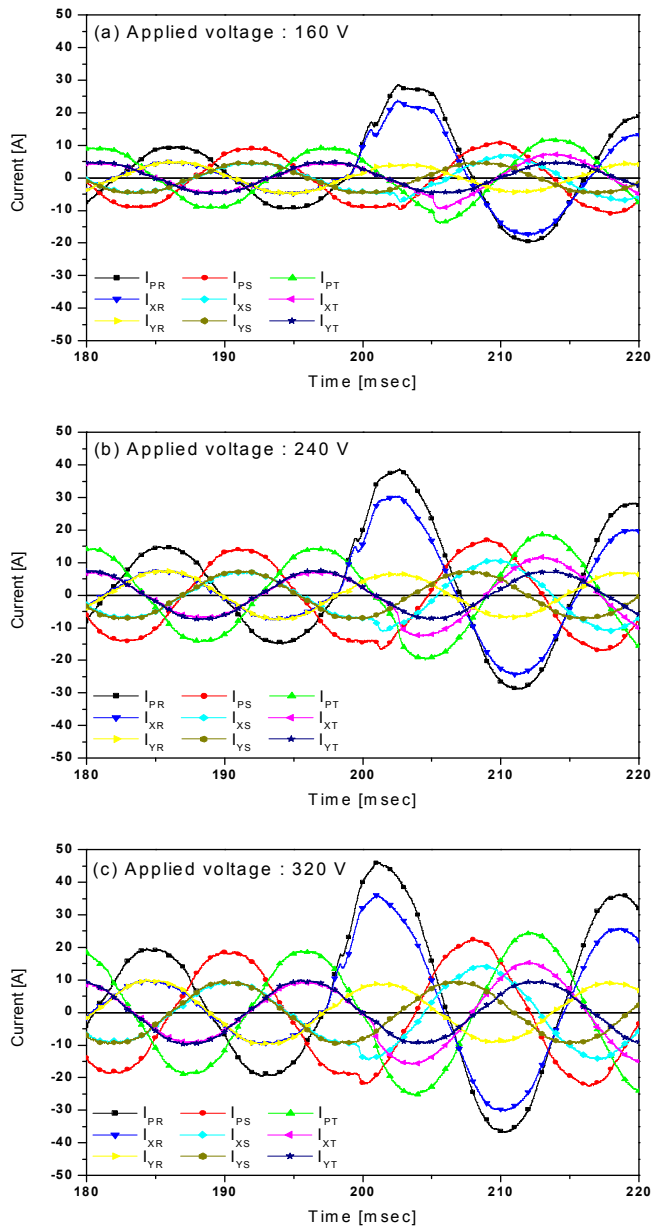


그림 18 Feeder에 한류기를 적용한 경우 1선 지락사고시 사고전류 파형  
 Fig. 18 Fault current waveforms in the case of single line-to-ground fault  
 with the SFCL in feeder

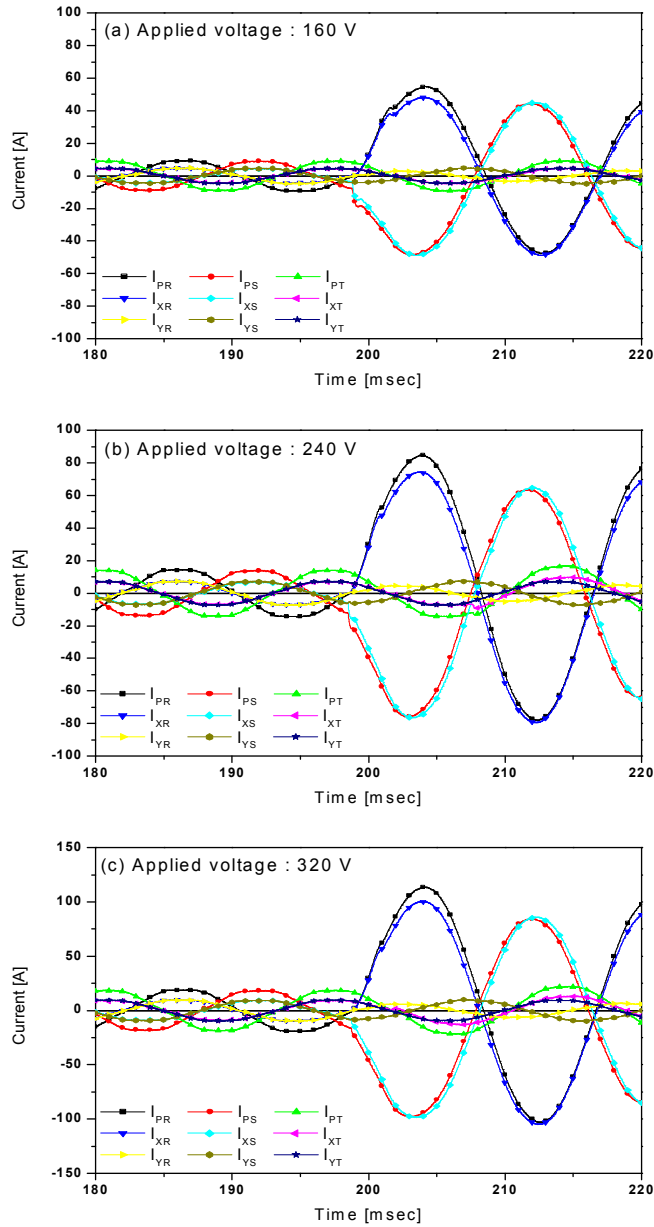


그림 19 Feeder에 한류기를 적용한 경우 2선 지락사고시 사고전류 파형  
 Fig. 19 Fault current waveforms in the case of double line-to-ground fault  
 with the SFCL in feeder



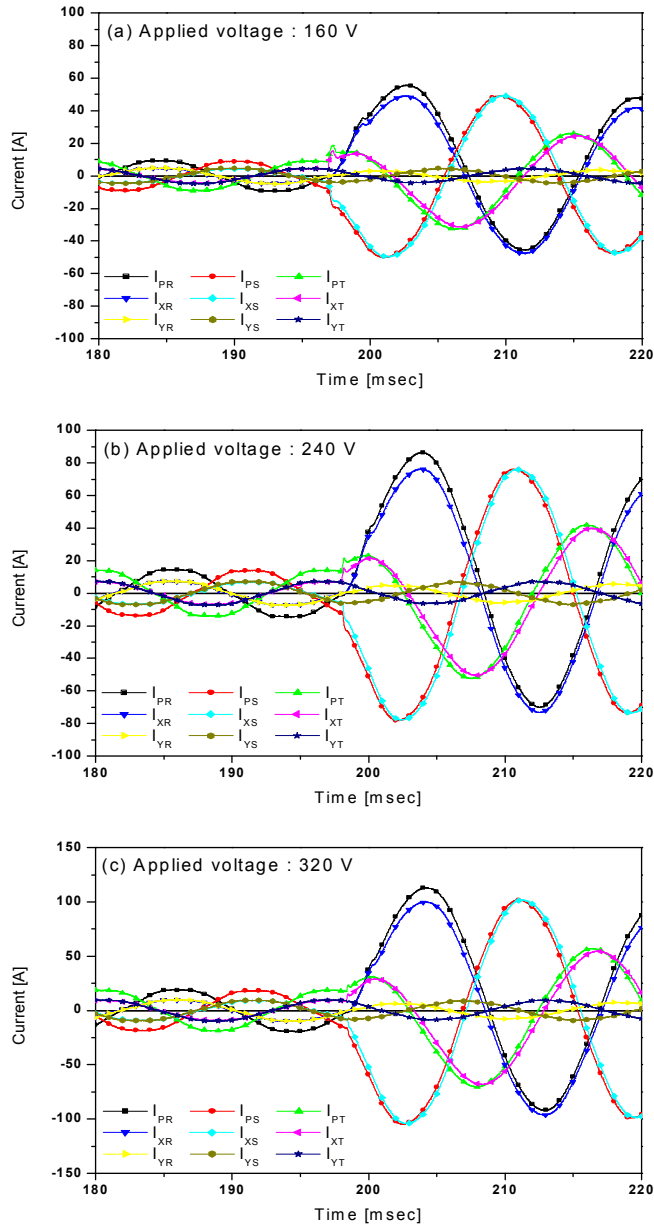


그림 20 Feeder에 한류기를 적용한 경우 3선 지락사고시 사고전류 파형  
 Fig. 20 Fault current waveforms in the case of triple line-to-ground fault  
 with the SFCL in feeder

### 3. 주변압기 2차측에 적용한 경우 (Case-3)

초전도 한류기를 주변압기 2차측에 설치할 경우, 어느 feeder에서 사고가 발생하더라도 그 사고전류를 제한시킴으로써 계통을 보호할 수 있는 장점이 있다. 그러나 초전도 한류기가 보호해야 할 계통의 범위가 넓어지게 되는 만큼 feeder의 선로 및 부하 임피던스가 감소하기 때문에 초전도 한류기의 정격용량은 커지게 된다. 그림 21에서 3상 일체형 자속결합형 초전도 한류기를 주변압기 2차측에 적용한 경우 1선 지락사고시 제한된 사고전류 파형을 나타내었다. 지락사고로 인해 발생한 사고전류는 초전도 한류기에 의해 약 70 % 이상 제한되었다. 표 3에서 초전도 한류기를 설치하지 않은 경우와 주변압기 2차측에 설치한 경우, 각 피더에 흐르는 전류 패턴 비교를 위해 1선 지락사고시 결과값들을 나타내었다. 측정된 실험결과로부터 건전한 feeder로 유도되는 정격전류가 한류기를 설치하지 않은 경우보다 더 많이 감소하게 되는 것을 알 수 있다. 이는 초전도 한류기에 의해 사고전류가 제한되었을 뿐만 아니라 그 전류는 사고가 발생한 feeder로 대부분 유도되었기 때문이다. 결과적으로 건전한 feeder에서는 정격전류 강하 문제로 인해 안정적인 전력공급이 불가능하게 된다. 2선 및 3선 지락사고의 경우 3상 일체형 자속결합형 초전도 한류기의 동작특성으로 인해 사고전류 제한율은 1선 지락사고시 제한율보다 감소하였으며, 각 feeder로 유도되는 전류의 흐름은 동일하다. 그림 22, 23에서 3상 일체형 자속결합형 초전도 한류기를 주변압기 2차측에 적용한 경우 2선 및 3선 지락사고시 제한된 사고전류 파형을 나타내었다. 반면 초전도 한류기를 주변압기 2차측에 설치한 경우, 임피던스 감소로 인해 전체 선로 전류가 증가하기 때문에, 실험전압 320 V에서 흐르는 정상전류에 의해 초전도 소자가 사고발생 전 켄치되는 결과를 보였다.

배전계통 내에서의 초전도 한류기 적용위치에 따른 사고전류 특성을 고찰한 결과, 전력망을 안정적으로 보호하고 건전 feeder에서 발생하는 전류강하 문제를 해결하기 위해서는 각 feeder 마다 초전도 한류기를 설치해야함을 알 수 있다. 또한 주변압기 2차측에 초전도 한류기를 설치할 경우 전체 선로 전류는 선로 임피던스 감소로 인해 증가하므로 초전도 한류기의 정격용량을 증가시켜야 한다. 이는 배전

계통의 보호범위를 확대시킬 수는 있지만 초전도 한류기의 비용이 상승하게 된다.

표 3 주변압기 2차측에 초전도 한류기 적용 유·무에 따른 각 feeder의 전류 비교  
Table 3 Comparison of the current in each feeder with or without the SFCL in the back of Tr.

Single line-to-ground fault				
[A]	without the SFCL		with the SFCL in the back of Tr.	
	before	after	before	after
$I_{PR}$ Applied voltage : 160 V 240 V	9.3 14.6	94.6 144	9.3 14.6	27.7 49.7
$I_{XR}$ (Feeder 1) Applied voltage : 160 V 240 V	4.6 7.1	87 132.2	4.6 7.1	26.4 46.8
$I_{YR}$ (Feeder 2) Applied voltage : 160 V 240 V	4.7 7.5	1.9 2.5	4.7 7.5	0.8 1.4

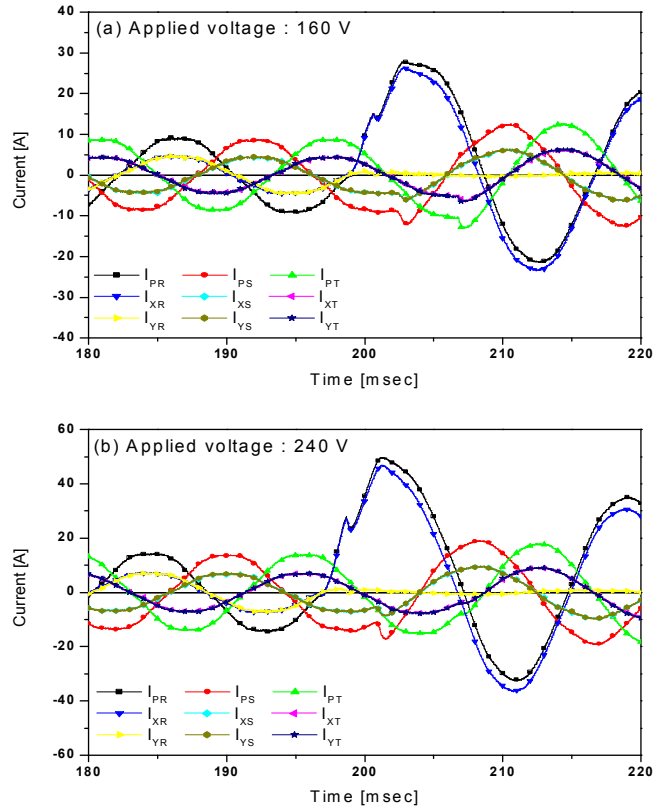


그림 21 주변압기 2차측에 한류기를 적용한 경우 1선 지락사고시 사고전류 파형  
 Fig. 21 Fault current waveforms in the case of single line-to-ground fault  
 with the SFCL in the back of Tr.

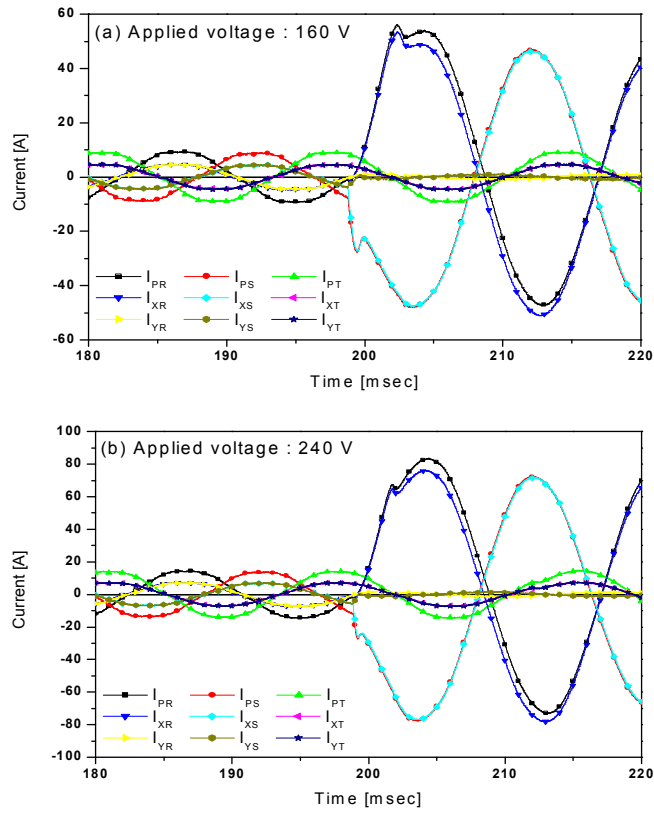


그림 22 주변압기 2차측에 한류기를 적용한 경우 2선 지락사고시 사고전류 파형  
 Fig. 22 Fault current waveforms in the case of double line-to-ground fault  
 with the SFCL in the back of Tr.

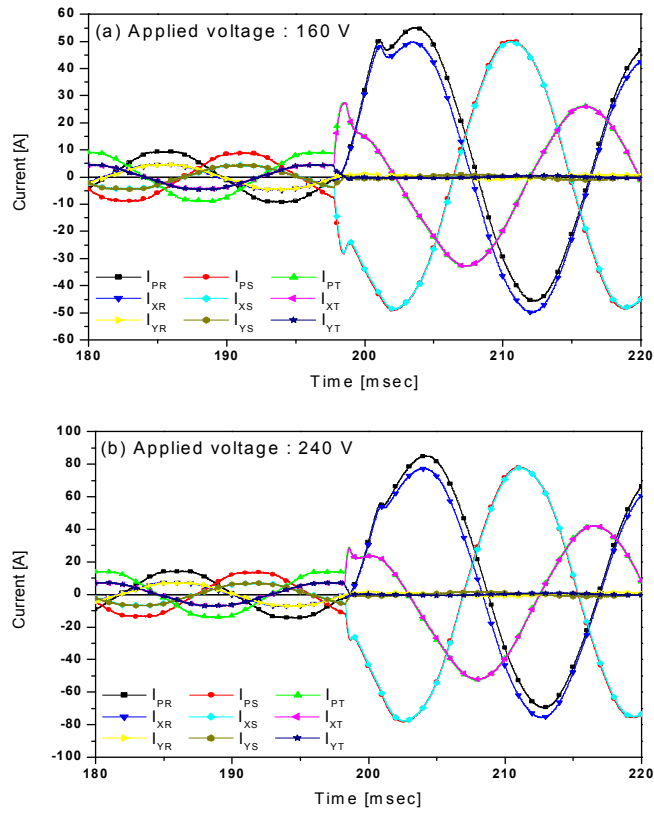


그림 23 주변압기 2차측에 한류기를 적용한 경우 3선 지락사고시 사고전류 파형  
 Fig. 23 Fault current waveforms in the case of triple line-to-ground fault  
 with the SFCL in the back of Tr.

## IV. 결 론

초전도 한류기를 전력망에 적용하기 위해서는 초전도 한류기의 용량증대 문제가 우선적으로 해결되어야 한다. 본 논문에서는 변압기를 이용하여 한류기의 용량을 증대시킨 3상 일체형 자속결합형 초전도 한류기의 전력망 과도상태시 동작특성을 고찰하였다. 한류기는 1선 또는 2선 지락사고와 같은 불평형 사고 발생시에도 사고상 및 건전상의 모든 초전도 소자가 켄치되어 사고전류를 제한하였다. 실험전압이 증가함에 따라, 발생하는 사고전류 크기는 그에 비례하여 증가하였지만 한류기에 의한 사고전류 제한율은 더욱 높아지는 결과를 보였다. 이러한 결과로부터 3상 일체형 자속결합형 초전도 한류기는 단일철심을 매개로 사고전류에 의한 자속을 사고상 및 건전상간에 유도하여 사고전류 제한동작을 수행하였음을 확인하였다. 하지만 2선 및 3선 지락사고시 사고전류 제한율은, 다른 사고상으로부터 발생하게 되는 자속의 영향으로 인해 왜곡하는 자속이 발생하게 되어, 1선 지락사고시 사고전류 제한율보다 저감되는 결과를 보였다.

초전도 한류기는 용량증대 문제와 더불어 전력망 보호시스템과의 협조 문제, 적용위치 선정 등의 문제들이 고려되어야 한다. 전력망에서 사용되는 재폐로 동작 책무와의 협조 문제를 고찰하기 위해 초전도 소자의 동시켄치 유·무에 따른 회복 특성 분석하였으며, 두 개의 feeder를 갖는 배전계통 내에서의 초전도 한류기 적용 위치에 따른 사고전류 패턴을 분석하였다. 직렬연결된 초전도 소자간 동시켄치가 유도되지 않을 경우, 임계전류값이 작은 초전도 소자만이 켄치되어 사고전류를 제한하였다. 그로 인해 전력부담이 가중된 초전도 소자는 회복시간이 지연되거나 사고주기 종료 후 초전도 상태로 회복하지 못하는 결과를 보였다. 이를 해결하기 위해 2차측 코일과 초전도 소자간에 중성선을 연결함으로써 동시켄치를 유도하였으며, 초전도 소자는 전력용 차단기의 차단동작주기 이내에 모두 초전도 상태로 회복하였다. 이러한 결과로부터 전력시스템의 보호협조 중 하나인 재폐로 동작 책무와 공조할 수 있다는 것을 입증하였다.

두 개의 feeder를 갖는 배전계통 내에서의 초전도 한류기 적용 위치에 따른 사고전류 패턴을 분석한 결과, feeder에 초전도 한류기를 설치할 경우 건전한 feeder로 유도되는 정격전류 감소율이 보완되는 결과를 얻었다. 주변압기 2차측에 초전도 한류기를 설치한 경우 계통의 보호범위가 넓어지는 장점이 있지만, 건전한 feeder에 흐르는 정격전류가 더욱 감소하게 되어, 안정적인 전력공급이 불가능해지는 것을 확인하였다. 전력망을 안정적으로 보호하고 건전 feeder에서 발생하는 전류강하 문제를 해결하기 위해서는 각 feeder 마다 초전도 한류기를 설치해야 하는 필요성을 확인할 수 있었다.



## 참 고 문 헌

- [1] 현옥배, 황시돌, 김혜림, 최효상, “초전도 사고전류 제한기술개발 보고서”, 한국 전력공사 전력연구원, 2002
- [2] 심정욱, 김혜림, 박권배, 강종성, 이방욱, 오일성, 현옥배, “YBCO 박막을 이용한 3상 6.6kV 저항형 초전도 한류기 제작 및 시험”, 한국 초전도·저온공학회논문지, 6권, 3호, pp. 50-55, 2004
- [3] 김준환, 이강완, “전력계통 고장전류 증대와 대응방안”, 전기저널, Vol. 1, pp. 1-19, 1998
- [4] 박민원, “차세대 초전도 응용기술 개발사업 - 차세대 초전도 응용전력기기별 소개”, 대한전기학회, 전기의세계, 제 51권, 제 4호, pp. 25-38, 2002
- [5] W. paul, M. Chen, M. Lanker, J. Rhyner, D. Braun, and W. Lanz, “Fault current limiter based on high temperature superconductors different concepts, test results, simulations, applications”, Physica C Superconductivity, Vol. 354, pp. 27-33, May 2001
- [6] H. S. Choi, S. H. Lim, D. C. Chung, B. S. Han, O. B. Hyun, T. H. Sung, and J. S. Hwang, “Responses of resistive superconducting fault current limiters to unbalanced faults”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 15, no. 2, pp. 2035-2038, 2005
- [7] “초전도 전력기기의 실계통 적용 기술개발(기획보고서)”, 지식경제부, 2009

- [8] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, 김상준, 문승현, 한병성, “YBCO 박막의 저항형 초전도 한류기에 대한 동작특성”, 대한전기학회 전기학회논문지, 48B권, 10호, pp. 537, 1999
- [9] S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han, “Current Limiting Characteristics of Integrated Three-Phase Flux-Lock Type SFCL”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 16, no. 2, pp. 715 - 718, 2006
- [10] S. H. Lim, “Operational Characteristics of Flux-Lock Type SFCL With Series Connection of Two Coils”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, no. 2, pp. 1895-1898, 2007
- [11] H. S. Choi, N. Y. Lee, Y. H. Han, T. H. Sung, and B. S. Han, “The Characteristic Analysis Between Flux-Coupling and Flux-Lock Type SFCL According to Variations of Turn Ratios”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 18, no. 2, pp. 737-740, 2008
- [12] B. I. Jung, H. S. Choi, Y. S. Cho, and D. C. Chung, “Current Limitation and Power Burden of a Flux-Coupling Type SFCL in the Three-Phase Power System According to Turn's Ratio and Fault Type”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 21, no. 2, pp. 1225-1228, 2011
- [13] S. H. Lim, H. S. Choi, D. C. Chung, Y. H. Jeong, Y. H. Han, T. H. Sung, and B. S. Han “Fault Current Limiting Characteristics of Resistive Type SFCL Using a Transformer”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 15, no. 2, pp. 2055-2058, 2005

- [14] B. C. Sung, D. K. Park, J. W. Park, and T. K. Ko, "Study on Optimal Location of a Resistive SFCL Applied to an Electric Power Grid", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, no. 3, pp. 2048-2052, 2009
- [15] I. Muta, T. Doshita, T. Nakamura, T. Egi, and T. Hoshino, "Influences of Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) on Superconducting Generator in One-Machine Double-Line System", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 13, no. 2, pp. 2206-2209, 2003
- [16] S. B. Rhee, J. K. Lee, and B. W. Lee, "Impacts of Superconducting Fault Current Limiters on the Recloser Operation in Distribution Electric Power Systems", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 21, no. 3, pp. 2197-2200, 2011
- [17] Y. S. Cho, H. S. Choi, and B. I. Jung, "Current Limiting and Recovering Characteristics of Three-Phase Transformer-Type SFCL With Neutral Lines According to Reclosing Procedure", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 21, no. 3, pp. 2205-2208, 2011
- [18] J. Carlos H. Llambes, D. W. Hazelton, and C. S. Weber, "Recovery Under Load Performance of 2nd Generation HTS Superconducting Fault Current Limiter for Electric Power Transmission Lines", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, no. 3, pp. 1968-1971, 2009
- [19] 방승현, 박세호, 이상봉, 김철환, 김재철, 현옥배, "배전계통에서의 상전도 및 초전도 한류기 특성에 관한 연구", 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, pp. 145-147, 2007

- [20] B. W. Lee and 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. Appl. Supercond., Vol. 20, no. 3, pp. 1114-1117, 2010
- [21] 김성열, 김욱원, 배인수, 김진오, "신뢰도를 고려한 배전계통 초전도 한류기의 최적 위치 선정", 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, pp. 105-107, 2009
- [22] 이상봉, 김철환, 김규호, 김재철, 현옥배, "비대칭 고장전류에 따른 초전도 한류기 동작 분석", 대한전기학회 전기학회논문지, 제 58권, 제 3호, pp. 450-454, 2009
- [23] L. Ye, M. Majoros, T. Coombs, and A. M. Campbell, "System Studies of the Superconducting Fault Current Limiter in Electrical Distribution Grids", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, no. 2, pp. 2339-2342, 2005

## 감사의 글

너무나 많은 분들의 도움을 받아 2년동안의 뜻깊은 대학원 생활을 마칠 수 있었습니다. 무엇보다도 부족한 저를 너그러운 마음으로 아낌없이 지도해주신 최효상 교수님께 감사드립니다. 또한 이 논문을 지도해주시고 심사해주신 오금곤 교수님, 백형래 교수님, 이우선 교수님, 조금배 교수님, 김용재 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

지난 2년동안 그 누구보다 많은 시간을 함께 지내면서 둘도 없는 조력자 역할을 해주신 형민이형, 용선이형, 병익이형, 수근이, 혜원에게 진심으로 고맙다는 말 전하고 싶습니다. 그리고 언제나 저를 응원해주고 힘이 되어주는 승훈이형, 해민이, 민구, 경리에게도 고맙다는 말 전합니다.

마지막으로 항상 저의 선택과 결정을 믿어주시고 지원해주시는 어머니, 아버지, 형에게 진심으로 고맙다는 말 전하고 싶습니다. 그리고, 언제나 제 곁에서 큰 힘이 되어주고, 믿어주고, 사랑해주는 땡글효진에게 고맙다는 말 사랑한다는 말 전합니다.

2012년 2월 하 경 훈 올림