

2012年 2月  
碩士學位論文

고장유형에 따른 변압기형  
초전도 한류기의 동작특성

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

崔洙根

2012年  
2月  
碩士學位論文

변압기  
유형에 따른  
초전도  
한류기의  
동작특성

崔  
洙  
根

고장유형에 따른 변압기형  
초전도 한류기의 동작특성

Operation Characteristics of Transformer-type  
SFCL Depending on Fault Patterns

2012年 2月 24日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

崔洙根

고장유형에 따른 변압기형  
초전도 한류기의 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

# 崔洙根의 碩士學位 論文을 認准함.

委員長 朝鮮大學校 教授 白亨來 印

委員 朝鮮大學校 教授 李愚宣 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. 변압기 유형에 따른 초전도 한류기의 동작원리 .....	3
A. 3상 일체형 변압기형 초전도 한류기의 구조 및 동작원리 .....	3
B. 3상 분리형 변압기형 초전도 한류기의 구조 및 동작원리 .....	5
III. 3상 변압기 유형에 의한 초전도 한류기의 동작특성 .....	7
A. 실험장치 .....	7
B. 3상 일체형 및 분리형 변압기형 초전도 한류기의 중성선 유무에 따른 사고유형별 동작특성 실험결과 및 고찰 .....	13
1. 중성선 없는 경우 .....	13
a. 1선 지락사고 .....	13
b. 2선 지락사고 .....	21
c. 3선 지락사고 .....	27
2. 중성선 있는 경우 .....	34
a. 1선 지락사고 .....	34
b. 2선 지락사고 .....	39
c. 3선 지락사고 .....	44
V. 결 론 .....	49
참고문헌 .....	51

## List of Tables

Table 3-1 The designed parameters of integrated transformer .....	8
Table 3-2 The designed parameters of separated transformer .....	8
Table 3-3 Critical current value of superconducting units .....	10

## List of Figures

Fig. 2-1 The experimental circuit diagram of integrated three-phase transformer-type SFCL .....	4
Fig. 2-2 Limiting fault current waveforms of integrated three phase transformer-type SFCL when the single line-to-ground fault .....	4
Fig. 2-3 The experimental circuit diagram of separated three phase transformer-type SFCL .....	6
Fig. 2-4 Limiting fault current waveforms of separated three phase transformer-type SFCL when the single line-to-ground fault .....	6
Fig. 3-1 The experimental circuit diagram of three phase transformer-type SFCL .....	7
Fig. 3-2 Shape of integrated transformer .....	9
Fig. 3-3 Shape of separate transformer .....	9
Fig. 3-4 YBCO thin film and its critical current curves .....	11
Fig. 3-5 Reclosing system .....	12
Fig. 3-6 Limiting fault current waveforms of the three phase transformer-type SFCL without a neutral line when the single line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280) .....	15
Fig. 3-7 Recovery waveforms of a superconducting element in the three phase transformer-type SFCL without a neutral line when the single line-to-ground fault generated ((a),(b) = 200V, (c),(d) = 280V) .....	18

Fig. 3-8	Limiting fault current curves according to applied voltage during the single line-to-ground fault .....	20
Fig. 3-9	Recovery time curves according to applied voltage during the single line-to-ground fault .....	20
Fig. 3-10	Limiting fault current waveforms of the three phase transformer-type SFCL without a neutral line when the double line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V) .....	22
Fig. 3-11	Recovery waveforms of a superconducting element in the three phase transformer-type SFCL without a neutral line when the double line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V) .....	24
Fig. 3-12	Limiting fault current curves according to applied voltage during the double line-to-ground fault .....	26
Fig. 3-13	Recovery time curves according to applied voltage during the double line-to-ground fault .....	26
Fig. 3-14	Limiting fault current waveforms of the three phase transformer-type SFCL without a neutral line when the triple line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V) .....	28
Fig. 3-15	Recovery waveforms of a superconducting element in the three phase transformer-type SFCL without a neutral line when the triple line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V) .....	31
Fig. 3-16	Limiting fault current curves according to applied voltage during the triple line-to-ground fault .....	33



Fig. 3-17 Recovery time curves according to applied voltage during the triple line-to-ground fault .....	33
Fig. 3-18 Limiting fault current waveforms of the three phase transformer-type SFCL with a neutral line when the single line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V) .....	35
Fig. 3-19 Recovery waveforms of a superconducting element in the three phase transformer-type SFCL with a neutral line when the single line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V) .....	37
Fig. 3-20 Recovery time curves according to applied voltage during the single line-to-ground fault .....	38
Fig. 3-21 Limiting fault current waveforms of the three phase transformer-type SFCL with a neutral line when the double line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)) .....	40
Fig. 3-22 Recovery waveforms of a superconducting element in the three phase transformer-type SFCL with a neutral line when the double line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V) .....	42
Fig. 3-23 Recovery time curves according to applied voltage during the double line-to-ground fault .....	43
Fig. 3-24 Limiting fault current waveforms of the three phase transformer-type SFCL with a neutral line when the triple line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V) .....	45

Fig. 3-25 Recovery waveforms of a superconducting element in the three phase transformer-type SFCL with a neutral line when the triple line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V) .....	47
Fig. 3-26 Recovery time curves according to applied voltage during the triple line-to-ground fault .....	48

# ABSTRACT

## Operation Characteristics of Transformer-type SFCL Depending on Fault Patterns

Choi Soo-Geun

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

Department of Electrical Engineering,

Graduate School of Chosun University

The current power system is getting larger and larger and more complex with sharp increase in power demand. Therefore, significantly increasing fault current resulting from accidents may result in breakers exceeding their breaking capacity or serious voltage drop. SFCLs are used to limit such fault current. It is expected that characteristics of the SFCLs will solve problems of existing devices to increase the capacity of existing protection devices and improve the reliability of the system.

In this essay, the operation characteristics depending on fault types were compared and analyzed for the integrated transformer-type SFCLs and the separated transformer-type SFCLs. The reclosing cycle was set to the cycle of 5-10-7-20-5.

Operation characteristics depending on increasing voltage and presence of the neutral wire were compared with operation characteristics depending on the turn ratio for analysis.

For single line-to-ground fault, double and triple line-to-ground faults, the limiting effect of fault current and fault lines on the sound lines was analyzed through experiment. Because the 3 phases of the integrated 3-phase transformer type SFCLs are coupled to one iron core unlike the separated 3-phase transformer type SFCLs, the fault phase affects sound phases.

As compared to this, because, in the separation type, fault phases never affect sound phases, it was identified that the separated transformer type SFCL showed higher fault current limit ratios than the integrated 3-phase transformer type SFCLs. It was identified that there was not significant difference in the fault current limit ratios between the integrated and the separated 3-phase transformer type SFCLs depending on the presence of the neutral line. From this, it was identified that the separated SFCL of higher fault current limit ratio recovered within even shorter time, with respect to recovery characteristics of superconducting elements during the open cycle depending on reclosing. It was identified that recovery was achieved within shorter time with the neutral line than without the neutral line.

It was identified that the recovery time was related to consumed power of the superconducting elements. It was identified that the separated SFCL showed higher fault current limit ratios and shorter recovery time depending on the presence of the neutral line than the integrated 3-phase transformer type SFCL.

On the basis of the result described above, if the separated SFCLs are applied to the power grid, fault current would be limited low, and the responsibility of breakers would be reduced through the recovery characteristics of the superconducting elements.

# I. 서 론

현재 전력계통은 전력수요의 급격한 증가로 인하여 규모가 더욱 커지고 복잡해지고 있다. 이에 따라 사고 발생 시 사고 전류가 크게 증가하여 전력용 차단기의 차단용량을 초과하거나 심각한 전압 강하를 초래할 수 있다. 이처럼 사고전류의 증가는 기존 보호기기의 차단용량을 초과하므로 더 큰 차단용량을 갖는 새로운 차단기의 교체나 계통 설비의 개선이 필요하다. 이에 가장 효과적인 해결책으로써 초전도 한류기를 들 수 있다. 초전도 한류기는 정상상태에서 저항이 제로인 초전도 현상을 이용하여 정상상태일 때는 전력손실이 없고, 사고 발생 시 퀘칭으로 인해 발생하는 임피던스로 사고 전류를 제한하는 전력기기이다[1-8].

초전도 한류기는 국내뿐만 아니라 세계적으로 연구가 진행 중이며, 저항형, 자속결합형, 변압기형 등 여러 가지의 형태가 있다. 이러한 초전도 한류기는 비록 초전도체 냉각을 위한 부가적인 장치가 필요하지만 사고전류 감지를 위한 별도의 장치가 필요하지 않고, 정상상태에서 손실이 없다는 장점이 있다. 또한 증가한 사고전류를 안정적으로 차단기의 용량에 맞게 제한할 수 있다는 장점도 있어서 차단기의 교체 문제를 해결할 수 있을 것이다[9-13].

초전도 한류기의 회복특성은 전력용 차단기의 차단 동작 후 퀘칭된 초전도 소자가 다시 상전도 상태로 복귀하는 특성을 나타내며, 이 또한 별도의 부수적인 장치 없이 이뤄진다. 이러한 초전도 한류기의 동작에 의해 전력용 차단기의 차단용량을 증대시키고 다른 전력기기들의 손상을 방지하여 안정적으로 전력을 공급할 수 있도록 한다. 그리고 초전도 한류기를 계통에 적용하기 위해서는 전력용 차단기나 타 보호 계전기와의 협조가 이루어져야 한다. 전력용 차단기에 의한 사고전류 차단 후 상전도 상태에서 초전도 상태로 복귀하는 회복시간은 재폐로 동작책무와 같은 보호 계전 시스템과 협조하는데 중요한 요소라 할 수 있다[14-15].

본 논문은 일체형과 분리형 삼상변압기를 이용한 초전도 한류기를 구성하였고, 초전도 소자의 퀘칭특성을 분석하기 위해 변압기의 2차권선과 초전도

소자 사이에 중성선 연결의 유무에 따라 설계하였다. 차단기의 재폐로 동작  
책무에 따라 변압기형 초전도 한류기의 사고전류 제한 및 초전도 소자의 회  
복특성을 비교, 분석하였다.

## II. 변압기 유형에 따른 초전도 한류기의 동작원리

### A. 3상 일체형 변압기형 초전도 한류기의 구조 및 동작원리

그림 2-1은 일체형 변압기형 초전도 한류기의 중성선 유무에 따른 등가회로도를 나타낸 것이다.  $I_{FCL(R, S, T)}$ ,  $I_{S(R, S, T)}$ 는 1, 2차측 전류를 나타내고,  $L_{P(R, S, T)}$ ,  $L_{S(R, S, T)}$ 는 1, 2차측 임피던스를 나타낸다.  $R_{(RA, RB, SA, SB, TA, TB)}$ 는 각 상의 초전도 소자를 나타낸 것이다. 그림 2-1(a)은 중성선이 없을 때의 일체형 변압기형 초전도 한류기의 등가 회로도이며, 그림 2-1(b)은 중성선이 있을 때의 일체형 변압기형 초전도 한류기이다. 등가 회로도와 같이 단일 철심에 3상이 유도적으로 결합되어 있으므로 사고가 발생하였을 때 사고상의 자속이 다른 상에 영향을 주게 된다. 이에 사고 발생시 건전상의 전류는 정상전류보다 증가하게 된다. 초전도 한류기의 용량을 증대 시키기 위해 2개의 초전도 소자를 직렬로 연결하였으며 2차권선과 초전도 소자 사이에 중성선을 연결하여 특성을 비교, 분석하였다.

그림 2-2는 일체형 변압기형 초전도 한류기일 때 사고전류 제한파형을 나타낸 것이다. 1선지락 사고임에도 불구하고 다른 건전상인 S, T상의 전류가 정상상태보다 높게 흐르는 것을 확인할 수 있다. 이는 R상의 사고전류로 인해 발생한 자속이 다른 건전상인 S, T상에 영향을 주어서 정상상태일 때보다 더 높게 흐르는 것이다.



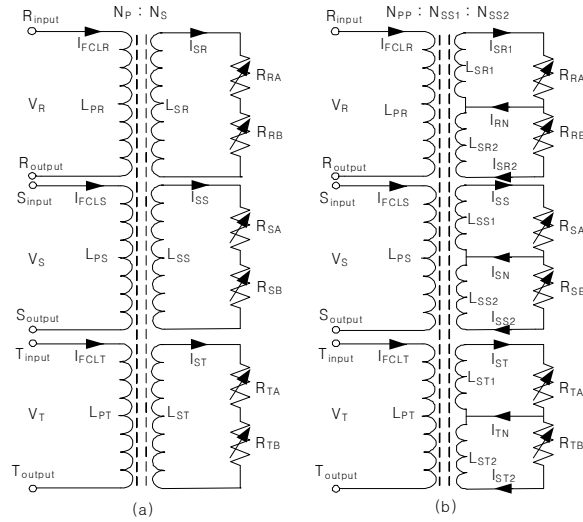


그림 2-1 3상 일체형 삼상변압기형 초전도 한류기 등가회로도  
 Fig. 2-1 The experimental circuit diagram of integrated three-phase transformer-type SFCL

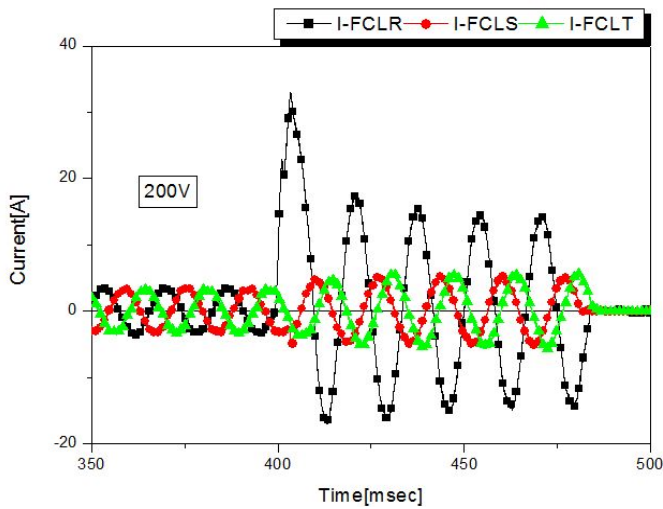


그림 2-2 3상 일체형 변압기형 초전도 한류기의 사고전류제한 파형  
 Fig. 2-2 Limiting fault current waveforms of integrated three phase transformer-type SFCL when the single line-to-ground fault generated

## B. 3상 분리형 변압기형 초전도 한류기의 구조 및 동작원리

그림 2-3은 3상 분리형 변압기형 초전도 한류기의 중성선 유무에 따른 등가회로도이다.  $I_{FCL(R, S, T)}$ ,  $I_{S(R, S, T)}$ 는 1, 2차측 전류이며,  $L_{P(R, S, T)}$ ,  $L_{S(R, S, T)}$ 는 1, 2차측 임피던스를 나타내고 있다.

$R_{(RA, RB, SA, SB, TA, TB)}$ 는 YBCO 초전도 소자를 나타낸 것이다. 일체형 변압기형 초전도 한류기와는 다르게 분리형 변압기형 초전도 한류기는 단일 철심에 한상 만이 결합되어 있으므로 사고가 발생하더라도 다른 건전상에는 영향을 주지 않고 사고가 발생한 상만의 사고전류를 제한하게 된다.

분리형 변압기형 초전도 한류기도 일체형 변압기형 초전도 한류기와 마찬가지로 중성선 유무에 따라 사고전류 제한 및 초전도 소자의 켄치 특성을 분석하였다.

그림 2-4는 3상 분리형 변압기형 초전도 한류기의 사고전류제한 파형을 나타낸 것이다. 일체형과는 다르게 사고가 발생하였을 때 발생한 상에서만 사고전류를 제한하고 나머지 건전상에서는 정상전류와 동일하게 흐르는 것을 확인할 수 있다.

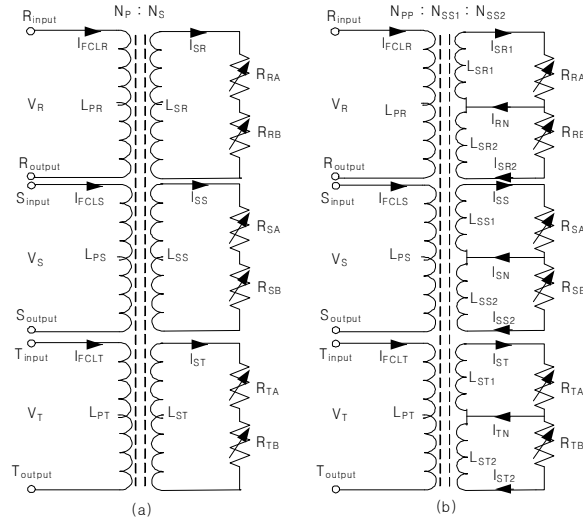


그림 2-3 3상 분리형 삼상변압기형 초전도 한류기의 등가회로도  
 Fig. 2-3 The experimental circuit diagram of separated three phase transformer-type SFCL

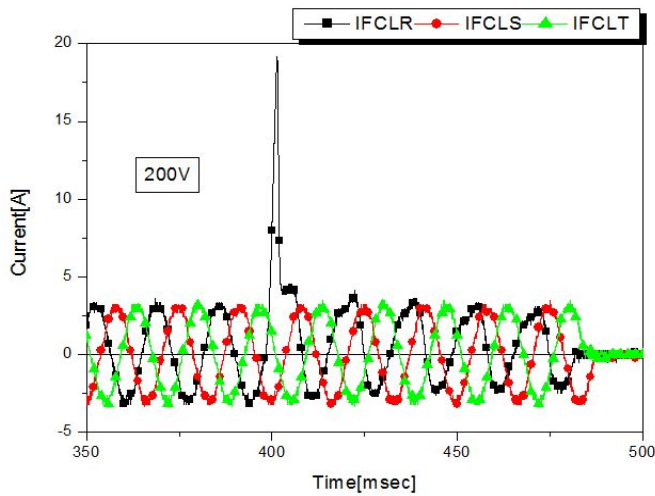


그림 2-4 3상 분리형 변압기형 초전도 한류기의 사고전류제한파형  
 Fig. 2-4 Limiting fault current waveforms of separated three phase transformer-type SFCL when the single line-to-ground fault generated

### III. 3상 변압기 유형에 의한 초전도 한류기의 동작특성

#### A. 실험장치

그림 3-1은 3상 일체형과 분리형 초전도 한류기의 실험을 하기 위한 회로도이다.  $V_R$ ,  $V_S$ ,  $V_T$ 는 각상의 인가전압이고,  $R_0$ 와 Load는 표준저항과 부하저항으로 나타내고  $1[\Omega]$ 과  $50[\Omega]$ 으로 설정하였다.

$SW_{1(R, S, T)}$ 은 전원인가를 위한 스위치이며,  $SW_{2(R, S, T)}$ 는 부하저항을 단락시켜 사고를 발생시키기 위한 스위치이다. 그리고 각상의 INPUT, OUTPUT은 변압기형 초전도 한류기와 연결하기 위한 단자이다. 또한 각상에 인가되는 전압은 200V와 280V로 설정하였다.

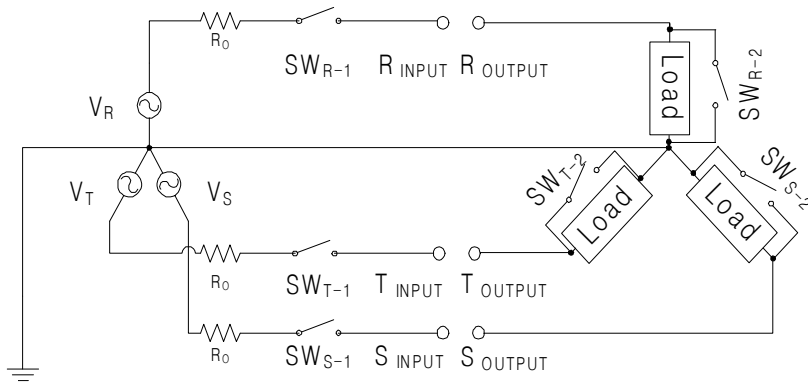


그림 3-1 3상 변압기형 초전도 한류기의 실험회로도

Fig. 3-1 The experimental circuit diagram of three phase transformer-type SFCL

그림 3-2는 실험에 사용한 일체형 변압기의 외형이며 설계파라미터의 조건은 표 3-1과 같다.

그림 3-3은 실험에 사용한 분리형 변압기의 외형이며 설계파라미터의 조건은 표 3-2와 같다.

표 3-1 일체형 변압기의 설계파라미터

Table. 3-1 The designed parameters of integrated transformer

항목	파라미터 조건
외측 수평길이	331mm
외측 수직길이	415mm
내측 수평길이	191mm
내측 수직길이	274mm
두께	130.1mm

표 3-2 분리형 변압기의 설계파라미터

Table. 3-2 The designed parameters of separated transformer

항목	파라미터 조건
외측 수평길이	270mm
외측 수직길이	170mm
내측 수평길이	180mm
내측 수직길이	224mm
두께	113mm

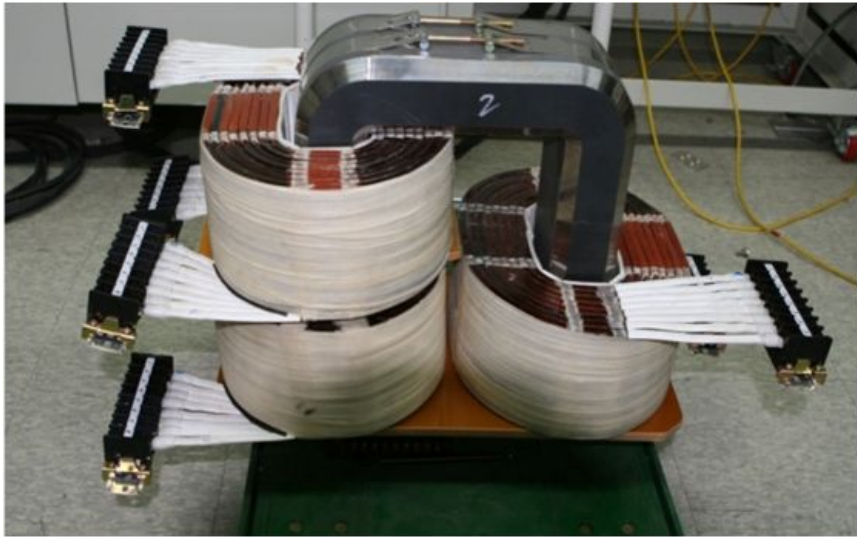


그림 3-2 일체형 변압기의 외형  
Fig. 3-2 Shape of integrated transformer

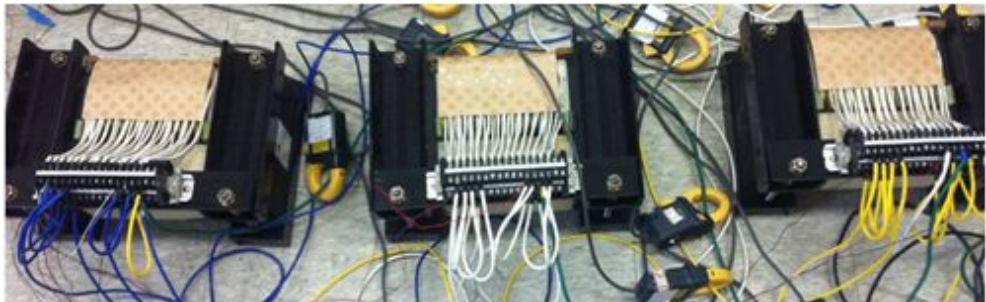


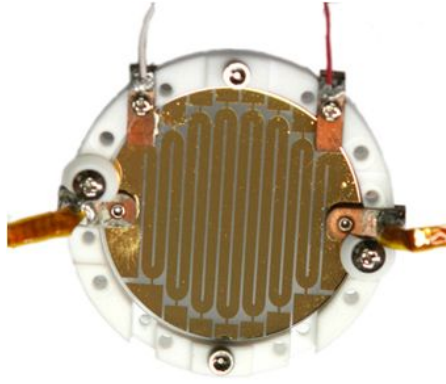
그림 3-3 분리형 변압기의 외형  
Fig. 3-3 Shape of separated transformer

현재 사용하고 있는 초전도 소자의 재료 및 형태에 따라 많은 연구가 진행되고 있다. 그 중에서 현재 YBCO계와 BSCCO계의 초전도체가 주로 사용되고 있으며, 그 형태에 따라 박막형, 벌크형, 선재형 등으로 제작된다. 그림 3-4(a)는 본 실험에서 사용된  $YB_2C_3O_7$  재질의 박막형 초전도 소자를 나타낸 것이며 직경 2인치, Meander-Line 형태로 제작되었다. 그림 3-4(b)는 실험에 사용된 초전도 소자의 임계전류 파형을 나타낸 것이다. 표 3-3은 각 소자의 임계전류 값들을 나타낸 것이다. 각 초전도 소자의 임계값들이 다른 이유는 제질상 불가피하게 발생하는 문제이며, 중성선을 연결하였을 때 동시퀀치가 일어나는 것을 확인하기 위하여 의도적으로 상이한 임계값을 갖는 것을 선택하였다.

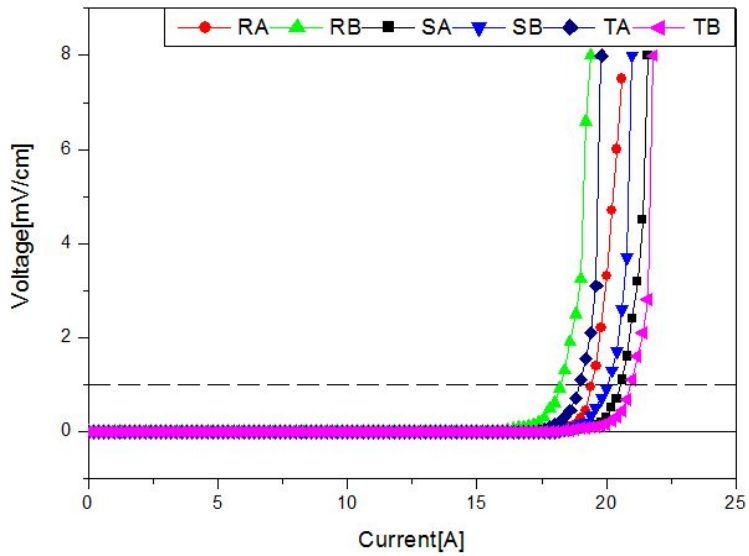
표 3-3. 초전도 소자의 임계전류 값

Table. 3-3 Critical current values of the superconducting units

HTSC RA	15.73[A]	HTSC RB	17.15[A]
HTSC SA	19.95[A]	HTSC SB	20.12[A]
HTSC TA	18.92[A]	HTSC TB	20.32[A]



(a) 박막형 YBCO 초전도 소자



(b) 초전도 소자의 임계전류

그림 3-4. 박막형 YBCO 초전도 소자와 임계전류

Fig. 3-4 YBCO thin film and its critical current curves



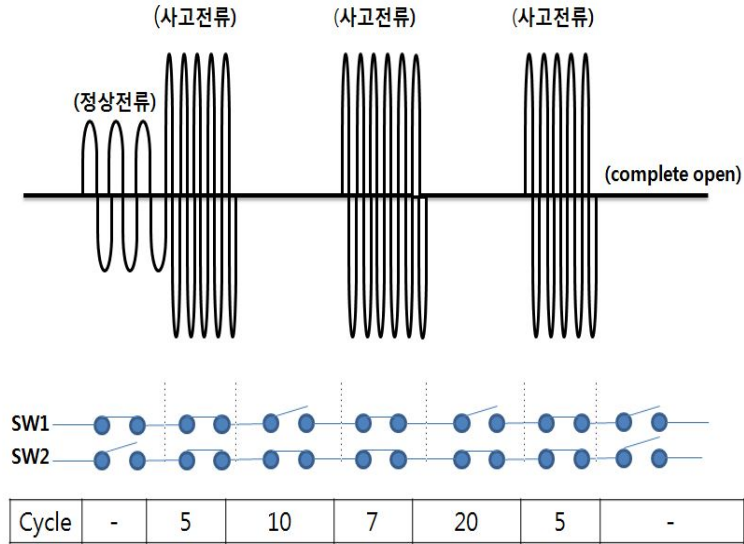


그림 3-5 재폐로 동작 시스템

Fig. 3-5 Reclosing operation system

전력망에서는 순간사고와 지속사고를 구분하기 위하여 재폐로 동작책무를 설정하여 전력용 차단기를 운영하고 있다. 초전도 한류기와 전력망의 보호 협조 특성을 분석하기 위해 재폐로 동작에 의해 발생하도록 하였다. 현재 전력망에서 적용하고 있는 재폐로 방식은 CO - 0.3sec - CO - 3min -CO( C: Close, O: Open )를 적용하고 있다. 이에 본 논문에서는 재폐로 방식에 따른 초전도 한류기의 동작주기를 그림 3-5와 같이 설정하였다. 재폐로 동작책무를 수행하기 위하여 순차적으로 SW<sub>(R, S, T)</sub>를 ON/ OFF하여 지락사고가 발생되도록 하였다.

## B. 3상 일체형 및 분리형 변압기형 초전도 한류기의 중성선 유무에 따른 사고유형별 동작특성 실험결과 및 고찰

### 1. 중성선 없는 경우

#### a. 1선 지락사고

그림 3-6은 중성선이 없을 때 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기와 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 1선 지락사고 시 재폐로 동작책무에 따른 사고전류의 제한특성 파형을 나타낸 것이다. 이 때 각 상의 1, 2차 권선의 비는  $N_p:N_s = 4:2$ 로 설정하였고, 각 상(R, S, T)의 인가전압은 200V와 280V이다. 그림 3-6(a)은 200V 인가 시 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기를 나타내는 것이다. 3번의 사고가 발생하는 재폐로 동작책무에 따라 1선 지락사고 시 R상의 사고전류는 각각 순차적으로 32[A], 30.53[A], 30.8[A]로 제한되었다. 1선 지락사고임에도 불구하고 S, T상의 전류도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 하나의 철심에 3상이 연결되어 있으므로 사고상에서 발생한 자속이 건전상인 다른 상에도 영향을 주게 되어 건전상의 전류가 정상상태일 때보다 더 높게 흐르는 것이다. 그리고 그림 3-6(b)는 200V 인가 시 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기로서 재폐로 동작책무에 따라 사고전류를 각각 19.2[A], 19.1 [A], 19.2[A]로 제한하였다. 일체형에 비해 분리형은 다른 건전상에 영향을 끼치지 않고 사고가 발생한 상에서만 제한을 하기 때문에 그림 3-6과 같이 분리형이 일체형 삼상변압기형 초전도 한류기 보다 더 낮게 제한하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 3-6(c)은 280V 인가 시 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 재폐로 동작책무에 따른 1선 지락사고 시 전류제한파형으로 R상의 사고전류를 37.27[A], 31.87[A], 32.8[A]로 각각 제한하였다. 그림 3-6(d)은 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 재폐로 동작책무에 따른 1선 지락사고 전류제한

파형으로 R상의 사고전류를 각각 19.2[A], 19.73[A], 19.47[A]로 제한하였다. 전압이 증가할수록 사고전류제한 파형 또한 증가하는 것을 확인할 수 있고, 200V일 때와 같은 형태의 파형을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

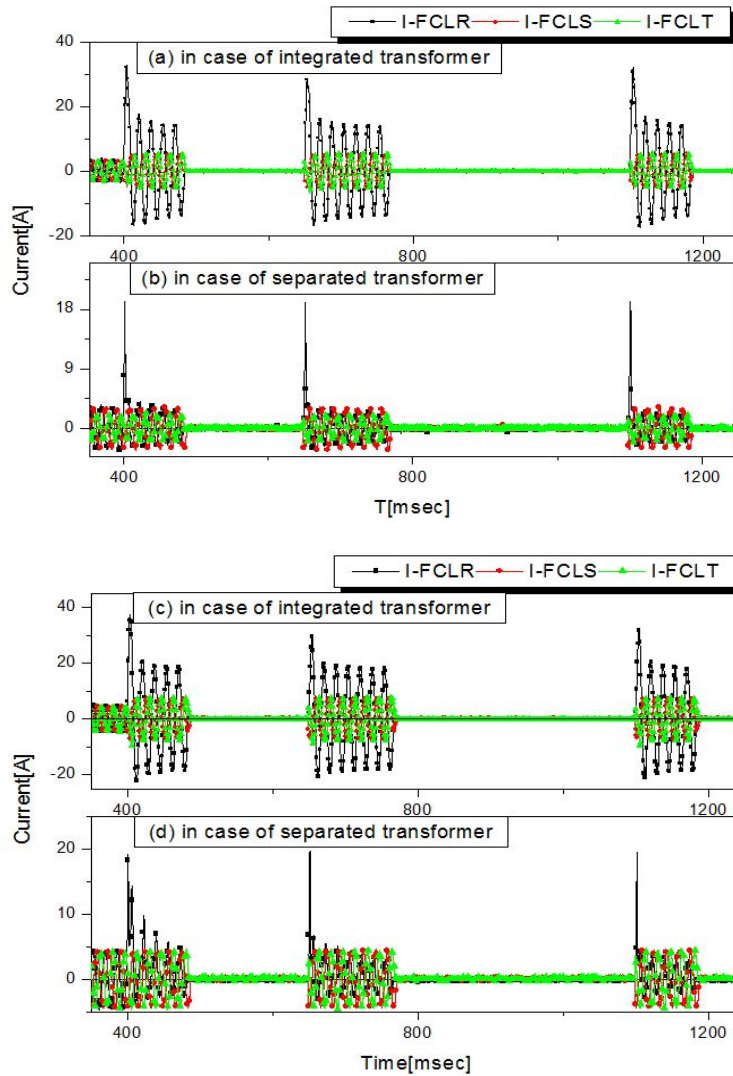


그림 3-6 중성선이 없는 3상 변압기형 초전도 한류기의 1선 지락사고 시 사고전류 제한파형 ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

Fig. 3-6 Limiting fault current waveforms of the three phase transformer-type SFCL without a neutral line when the single line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280)

그림 3-7(a), (b)은 200V 인가 시 재폐로 동작에 따른 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 초전도 소자 회복특성을 나타낸 파형이다. 회복특성은 초전도 소자가 켄치되어 상전도로 전이되었다가 초전도 상태로 복귀하는 시간을 나타낸 것이다. 그림 3-7(a)은 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 경우로 3번의 개로주기동안 R상의 RB소자는 66.67[msec], 73.93[msec], 65.78[msec]이내에 회복되는 것을 확인하였고, S상의 SA가 각각 65.65[msec], 74.28[msec], 65.9[msec]이내에 회복되었다. 그리고 T상의 TB는 각각 56.32[msec], 70.4[msec], 61.28[msec]이내에 회복되는 것을 확인할 수 있었다. 1선 지락사고임에도 불구하고 건전 상의 초전도 소자가 회복한다. 이것은 건전상인 S상과 T상의 초전도 소자가 사고상으로부터 임계전류 이상의 전류를 받아 켄치되었기 때문이다. 또한 초전도 소자 2개 중 하나의 소자만이 회복되는 것을 확인할 수 있는데 이는 임계전류값이 낮은 초전도 소자부터 켄치되기 때문이다. 그림 3-7(b)은 분리형 변압기형 초전도 한류기의 회복으로 사고가 발생한 R상의 초전도 소자만이 각각 23.56[msec], 23.49[msec], 25.37[msec]동안 회복되었다. 분리형 삼상변압기형 초전도 한류기도 마찬가지로 초전도 소자 2개중 하나의 소자만이 켄치되어 회복하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 일체형과는 달리 분리형은 발생한 사고상에서만 사고전류를 제한하였기 때문에 회복시간이 보다 짧아진다는 것을 확인할 수 있었다.

그림 3-7(c)와 (d)는 280V 인가 시 일체형과 분리형 삼상변압기형 초전도 한류기의 재폐로 동작책무에 따른 회복특성을 나타낸 파형이다.

그림 3-7(c)은 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 회복파형으로 R상은 RB가 켄치되어 각각 70.08[msec], 107.62[msec], 80.9[msec]동안 회복되었고, S상은 SA가 켄치되어 각각 68.91[msec], 105.77[msec], 82.77[msec]동안 회복되었다. 그리고 T상은 TB가 켄치되어 72.8[msec], 106.03[msec], 76.15[msec]동안 회복되었다. 그림 3-7(d)은 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 회복파형으로 R상만 35.54[msec], 35.73 [msec], 35.89[msec]동안 회복되었다. 두 변압기형 초전도 한류기 모두 다 전압이 증가하면 사고전류

제한크기가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 사고전류 제한율이 전압이 증가할수록 떨어지기 때문에 회복시간이 늘어나는 것이다.

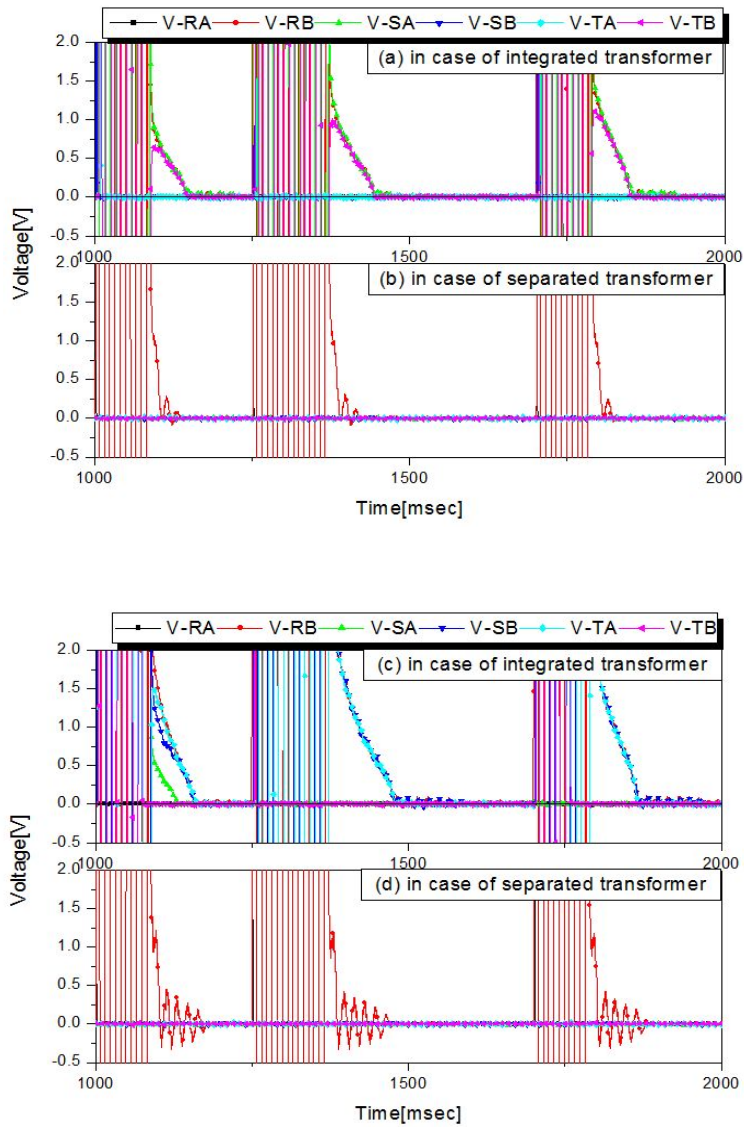


그림 3-7 중성선이 없는 3상 변압기형 초전도 한류기의 1선 지락사고 시 회복특성파형 ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

Fig. 3-7 Recovery waveforms of a superconducting element in the three phase transformer-type SFCL without a neutral line when the single line-to-ground fault generated ((a),(b) = 200V, (c),(d) = 280V)

그림 3-8은 1선 지락사고 시 전압증가에 따른 R상의 제한된 사고전류 크기를 재폐로 동작에 따라 나타낸 것이다. 곡선을 보면 전압이 증가할수록 두 변압기형 초전도 한류기 모두 다 사고전류 크기도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기를 보면 첫 번째 사고전류가 가장 크게 흐른다는 것을 확인할 수 있는데 이는 정상전류가 흐르는 상태에서 사고가 발생하였기 때문이다.

또한 일체형 삼상변압기형 초전도 한류기는 전압이 증가할수록 사고전류 제한율이 감소하는 반면 분리형 삼상변압기형 초전도 한류기는 전압이 증가하여도 크게 사고전류 제한율이 감소하지 않는 것을 확인할 수 있다. 그리고 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기가 전압이 증가할수록 제한된 사고전류 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 초전도 소자가 사고전류의 증가에 따라 켄치되었을 때 발생하는 저항의 크기가 커지지만, 일체형 변압기 사용으로 타상에서 발생하는 자속에 의해 전류가 더 많이 유도 되기 때문이다.

그림 3-9는 1선 지락사고 시 전압증가에 따른 R상 초전도 소자의 회복시간을 나타낸 것이다. 사고전류 제한곡선과 마찬가지로 전압이 증가할수록 그리고 사고 주기가 길수록 초전도 소자가 받는 전력부담이 증가하여 회복시간이 길어지는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 곡선을 통하여 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기와 분리형 삼상변압기형 초전도 한류기가 전압이 증가할수록 회복시간의 차이를 한눈에 알 수 있다.



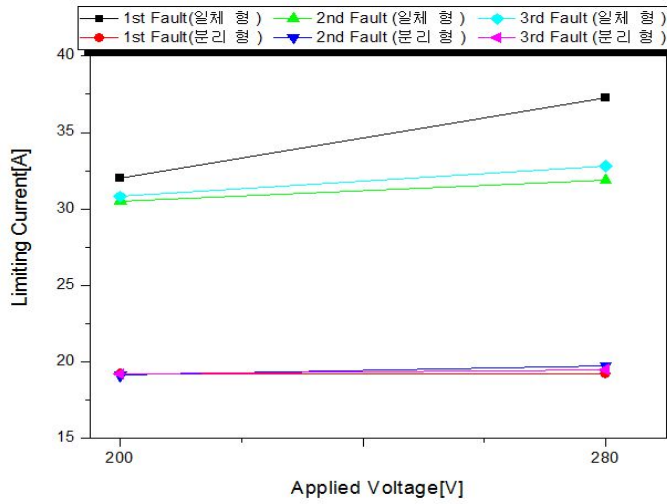


그림 3-8 1선 지락사고 시 전압증가에 따른 제한된 사고전류 곡선  
 Fig. 3-8 Limiting fault current curves according to applied voltage during the single line-to-ground fault

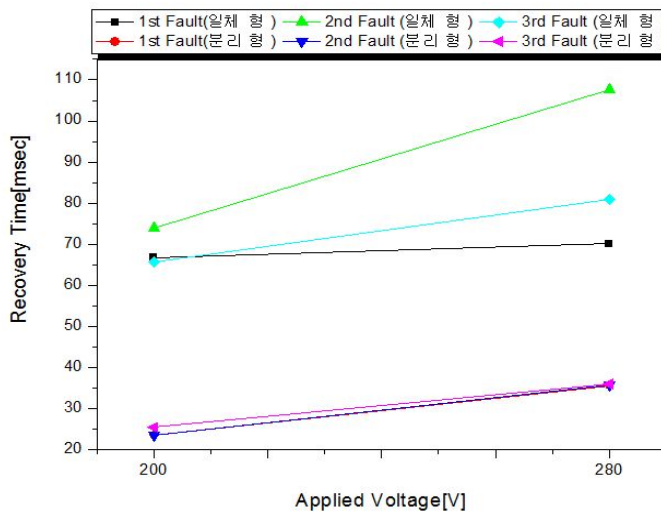


그림 3-9 1선 지락사고 시 전압증가에 따른 회복시간 곡선  
 Fig. 3-9 Recovery time curves according to applied voltage during the single line-to-ground fault

## b. 2선 지락사고

그림 3-10은 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 재폐로 동작책무에 따른 2선 지락사고전류의 제한파형을 나타낸 것이다. 각 상의 1, 2차 권선의 수는  $N_p:N_s = 4:2$ 이다.

그림 3-10(a)은 200V 인가 시 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 재폐로 동작책무에 따른 2선 지락사고전류 제한파형이다. R상의 사고전류는 순차적으로 65.73[A], 64.53 [A], 64.8[A]로 제한되었다. 그리고 S상의 사고전류는 각각 -59.47[A], -58.53[A], -58.27[A]로 제한되었고, S상의 사고전류 제한파형이 -방향으로 흐르는 것은 R상을 기준으로 사고가 발생되므로 S상의 위상이  $120^\circ$  앞서 사고전류가 발생하기 때문이다.

그리고 1선 지락사고와 비교하였을 때 제한된 사고전류가 2배 정도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 사고상인 S상과 건전상 T상의 1, 2차 권선에서 발생하는 자속이 R상의 자속과 쇄교하여 증가하였기 때문이다.

그림 3-10(b)은 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 3번의 사고가 발생하는 R상의 사고전류는 19.5 [A], 18.8[A], 19.2[A]로 제한되었고, S상의 사고전류는 각각 -18.9[A], -18.9 [A], 18.9[A]로 제한되었다. 분리형도 마찬가지로 S상의 사고전류 제한파형이 -방향으로 제한되는 것을 확인할 수 있다.

그림 3-10(c)은 280V 인가 시 일체형 삼상변압기형 초전도 한류기의 재폐로 동작책무에 따른 2선 지락사고로 R상의 사고전류는 90.9[A], 89.73[A], 89.47[A]로 제한되었다. 그리고 S상의 사고전류는 -84.13[A], -83.6[A], -81.87[A]로 제한되었다. 그림 3-10(d)은 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 재폐로 동작책무에 따른 2선 지락사고로 R상은 19.47[A], 19.07[A], 19.47[A]로 제한되었다. 그리고 S상은 각각 -30.27[A], -27.33[A], -26[A]로 제한되었다. 1선 지락사고일 때와 마찬가지로 전압이 증가할수록 사고전류 제한값은 커질 뿐 파형의 변화가 없는 것을 확인할 수 있다.

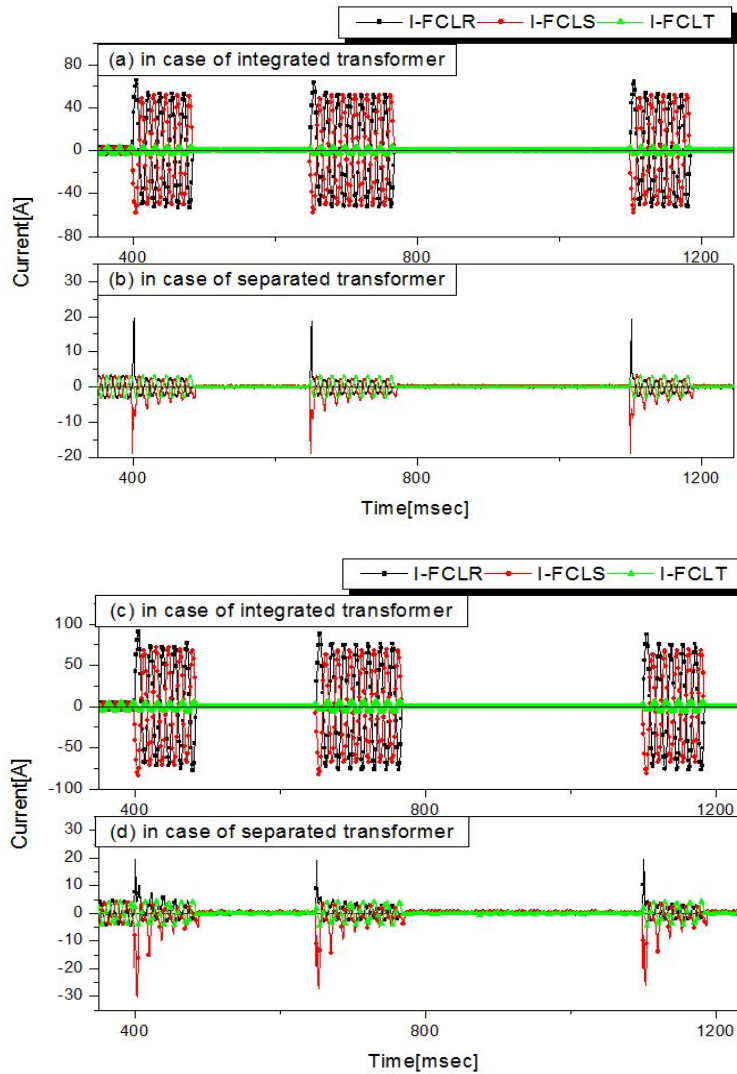


그림 3-10 중성선이 없는 3상 변압기형 초전도 한류기의 2선 지락사고 시  
사고전류 제한파형 ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

Fig. 3-10 Limiting fault current waveforms of the three phase transformer-type SFCL without a neutral line when the double line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

그림 3-11은 200V 인가 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 2선 지락사고 시 재폐로 동작책무에 따른 회복특성을 나타낸 것이다. 그림 3-11(a)은 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 경우로 3번의 개로 주기 동안 R상의 RB소자는 각각 68.95[msec], 83.78[msec], 84.07 [msec]동안 회복되었고, S상의 SA소자는 각각 69.48[msec], 84.49[msec], 88.45[msec]동안 회복되었다. 그리고 T상의 TB소자는 각각 56.77[msec], 71.07[msec], 60[msec]동안 회복되었다. 1선 지락사고 회복특성과 마찬가지로 건전상의 초전도 소자가 회복하는 것을 확인할 수 있다. 이는 1선 지락사고처럼 사고 전류를 제한할 때 건전상에도 영향을 주게 되어 건전상의 초전도 소자가 켜치되기 때문이다. 그림 3-11(b)은 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 회복시간을 나타내는 파형으로 R상의 RB소자는 각각 24.74[msec], 24.62[msec], 24.8[msec]동안 회복되었고, S상의 SB소자는 각각 41.02[msec], 41.34[msec], 36.67[msec]동안 회복되었다. 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기는 사고난 상에서의 초전도 소자 2개 중 하나의 소자만이 켜치되어 회복하는 것을 확인할 수 있다. 또한 건전상의 영향을 받지 않아서 회복시간이 짧은 것을 확인할 수 있다.

그림 3-11(c)와 (d)는 280V 인가 시 일체형과 분리형 삼상변압기형 초전도 한류기의 재폐로 동작책무에 따른 회복특성을 나타낸 파형이다. 그림 3-11(c)은 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 R상의 RB소자는 각각 78.1[msec], 88.02[msec], 99.02[msec]동안 회복되었고, S상의 SB소자는 각각 77.73[msec], 90.63[msec], 95.23[msec]동안 회복되었다. 그리고 T상의 TA소자는 각각 61.23[msec], 82.18[msec], 73.05[msec]동안 회복되었다. 그림 3-11(d)은 분리형 삼상변압기형 초전도 한류기로 R상의 RB소자는 각각 43.77[msec], 44[msec], 43.78[msec]동안 회복되었고, S상의 SB소자는 각각 59.65[msec], 60.66[msec], 61.51[msec]동안 회복되었다. 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기는 전압이 증가하더라도 회복시간만 늘어날 뿐 다른 파형의 변화는 없는 것을 확인할 수 있었다.

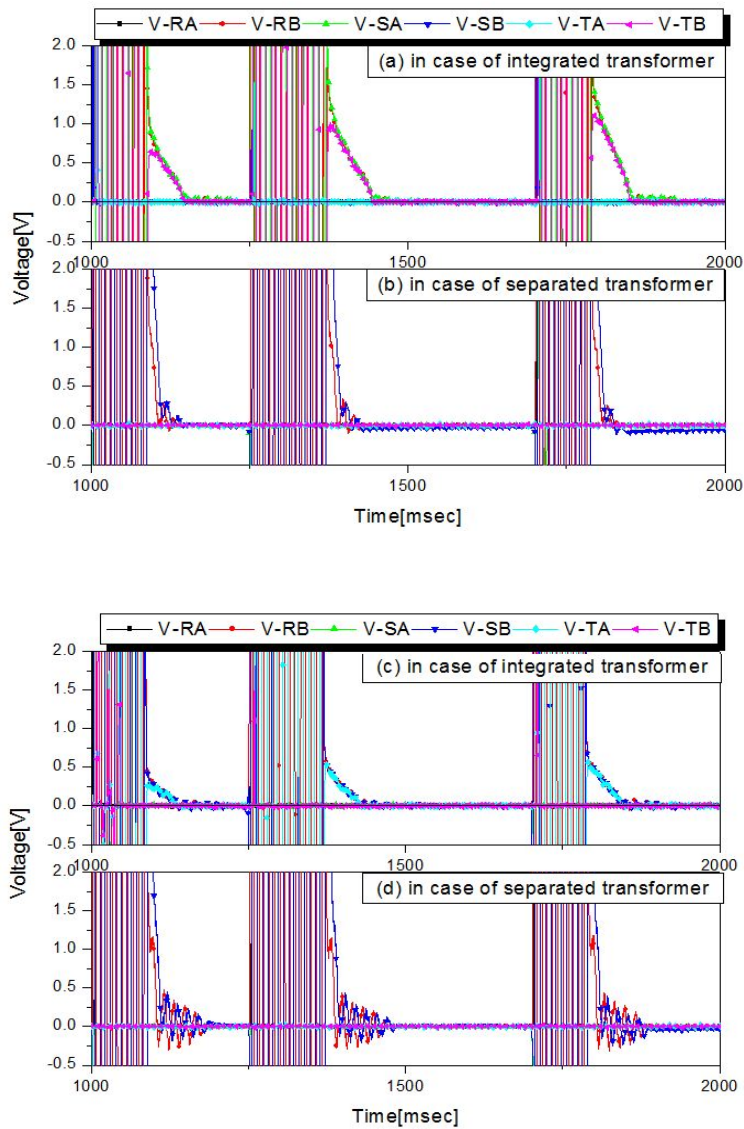


그림 3-11 중성선이 없는 3상 변압기형 초전도 한류기의 2선 지락사고 시 회복특성파형((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

Fig. 3-11 Recovery waveforms of a superconducting element in the three phase transformer-type SFCL without a neutral line when the double line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

그림 3-12는 2선 지락사고 시 재폐로 동작책무에 따른 사고전류 제한크기를 나타낸 것이다. 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기를 보면 1선 지락사고일 때 첫 번째 사고전류 크기가 크게 흘렀지만 2선 지락사고일 때에는 3번의 사고가 거의 같게 흐르는 것을 확인할 수 있다. 이는 사고가 발생하였을 때 하나의 철심에 연결되어 있기 때문에 다른 사고상으로부터 자속의 영향을 받았기 때문이다. 반대로 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기는 사고가 발생한 상에서만 사고전류를 제한하기 때문에 1선 지락사고 일 때와 별 차이는 없다. 그리고 과형으로 봤을 때보다 일체형 과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 사고전류 제한크기의 차이를 쉽게 확인할 수 있다.

그림 3-13은 2선 지락사고 시 전압증가에 따른 회복시간을 나타낸 곡선이다. 1선 지락사고일 때와 마찬가지로 전압이 증가할수록 그리고 사고주기가 길수록 초전도 소자의 회복시간이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

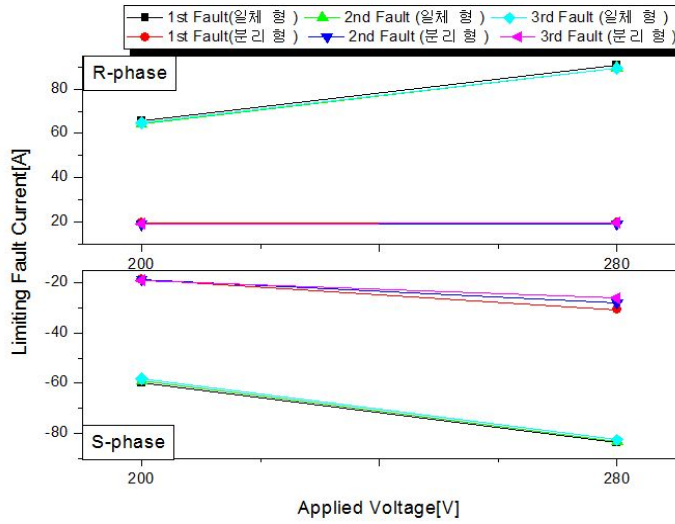


그림 3-12 2선 지락사고 시 전압증가에 따른 사고전류 제한 곡선  
 Fig. 3-12 Limiting fault current curves according to applied voltage during the double line-to-ground fault

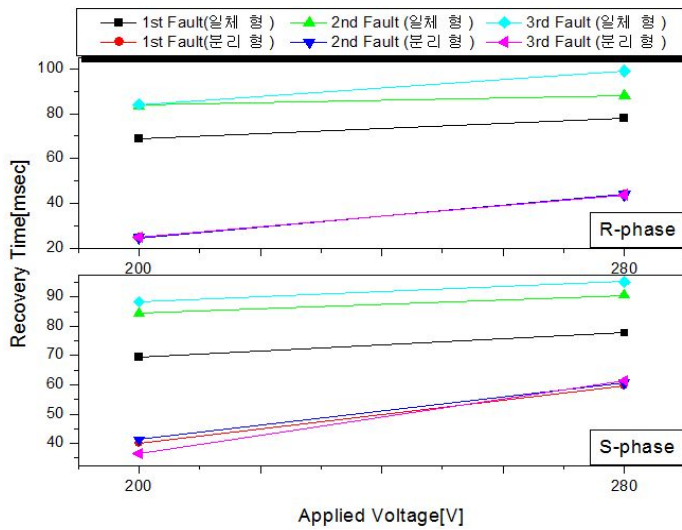


그림 3-13 2선 지락사고 시 전압증가에 따른 회복시간 곡선  
 Fig. 3-13 Recovery time curves according to applied voltage during the double line-to-ground fault

### c. 3선 지락사고

그림 3-14는 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 재폐로 동작 책무에 따른 3선 지락사고전류 제한과형을 나타낸 것이다. 각 상의 1, 2차 권선의 수는  $N_p:N_s = 4:2$ 이다. 그림 3-14(a)은 200V 인가 시 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기를 나타낸 것이다. 재폐로 동작책무에 따른 3번의 사고가 발생하여 R상의 사고전류는 66.53[A], 65.2[A], 60.67 [A]로 제한되었고, S상의 사고전류는 -59.73[A], -59.07[A], -58[A]로 제한되었다. 그리고 T상의 사고전류는 21.73[A], 18.67[A], 20.53[A]로 제한되었다. T상의 사고전류 제한과형이 다른 사고전류 제한과형 보다 낮은 것을 확인 할 수 있는데 이는 T상이 240도 위치에서 앞서 사고가 발생하여 다른 상보다 먼저 켜치 되어 전류가 낮게 제한된 것이다. 그림 3-14(b)은 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 재폐로 동작책무에 따라 R상의 사고전류는 18.93[A], 18.93 [A], 18.93[A]로 제한되었고, S상의 사고전류는 -18.67[A], -18.67[A], -18.67[A]로 제한되었다. 그리고 T상의 사고전류는 15.07[A], 13.2[A], 14.13[A]로 제한되었다. 분리형은 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기에 비해 사고전류 제한값이 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 사고가 발생한 상만을 제한하고 다른 상의 영향을 받지 않기 때문에 사고전류를 보다 낮게 제한할 수 있는 것이다. 그림 3-14(c)는 280V 전압 인가 시 일체형 삼상변압기형 초전도 한류기의 재폐로 동작책무에 따라 R상의 사고전류는 91.87[A], 91.2[A], 90.67 [A]로 제한되었고, S상은 -84.53[A], -83.33[A], -82.67[A]로 제한되었다. 그리고 T상은 각각 22.8[A], 17.87[A], 21.47[A]로 제한되었다. 그림 3-14(d)는 280V 전압 인가 시 분리형 초전도 한류기의 재폐로 동작책무에 따라 R상의 사고전류는 19.47[A], 19.07[A], 19.47[A]로 제한되었다. S상은 각각 -30.27[A], -27.33[A], -26[A]로 제한되었다. 그리고 T상은 각각 17.33 [A], 14.8[A], 16.53[A]로 제한되었다. 3선 지락사고일 때에도 마찬가지로 전압이 증가할수록 사고전류 제한값이 증가하는 것을 확인할 수 있다.



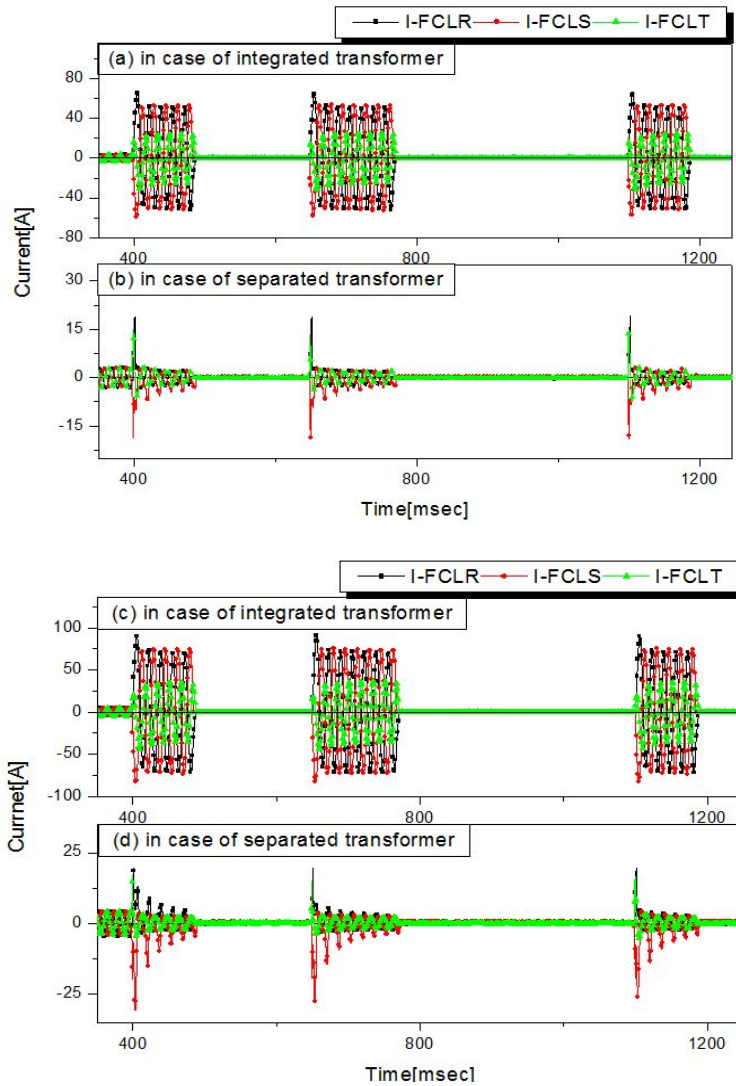


그림 3-14 중성선이 없는 삼상변압기형 초전도 한류기의 3선 지락사고 시 사고전류 제한파형((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

Fig. 3-14 Limiting fault current waveforms of the three phase transformer-type SFCL without a neutral line when the triple line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

그림 3-15(a), (b)는 200V 인가 시 재폐로 동작에 따른 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 초전도 소자 회복특성을 나타낸 파형이다. 그림 3-15(a)는 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 3번의 개로주기동안 R상의 RB소자는 각각 69.57[msec], 57.59[msec], 75.12[msec]동안 회복되었고, S상의 SB소자는 각각 67.72[msec], 59.43[msec], 77.8[msec]동안 회복되었다. 그리고 T상의 TB소자는 각각 74.28[msec], 72.8 [msec], 87.36[msec] 동안 회복되었다. 회복시간이 2선 지락사고일 때보다 더 짧아진 것을 확인할 수 있는데 이는 3상이 철심 하나에 결합되어 있으므로 각 상의 초전도 소자의 전력량이 균일하게 분담되었기 때문이다. 그림 3-15(b)는 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 R상의 RB소자는 각각 35.36[msec], 43.99[msec], 39.7[msec]동안 회복되었고, S상의 SB소자는 각각 44.21[msec], 40.73[msec], 47.6[msec]동안 회복되었다. 그리고 T상의 TB소자는 43.12[msec], 43.96 [msec], 52.56[msec]동안 회복되었다. 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기는 단일 철심에 한상만이 결합되어 있으므로 일체형처럼 초전도 소자의 전력량이 분담되지 않는다. 하지만 사고 발생 시 다른 상 으로부터 영향을 받지 않기 때문에 초전도 소자의 전력부담이 적어 빠른 회복을 보이는 것을 확인할 수 있다.

그림 3-15(c)와 (d)는 280V 인가 시 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 재폐로 동작책무에 따른 회복시간을 나타내는 파형이다. 그림 3-15(c)는 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 R상의 RB소자는 각각 125.93[msec], 135.14[msec], 127.36[msec]동안 회복되었고, S상의 SB소자는 각각 128.29[msec], 135.47[msec], 132.2[msec]동안 회복되었다. 그리고 T상의 TB소자는 각각 136.57[msec], 140.26[msec], 138.32[msec]동안 회복되었다. 전압이 증가할수록 회복시간이 길어지는 것을 확인할 수 있는데 이는 다른 사고상에서 발생한 자속에 의해 초전도 소자의 전력량이 증가하였기 때문이다. 그림 3-15(d)는 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 R상의 RB소자는 각각 60.38[msec], 60.9[msec], 60.24 [msec]동안 회복되었고, S상의 SB소자는 각각 78.1[msec], 75.95[msec], 76.8[msec]동안 회복되었다. 그

리고 T상의 TB소자는 각각 76.6[msec], 68.13[msec], 71.04 [msec]동안 회복되었다. 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기는 일체형에 비해 다른 사고상의 영향을 받지 않기 때문에 초전도 소자의 전력부담이 적어 회복시간이 짧은 것을 확인할 수 있다.

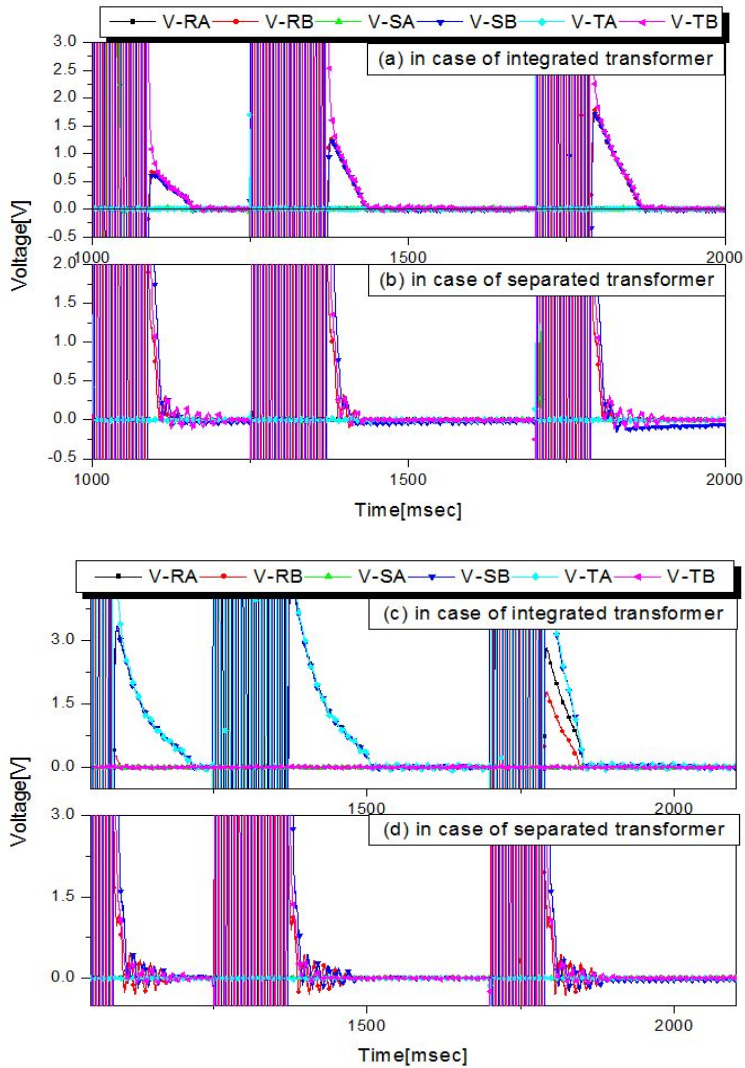


그림 3-15 중성선이 없는 삼상 변압기형 초전도 한류기의 3선 지락사고 시 회복특성파형((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

Fig. 3-15 Recovery waveforms of a superconducting element in the three phase transformer-type SFCL without a neutral line when the triple line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

그림 3-16은 3선 지락사고 시 전압증가에 따른 각 상의 사고전류 제한곡선을 나타낸 것이다. 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 R, S상의 사고전류 제한곡선이 2선 지락사고일 때와 비슷한 것을 확인할 수 있다. 그리고 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 T상 또한 사고전류 제한은 전압이 증가하더라도 높게 제한되지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞선 240도 위치에서 사고가 발생하여 다른 상보다 먼저 켜치되었기 때문이다.

그림 3-17은 3선 지락사고 시 전압증가에 따른 각 상의 회복시간 곡선을 나타낸 것이다. 앞선 1선, 2선 초전도 소자의 회복시간처럼 전압이 증가할수록 그리고 사고주기가 길수록 회복시간이 길어지는 것을 확인할 수 있다. 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기는 다른 사고상에서 발생하는 자속에 의해 사고전류가 많이 유도되므로 초전도 소자가 회복되는 시간이 길어지는 것이다. 그에 비해 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기는 다른 상의 영향을 받지 않기 때문에 회복시간이 짧은 것을 확인할 수 있다.

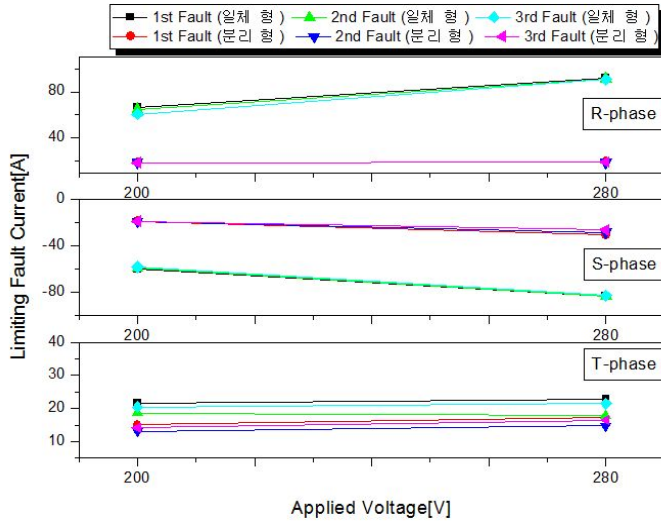


그림 3-16 3선 지락사고 시 전압증가에 따른 사고전류 제한곡선  
 Fig. 3-16 Limiting fault current curves according to applied voltage during the triple line-to-ground fault

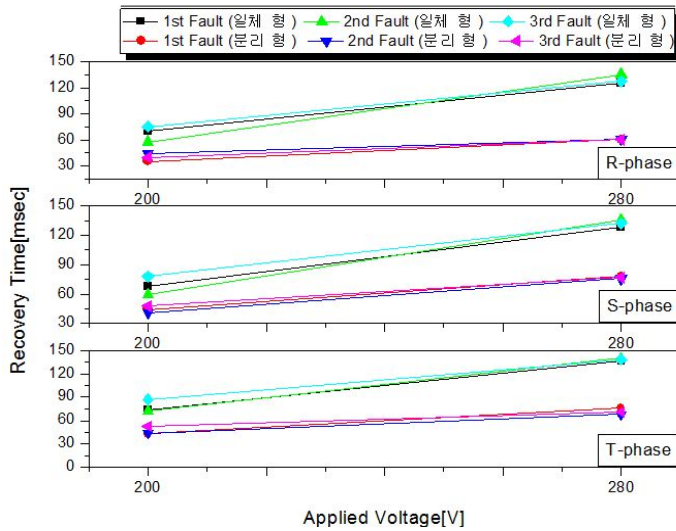


그림 3-17 3선 지락사고 시 전압증가에 따른 회복시간 곡선  
 Fig. 3-17 Recovery time curves according to applied voltage during the triple line-to-ground fault

## 2. 중성선 있는 경우

### a. 1선 지락사고

그림 3-18(a), (b)는 중성선이 있을 때 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기와 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 1선지락 사고 시 3변의 사고가 발생하는 제폐로 동작책무에 따른 사고전류의 제한특성 과형을 나타낸 것이다. 그리고 각 상의 1, 2차 권선의 비는  $N_p:N_s:N_T = 4:1:1$ 로 설정하였고, 인가전압은 200V이다. 그림 3-18(a)은 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 R상의 사고전류는 각각 32[A], 30.53[A], 30.8[A]로 제한되었다. 그리고 그림 3-18(b)은 분리형 삼상변압기형 초전도 한류기로 각각 19.47[A], 18[A], 19.07[A]로 제한되었다. 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기는 중성선이 없을 때와 사고전류 제한과형이 크게 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 중성선 유무에 관계없이 초전도 소자가 사고전류를 제한하기 때문이다.

그림 3-18(c)와 (d)는 280V 전압 인가 시 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 사고전류 제한과형을 나타낸 것이다. 그림 3-18(c)은 일체형 삼상변압기형 초전도 한류기로 R상의 사고전류는 각각 36[A], 33.07 [A], 35.2[A]로 제한되었다. 그림 3-18(d)은 분리형 삼상변압기형 초전도 한류기로 R상의 사고전류는 각각 19.60[A], 19.28[A], 19.40[A]로 제한되었다. 전압이 증가하여도 두 변압기형 초전도 한류기는 중성선이 없을 때와 별 차이가 나지 않는 것을 확인할 수 있다.

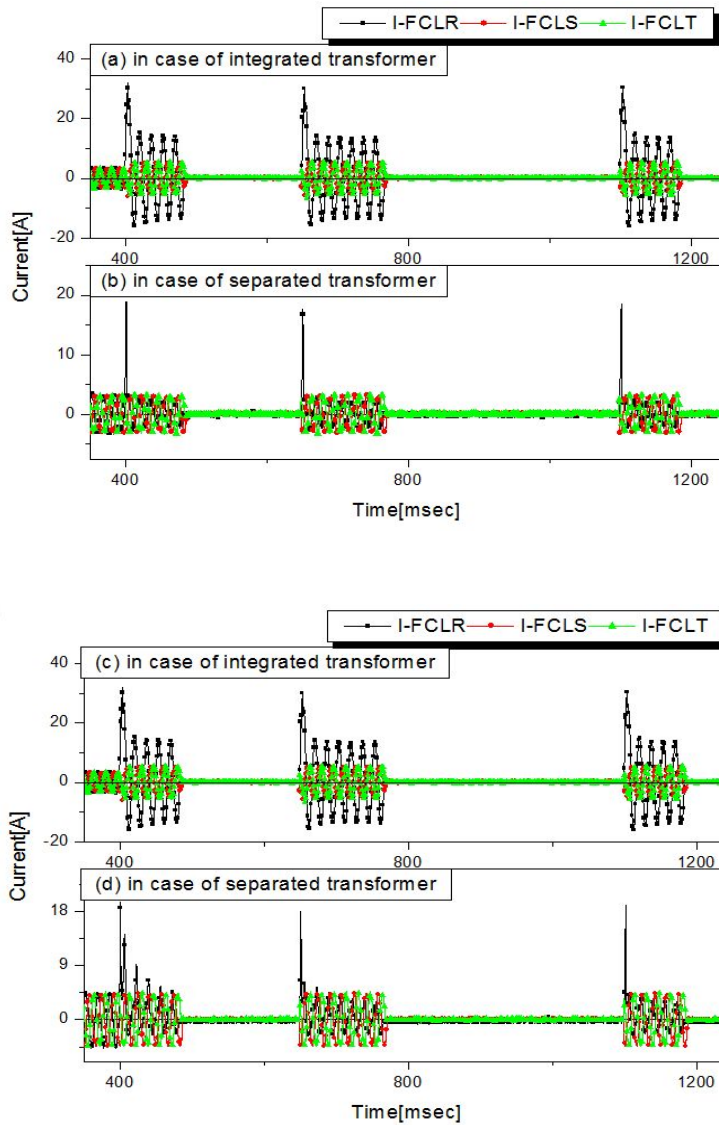


그림 3-18 중성선이 있는 삼상 변압기형 초전도 한류기의 1선 지락사고 시 사고전류 제한파형((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

Fig. 3-18 Limiting fault current waveforms of the three phase transformer-type SFCL with a neutral line when the single line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)



그림 3-19(a), (b)는 200V 인가 시 재폐로 동작책무에 따른 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 회복과형을 나타낸 것이다. 그림 3-19(a)은 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 각 상의 초전도 소자 2개가 모두 동시퀵치되어 각각 18.25[msec], 15.27[msec], 17.1[msec]동안 회복되었다. 그림 3-19(b)은 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 R상의 초전도 소자 2개가 동시퀵치되어 각각 17.51[msec], 15.24[msec], 13.11 [msec]동안 회복되었다. 두 변압기형 삼상 초전도 한류기는 중성선이 없는 경우보다 있는 경우 회복시간이 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 중성선이 없는 경우 각 상 하나의 소자만이 사고전류를 부담하였지만 중성선이 있는 경우 각 상 2개의 초전도 소자가 사고전류를 분담하여 제한하기 때문에 훨씬 빠른 시간에 회복되는 것이다. 그리고 일체형 보다 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기가 중성선 유무에 관계없이 빠르게 회복하는 것을 확인할 수 있다.

그림 3-19(c), (d)는 280V 전압 인가 시 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 회복과형을 나타낸 것이다. 그림 3-19(c)는 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 각 상 초전도 소자 2개 모두 동시퀵치되어 각각 39.68[msce], 40.22[msce], 41.98[msce]동안 회복되었다. 그림 3-19(d)는 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 R상의 초전도 소자 2개가 동시 퀵치되어 각각 24.12[msce], 24.06[msce], 23.43[msec]동안 회복되었다. 두 변압기형 삼상 초전도 한류기는 전압이 증가할수록 그리고 사고주기가 길수록 중성선이 없을 경우보다 회복시간이 많이 단축된 것을 확인할 수 있다.

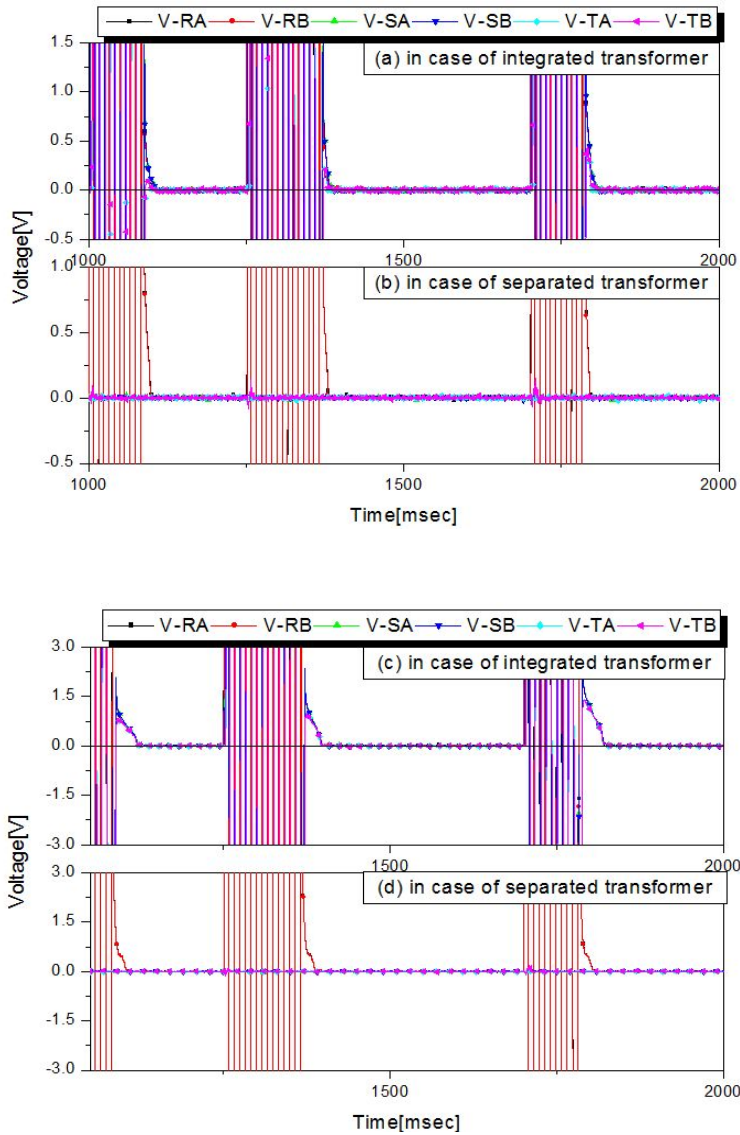


그림 3-19 중성선이 있는 3상 변압기형 초전도 한류기의 1선 지락사고 시 회복특성파형((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

Fig. 3-19 Recovery waveforms of a superconducting element in the three phase transformer-type SFCL with a neutral line when the single line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

그림 3-20은 1선 지락사고 시 전압증가에 따른 초전도 소자의 회복시간을 나타낸 곡선이다. 전압이 증가할수록 초전도 소자가 받는 전력량이 증가하기 때문에 회복시간이 증가하게 되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 일체형과 분리형 삼상변압기형 초전도 한류기는 중성선이 없을 때보다 중성선이 있는 경우 더 빠른 시간에 회복하는 것을 확인할 수 있다.

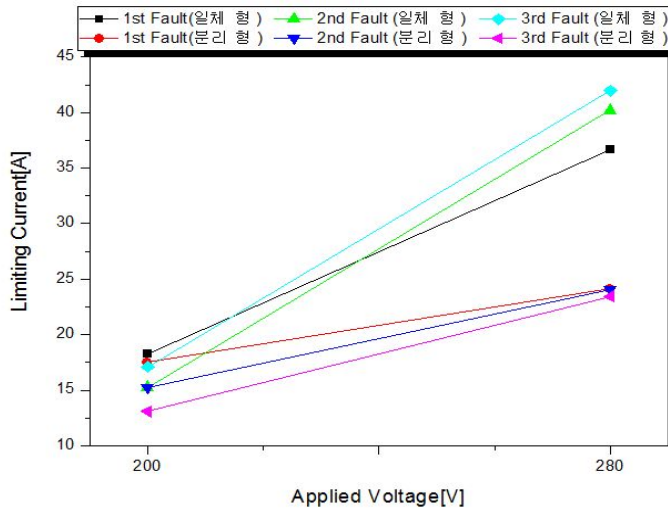


그림 3-20 1선 지락사고 시 전압증가에 따른 회복시간 곡선

Fig. 3-20 Recovery time curves according to applied voltage during the single line-to-ground fault

## b. 2선 지락사고

그림 3-21은 중성선이 있는 경우 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 재폐로 동작책무에 따른 2선지락 사고전류의 제한파형을 나타낸 것이다. 각 상의 1, 2차 권선의 수는  $N_p:N_s:N_T = 4:1:1$ 이고, 각 상 인가전압은 200V, 280V이다.

그림 3-21(a)은 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 R상의 사고전류는 각각 65.47[A], 65.07[A], 64.8[A]로 제한되었고, S상의 사고전류는 각각 -60.53[A], -59.2[A], -59.07[A]로 제한되었다. 그림 3-21(b)는 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 R상의 사고전류는 각각 18.8[A], 17.73[A], 17.73[A]로 제한되었고, S상의 사고전류는 -18.93[A], -18.4[A], -19.2[A]로 제한되었다. 2선 지락사고 발생 시에도 두 변압기형 삼상 초전도 한류기는 중성선의 유무에 관계없이 사고전류 제한파형의 차이가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.

그림 3-21(c)은 일체형 삼상변압기형 초전도 한류기로 R상의 사고전류는 각각 90.93[A], 89.87 [A], 89.9[A]로 제한되었고, S상의 사고전류는 각각 -85.33[A], -83.6[A], -83.07[A]로 제한되었다. 그림 3-21(d)은 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 R상의 사고전류는 각각 19.33[A], 18.27[A], 19.07[A]로 제한되었고, S상의 사고전류는 각각 -31.31[A], -29.2[A], -29.2[A]로 제한되었다. 전압이 증가하여도 두 변압기형 삼상 초전도 한류기는 중성선의 유무에 크게 달라진 점이 없는 것을 확인할 수 있다.

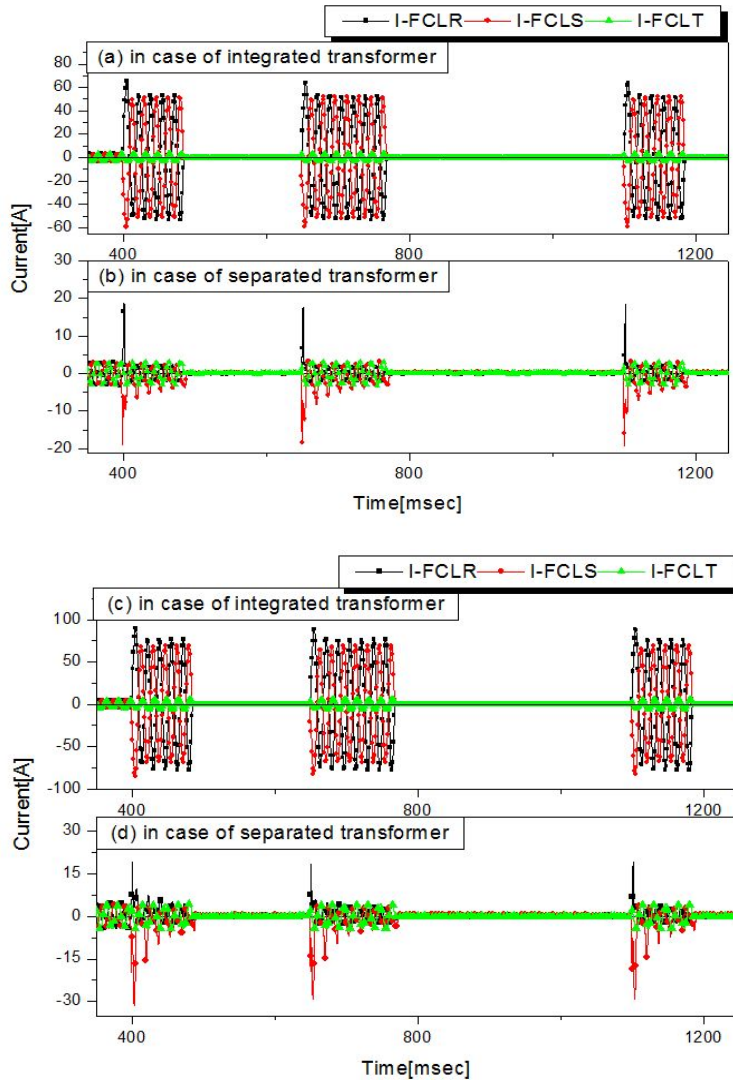


그림 3-21 중성선이 있는 3상 변압기형 초전도 한류기의 2선 지락사고 시  
사고전류 제한파형 ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

Fig. 3-21 Limiting fault current waveforms of the three phase  
transformer-type SFCL with a neutral line when the double  
line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

그림 3-22(a), (b)는 200V 인가 시 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 재폐로 동작책무에 따른 회복과형을 나타낸 것이다. 그림 3-22(a)는 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 각 상의 초전도 소자 2개가 동시 켜치가 되어서 각각 16.39[msec], 14.89[msec], 13.02[msec]동안 회복되었다. 그림 3-22(b)는 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 R상과 S상의 초전도 소자 2개가 동시 켜치가 되어서 각각 14.24 [msec], 12.16[msec], 10.72 [msec]동안 회복되었다. 두 변압기형 삼상 초전도 한류기는 2선 지락사고일 때도 마찬가지로 중성선 유무에 따라 회복시간이 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 1선 지락사고 회복특성과 같은 이유이다. 그림 3-22(c), (d)는 280V 전압 인가 시 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 재폐로 동작책무에 따른 회복과형을 나타낸 것이다. 그림 3-22(c)는 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 초전도 소자 6개가 동시 켜치가 일어나서 각각 20.47[msec], 23.08[msec], 26.38[msec]동안 회복되었다. 그림 3-22(d)는 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 R상과 S상의 초전도 소자 2개가 켜치되어 각각 21.63[msec], 19.25[msec], 24.95[msec]동안 회복되었다. 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기는 전압이 증가하더라도 중성선이 없는 경우보다 회복시간이 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 초전도 소자 6개가 동시 켜치가 일어나서 초전도 소자가 받는 전력량을 분담하였기 때문이다. 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기는 발생한 사고상의 초전도 소자 2개가 동시 켜치되어 전력량을 분담하였기 때문에 회복시간이 짧아진 것이다.

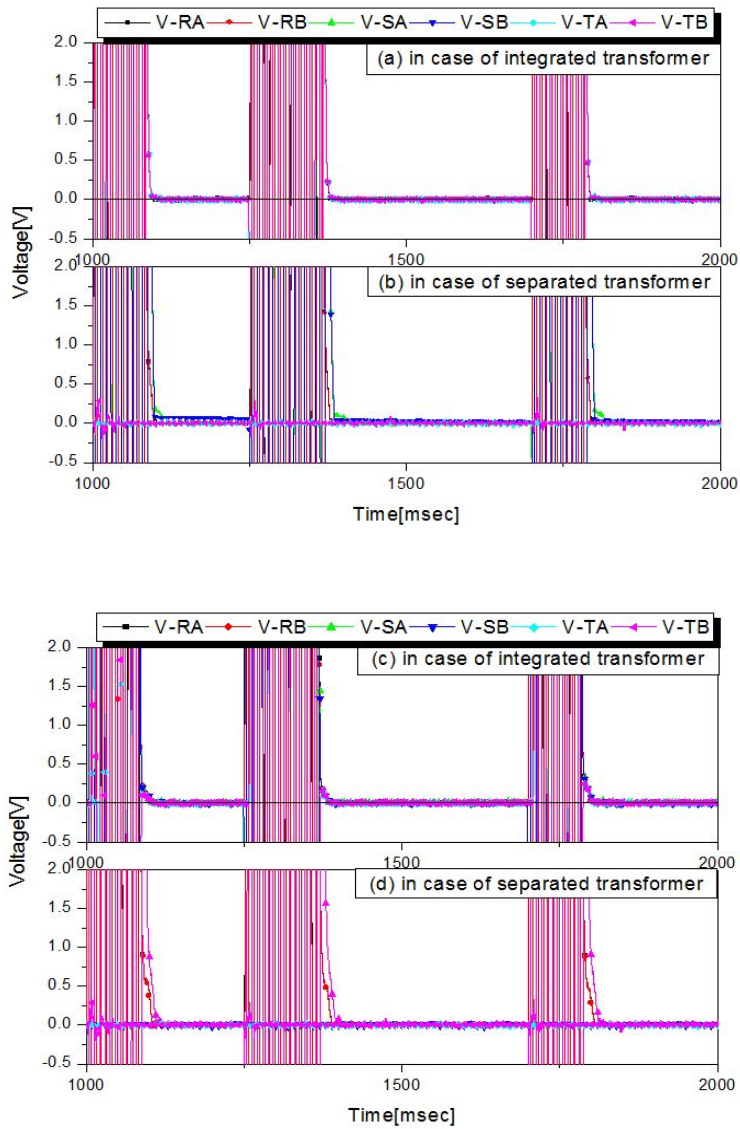


그림 3-22 중성선이 있는 삼상 변압기형 초전도 한류기의 2선 지락사고 시 회복특성과형 ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

Fig. 3-22 Recovery waveforms of a superconducting element in the three phase transformer-type SFCL with a neutral line when the double line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

그림 3-23은 2선 지락사고 시 전압증가에 따른 초전도 소자의 회복시간을 나타낸 곡선이다. 두 변압기형 삼상 변압기형 초전도 한류기는 중성선이 없을 경우와 비교하였을 때 중성선이 있는 경우 회복시간이 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 일체형 삼상변압기형 초전도 한류기는 6개의 초전도 소자가 전력부담을 하기 때문에 분리형 삼상변압기형 초전도 한류기와 거의 비슷한 회복시간을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다.

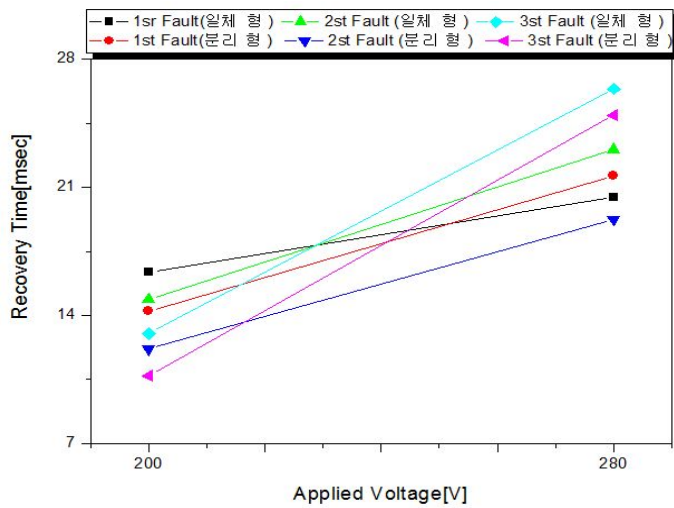


그림 3-23 2선 지락사고 시 전압증가에 따른 회복시간 곡선

Fig. 3-23 Recovery time curves according to applied voltage during the double line-to-ground fault



### c. 3선 지락사고

그림 3-24(a), (b)는 200V 전압 인가 시 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 재폐로 동작책무에 따른 3선 지락사고전류 제한과형을 나타낸 것이다. 각 상의 1, 2차 권선의 수는  $N_p:N_s:N_T = 4:1:1$ 이다.

그림 3-24(a)는 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 R상의 사고전류는 각각 66.67[A], 66[A], 65.73[A]로 제한되었고, S상의 사고전류는 각각 -60.27[A], -59.2[A], -58.8[A]로 제한되었다. 그리고 T상의 사고전류는 각각 21.87[A], 19.2[A], 20.53[A]로 제한되었다. 그림 3-24(b)는 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 R상의 사고전류는 각각 18.8[A], 17.87[A], 18.7[A]로 제한되었고, S상의 사고전류는 각각 -18.93[A], -18.13[A], -18.87[A]로 제한되었다. 그리고 T상의 사고전류는 각각 14.8 [A], 14.4[A], 14.67[A]로 제한되었다. 3선 지락사고 역시 두 변압기형 삼상 초전도 한류기는 중성선 유무에 사고전류 제한이 큰 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있다.

그림 3-24(c), (d)는 280V 전원 인가 시 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 사고전류 제한과형을 나타낸 것이다. 그림 3-24(c)는 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 R상의 사고전류는 각각 92.4[A], 91.6[A], 91.3[A]로 제한되었고, S상의 사고전류는 각각 -85.33[A], -84.4 [A], -83.6[A]로 제한되었다. 그리고 T상의 사고전류는 각각 22.53[A], 20.13[A], 21.87[A]로 제한되었다. 그림 3-24(d)는 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 R상의 사고전류는 각각 19.33[A], 18.27[A], 19.07[A]로 제한되었고, S상의 사고전류는 각각 -29.2[A], -28.67[A], -27.73[A]로 제한되었다. 그리고 T상의 사고전류는 각각 17.07[A], 16.53[A], 17.07[A]로 제한되었다. 전압이 증가하더라도 두 변압기형 삼상 초전도 한류기는 중성선 유무에 관계없이 사고전류 제한의 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.

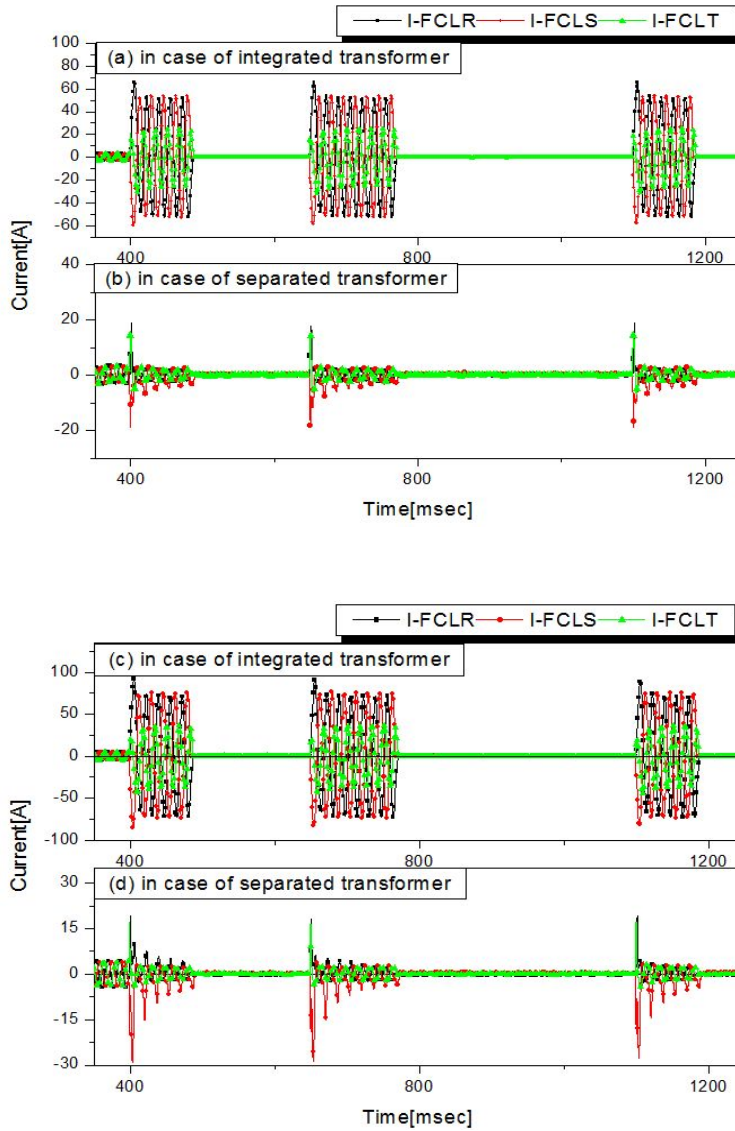


그림. 3-24 중성선이 있는 삼상 변압기형 초전도 한류기의 3선 지락사고 시  
사고전류 제한과형 ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

Fig. 3-24 Limiting fault current waveforms of the three phase  
transformer-type SFCL with a neutral line when the triple  
line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

그림 3-25(a), (b)는 200V 전압 인가 시 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 재폐로 동작책무에 따른 회복과형을 나타낸 것이다. 그림 3-25(a)는 일체형 삼상변압기형 초전도 한류기로 초전도 소자 6개가 동시퀵치가 되어서 각각 15.35[msec], 14.18[msec], 15.48[msec]동안 회복되었다. 그리고 그림 3-25(b)는 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 각 상의 초전도 소자 6개 모두 동시퀵치가 되어서 각각 13.44[msec], 10.88 [msec], 12.75[msec]동안 회복되었다. 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기가 다른 사고일 때보다 초전도 소자의 회복시간이 짧아진 것을 확인할 수 있는데 이는 하나의 철심에 3상이 결합되어 있으므로 각 상의 초전도 소자가 사고전류를 분담하였기 때문이다. 그리고 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기 또한 각 상의 초전도 소자들이 사고전류를 분담하였기 때문에 중성선이 없을 때보다 빠른 회복시간을 나타낸 것이다. 그림 3-25(c), (d)는 280V 전압 인가 시 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 재폐로 동작책무에 따른 회복과형을 나타낸 것이다. 그림 3-25(c)는 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 각 상의 초전도 소자가 모두 동시퀵치되어 각각 27.84[msec], 26.52[msec], 35.01[msec]동안 회복되었다. 그림 3-25(d)는 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기로 각 상의 초전도 소자가 모두 동시퀵치되어 각각 20.99[msec], 25.41[msec], 20.55[msec]동안 회복되었다. 두 변압기형 삼상 초전도 한류기는 전압이 증가하더라도 각 상의 초전도 소자의 동시퀵치로 다른 지락사고의 회복시간보다 빠른 것을 확인할 수 있다.

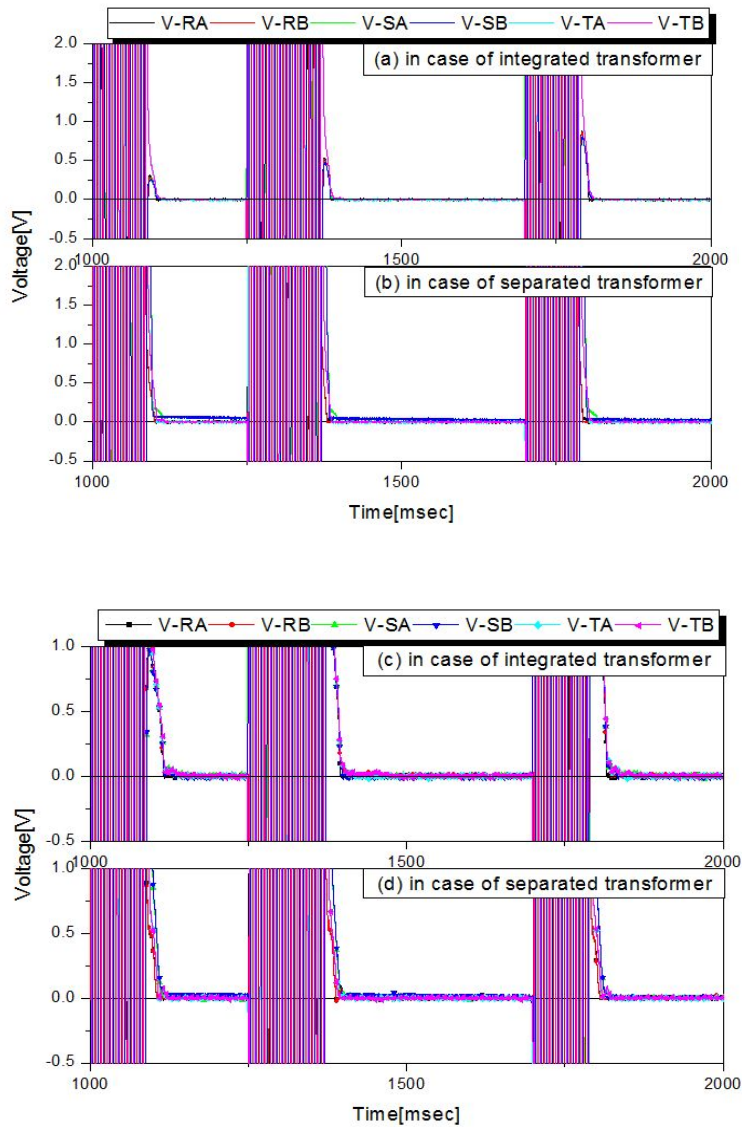


그림 3-25 중성선이 있는 삼상 변압기형 초전도 한류기의 3선 지락사고 시 회복특성파형((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

Fig. 3-25 Recovery waveforms of a superconducting element in the three phase transformer-type SFCL with a neutral line when the triple line-to-ground fault generated ((a), (b) = 200V, (c), (d) = 280V)

그림 3-26은 3선 지락사고 시 전압증가에 따른 회복시간 곡선을 나타낸 것이다. 앞선 중성선이 없는 경우와 비교 시 두 변압기형 3상 초전도 한류기의 초전도 소자 회복시간은 전압이 증가하더라도 많이 짧아진 것을 확인할 수 있다. 이는 일체형 삼상변압기형 초전도 한류기는 6개의 초전도 소자가 모두 동시켄치가 되어서 초전도 소자의 전력분담을 하기 때문에 빠른 시간에 회복할 수 있으며, 분리형 삼상변압기형 초전도 한류기는 발생한 사고상의 초전도 소자 2개가 전력분담하기 때문에 중성선이 없을 때보다 빠른 회복시간을 나타내고 있는 것이다.

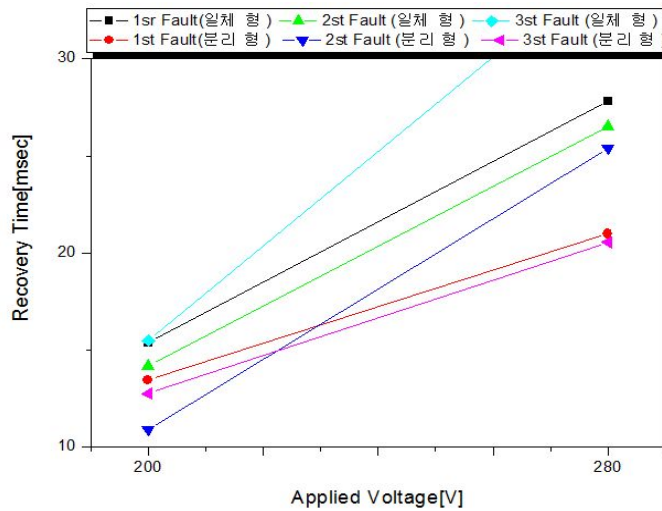


그림 3-26 3선 지락사고 시 전압증가에 따른 회복시간 곡선

Fig. 3-26 Recovery time curves according to applied voltage during the triple line-to-ground fault

## IV. 결 론

본 논문에서는 일체형과 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 사고유형별 동작특성을 분석하였으며, 중성선 유무에 따른 동작특성을 비교 분석하였다. 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기는 하나의 철심에 3상이 연결되어 있는 구조를 가지고 있고, 분리형 삼상변압기형 초전도 한류기는 하나의 철심에 한상만 연결되어 있는 구조이다.

그리고 본 논문에서 제시하고 있는 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기에서 사고가 발생하였을 때 건전상에도 영향을 주게 되어 초전도 소자의 켄치현상이 발생하는 현상들을 분리형 삼상변압기형 초전도 한류기를 통하여 해결하였다. 이러한 분석결과를 토대로 3상 시스템에서 발생하는 지락사고를 실험함으로써 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기와 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기의 사고전류 제한특성과 회복특성을 비교 분석하였다. 이러한 분석을 통하여 본 논문에서 얻은 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기는 사고가 발생하여 사고전류를 제한할 때 사고가 발생한 상뿐만 아니라 사고가 발생하지 않는 건전상의 전류도 증가하게 되었다. 이는 하나의 철심에 3상이 연결되어 있으므로 사고가 발생한 상에서 자속이 발생하여 건전상에 영향을 끼치게 되기 때문이다. 이때 자속의 영향을 받은 건전상에서 전류가 발생하여 정상전류보다 높은 전류가 흐르게 되는 것이다. 그에 반해 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기는 하나의 철심에 하나의 상만을 연결하기 때문에 사고가 발생하더라도 다른 건전상에는 전혀 영향을 주지 않고 발생한 사고상의 사고전류만을 제한하게 되므로 일체형 보다 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기가 사고전류를 낮게 제한할 수 있었다.

2. 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기는 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기보다 회복시간이 80msec이내에 회복되었다. 중성선이 있는 경우에는 50msec이내에 모든 초전도 소자가 회복하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 중성선이 있는 경우에는 초전도 소자 모두 균일하게 소비전력을 분담하기 때문이고, 중성선이 없는 경우에는 각 상의 초전도 소자 2개 중 하나의 소자만이 켜치되어 회복하기 때문에 회복시간이 길어지는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 분석결과로부터 분리형 삼상 변압기형 초전도 한류기는 일체형 삼상 변압기형 초전도 한류기보다 높은 사고전류 제한율을 가지고 있으며, 빠른 회복시간으로 사고가 발생하였을 때 차단기의 역할을 분담할 수 있을 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

- [1] W. Paul, M. Chen M. Lakner, J Rhyner, D. Braun, and W. Lanz, "Fault current limiter based on high temperature superconductors - different concepts, test results, simulations, applications", *Physica C*, Vol. 354, pp. 27-33, 2001.
- [2] B. H. Choi, B. S. Han, "Operating Characteristics of Transformer Type SFCL with Resistor in Tertiary Winding", *Journal of the Korea Institute of Electronic Material Engineers*, Vol 21, No 12, pp. 111, 2008.
- [3] H. S. Choi, H. R. Kim, O. B. Hyun, and S. J. Kim, "Quench properties of Y-Ba-Cu-O films after over powering quenches," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 11, pp. 2418-2421, 2001.
- [4] 김준환, 이강완, "전력계통, 고정전류 증대와 대응방안", *전기저널*, 1권, 1호, pp. 19, 1998.
- [4] S. B. Rhee, C. H. Kim, K. H. Kim, J. C. Kim, O. B. Hyun, "An Analysis of Recloser Operation According to Recovery Characteristics of Superconducting fault Current Limiter", *전기학회논문집*, Vol. 58 No 5, pp. 905-909, 2009.
- [5] Y. S. Cho, H. S. Choi, H. M. Park, J. H. Lee, B. I. Jung "Current Limiting Characteristics of transformer type SFCL using neutral line", *대한전기학회 하계학술대회 논문집*, pp. 2090-2010, 2007.
- [6] 임성훈, 최명호, 이현수, 한병성, "차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 설계 및 특성 시뮬레이션", *전기학회논문지*, 48권, 3호, pp. 173, 1999.



- [7] Y. S. Cho, H. S. Choi, H. M. Park, S. B. Chung, "Characteristics of Transformer-Type SFCL according to the Connecting Methods of Secondary Coils" KIEE, Vol. 56 No 12, pp. 2078~2083, 2007.
- [8] S. H. Lim, "Study on peak current limiting characteristics of a flux-lock Type using its third winding," IEEE Transactions on, Appl. superconduct., Vol. 21, pp. 1275-1279, 2011.
- [9] S.-W. Yim, H.-R. O.-B. Hyun, J. Sim, "Quench and recovery characteristics of Au/YBCO thin type SFCL," Physica C: Superconductivity, Vol. 463-465, pp. 1172, 2007.
- [10] I. K. You, S. H. Lim, J. C. Kim, "Operational Characteristics of Hybrid SFCL With First Half Cycle Non-Limiting Operation Considering Its Design Parameter," IEEE Transactions on, Appl. superconduct., Vol. 21, pp.1271-1274, 2011.
- [11] H. S. Choi, J. H. Lee, Y. S. Cho, H. M. Park, "Recovery behaviors of the transformer-type SFCL with or without neutral lines," IEEE Transactions on, Appl. superconduct., Vol. 19, pp. 1793-1796, 2009.
- [12] Y. S. Cho, H. S. Choi, B. I. Jung, "Operation characteristics in the three-phase transformer-type SFCL with neutral line based on sequential reclosing process." Physica C, Vol. 471, pp. 1341-1347, 2011.
- [13] S. W. Lee, S. H. Lim, S. H. Ko, S. R. Lee, "Operational Characteristics of a Flux-Lock Type SFCL Integrated with Voltage-Controlled Voltage Source Inverter," KIEE Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 3, No 4, pp. 546-551, 2008.

- [14] 이상봉, 김철환, 김규호, 김재철, 현옥배, "초전도 한류기 회복특성에 따른 재폐로 차단기 동작 연구", 대한전기학회 하계학술대회, NO. 7 , pp. 279-380, 2008.
- [15] S. G. Choi, H. S. Choi, Y. S. Cho, H. M. Park, B. I. Jung, K. H. Ha, "Characteristics of transformer-type superconducting fault current limiter depending on reclosing in changing the number of turns of secondary winding ", Physica C, Vol. 471, p. 1332-1336, 2011.

## 감사의 글

2년이라는 시간은 제게 앞만 보고 달려와 놓친 것, 잃은 것도 많은 시간이었지만 그 만큼 제 인생 전체를 볼 때 가장 큰 발전과 발돋움의 기간이었습니다. 이렇게 변화할 수 있게 도와주신 제 주위에 모든 분들께 감사의 말씀을 드립니다. 공학적인 지식과 더불어 엔지니어로써 가져야할 바람직한 마음가짐과 자세를 깨우치게 해주신 최효상 교수님께 진심으로 감사 말씀드립니다. 초전도 한류기 분야에 대해 많은 것을 배울 수 있었고, 이를 통해 자부심과 자신감을 소양할 수 있었던 점을 거듭 감사히 생각합니다. 지난 20여 년간 머리와 가슴으로 인생을 살게끔 뒷바라지 해주신 부모님께 사랑한다는 말씀을 드리며, 저의 논문을 심사해주시고 석사과정동안 여러 가르침을 해주신 백형래 교수님, 조금배 교수님, 이우선 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 저에게는 인생의 전환점이라고 해도 과언이 아닐 만큼 큰 도움을 받았던 전력계통실협실. 그중에서도 대학원 생활을 통해 인간관계, 또 다른 고민과 삶의 방향을 바로 세우게 해주신 조용선 선배와 잘 챙겨주시고 실수투성인 저에게 웃음과 인생의 가르침을 주신 정병익 선배, 그리고 저와 함께 입학하고 졸업까지 항상 옆에서 큰 힘이 되어주었던 하경훈 형에게 감사하다는 말을 하고 싶습니다. 학부시절부터 저의 옆에서 어려울 때마다 도움을 주시고 정신적 멘토가 되어 주신 이성영 형과 학교 내에서 항상 웃음을 잃지 않고 나를 대해준 실험실 막둥이 최혜원에게도 감사하다는 말을 전하고 싶습니다. 이에 졸업을 앞두고 지나온 시간을 돌아보면 '왜 더 좋은 방법이 있었는데 그렇게 하지 못했나?'에 대한 후회를 하곤 합니다. 이제 논문이 완성되어가면서 이런 후회가 바로 깨달음 이였다는 사실을 알게 되었습니다. 많은 깨달음 속에서도 결국 인생은 깨달음의 연속이라고 생각합니다. 제가 감사의 말씀 드린 모든 분들 오래오래 건강하시고, 좋은 일들만 가득하시길 바라며 더 큰 사회를 위해 당찬 발걸음을 내딛는 저를 끝까지 함께 해주시길 바랍니다.

마지막으로 2년동안 못난 저를 기다려준 여자친구에게 이 논문을 전해주고 싶습니다.

2011년 12월 최 수 근 올림