



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](#)

2014年 2月  
碩士學位論文

고속 인터럽터를 적용한  
자속상쇄형 한류기 연구

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

崔惠願

2014年  
2月  
碩士學位論文

고속 인터럽터를 이용한  
자속상쇄형 한류기 연구

崔惠願

고속 인터럽터를 적용한  
자속상쇄형 한류기 연구

A Study on Flux-offset Type Fault Current Limiter  
using a High-speed Interrupter

2014年 2月 25日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

崔惠願

고속 인터럽터를 적용한  
자속상쇄형 한류기 연구

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.

2013年 10月

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

崔 惠 願

崔惠願의 碩士學位 論文을 認准함.

委員長 朝鮮大學校 教授 이우선 印

委員 朝鮮大學校 教授 정병익 印

委員 朝鮮大學校 教授 최효상 印

2013年 11月

朝鮮大學校 大學院

# 목 차

ABSTRACT .....	ix
I. 서 론 .....	1
II. 실험설계 및 동작원리 .....	4
A. 자속상쇄형 고속도 한류기 .....	4
1. 삼상 일체형 변압기 원리 및 설계·제작 .....	4
a. 변압기 자속상쇄 원리 .....	4
b. 3상 일체형 변압기 설계 및 제작 .....	7
2. 고속 인터럽터의 설계·제작 및 원리 .....	9
a. 고속 인터럽터 설계 및 제작 .....	9
b. 고속 인터럽터의 동작 메커니즘 .....	12
3. 자속상쇄형 고속도 한류기 구성 및 동작 메커니즘 .....	13
B. 실험장치 구성 .....	14
1. 실험 회로도 .....	14
2. 전원 공급 장치 .....	17
3. 사고 발생 장치 .....	18

4. SCR 스위칭 제어 시스템 .....	19
5. 부하설비 .....	20
<b>Ⅲ. 실험 및 고찰 .....</b>	<b>21</b>
<b>A. 사고유형별 동작특성 .....</b>	<b>21</b>
1. 1선 지락 사고 .....	21
2. 2선 지락 사고 .....	24
3. 3선 지락 사고 .....	28
4. 2선 단락 사고 .....	31
5. 3선 단락 사고 .....	34
<b>B. 전압증가별 동작특성 .....</b>	<b>37</b>
<b>C. 자속상쇄형 고속도 한류기 동작 신뢰성 확보 .....</b>	<b>43</b>
1. 변압기형 초전도 한류기의 설계 및 동작특성 .....	43
a. 변압기형 초전도 한류기 회로도 및 실험 설계 .....	43
b. 변압기형 초전도 한류기의 동작 메커니즘 .....	45
c. 1선 지락 사고 .....	46
2. 자속상쇄형 고속도 한류기와 변압기형 초전도 한류기의 동작 특성 비교 .....	48

V. 결 론 .....	49
참고문헌 .....	51



## List of Tables

Table 2-1 Inductance value of three-phase reactor .....	8
Table 2-2 Specifications of solenoid coils .....	10
Table 2-3 Electrical and mechanical specifications of vacuum interrupters .....	11
Table 2-4 Experimental condition .....	15
Table 2-5 Specifications of power supply .....	17
Table 2-6 Specifications of SCR switching control system .....	19
Table 2-7 Specifications of load equipment of each phase .....	20
Table 3-1 Operation characteristics of each phase during a single line-to-ground fault .....	23
Table 3-2 Operation characteristics of each phase during a double line-to-ground fault .....	26
Table 3-3 Operation characteristics of each phase during a triple line-to-ground fault .....	28
Table 3-4 Operation characteristics of each phase during a double line-to-line fault .....	33
Table 3-5 Operation characteristics of each phase during a triple line-to-line fault .....	36
Table 3-6 Fault current limiting characteristics of flux-offset type high-speed FCLs according to applied voltage during a single line-to-ground fault .....	38
Table 3-7 Fault current limiting characteristics of flux-offset type high-speed FCLs according to applied voltage during a double line-to-ground fault .....	39
Table 3-8 Fault current limiting characteristics of flux-offset type high-speed FCLs according to applied voltage during a triple line-to-ground	

fault .....	40
Table 3-9 Fault current limiting characteristics of flux-offset type high-speed FCLs according to applied voltage during a double line-to-line fault .....	41
Table 3-10 Fault current limiting characteristics of flux-offset type high-speed FCLs according to applied voltage during a triple line-to-line fault .....	42
Table 3-11 Specification of superconductor .....	44
Table 3-12 Comparison of the fault current limitation characteristics between transformer-type SFCL and flux-offset type FCLs .....	48

## List of Figures

Fig. 1-1 Trend change of electricity rates and electricity usage .....	2
Fig. 1-2 The relationship between rate of economic growth and amount of power consumption .....	2
Fig. 1-3 Trend change in amount of power consumption and the maximum power .....	3
Fig. 2-1 Equivalent circuit of the transformer (a) Short circuit, (b) Open circuit .....	6
Fig. 2-2 Integrated three-phase transformer .....	7
Fig. 2-3 LCR meter .....	7
Fig. 2-4 Three-phase high-speed interrupter .....	9
Fig. 2-5 Structure of a solenoid .....	10
Fig. 2-6 Structure of vacuum interrupters .....	11
Fig. 2-7 Operation mechanism of a high-speed interrupter .....	12
Fig. 2-8 Concept of flux-offset type fault current limiter using a high-speed interrupter .....	13
Fig. 2-9 Operating mechanism of flux-offset type fault current limiter using a high-speed interrupter .....	14
Fig. 2-10 Experimental circuit of flux-offset type fault current limiter using a high-speed interrupter .....	16
Fig. 2-11 Power supply .....	17
Fig. 2-12 Fault generation device .....	18
Fig. 2-13 SCR switching control system .....	19
Fig. 2-14 Load equipment of each phase .....	20
Fig. 3-1 Voltage and current curves of fault line (R-phase) during a single	

line-to-ground fault .....	22
Fig. 3-2 Resistance curve of fault line during a single line-to-ground fault (R-phase) .....	22
Fig. 3-3 Voltage and current curves of normal line (S, T-phase) during a single line-to-ground fault .....	23
Fig. 3-4 Voltage and current curves of fault line (R-phase) during a double line-to-ground fault .....	25
Fig. 3-5 Voltage and current curves of fault line (S-phase) during a double line-to-ground fault .....	25
Fig. 3-6 Resistance curve of fault line during a double line-to-ground fault (S, T-phase) .....	26
Fig. 3-7 Voltage and current curves of normal line (T-phase) during a double line-to-ground fault .....	27
Fig. 3-8 Voltage and current curves of fault line (R-phase) during a triple line-to-ground fault .....	29
Fig. 3-9 Voltage and current curves of fault line (S-phase) during a triple line-to-ground fault .....	29
Fig. 3-10 Voltage and current curves of fault line (T-phase) during a triple line-to-ground fault .....	30
Fig. 3-11 Resistance curve of fault line during a triple line-to-ground fault (R, S, T-phase) .....	30
Fig. 3-12 Voltage and current curves of fault line (R-phase) during a double line-to-line fault .....	31
Fig. 3-13 Voltage and current curves of fault line (S-phase) during a double line-to-line fault .....	32
Fig. 3-14 Resistance curve of fault line during a double line-to-line fault (R, S-phase) .....	32

Fig. 3-15 Voltage and current curves of normal line (T-phase) during a double line-to-line fault .....	33
Fig. 3-16 Voltage and current curves of fault line (R-phase) during a triple line-to-line fault .....	34
Fig. 3-17 Voltage and current curves of fault line (S-phase) during a triple line-to-line fault .....	35
Fig. 3-18 Voltage and current curves of fault line (T-phase) during a triple line-to-line fault .....	35
Fig. 3-19 Resistance curve of fault line during a triple line-to-line fault (R, S, T-phase) .....	36
Fig. 3-20 Fault current limiting-rate of flux-offset type FCLs according to applied voltage during a single line-to-ground fault .....	38
Fig. 3-21 Fault current limiting-rate of flux-offset type FCLs according to applied voltage during a double line-to-ground fault .....	39
Fig. 3-22 Fault current limiting-rate of flux-offset type FCLs according to applied voltage during a triple line-to-ground fault .....	40
Fig. 3-23 Fault current limiting-rate of flux-offset type FCLs according to applied voltage during a double line-to-line fault .....	41
Fig. 3-24 Fault current limiting-rate of flux-offset type FCLs according to applied voltage during a triple line-to-line fault .....	42
Fig. 3-25 Experimental circuit of a transformer-type SFCL .....	44
Fig. 3-26 Operation mechanism of a transformer-type SFCL .....	45
Fig. 3-27 Voltage and current characteristics of fault line (R-phase) during a single line-to-ground fault .....	46
Fig. 3-28 Voltage and current characteristics of normal line (S, T phase) during a single line-to-ground fault .....	47

# ABSTRACT

## A Study on Flux-offset Type Fault Current Limiter using a High-speed Interrupter

Choi Hye-Won

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

Department of Electrical Engineering,

Graduate School of Chosun University

Due to the current economic growth, the increase in the national income and abnormal temperature, the amount of electricity demand is soaring. To satisfy such demand, the capacity of power facilities have been expanded. However, such an expansion reduced the total impedance of the power system, which increased the number of faults in the system as well as the size of fault-current, which is now exceeding the protective capacity of the existing protective equipment.

This thesis proposed a flux-offset type limiter using a high-speed interrupter as a new fault current limiter. The proposed flux-offset type fault current limiter applied a high-speed interrupter to the transformer, using a flux-offset phenomenon of the transformer to limit fault-current. The load was connected to the primary winding of the transformer while the high-speed interrupter was applied to the secondary winding to create a short circuit. After having constructed a simulation system, We tested various types of ground faults and other types of faults. The test results showed that the proposed model limited the fault-current effectively

under a single, double, triple line-to-ground fault and line-to-line fault situations within the average of 11msec. Also the comparison tests between the transformer-type SFCL and the proposed model showed that the proposed fault current limiter limited the fault-current much faster.

## I. 서 론

그림1-1과 같이 현재 전기에너지는 타 에너지에 비해 상대적으로 낮은 요금과 사용의 편리성으로 인해 전력다소비 분야의 산업비중이 지속적으로 증가하고 있다. 또한, 최근에는 폭염이나 한파 등 이상기온으로 인한 냉난방 전력기기의 사용량 증가, 국민의 소득향상, 경제성장으로 인해 전력소비량이 그림 1-2와 같이 증가하고 있다. 그림 1-3은 전력소비량과 최대전력의 추이 변화를 나타낸 곡선이다. 이와 같이 국내의 전력수요량은 매년 급격하게 증가하고 있다. 급격하게 증가하는 전력수요량을 충족시키고 안정적인 전력을 공급하기 위하여 2002년 대비 발전설비를 약 52% 증가하였지만 이를 감당하기에는 역부족이다[1-7]. 게다가 국내의 발전시스템은 해안가의 일부지역에 집중되어 있는 반면 총 전력수요량의 약 42%는 수도권에 집중되어 있다. 이에 따라 수도권으로 전력을 수송하는 과정에서 고장이 발생할 경우 수도권의 전력 수급이 어려워지면서 최악의 경우 전압붕괴로 인한 광역정전이 발생하게 된다. 현재 수도권의 전력계통은 이미 발전력증대와 송전망이 다중으로 연계되어 포화상태이다. 이로 인해 송배전계통의 임피던스가 저하되어 고장발생 횟수와 고장전류의 크기가 점점 증가하여 기존 보호기기의 보호용량을 넘어서고 있다[8-15]. 사고가 발생했을 경우 단시간 내 차단동작이 이루어지지 않는다면 2011년 9월 15일 대정전 사태와 같이 천문학적인 인적, 물적, 경제적 피해를 가져오게 된다. 이에 따라 전력계통에서는 점점 증가하는 고장전류를 제한하기 위해 직렬 리액터 설치, 상위 차단기로 교체, 모선분리 등 다양한 방안을 적용하였다. 그러나 용량의 한계, 전력계통의 안정도 및 신뢰도 저하 등의 또 다른 문제점을 야기 시켰다. 이로 인해 더욱 안정적이고 신뢰도가 높은 새로운 사고전류 저감 대책으로 초전도 한류기가 제안되었다[16-19].



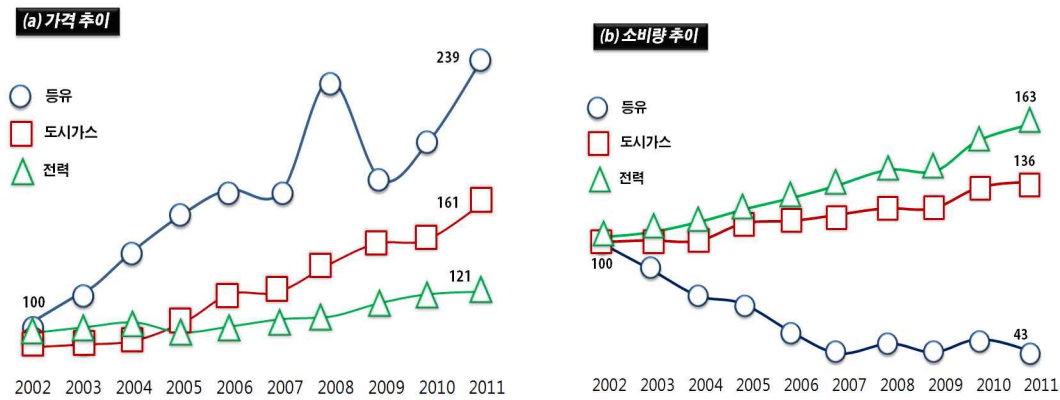


그림 1-1 전기요금 및 소비량 변화 추이

Fig. 1-1 Trend change of electricity rates and electricity usage

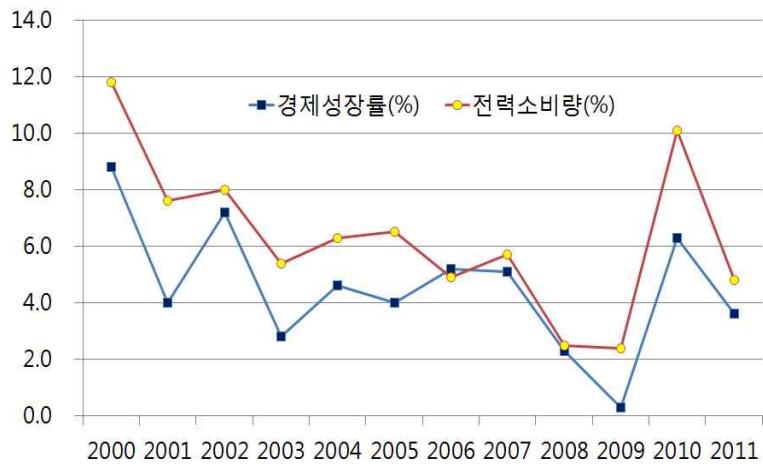


그림 1-2 경제성장률과 전력소비량의 상호관계

Fig. 1-2 The relationship between rate of economic growth and amount of power consumption

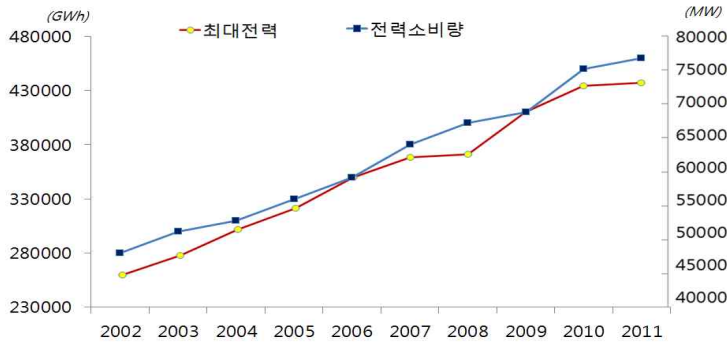


그림 1-3 전력소비량과 최대전력의 변화 추이

Fig. 1-3 Trend change in amount of power consumption and the maximum power

초전도 한류기는 임계값 이하에서 임피던스가 영인 초전도체의 고유특성을 응용한 초전도 전력응용기기이다. 초전도 한류기는 전력계통을 보호하기 위한 기기로써 정상시 무 임피던스로 동작하여 전력계통에 영향을 주지 않는다. 그러나 사고가 발생하면 이를 감지하고 quench되어 사고전류를 제한한다. 또한, 사고전류를 제한한 후 빠르게 무 임피던스 특성인 초전도성을 회복하여 정상동작을 수행한다 [1-19]. 현재 초전도 한류기는 국내뿐만 아니라 독일, 미국, 일본, 중국 등 세계 여러나라의 연구팀에서 저항형, 유도형 등 다양한 형태의 한류기를 제안하여 연구하고 있다. 각 연구팀은 시뮬레이션이나 모의실험을 통해 안정적인 사고전류제한 특성을 확보하였다. 그러나 실 계통에 적용하기 위한 초전도 한류기를 개발하기에는 초전도체의 비용 및 냉각설비, 기존 보호기기와의 협조 문제, 경제성 등 상업적 및 기술적인 어려움으로 가능성이 불투명하다. 이로 인해 현재 전력계통에서는 사고전류 제한율이 높고 경제성이 뛰어나면서 기술성이 높아 실용화시키기에 쉬운 한류기 기술에 이목을 집중하고 있다. 이에 본 논문에서는 새로운 한류기로서 변압기와 고속 인터럽터를 융합한 자속상쇄형 고속도 한류기를 제안하여 연구하였다.

## II. 자속상쇄형 고속도 한류기 구성 및 실험설계

### A. 자속상쇄형 고속도 한류기 구성

#### 1. 삼상 일체형 변압기 원리 및 설계·제작

##### a. 변압기의 자속상쇄 원리

변압기는 하나의 회로에서 교류전력을 받아 전자유도작용을 통해 다른 회로에 전력을 공급하는 기기이다. 변압기의 1차 코일과 2차 코일의 권수비를 동일하게 설정한 뒤 변압기의 1차 권선에 전원을 인가하면 1차 전류  $I_P$ 가 1차 코일에 흐른다. 이로 인해 1차 코일에는 자기장이 형성되어 자속  $\Phi_1$ 이 발생하고 자속의 증감을 방해하는 방향으로 역기전력  $e_1$ 이 발생된다. 그림 2-1(a)와 같이 변압기의 2차 권선이 단락상태일 경우 전자유도작용을 통해 변압기의 2차 코일에 전류  $I_S$ 가 유도된다. 이와 동시에 변압기의 2차 권선에는 역기전력  $-e_2$ 가 발생하고  $\Phi_1$ 을 상쇄시키는 방향으로  $-\Phi_2$ 가 생성되어  $\Phi_1$ 과  $-\Phi_2$ 는 서로 상쇄된다. 이로 인해 식 (2.1), (2.2)과 같이  $E_1$ 과  $E_2$ 는 평행을 유지하면서 변압기의 1차, 2차 코일에서 발생하는 유도성 리액턴스는 영이 되면서 식 (2.4)~(2.7)과 같이 임피던스는 영이 된다. 그러나 그림 2-1(b)와 같이 변압기의 2차 권선을 개방시켰을 경우 1차 전류  $I_P$ 가 2차 코일에도 쇄교하므로 역기전력  $-e_2$ 는 발생하지만  $I_S$ 는 흐르지 않는다. 이로 인해 변압기 1차 코일의  $\Phi_1$ 이 상쇄되지 않아 회로에서는 유도성 리액턴스가 존재하여 임의의 임피던스 값이 발생한다. 이를 식 (2.8)~(2.12)에 유도하였다.

$$E_1 = -N_1 \frac{d\phi_m}{dt} = 4.44fN_1\phi_m [V], \quad E_2 = -N_2 \frac{d\phi_m}{dt} = 4.44fN_2\phi_m [V] \quad (2.1)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44fN_1\phi_m}{4.44fN_2\phi_m} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.2)$$

$$LI = N\phi, \quad L = \frac{N\phi}{I} [H] \quad (2.3)$$

( $E_{1,2}$ : 유도기전력,  $N_{1,2}$ : 권수비,  $f$ : 주파수,  $\phi$ : 자속,  $L$ : 리액턴스,  $I_{1,2}$ : 전류)

(a) 2차 권선이 단락상태일 경우

$$L_1 = \frac{N_1\Phi_1}{I_1} [H], \quad L_2 = \frac{N_2\Phi_2}{I_2} [H] \quad (2.4)$$

$$\Phi_1 = -\Phi_2 \quad (2.4)$$

$$L_1 = 0[H], \quad L_2 = 0[H] \quad (2.5)$$

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi f \times 0 \quad (2.6)$$

$$Z = 0 \quad (2.7)$$

(b) 2차 권선이 개방상태일 경우

$$L_1 = \frac{N_1 \Phi_1}{I_1} [H] \quad (2.8)$$

$$\Phi_1 = \text{존재} \quad (2.9)$$

$$L_1 = \frac{N_1 \Phi_1}{I_1} [H] \quad (2.10)$$

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi f \times L_1 \quad (2.11)$$

$$Z = X_L \quad (2.12)$$

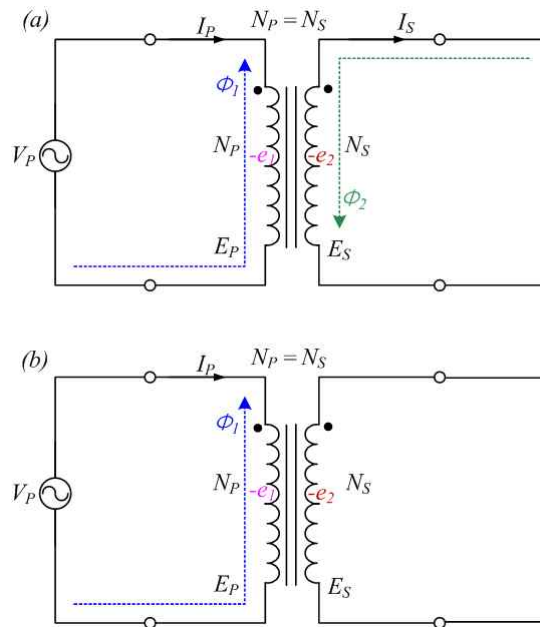


그림 2-1 변압기 등가회로 (a)단락회로, (b)개방회로

Fig. 2-1 Equivalent circuit of the transformer (a) Short circuit, (b) Open circuit

### b. 삼상 일체형 변압기 설계 및 제작

그림 2-2는 본 실험에 적용된 전력계통용 변압기이다. 현 계통과의 신뢰성을 확보하기 위하여 삼상(R, S, T상)일체형으로 설계하였다. 각 상 리액터의 인덕턴스 값은 그림2-3의 LCR meter로 측정하여 표2-1에 나타내었다. 본 실험에서는 변압기의 1차, 2차 권수비( $N_p:N_s$ )를 4:4로 설정하였다.

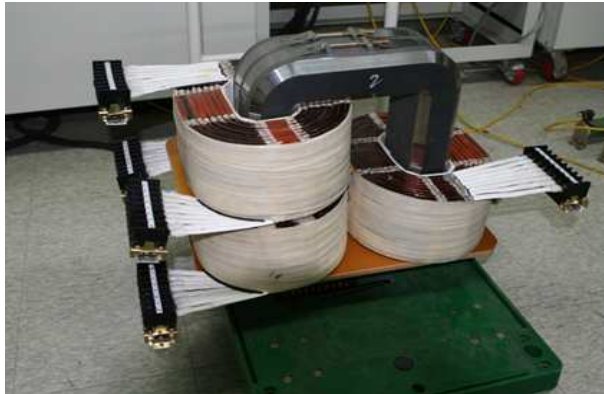


그림 2-2 삼상 일체형 변압기

Fig 2-2. Integrated three-phase transformer



그림 2-3 LCR meter

Fig. 2-3 LCR meter

표 2-1 삼상 변압기 리액터의 인덕턴스 값

Table 2-1 Inductance value of three-phase reactor

R상		S상		T상	
Tap	Inductance	Tap	Inductance	Tap	Inductance
1	8.172	1	8.148	1	8.139
2	8.168	2	8.147	2	8.136
3	8.164	3	8.146	3	8.132
4	8.166	4	8.147	4	8.134
5	8.175	5	8.148	5	8.141
6	8.174	6	8.151	6	8.143
7	8.186	7	8.159	7	8.147
8	8.197	8	8.172	8	8.166
0-1	8.172	0-1	8.148	0-1	8.139
0-2	32.97	0-2	32.90	0-2	32.86
0-3	73.30	0-3	73.12	0-3	73.00
0-4	127.4	0-4	127.0	0-4	126.9
0-5	198.7	0-5	198.3	0-5	198.0
0-6	285.6	0-6	284.9	0-6	284.5
0-7	387.9	0-7	387.0	0-7	386.5
0-8	505.7	0-8	504.6	0-8	503.7

## 2. 고속 인터럽터 설계 및 제작과 원리

### a. 고속 인터럽터 설계 및 제작

그림 2-4는 본 실험에 사용된 삼상 고속 인터럽터이다. 제작된 고속 인터럽터는 솔레노이드와 진공 인터럽터를 융합한 기기이다. 본 연구에 적용된 기기들은 제작과정에서 성능 시험을 통해 뛰어난 차단능력과 고전압 절연성능을 입증받았다. 그러므로 실 계통에 적용될 경우 높은 신뢰성을 확보할 수 있다. 먼저 솔레노이드는 교류·직류의 여자 코일에 전류를 투입하면 코일로 권선된 철심이 자화되어 가동철심을 움직이게 한다[2-7]. 이로 인해 전기적 에너지는 기계적 출력으로 변환된다. 그림 2-5은 솔레노이드의 구조이고 표 2-2는 제작에 적용된 솔레노이드의 사양이다.

다음으로 진공 인터럽터는 접촉부를 구성하는 핵심부품으로써 본 실험에서는 현재 6.6kV 계통에 적용가능한 대용량의 진공 인터럽터를 융합하였다. 스트로크 길이가 6~10mm로 솔레노이드 코일에 의해 충분한 개로 동작이 이루어질 수 있게 설계하였다. 그림 2-6는 고압 진공 인터럽터의 구조이고 표 2-3는 제작에 사용된 진공 인터럽터의 전기적 및 기계적 사양이다.



그림 2-4 삼상 고속 인터럽터

Fig. 2-4 Three-phase high-speed interrupter



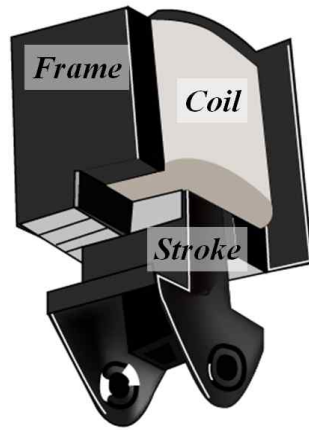


그림 2-5 솔레노이드 구조

Fig. 2-5 Structure of a solenoid

표 2-2 솔레노이드 사양

Table 2-2 Specifications of solenoid coils

	값	단위
모델명	STC-1002	
정격전압	220	V
정격주파수	50/60	Hz
정격스트로크	30	mm
토크	15	Kg/m

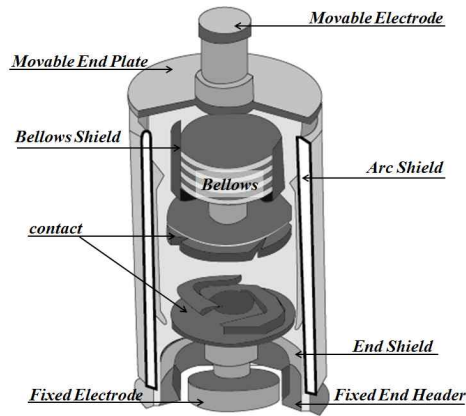


그림 2-6 진공 인터럽터 구조

Fig. 2-6 Structure of vacuum interrupters

표 2-3 진공 인터럽터의 전기적 및 기계적 사양

Table 2-3 Electrical and mechanical specifications of vacuum interrupters

LV07251B					
전기적 사양			기계적 사양		
정격전압	7.2	kV	스트로크	10±1	mm
차단전압	20	kV	개극속도	0.7~1.0	(m/s)
정격전류	1250	A	투입속도	0.7~1.0	(m/s)
			접점 자폐력	12.6	(kg·f)

### b. 고속 인터럽터의 동작 메커니즘

그림 2-7은 고속 인터럽터의 동작 메커니즘이다. 솔레노이드 코일에 전류가 흐르면 전자력이 발생하고 이 힘에 의해 진공 인터럽터의 접점과 연결된 가동철심이 당겨지게 된다. 이로 인해 진공 인터럽터의 b접점은 turn-on에서 turn-off되고 a접점은 turn-off에서 turn-on된다. 본 실험에서는 고속 인터럽터의 b접점만 사용하였다.

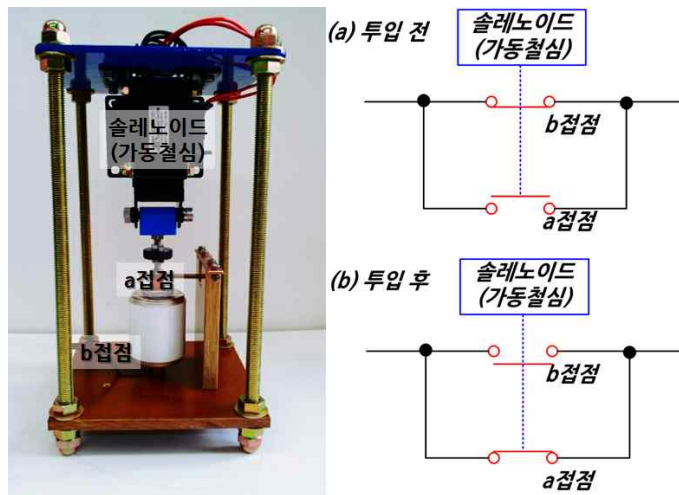


그림 2-7 고속 인터럽터의 동작 메커니즘

Fig. 2-7 Operation mechanism of a high-speed interrupter

### 3. 자속상쇄형 고속도 한류기의 구성 및 동작메커니즘

그림 2-8은 본 논문에서 제안하는 자속상쇄형 고속도 한류기(F-HFCL: flux-offset type fault current limiter using a high-speed interrupter)의 개념이다. 자속상쇄형 고속도 한류기는 전력계통용 변압기와 고속 인터럽터를 융합한 전력기기이다. 이는 변압기의 1차, 2차 코일을 이용한 한류기술로써 변압기의 1차 권선에는 부하를 연결하고 2차 권선에는 기계적 접점인 고속 인터럽터를 이용하여 단락 회로를 구성하였다. 이때 변압기의 1차, 2차 코일의 권수비는 같게 설정한다. 그림 2-9는 자속상쇄형 고속도 한류기의 동작 메커니즘이다. 정상 시에는 변압기 1차, 2차 코일에 유도되는 자속이 서로 상쇄됨으로써 임피던스가 발생하지 않는다. 이에 따라 선로에는 변압기 자체의 누설자속과 철손 등의 미미한 손실만 발생한다. 그러나 사고가 발생하면 고속 인터럽터의 b접점이 turn-off되어 변압기 2차측의 단락 권선이 개방된다. 이로 인해 변압기 1차, 2차 코일의 자속상쇄가 발생하지 않고 1차 코일의 인덕턴스에 의해 임피던스가 발생한다. 이때 발생한 임피던스에 의해 사고전류는 제한된다.

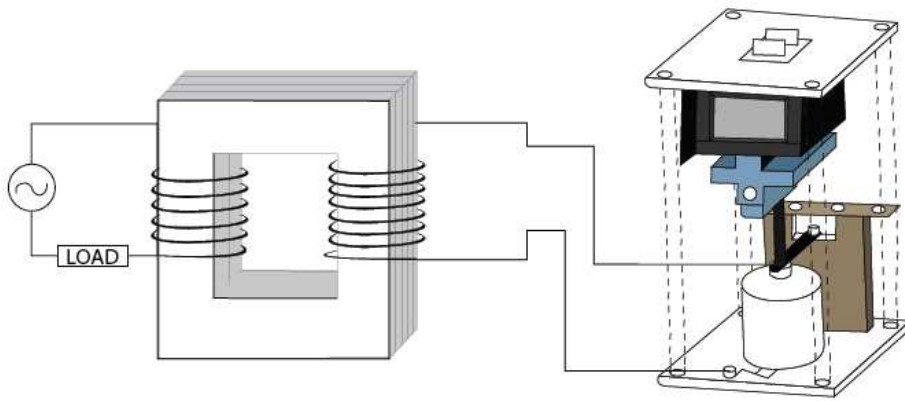


그림 2-8 자속상쇄형 고속도 한류기의 개념

Fig. 2-8 Concept of flux-offset type fault current limiter using a high-speed interrupter

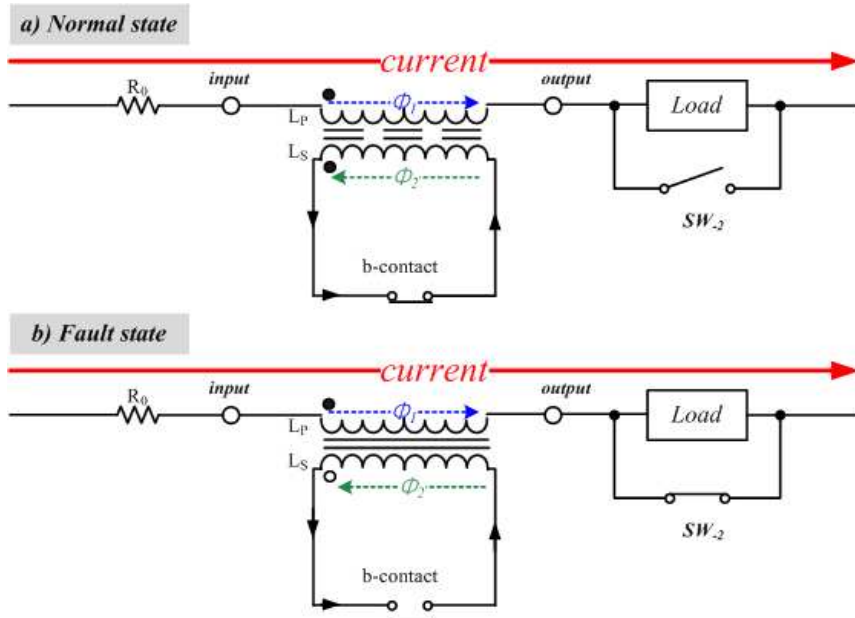


그림 2-9 자속상쇄형 고속도 한류기의 동작메커니즘

Fig. 2-9 Operating mechanism of flux-offset type fault current limiter using a high-speed interrupter

## B. 실험장치 구성

### 1. 실험회로도

본 실험에서는 자속상쇄형 고속도 한류기의 사고전류제한 특성과 안정적인 동작 특성을 분석하기 위해 삼상 일체형 변압기와 삼상 고속 인터럽터를 적용하여 삼상(R, S, T상)계통으로 구성하였다. 그림 2-10는 자속상쇄형 고속도 한류기의 실험 회로도 이다. 실제 송·배전 계통과 비슷하게 전원 장치, 사고 발생 장치, CT, SCR switching control system 등을 설치하였다. 앞에서 설명한 바와 같이 변압기의 1차 권선에는 50[Ω]의 부하를 연결하였고 2차 코일에는 고속 인터럽터를 적용하여 단락회로를 구성하였다. 회로에 전원을 인가하기 위해 전원인가 스위치 SW<sub>R-1</sub>, SW<sub>S-1</sub>, SW<sub>T-1</sub>을 변압기의 1차 권선에 설치하였고 모의 사고를 발생시키기 위해 사고발생 스위치인 SW<sub>R-2</sub>, SW<sub>S-2</sub>, SW<sub>T-2</sub>를 각 상에 설치하였다[2-7]. 120[V]의 전압을 인가하였고 1선, 2선, 3선 지락 및 단락 사고를 발생시켰다. 표 2-4는 모의실험 설계 조건을 나타낸다.

표 2-4 실험조건

Table 2-4 Experimental condition

	실험 조건				
발생사고	1선 지락사고	2선 지락사고	3선 지락사고	2선 단락사고	3선 단락사고
인가전압	120V				
주기	Open : 5cycle, Close : 10cycle				

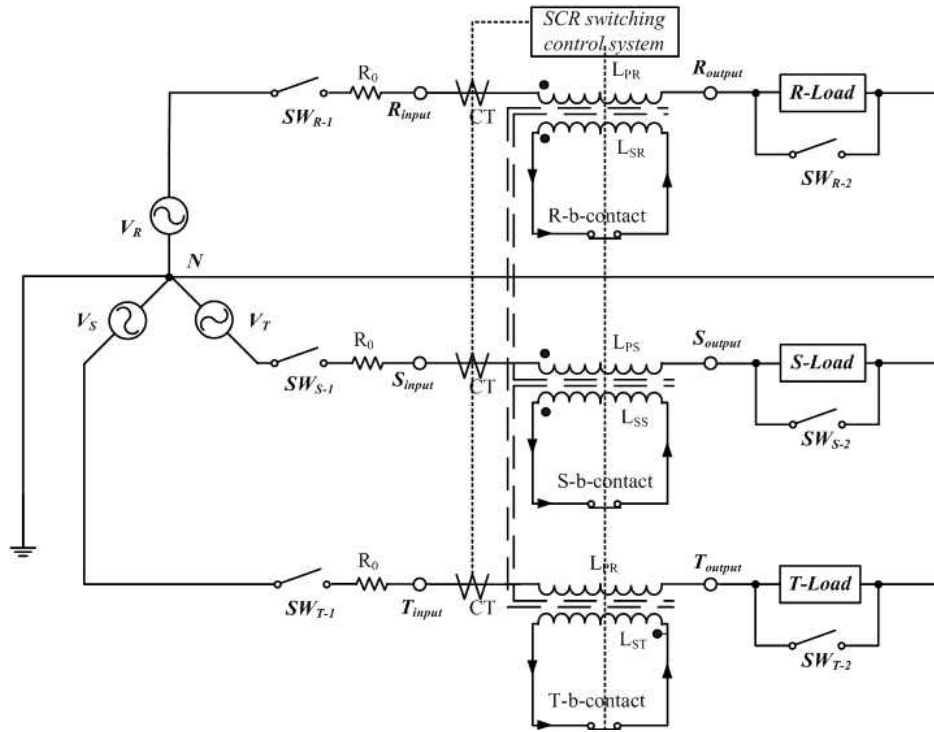


그림 2-10 자속상쇄형 고속도 한류기 실험 회로도

Fig. 2-10 Experimental circuit of flux-offset type fault current limiter using a high-speed interrupter

## 2. 전원 공급 장치

그림 2-11은 전원 공급 장치이고 표 2-5는 전원 공급 장치의 사양이다. 전원공급용 변압기의 용량은 200[kVA]이다. 40[V]씩 전압을 조정할 수 있다. 본 실험에서는 각 사고유형별로 120[V]에서 360[V]까지 전압을 인가하였다.



그림 2-11 전원 공급 장치

Fig. 2-11 Power supply

표 2-5 전원 공급 장치 사양

Table 2-5 Specifications of power supply

	사 양
용량	200kVA
인가전압	380V
상 & 주파수	3 $\Phi$ , 60Hz
인가전류	328A
출력전압	40V ~ 480V
전압 오차	$\pm 3\%$ 이내
결선 방법	Primary winding $\Delta$ / Secondary winding Y



### 3. 사고 발생 장치

그림 2-12는 사고 발생 장치이다. 본 장치를 이용하여 1선, 2선, 3선 지락 및 단락 사고를 발생시켰고 사고주기는 Open : 5cycle, Close : 10cycle로 설정하였다.



그림 2-12 사고 발생 장치

Fig. 2-12 Fault generation device

#### 4. SCR 스위칭 제어 시스템

그림 2-13은 본 실험에 사용된 SCR 스위칭 제어 시스템이다. 표 2-6은 SCR 스위칭 제어 시스템의 사양이다. 이는 고속 인터럽터의 솔레노이드 코일에 전원을 공급하는 장치이다. 사고가 발생했을 경우 사고전류의 크기가 각 상에 적용된 CT(Current Transformer)의 설정 값 이상을 초과하면 SCR 스위칭 제어 시스템이 고속 인터럽터의 솔레노이드 코일에 전원을 인가한다. 이로 인해 솔레노이드의 가동철심이 동작하여 진공 인터럽터의 접점(b, a-contact)이 변경된다.



그림 2-13 SCR 스위칭 제어 시스템

Fig. 2-13 SCR switching control system

표 2-6 SCR 스위칭 제어 시스템의 사양

Table 2-6 Specifications of SCR switching control system

SCR 스위칭 제어 시스템		
상수	3Φ 60Hz	
입력전압	AC 220	V
통전전류	Max 100	A
구동소자	SCR 1600/150	V/A
개폐시간	8	ms

## 5. 부하설비

그림 2-14는 변압기 각 상의 1차 권선에 연결된 부하이다. 1 tap은 5[Ω]으로 각 상은 전체 10tap으로 구성되어 있다. R, S, T상의 각 상의 총 부하저항은 50[Ω]으로 설정하였다.



그림 2-14 각 상의 부하설비

Fig. 2-14 Load equipment of each phase

표 2-7 각 상의 부하설비 사양

Table 2-7 Specifications of load equipment of each phase

	R상	S상	T상
1 tap	5[Ω]	5[Ω]	5[Ω]
1-10 tap	50[Ω]	50[Ω]	50[Ω]
정격전압	500[V]	500[V]	500[V]
정격전류	50[A]	50[A]	50[A]
순간단락전류	1000[A]	1000[A]	1000[A]

### Ⅲ. 실험 및 고찰

#### A. 사고유형별 동작특성

##### 1. 1선 지락 사고

전력계통에서 발생하는 지락사고는 단락사고에 비해 사고전류의 크기가 작지만 2차 사고를 가져올 가능성을 지니고 있다. 현재 계통에서 발생하는 사고 중 1선 지락사고가 70%를 차지하고 있다.

그림 3-1은 1선 지락 사고 시 사고선로(R상)의 전압 및 전류 특성을 나타낸 곡선이다. 전원 인가 스위치인  $SW_{R-L}$ ,  $SW_{S-L}$ ,  $SW_{T-L}$ 을 통해 각 상(R, S, T상)에 전원을 인가하였다. 정상 시에는 변압기의 1차 코일에서 발생하는 자속  $\phi_1$ 과 2차 코일에서 발생한  $-\phi_2$ 가 서로 상쇄되어 리액터의 인덕턴스 값은 존재하지 않으므로 선로에는 변압기자체의 철손과 누설자속만 발생한다. 이는 전력계통 전체에 비하면 미미한 손실이므로 선로에는 임피던스가 없이 1.73[A]의 정상 전류가 도통된다.

그러나 사고 발생 스위치인  $SW_{R-2}$ 로 1선 지락 사고를 발생시켰을 경우 56.48[A]의 사고전류가 발생하였다. 이를 CT가 감지하고 SCR switching control system이 고속 인터럽터에 전원을 투입하였다. 전원이 투입되고 고속 인터럽터의 b접점은 turn-off되어 고속 인터럽터의 b접점과 단락권선을 이루었던 변압기의 2차 회로는 개방되었다. 이로 인해 변압기의 1차, 2차 코일의 자속상쇄의 균형이 깨지게 되고 1차코일의  $\phi_1$ 에 의해 리액터의 인덕턴스 값이 발생하여 선로에는 그림 3-2와 같이 임피던스가 발생한다. 이 임피던스에 의해 사고전류는 사고발생 8.26[msec]이후 6.80[A]로 제한되었다. 식 3.1에 의해 약 87%의 사고 전류 제한율을 산출하였다.

그림 3-3은 1선 지락 사고 시 정상선로(S, T상)의 전압 및 전류 특성을 나타낸 곡선이다. 삼상 일체화된 변압기와 고속 인터럽터의 사용으로 인해 전압이 상승하였으나 정상 동작을 수행하였다.

$$I_L(\text{제한율}) = \frac{I_f(\text{사고 전류}) - I_L(\text{제한 전류})}{I_f(\text{사고 전류})} \times 100 \quad (3.1)$$

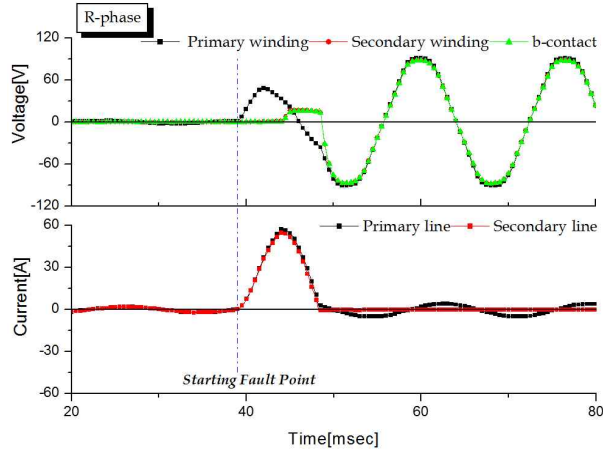


그림 3-1 1선 지락사고 시 사고 선로(R상)의 전압 및 전류 곡선

Fig. 3-1 Voltage and current curves of fault line (R-phase) during a single line-to-ground fault

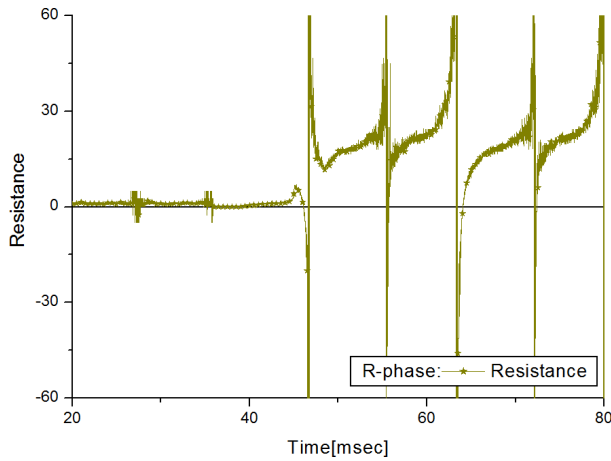


그림 3-2 1선 지락사고 시 사고 선로(R상)의 저항 곡선

Fig. 3-2 Resistance curve of fault line during a single line-to-ground fault (R-phase)

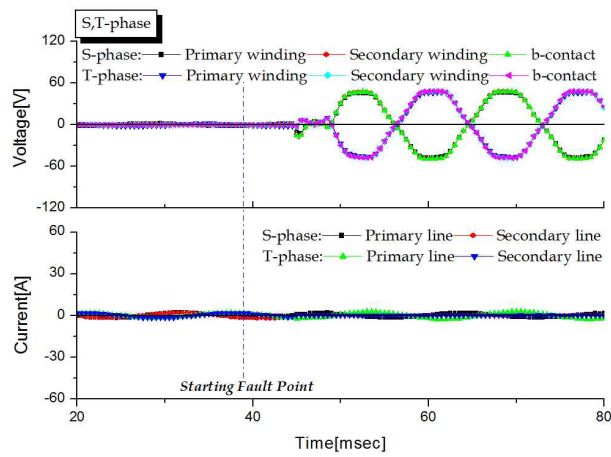


그림 3-3 1선 지락사고 시 정상 선로(S, T상)의 전압 및 전류 곡선  
 Fig. 3-3 Voltage and current curves of normal line (S, T-phase) during a single line-to-ground fault

표 3-1 1선 지락사고 시 각 상의 동작특성

Table 3-1 Operation characteristics of each phase during a single line-to-ground fault

	R상	S상	T상
상태	사고	정상	정상
정상전류( $I_N$ )	1.73A	1.71A	1.70A
사고발생시간	38.98msec	-	-
b접점 turn-off	48.24msec	-	-
사고전류( $I_f$ )	56.48A	-	-
제한전류( $I_L$ )	10.07A	-	-
제한시간	8.26msec	-	-
제한율( $I_L$ )	87%	-	-

## 2. 2선 지락 사고

그림 3-4, 5은 2선 지락 사고 시 사고선로(R, S상)의 전압 및 전류 특성을 나타낸 곡선이다. 1선 지락사고와 마찬가지로  $SW_{R-1}$ ,  $SW_{S-1}$ ,  $SW_{T-1}$ 을 통해 R, S, T상에 전원을 인가하였다. 정상 시에는 변압기의 1차, 2차 코일에서 발생하는 자속이 서로 상쇄됨으로써 각 상의 선로에는 임피던스가 없이 2.46, 3.04, 2.55[A]의 전류가 투입되어 정상동작을 수행하였다. 그러나 사고발생 스위치인  $SW_{R-2}$ ,  $SW_{S-2}$ 로 사고를 발생시켰을 경우 52.14, 51.45[A]의 사고전류가 발생하였다. 이를 CT가 감지하고 SCR switching control system이 고속 인터럽터에 전원을 인가하고 고속 인터럽터는 접점이 변경되어 변압기의 2차 단락권선은 개방되었다. 이로 인해 변압기의 1차, 2차 코일의 자속상쇄가 이루어지지 않고 변압기 1차 코일에서 발생하는  $\phi$ 에 의해 선로에는 임의의 임피던스가 발생한다. 이에 따라 각 상의 사고전류는 사고가 발생하고 8.26, 6.76[msec] 이후에 8.67, 9.96[A]로 제한되었다.

그림 3-6는 사고선로(R, S상)의 저항 특성을 나타낸 곡선이다. 이 역시 정상 시에는 임피던스가 거의 영이지만 사고가 발생하고 변압기의 2차권선이 개방됨과 동시에 임피던스가 발생하였다.

그림 3-7은 2선 지락 사고 시 정상선로(T상)의 전압 및 전류 특성을 나타낸 곡선이다. 각 상의 2차권선이 개방됨과 동시에 전압이 증가하였으나 정상 동작을 수행하였다.

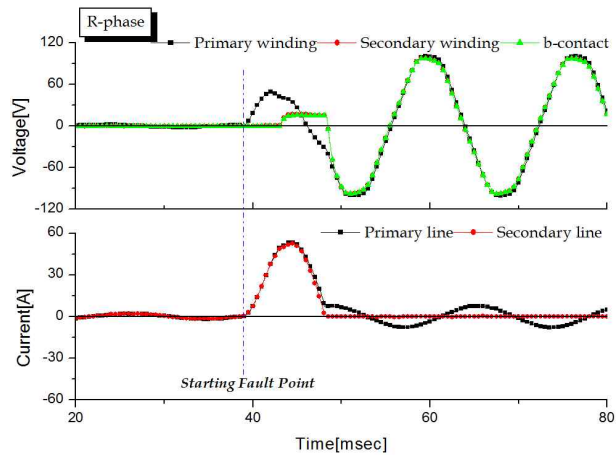


그림 3-4 2선 지락사고 시 사고 선로(R상)의 전압 및 전류 곡선

Fig. 3-4 Voltage and current curves of fault line (R-phase) during a double line-to-ground fault

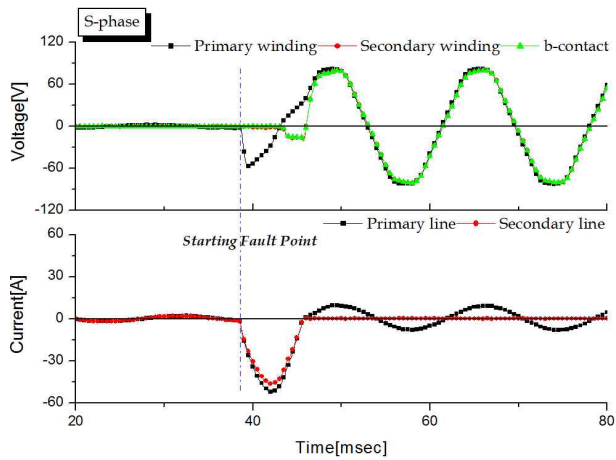


그림 3-5 2선 지락사고 시 사고 선로(S상)의 전압 및 전류 곡선

Fig. 3-5 Voltage and current curves of fault line (S-phase) during a double line-to-ground fault



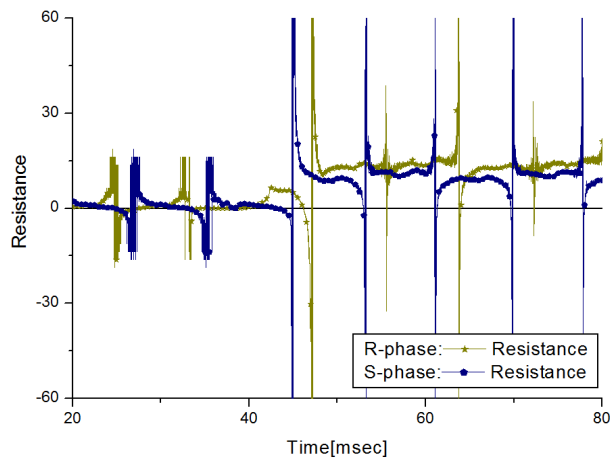


그림 3-6 2선 지락사고 시 사고 선로의 저항 곡선(R, S상)

Fig. 3-6 Resistance curve of fault line during a double line-to-ground fault (S, T-phase)

표 3-2 2선 지락사고 시 각 상의 동작특성

Table 3-2 Operation characteristics of each phase during a double line-to-ground fault

	R상	S상	T상
상태	사고	사고	정상
정상전류( $I_N$ )	2.46A	3.04A	2.55A
사고발생시간	38.98msec	38.98msec	-
b접점 turn-off	48.24msec	45.74msec	-
사고전류( $I_f$ )	52.14A	51.45A	-
제한전류( $I_l$ )	8.67A	9.96A	-
제한시간	8.26msec	6.76msec	-
제한율( $I_L$ )	83%	80%	-

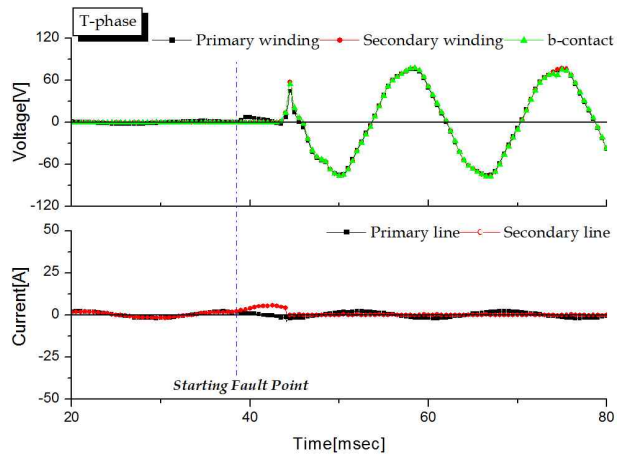


그림 3-7 2선 지락사고 시 정상 선로(T상)의 전압 및 전류 곡선

Fig. 3-7 Voltage and current curves of normal line (T-phase) during a double line-to-ground fault

### 3. 3선 지락 사고

3선 지락 사고는 발생확률은 적지만 발생할 경우 계통 전체에 많은 피해를 가져오게 된다. 그림 3-8, 9, 10은 3선 지락 사고 시 사고 선로(R, S, T상)의 전압 및 전류 특성을 나타낸 곡선이다. 1선, 2선 지락사고와 마찬가지로 정상 시에는 변압기의 1차, 2차 코일에서 발생하는 자속  $\phi_1$ 과  $-\phi_2$ 가 서로 상쇄됨으로써 각 상(R, S, T상)의 선로에는 3.75, 2.46, 2.04[A]의 전류가 손실 없이 유입된다. 그러나 사고발생스위치( $SW_{R-2}$ ,  $SW_{S-2}$ ,  $SW_{T-2}$ )로 사고를 발생시켰을 경우 53.55, 51.44, 44.04[A]의 사고전류가 발생하였다. 이를 CT가 감지하고 SCR switching control system이 고속 인터럽터에 전원을 인가하자 변압기의 2차 권선은 개방되었다. 이로 인해 1차, 2차 코일의 자속상쇄가 이루어지지 않고 변압기의 1차 코일에 의해 선로에는 임의의 임피던스가 발생한다. 이 임피던스에 의해 사고전류는 12.77, 14.88, 22.75[A]로 제한되었다. 이에 따라 사고전류는 사고가 발생하고 9.07, 6.47, 12.74[msec]이후에 제한되었다.

그림 3-11는 사고 선로(R, S, T상)의 저항 특성을 나타낸 곡선이다. 마찬가지로 고속 인터럽터의 b접점이 turn-off됨과 동시에 임피던스가 발생하였다.

표 3-3 3선 지락사고 시 각 상의 동작특성

Table 3-3 Operation characteristics of each phase during a triple line-to-ground fault

	R상	S상	T상
상태	사고	사고	사고
정상전류( $I_N$ )	3.75A	2.46A	2.04A
사고발생시간	38.91msec	38.91msec	38.91msec
b접점 turn-off	47.97msec	45.38msec	51.65msec
사고전류( $I_f$ )	53.55A	51.44A	44.04A
제한전류( $I_l$ )	12.77A	14.88A	22.75A
제한시간	9.07msec	6.47msec	12.74msec
제한율( $I_L$ )	76%	71%	48%

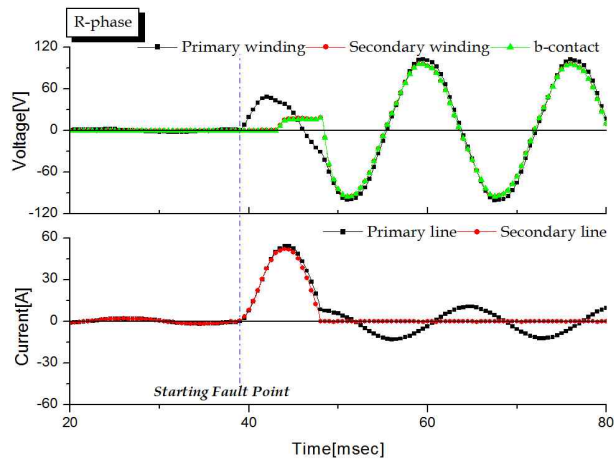


그림 3-8 3선 지락사고 시 사고선로(R상)의 전압 및 전류 곡선  
 Fig. 3-8 Voltage and current curves of fault line (R-phase) during a triple line-to-ground fault

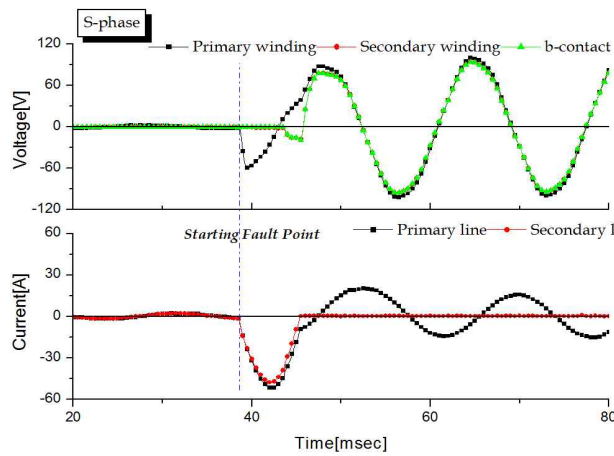


그림 3-9 3선 지락사고 시 사고선로(S상)의 전압 및 전류 곡선  
 Fig. 3-9 Voltage and current curves of fault line (S-phase) during a triple line-to-ground fault

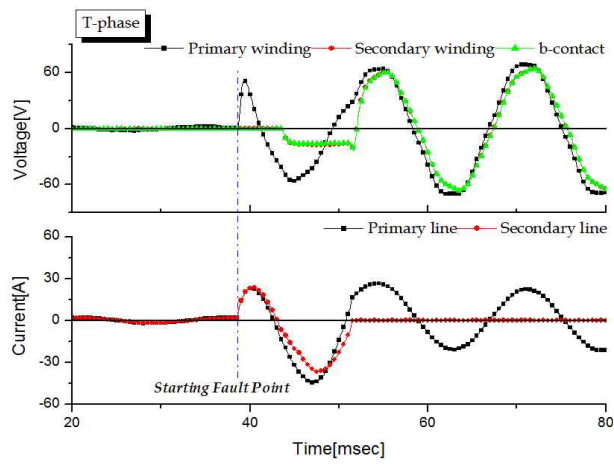


그림 3-10 3선 지락사고 시 사고선로(T상)의 전압 및 전류 곡선  
 Fig. 3-10 Voltage and current curves of fault line (T-phase) during a triple line-to-ground fault

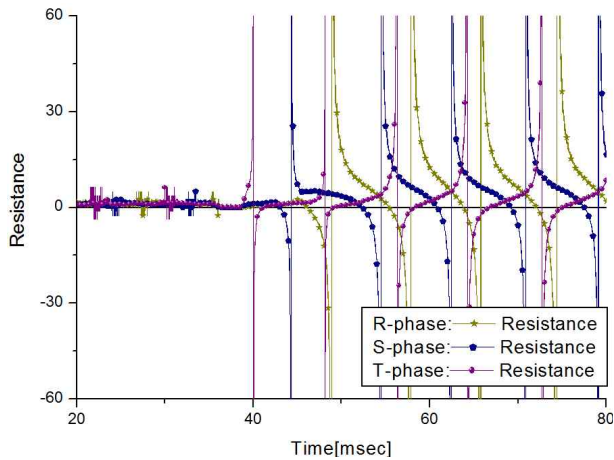


그림 3-11 3선 지락사고 시 사고선로의 저항 곡선 (R, S, T상)  
 Fig. 3-11 Resistance curve of fault line during a triple line-to-ground fault (R, S, T-phase)

#### 4. 2선 단락 사고

그림 3-12, 13은 2선 단락 사고 시 사고 선로(R, S상)의 전압 및 전류 특성을 나타낸 곡선이다. 1선, 2선, 3선 지락 사고와 마찬가지로 정상 시에는 자속상쇄가 일어나 손실 없이 각 상에 전류가 유입된다. 그러나  $SW_{R-2}$ ,  $SW_{S-2}$ 로 사고를 발생시키면 고속 인터럽터의 b접점은 turn-off 되고 변압기의 2차 단락권선은 개방된다. 이로 인해 변압기 1차 코일의  $\Phi_1$ 을 상쇄시키던  $-\Phi_2$ 가 사라지면서 임의의 임피던스가 발생해 사고전류를 4.45, 1.05[A]로 제한한다.

그림 3-14는 사고 선로의(R, S상)의 저항곡선이다. 고속 인터럽터의 b접점이 turn-off 됨과 동시에 임피던스가 발생하였다.

그림 3-15는 정상 선로(T상)의 전압 및 전류 특성이다. 지락사고와 마찬가지로 전압은 상승하였으나 안정적인 동작을 수행하였다.

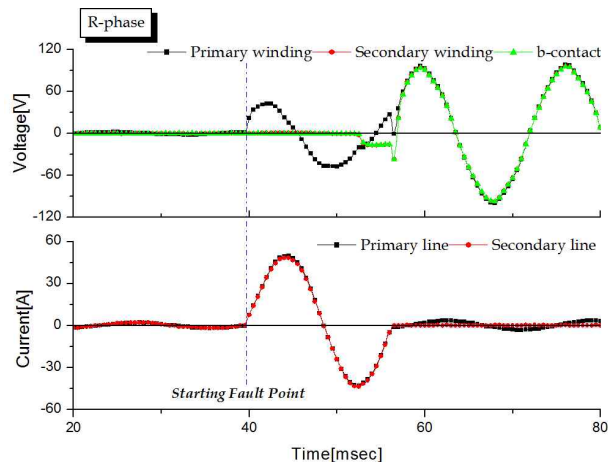


그림 3-12 2선 단락사고 시 사고 선로(R상)의 전압 및 전류 곡선

Fig. 3-12 Voltage and current curves of fault line (R-phase) during a double line-to-line fault

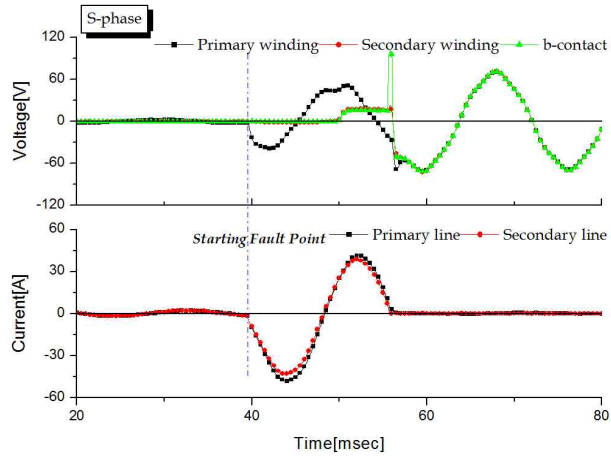


그림 3-13 2선 단락사고 시 사고 선로(S상)의 전압 및 전류 곡선  
 Fig. 3-13 Voltage and current curves of fault line (S-phase) during a double line-to-line fault

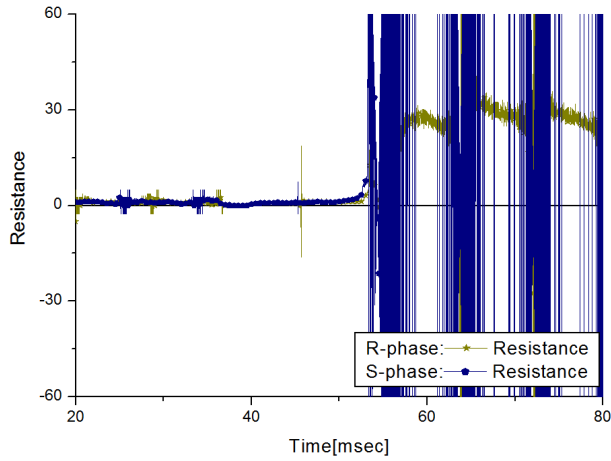


그림 3-14 2선 단락사고 시 사고 선로의 저항 곡선 (R, S상)  
 Fig. 3-14 Resistance curve of fault line during a double line-to-line fault (R, S-phase)

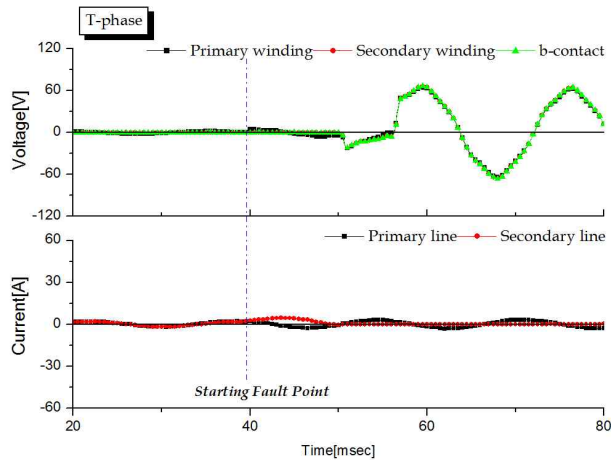


그림 3-15 2선 단락사고 시 정상 선로(T상)의 전압 및 전류 곡선

Fig. 3-15 Voltage and current curves of normal line (T-phase) during a double line-to-line fault

표 3-4 2선 단락사고 시 각 상의 동작 특성

Table 3-4 Operation characteristics of each phase during a double line-to-line fault

	R상	S상	T상
상태	사고	사고	정상
정상전류( $I_N$ )	3.04A	2.03A	2.48A
사고발생시간	39.54msec	39.54msec	-
b접점 turn-off	56.25msec	56.11msec	-
사고전류( $I_f$ )	48.75A	48.75A	-
제한전류( $I_l$ )	4.45A	1.05A	-
제한시간	16.71msec	16.57msec	-
제한율( $I_L$ )	90%	97%	-



### 5. 3선 단락 사고

그림 3-16, 17, 18은 3선 단락 사고 시 사고 선로(R, S, T상)의 전압 및 전류 특성을 나타낸 곡선이고 그림 3-19는 사고선로(R, S, T상)의 저항 특성을 나타낸 곡선이다. 앞에서 언급한 사고들과 마찬가지로 정상 시에는 임피던스가 없이 각 상에 전류가 유입되다가 사고가 발생하면 고속 인터럽터의 접점이 변경되어 변압기의 2차 단락권선이 개방된다. 이로 인해 자속상쇄가 이루어지지 않고 변압기 1차 코일의 인덕턴스에 의해 발생한 임피던스가 각 상의 사고전류를 제한한다.

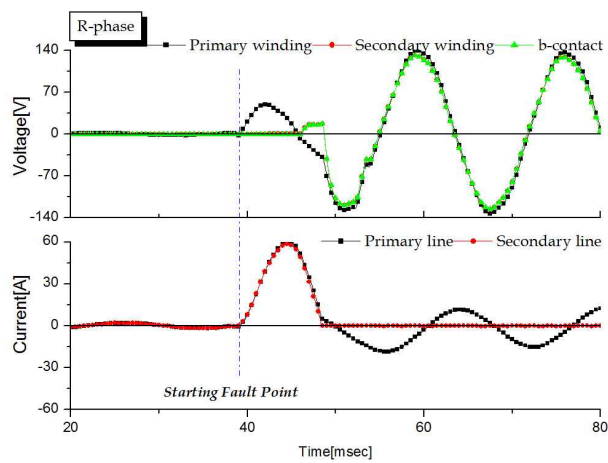


그림 3-16 3선 단락사고 시 사고 선로(R상)의 전압 및 전류 곡선

Fig. 3-16 Voltage and current curves of fault line (R-phase) during a triple line-to-line fault

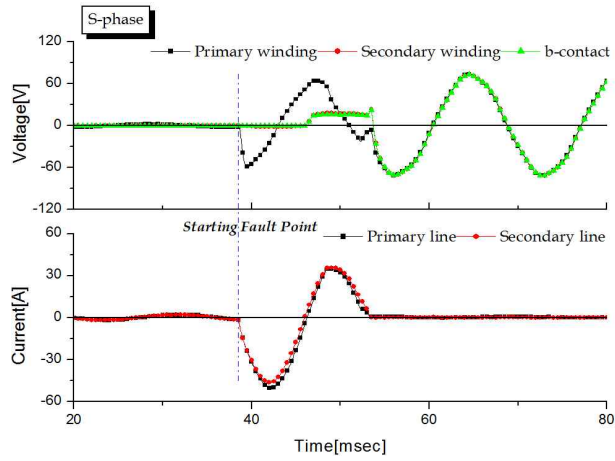


그림 3-17 3선 단락사고 시 사고 선로(S상)의 전압 및 전류 곡선

Fig. 3-17 Voltage and current curves of fault line (S-phase) during a triple line-to-line fault

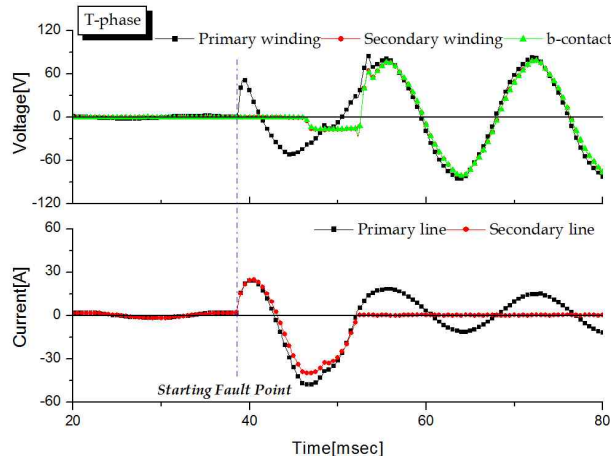


그림 3-18 3선 단락사고 시 사고 선로(T상)의 전압 및 전류 곡선

Fig. 3-18 Voltage and current curves of fault line (T-phase) during a triple line-to-line fault

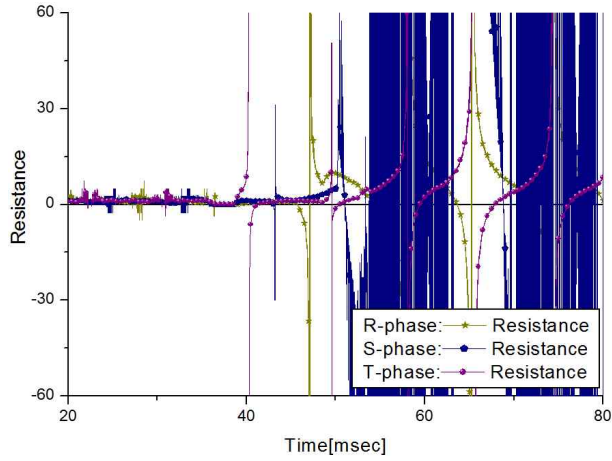


그림 3-19 3선 단락사고 시 사고 선로의 저항 곡선 (R, S, T상)

Fig. 3-19 Resistance curve of fault line during a triple line-to-line fault (R, S, T-phase)

표 3-5 3선 단락사고 시 각 상의 사고전류제한특성

Table 3-5 Operation characteristics of each phase during a triple line-to-line fault

	R상	S상	T상
상태	사고	사고	사고
정상전류( $I_N$ )	2.46A	1.75A	3.04A
사고발생시간	39.18msec	39.18msec	39.18msec
b접점 turn-off	48.45msec	53.25msec	52.27msec
사고전류( $I_f$ )	58.35A	49.45A	47.34A
제한전류( $I_i$ )	11.36A	1.05A	12.07A
제한시간	9.27msec	14.07msec	13.09msec
제한율( $I_L$ )	97%	97%	74%

## B. 전압증가별 동작 특성

본 실험에서는 각 사고 유형별로 인가전압을 360[V]까지 증가시켜 자속상쇄형 고속도 한류기의 사고전류제한특성을 분석하였다.

표 3-6은 1선 지락사고 시 전압증가에 따른 사고전류의 제한 특성을 나타내었다. 앞에서 언급한 식(3.1)에 의해 사고전류 제한율을 산출하여 그림 3-20과 같이 그래프로 나타내었다. 전압이 증가함에 따라 사고전류 제한율이 감소하였으나 평균 63%의 제한율을 유지하였다.

표 3-7은 2선 지락사고 시 전압증가에 따른 자속상쇄형 고속도 한류기의 사고전류제한 특성을 나타내었고 식(3.1)에 의해 사고전류 제한율을 그림 3-21과 같이 나타내었다. 사고 상인 R, S상 모두 사고전류를 평균 67%이내로 제한하였다.

표 3-8, 9, 10, 그림 3-22, 23, 24은 3선 지락 및 2선, 3선 단락 사고 시 전압증가에 따른 사고전류 제한특성 및 제한율이다. 1선, 2선 지락사고와 마찬가지로 각각 평균 70%, 60%, 55%의 사고전류 제한율을 확보하였다.

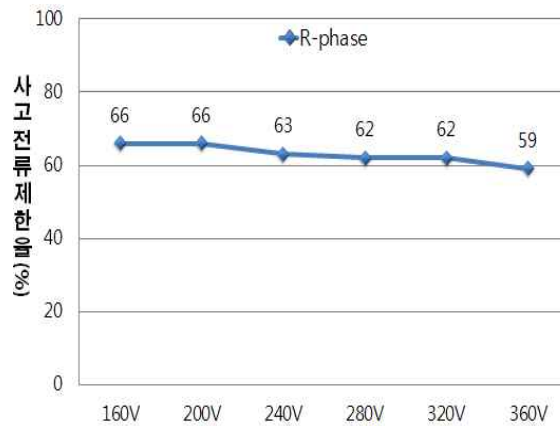


그림 3-20 1선 지락사고 시 전압증가에 따른 자속상쇄형 고속도 한류기의 사고전류 제한율

Fig. 3-20 Fault current limiting-rate of flux-offset type FCLs according to applied voltage during a single line-to-ground fault

표 3-6 1선 지락 사고 시 전압증가에 따른 자속상쇄형 고속도 한류기의 사고전류제한 특성

Table 3-6 Fault current limiting characteristics of flux-offset type FCLs according to applied voltage during a single line-to-ground fault

인가전압[V]	사고전류[A]			제한전류[A]		
	R상	S상	T상	R상	S상	T상
160V	71.32	-	-	24.33	-	-
200V	90.48	-	-	31.21	-	-
240V	107.47	-	-	40.57	-	-
280V	122.12	-	-	46.22	-	-
320V	141.54	-	-	54.03	-	-
360V	157.72	-	-	64.53	-	-

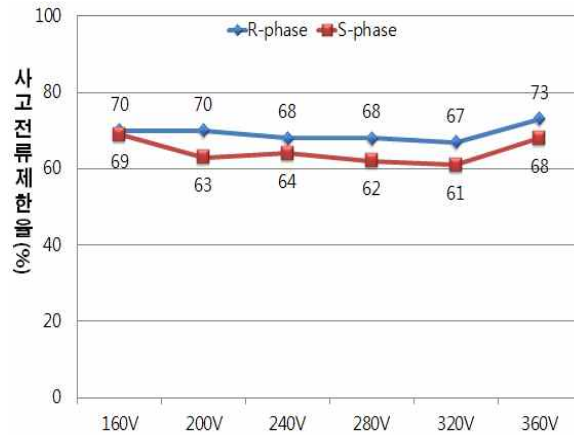


그림 3-21 2선 지락사고 시 전압증가에 따른 자속상쇄형 고속도 한류기의 사고전류 제한율

Fig. 3-21 Fault current limiting-rate of flux-offset type FCLs according to applied voltage during a double line-to-ground fault

표 3-7 2선 지락 사고 시 전압증가에 따른 자속상쇄형 고속도 한류기의 사고전류제한특성

Table 3-7 Fault current limiting characteristics of flux-offset type FCLs according to applied voltage during a double line-to-ground fault

인가전압[V]	사고전류[A]			제한전류[A]		
	R상	S상	T상	R상	S상	T상
160V	73.82	47.73	-	22.07	14.62	-
200V	93.78	61.11	-	28.27	22.67	-
240V	112.55	73.90	-	35.61	26.54	-
280V	126.97	84.30	-	40.47	31.87	-
320V	146.47	99.69	-	48.90	38.75	-
360V	166.46	114.71	-	44.81	36.86	-

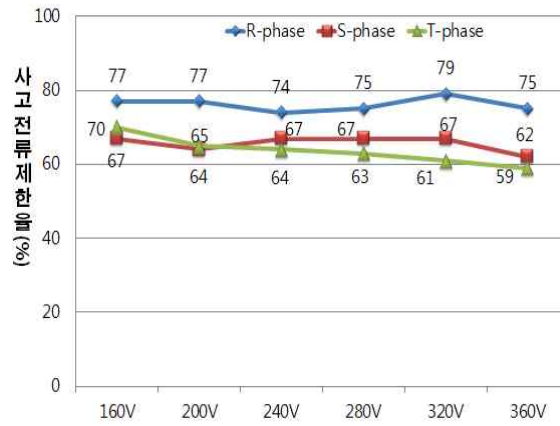


그림 3-22 3선 지락사고 시 전압증가에 따른 자속상쇄형 고속도 한류기의 사고전류 제한율

Fig. 3-22 Fault current limiting-rate of flux-offset type FCLs according to applied voltage during a triple line-to-ground fault

표 3-8 3선 지락 사고 시 전압증가에 따른 자속상쇄형 고속도 한류기의 사고전류제한특성

Table 3-8 Fault current limiting characteristics of flux-offset type FCLs according to applied voltage during a triple line-to-ground fault

인가전압[V]	사고전류[A]			제한전류[A]		
	R상	S상	T상	R상	S상	T상
160V	69.76	48.31	51.20	15.94	15.73	15.54
200V	88.82	60.84	65.10	20.50	21.77	22.84
240V	108.02	74.44	73.73	27.55	24.43	26.84
280V	122.19	86.73	83.81	30.54	28.55	31.39
320V	142.00	99.43	97.31	30.48	33.04	37.73
360V	158.52	114.09	108.62	38.98	42.95	44.19

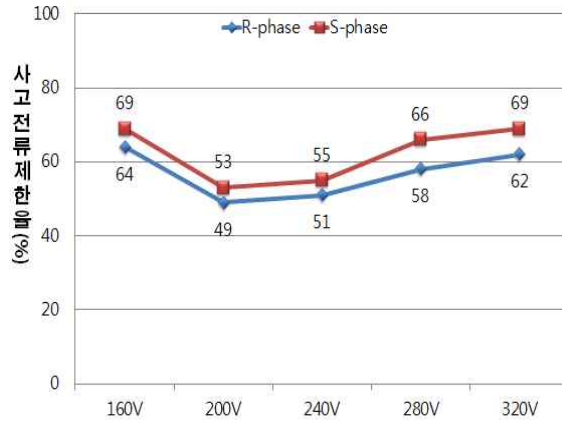


그림 3-23 2선 단락사고 시 전압증가에 따른 자속상쇄형 고속도 한류기의 사고전류 제한율

Fig. 3-23 Fault current limiting-rate of flux-offset type FCLs according to applied voltage during a double line-to-line fault

3-9 2선 단락 사고 시 전압증가에 따른 자속상쇄형 고속도 한류기의 사고전류제한특성

Table 3-9 Fault current limiting characteristics of flux-offset type FCLs according to applied voltage during a double line-to-line fault

인가전압[V]	사고전류[A]			제한전류[A]		
	R상	S상	T상	R상	S상	T상
160V	52.04	48.71	-	18.52	14.96	-
200V	66.36	61.32	-	33.53	28.73	-
240V	79.83	75.10	-	39.08	33.56	-
280V	91.73	86.13	-	48.00	38.65	-
320V	106.20	98.70	-	40.68	33.18	-



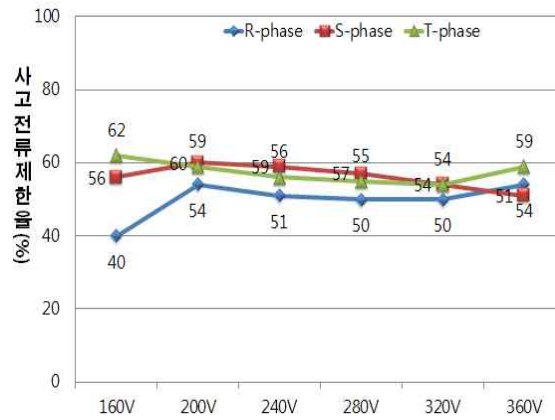


그림 3-24 3선 단락사고 시 전압증가에 따른 자속상쇄형 고속도 한류기의 사고전류 제한율

Fig. 3-24 Fault current limiting-rate of flux-offset type FCLs according to applied voltage during a triple line-to-line fault

표 3-10 3선 단락 사고 시 전압증가에 따른 자속상쇄형 고속도 한류기의 사고전류제한특성

Table 3-10 Fault current limiting characteristics of flux-offset type FCLs according to applied voltage during a triple line-to-line fault

인가전압[V]	사고전류[A]			제한전류[A]		
	R상	S상	T상	R상	S상	T상
160V	67.32	47.82	51.70	40.27	21.06	19.86
200V	85.56	61.53	64.02	38.54	24.22	26.25
240V	102.41	75.01	75.39	49.45	30.53	33.44
280V	116.46	84.30	86.95	45.60	36.49	39.15
320V	134.31	98.37	102.00	66.54	45.60	47.19
360V	152.40	113.78	110.43	68.94	55.73	52.93

## C. 자속상쇄형 고속도 한류기의 동작 신뢰성 확보

앞에서 실행한 사고유형별, 전압증가에 따른 실험을 통해 자속상쇄형 고속도 한류기의 안정적인 사고전류제한 특성을 분석하였다. 이에 덧붙여 실 계통에 적용될 한류기술로써의 동작 신뢰성을 확보하기 위해 현재 전력계통에서 우위를 선점하고 있는 초전도 한류기와 동작특성을 비교하였다. 본 실험에서는 변압기 타입의 초전도 한류기를 비교 군으로 선정하였다.

### 1. 변압기형 초전도 한류기 회로도 설계 및 동작 특성

#### a. 변압기형 초전도 한류기 회로도 설계 및 실험 설계

변압기형 초전도 한류기는 기존에 본 연구팀이 연구한 초전도를 이용한 한류기 기술로써 전력계통용 변압기의 3차 권선에 초전도체를 적용한 구조이다. 저항형 초전도 한류기에 비해 전력계통과 초전도체에 변압기를 적용하여 연결함으로써 초전도체에 가해지는 직접적인 부담을 감소시켰다. 초전도체는 임계값 이하에서는 임피던스가 영이지만 임계값 이상의 전류가 유입될 경우 quench되어 임의의 임피던스를 발생시킨다. 초전도 한류기는 이러한 초전도체의 영 저항 특성을 응용한 한류기술이다.

그림 3-25는 변압기형 초전도 한류기의 실험 회로도이다.  $SW_{R-1}$ ,  $SW_{S-1}$ ,  $SW_{T-1}$ 은 전원 인가 스위치이고  $SW_{R-2}$ ,  $SW_{S-2}$ ,  $SW_{T-2}$ 는 모의 사고 발생 스위치이다. 사고 발생 시 사고전류를 감지하고 사고 여부를 판단하기 위해 변압기의 2차 권선에 CT(Current Transformer)와 SCR switching control system을 설치하였다. 초전도체는 변압기의 3차 권선에 적용하였다. 표 3-11은 실험에 사용된 초전도체의 사양이다.

자속상쇄형 고속도 한류기와 마찬가지로 삼상 일체형 변압기를 사용하여 삼상(R, S, T상)계통으로 구성하였다. 현재 계통에서 가장 빈번하게 발생하는 1선 지락 사고를 발생시켜 동작특성을 비교·분석하였다. 인가전압은 120[V]이다.

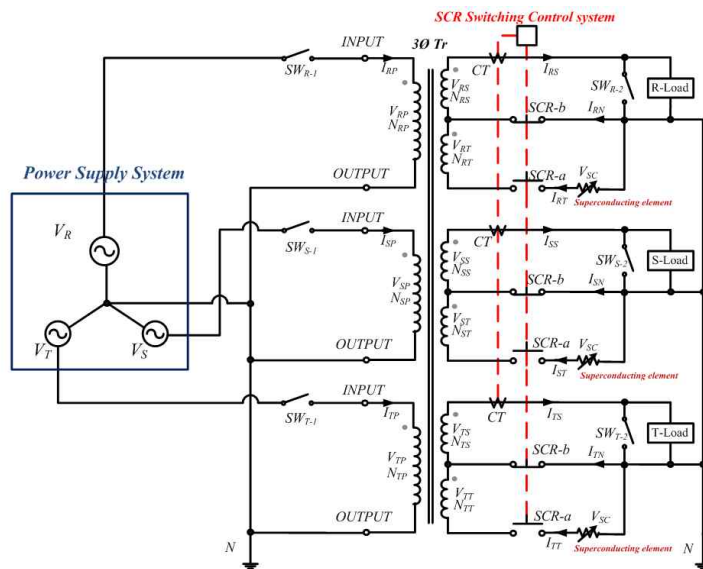
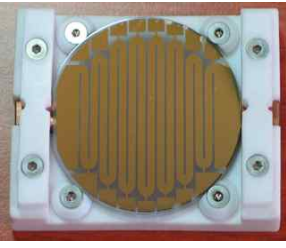


그림 3-25 변압기형 초전도 한류기 실험회로도

Fig. 3-25 Experimental circuit of a transformer-type SFCL

표 3-11 초전도체의 사양

Table 3-11 Specification of a superconductor

항 목	값	단 위
	소자직경	2 inch
	스트립폭	2 mm
	전체길이	540 mm
	YBCO층 두께	0.3 m
	Au층 두께	0.1~0.2 m

### b. 변압기형 초전도 한류기의 동작 메커니즘

전원인가 스위치를 통해 각 상에 전원을 인가하면 그림 3-26(a)와 같이 전류는 변압기의 2차 권선과 중성선을 통해 정상적으로 도통된다. 그러나 그림 3-26(b)와 같이 사고를 발생시켰을 경우 변압기의 2차 권선에 적용된 CT와 SCR switching control system이 감지하고 판단하여 SCR-a, b에 전원을 투입한다. SCR은 turn-on 동작은 바로 수행하지만 turn-off 동작은 선로에 흐르는 전류가 유지전류 이하일 경우 수행된다. 그러므로 SCR-a는 사고발생과 동시에 turn-on 동작을 수행하지만 SCR-b는 SCR-a가 turn-on되어 전류가 3차 권선으로 흐르는 순간 중성선에 흐르는 전류는 급감하므로 SCR-a가 turn-on 동작을 수행한 이후에 turn-off 동작을 수행한다. 그러므로 전원이 투입되고 SCR-a, b가 turn-on, off 동작을 수행하면 사고전류는 초전도체가 적용된 3차 권선으로만 유입되고 이로 인해 초전도체가 quench되어 사고전류를 제한한다.

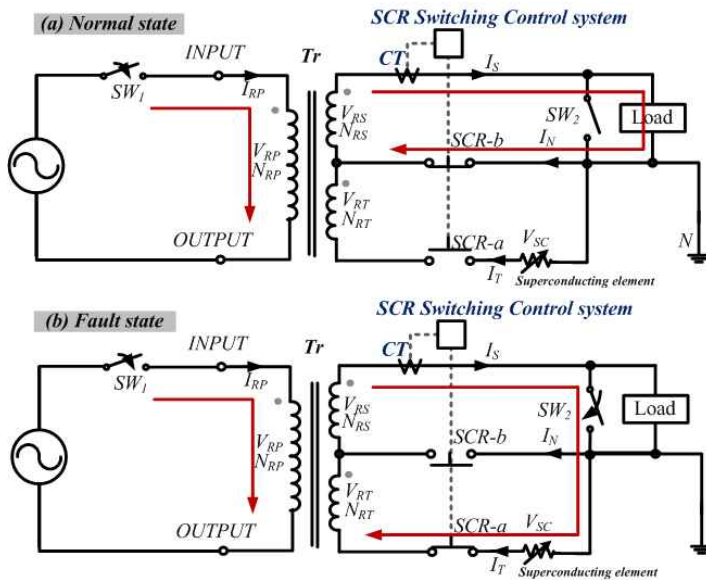


그림 3-26 변압기형 초전도 한류기 동작 메커니즘

Fig. 3-26 Operation mechanism of a transformer-type SFCL

### c. 1선 지락 사고

그림 3-27은 변압기형 초전도 한류기의 1선 지락 사고 시 사고선로(R상)의 전압 및 전류 특성을 나타낸 곡선이다.  $SW_{R-2}$ 로 사고를 발생시키자 사고전류를 CT가 감지하여 SCR switching control system이 SCR에 전원을 인가하였다. 전원이 인가됨과 동시에 SCR-a는 turn-on 동작을 수행하고, SCR-b는 반주기 이후에 turn-off 동작을 수행한다. 이로 인해 사고가 발생하고 10.64[msec]이후에 사고전류는 선로가 변경되어 3차 권선으로만 유입되고 초전도체가 quench되어 63.79[A]의 사고전류는 10.07[A]로 제한된다.

그림 3-28은 정상 선로(S, T상)의 전압 및 전류 특성이다. 삼상 일체화된 변압기 사용으로 인해 전류가 약간 증가하였으나 1/2주기 이내 정상 동작을 수행하였다.

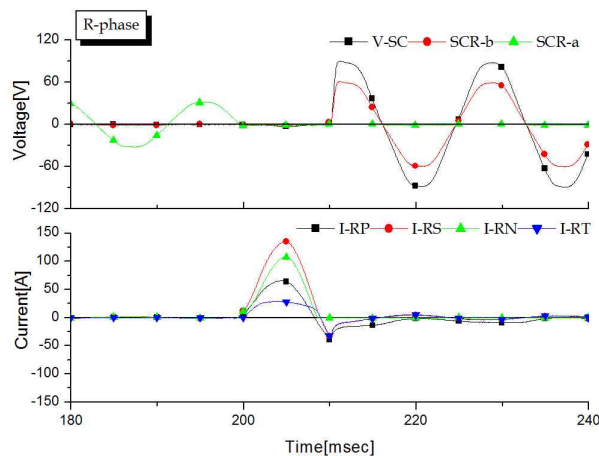


그림 3-27 1선 지락사고 시 사고선로(R상)의 전압 및 전류 특성

Fig. 3-27 Voltage and current characteristics of fault line (R-phase) during a single line-to-ground fault

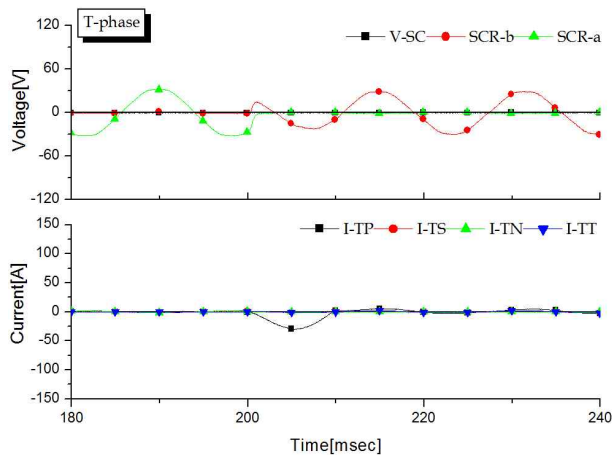
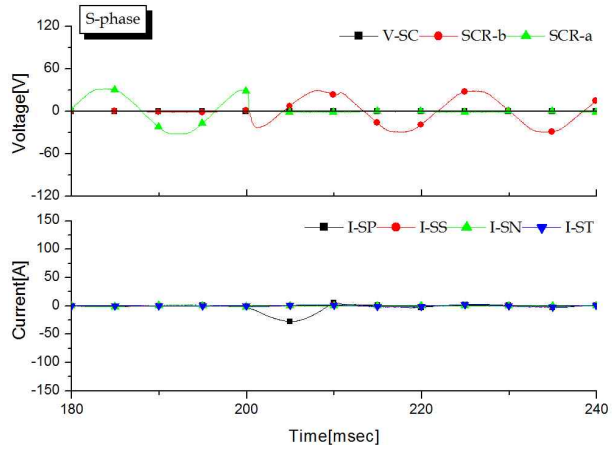


그림 3-28 1선 지락사고 시 정상 선로(S, T상)의 전압 및 전류 특성  
 Fig. 3-28 Voltage and current characteristics of normal line (S, T phase)  
 during a single line-to-ground fault

## 2. 자속상쇄형 고속도 한류기와 변압기형 초전도 한류기의 동작 특성 비교

자속상쇄형 고속도 한류기는 사고전류를 제한하기 위해 변압기의 1차, 2차 코일의 자속상쇄 원리를 응용하였고 기계적 접점인 고속 인터럽터를 적용하여 회로를 구성하였다. 반면, 변압기형 초전도 한류기는 변압기의 3차 권선에 초전도체를 적용하여 초전도체의 quench 특성을 이용해 사고전류를 제한하였고 전력용 반도체 소자인 SCR을 적용하여 회로를 구성하였다. 표 3-12는 1선 지락 사고 시 변압기형 초전도 한류기와 자속상쇄형 고속도 한류기의 동작특성을 비교하여 나타내었다. 두 가지 형태의 한류기 모두 안정적으로 사고전류를 제한하였다. 그러나 고속 인터럽터를 적용한 자속상쇄형 고속도 한류기가 기계적 접점 사용을 사용함으로써 스위칭 동작 시 time delay가 발생하지 않아 사고전류를 더욱 빠른 시간 내에 제한시켰다.

표 3-12 변압기형 초전도 한류기와 자속상쇄형 고속도 한류기의 제한 특성 비교  
Table 3-12 Comparison of the fault current limitation characteristics between transformer-type SFCLs and flux-offset type FCLs

	변압기형 초전도 한류기	자속상쇄형 고속도 한류기
인가전압	120V	
발생사고	A Single line-to-ground	
사고전류( $I_f$ )	63.79A	56.48A
제한전류( $I_L$ )	10.07A	6.80A
제한시간	10.64msec	8.26msec
제한율( $I_L$ )	84%	87%

## V. 결 론

본 논문에서는 점점 증가하는 고장전류를 제한하는 한류기술로써 자속상쇄형 고속도 한류기를 제안하였다. 자속상쇄형 고속도 한류기는 변압기와 고속 인터럽터를 융합한 기기로서 변압기의 1차, 2차 코일의 자속상쇄를 이용한 한류기술이다. 변압기의 1차, 2차 코일의 권수비를 같게 설정한 뒤 변압기의 1차 권선에는 부하를 연결하고 2차 권선에는 고속 인터럽터의 b접점을 적용하여 단락회로를 구성하였다. 실제 송·배전 계통과 같게 구성한 뒤 1, 2, 3선 지락 및 단락 사고를 발생시켜 동작 특성을 분석하고 인가전압에 따른 동작 특성을 분석하였다. 또한, 본 논문에서 제안하는 한류기의 동작 및 제한성능의 신뢰성을 확보하기 위해 변압기형 초전도 한류기와 비교·분석하였다. 실험결과, 정상 시 변압기의 1, 2차 코일에서 발생하는 자속이 서로 상쇄되어 선로에는 변압기 자체의 미미한 누설자속 및 철손만 존재하므로 거의 임피던스가 없이 동작하였다. 그러나 사고가 발생했을 경우 변압기 2차 권선의 단락회로가 개방되어 자속상쇄가 일어나지 않으므로 선로에는 변압기 1차 코일의 리액턴스에 의해 임피던스가 발생하여 사고전류를 제한하는 것을 확인하였다.

먼저, 1선, 2선, 3선 지락 및 단락사고 시 동작특성을 분석한 결과, 기존 전력용 차단기의 차단 동작 시간(5~8cycle)에 비해 평균 11msec(1cycle 이내)로 훨씬 빠르게 사고전류를 제한하였고, 1선, 2선 지락 및 단락 사고의 경우 사고가 발생하는 시점, 정상 상의 전압파형의 일그러짐이 나타났다. 이는 삼상(R, S, T-phase)이 하나의 철심에 연결되어 있는 삼상 일체형 변압기 사용으로 인해 사고 상에서 발생하는 자속이 사고가 발생하지 않은 건전 상에 영향을 끼치기 때문이다.

다음으로, 인가전압을 120V에서 360V까지 증가시켜 동작특성을 분석한 결과, 각각의 사고유형별로 평균 60% 이상의 사고전류 제한율을 확보하였다. 또한, 사고전류의 크기는 변압기의 코일 임피던스와 반비례하므로 사고를 발생시켰을 때 코일의 권수를 조정함으로써 사고전류의 크기를 제한할 수 있다는 것을 확인하였다.



마지막으로, 변압기형 초전도 한류기와 동작특성을 비교 분석한 결과, 자속상쇄형 고속도 한류기는 변압기형 초전도 한류기와 흡사한 사고전류 제한율을 확보하였다. 더하여 전기적 접점이 아닌 기계적 접점을 사용함으로써 time delay가 발생하지 않아 사고전류제한 동작시간이 단축 되는 것을 확인하였다.

본 논문에서 모의·비교실험을 통해 분석한 결과를 바탕으로 자속상쇄형 고속도 한류기는 다양한 사고에서 안정적으로 사고전류를 제한하고 변압기형 초전도 한류기와 거의 비슷한 사고전류 제한율을 가지면서 제한동작 시간은 더욱 단축시키므로 실 계통에 적용될 경우 경제성, 동작 신뢰성 면에서 기존에 제시된 한류기에 비해 장점을 가질 것으로 판단된다. 다만, 본 논문에서는 실 계통의 인가전압에 비해 극히 낮은 저 전압으로 실험하여 분석한 결과이므로 실용화를 시키기 위해서는 현 계통의 전압과 같은 고전압을 인가하여 안정적인 동작특성을 확보하는 추가 연구가 필요하다고 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. S. Choi, H. R. Kim, O. B. Hyun and S. J. Kim, "Quench properties of Y-Ba-Cu-O films after overpowering quenches", IEEE Trans. Appl Supercond, vol.11, no.2, pp.2418-2421, 2001.
  
- [2] H. W. Choi, H. S. Choi, B. I. Jung, "Operational Characteristics of the High-speed Interrupter for Reliability Enhancement of Power Supply and Demand", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol.62, no.1, pp.143-148, 2013.
  
- [3] I. S. Jeong, H. S. Choi, B. I. Jung, "The Operational Characteristics of High-speed Interrupter by Fault Types", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol.62, no.2, pp.278-283, 2013.
  
- [4] I. G. Im, H. S. Choi, B. I. Jung, "Characteristics of a FCL Applying Fast Interrupter According to the Current Limitation Elements", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol.61, no.11, pp.1752-1757, 2012.
  
- [5] B. I. Jung, "A Study on Characteristics of High-Speed Fault Current Limiter using a Solenoid", Doctor degree of graduate school, Chosun University : Dept. of Electrical Engineering, 2013.
  
- [6] I. G. Im, H. S. Choi, B. I. Jung, I. S. Jeong, H. W. Choi, "Analysis on Fault Current Limiting Characteristics of Three-phase FCL using high-speed

interrupter”, 한국조명·전기설비학회 추계학술대회 논문집, vol.2012, no.10, pp. 214-215, 2012.

[7] I. S. Jeong, H. S. Choi, B. I. Jung, I. G. Im, H. W. Choi, M. S. Kang “Contact operating characteristics of the high-speed interrupter corresponding to the voltage size in the event of an accident”, 한국조명·전기설비학회 학술대회 논문집, vol.2013, no.5, pp. 236-237, 2013.

[8] J. S. Kim, S. H. Lim, J. C. Kim, “Study on Protective coordination of a Flux-Lock Type SFCL with Over-Current Relay”, IEEE Trans. Appl. Superconduct, vol.20, no.3, pp.1159-1163, 2010.

[9] M. H. Kim, J. S. Kim, S. H. Lim, J. C. Kim, “Analysis on Application of SFCL in Power Distribution System with Distributed Generator for keep the protect coordination”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol.61, no.9, pp.1226-1231, 2012.

[10] K. H. Ha, S. G. Choi, Y. S. Cho, H. S. Choi, “Operational operations of Flux-Coupling Type SFCL Using Integrated Three Phase Transformer Under Transient State”, IEEE Trans, vol.22, no.3, pp.5601604, 2012.

[11] M. H. Kim, J. S. Kim, S. H. Lim, J. C. Kim, “분산전원이 도입된 배전계통에 초진도 한류기 적용시 계통보호 시스템의 영향에 관한 연구”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol.61, no.9, pp.1226-1231, 2012.

[12] 지식경제부, “제6차 전력수급기본계획”, 2013.

- [13] J. S. Kang, "A Study on solid state fault current limiter based on magnetic turn-off principle", Graduate School, Yonsei University : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, 2012.
- [14] T. Y. Lee, "자계소호 원리를 활용한 고장전류제한기에 관한 연구", Graduate School, Yonsei University : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, 2013.
- [15] J. Lee, H. H. Lim, J. J. Song, J. H. Kim, B. S. Han, "Characteristic of Magnetic Shielding Type High-Tc Superconducting Fault Current Limiter Using Magnetization Curve of Iron Core", 한국전기전자재료학회 하계학술대회 논문집, pp.511-514, 2002.
- [16] J. Lee, H. H. Lim, H. G. Kang, S. C. Ko, B. S. Han, "The Study on current limiting characteristics analysis of magnetic shielding type fault current limiter", Progress in Superconductivity, vol.3, no.2, pp.235-240, 2002.
- [17] J. S. Kim, J. F. Moon, S. H. Lim, J. C. Kim, "Study on Selection of SFCL's Impedance for Protective coordination with Over current Relay in a Distribution System", IEEE T&D Conference and Exhibition, pp.1-4, 2009.
- [18] 현옥배, "초전도 한류기 개발과 활용 전망", 대한전기학회, vol.59, no.10, pp.26-30, 2010.
- [19] Byung-Ik Jung, Hyo-Sang Choi, Yong-Cun Cho, Kyung-Hun Ha, Sung-Pil Go, "Transient characteristics of flux-coupling type SFCL according to fault type", KIEE Trans, vol.2011, no.7, pp.154-2155, 2011.