

2007年  
2月  
碩士學位論文

# 변압기를 이용한 고온 초전도 한류기의 사고전류제한 특성에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

趙鎔善

2007年  
2月  
碩士學位論文  
변압기를  
이용한  
고온  
초전도  
한류기의  
사고전류제한  
특성에  
관한  
연구  
趙鎔善

# 변압기를 이용한 고온 초전도 한류기의 사고전류제한 특성에 관한 연구

A Study on Fault Current Characteristics of High-T<sub>c</sub>  
Superconducting Fault Current Limiter Using a Transformer

2007年 2月 日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

趙鎔善

# 변압기를 이용한 고온 초전도 한류기의 사고전류제한 특성에 관한 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.

2006 年 10 月 日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

趙 鎔 善

趙鎔善의 碩士學位 論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 \_\_\_\_\_ 印

委 員 朝鮮大學校 教授 \_\_\_\_\_ 印

委 員 朝鮮大學校 教授 \_\_\_\_\_ 印

2006 年 11 月 日

朝鮮大學校 大學院

# 목 차

## ABSTRACT

I. 서론	1
II. 초전도 한류기의 구조 및 동작 원리	3
III. 설계 및 제작	12
A. 초전도 소자 제작 및 임계 특성	12
1. 초전도 소자 설계·제작	12
2. 초전도 소자 임계 특성	14
B. 변압기 설계 및 제작	19
C. 초전도 소자 홀더 설계 및 제작	23
D. 실험 장치의 구성	25
1. 사고발생용 전원 시스템	25
2. 사고발생용 위상제어 시스템	27
3. 사고발생용 스위치 및 드라이버 시스템	28
IV. 실험결과 및 분석	30
A. 2차회로의 증가에 따른 전류제한 특성 분석	30
B. 2차회로의 직·병렬연결에 따른 전류제한 특성 분석	35

C. 철심의 개로 및 폐로 구조에 따른 특성 분석 . . . . . 40

V. 결 론 . . . . . 46

참고문헌

## *List of table*

Table 1. Specification of a YBCO thin film .....	13
Table 2. The designed parameters of the transformer for a SFCL .....	20
Table 3. The designed parameter of the power system .....	26

## *List of figures*

Fig. 1. Conceptive diagram of the SFCL using transformer .....	3
Fig. 2. Experimental circuits of the SFCLs according to the increase of secondary windings .....	4
Fig. 3. Equivalent circuits of the SFCLs according to the serial and parallel connections of three secondary coils .....	7
Fig. 4. Conceptive diagram of a SFCL with an iron core of the closed or open loop .....	9
Fig. 5. The pattern shape of a YBCO thin film .....	13
Fig. 6. The critical surface of a superconductor .....	14
Fig. 7. The phase diagram of a superconductor .....	15
Fig. 8. Experimental circuit for the measurement of the critical current .....	18
Fig. 9. $I$ - $V$ curves of the superconducting elements .....	18
Fig. 10. A design drawing of the transformer for a SFCL .....	19
Fig. 11. The appearance of the designed reactor .....	20
Fig. 12. The self-inductances according to turn number .....	21
Fig. 13. The flowing flux into the iron core .....	21
Fig. 14. The fixing holder for the YBCO thin films .....	24
Fig. 15. The contact pole for the mechanical connection .....	24
Fig. 16. The power system for various fault simulation .....	25
Fig. 17. The controller for power system .....	26
Fig. 18. The phase controller for various fault simulation .....	27
Fig. 19. The switch panel for various fault simulation .....	28
Fig. 20. The experimental circuit for various fault simulation system ..	29
Fig. 21. Fault current limiting curves of resistive-type SFCL	



according to the number of the serial connection for for three superconducting elements .....	31
Fig. 22. Fault current limiting curves of SFCL according to the number of the secondary windings for three superconducting elements .....	32
Fig. 23. The resistance curves generated in the superconducting element of resistive-type SFCL and SFCL using the transformer .....	33
Fig. 24. Current waveforms of the resistive-type SFCL and the SFCLs using the transformer .....	36
Fig. 25. Voltage waveforms of the resistive-type SFCL and the SFCLs using the transformer .....	37
Fig. 26. Resistances and consumption powers of the resistive-type SFCL and the SFCLs using the transformer .....	39
Fig. 27. Fault current limiting characteristics of the closed-loop circuit according to the inductance ratios between primary and secondary windings .....	41
Fig. 28. Fault current limiting characteristics of the open-loop circuit according to the inductance ratios between primary and secondary windings .....	42
Fig. 29. Consumption power graph compare with primary and secondary windings of SFCL using closed-loop core .....	44
Fig. 30. Consumption power graph compare with primary and secondary windings of SFCL using open-loop core .....	45

# *ABSTRACT*

## **A Study on Fault Current Characteristics of High- $T_C$ Superconducting Fault Current Limiter Using a Transformer**

Cho, Yong - Sun

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

Department of Electrical Engineering,

Graduate School of Chosun University

The fault current levels has gradually increased to exceed breaker interruption ratings due to the variation of the power demands. The mechanical impacts of protective equipments on the power system have been increased by the increase of these fault current levels. Therefore, it is demanded to suppress the fault currents with reliability and rapidity. Under these situations, the appearance of the superconducting fault current limiter (SFCL) suggests a positive alternative for reduction of the fault current. SFCLs can limit the fault currents within very short response time (less than 6 msec). There are various kinds of SFCLs : resistive, inductive, flux-lock, and so on. Resistive-type SFCL using intrinsic zero-impedance characteristic of the superconductor has a simple structure. It could be made small-sized and compact by using thin films. The simultaneous quenching between the superconducting elements is important for the capacity increase in serial and parallel connections. The unbalanced quenching of the resistive-type SFCL at the serial and parallel connections between superconduc-

ting elements occurs by slight difference in their critical current density. The slight difference is unavoidable because of inhomogeneity generated in their manufacturing process. To connect the superconducting elements in series and parallel without unbalanced quench is necessary for the increase of capacity in SFCLs. As other types of SFCLs, we have tested the characteristics of the SFCLs using a transformer with a primary winding and several secondary windings. In this paper, we investigated the three structures as follows :

1. The SFCL consisted of a transformer with a primary winding and three secondary windings.
2. The SFCL consisted of a transformer with a primary winding and the serial or the parallel connections of three secondary windings from the parallel connection of three superconducting elements.
3. The SFCL consist of a transformer with closed or open-loop iron core.

From the analysis for the results obtained by the experiments of the SFCL using a transformer, the conclusions were found as follows :

1. The SFCL using a transformer with a primary winding and three secondary windings achieved the simultaneous quenching due to the electrical isolation and the mutual flux linkage among the secondary windings by using the transformer. The SFCL also has the easiness of capacity increase by simultaneous quenching between each superconducting element and by almost same resistance compared to resistive-type SFCL.
2. The SFCL with parallel connection of secondary windings and three

superconducting elements was more effective in the limitation of the fault current, the consumption power and the quenching time of the superconducting elements when it compared to both the resistive-type SFCL and a SFCL with the serial connection of secondary windings.

3. The consumption power of the SFCL with the closed-loop iron core was lower than in the open-loop iron core because of the reduction of mutual inductance between primary and secondary windings from the increase of the leakage flux.

## I. 서 론

현재 전력계통은 국가 경제의 지속적인 성장과 산업발전으로 인해 전력수요가 급격히 증가하고 있는 실정이다. 이에 따라 전력계통의 허용용량은 계통 임피던스의 감소로 인해 선로의 단락 및 지락 사고시 사고전류가 그 허용범위를 초과하여 급격히 증가하고 있다. 이로 인해 사고전류는 전력 시스템의 절연과피 등 계통의 신뢰도 및 안정도 저하의 요인으로 대두되고 있다[1]. 이러한 사고전류의 대응책으로 현재 대응량 차단기로의 교체, 직렬 리액터 사용, 송전선로의 부분 모선분리 등 여러 방안들을 강구하고 있으나 각각의 방안들이 단점을 가지고 있어 확실한 대응책으로 적용되고 있지 못하고 있는 실정이다. 이러한 대응책들의 문제점을 모두 해결할 수 있는 방안으로 초전도 현상을 이용한 초전도 한류기가 전 세계적으로 대두되고 있다. 초전도 한류기는 초전도 임계특성 중 하나인 영저항 특성을 이용하기 때문에 사고 전에는 제로 임피던스로서 계통에 아무런 영향이 없이 동작을 한다. 그러나 전력계통에 단락 및 지락 사고가 발생하여 사고전류가 초전도체의 임계특성을 넘으면 초전도 상태에서 상전도 상태로의 상전이 발생하여 신속한 임피던스의 발생으로 인해 계통의 사고전류를 제한하게 된다.

현재 전 세계적으로 연구가 진행되고 있는 초전도 한류기는 저항형, DC 리액터형, 자속구속형 등 여러 가지의 형태가 있다. 저항형 한류기는 구조 및 원리가 간단하고 소형화할 수 있는 장점이 있다. 또한, 한류 용량을 증대시키기 위해 초전도체의 직·병렬연결이 필수적이거나, 이에 따라 초전도체의 동시퀀치 문제점이 발생하게 된다. DC 리액터형 한류기는 저항형과 다르게 초전도체에 직접 사고전류가 흐르지 않기 때문에 초전도체의 파손 위험이 적고 회복시간이 빠르다는 장점이 있으나, 용량증대시 철심 포화문제와 부피증가의 문제, 제작상의 어려움 등의 문제점이 있다[2]-[14].

본 논문에서는 고 임계전류밀도를 갖는  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (YBCO) 박막형 고온 초전도 소자와 변압기를 이용하여 초전도 한류기를 구성하고, 초전도 소자의 퀀치특성과 사고전류제한 특성 등에 대해 분석하였다. 이를 위해, 첫 번째로 기본적인 구조를 갖는 변압기를 이용한 초전도 한류기에 대해 저항형 한류기와 비교하여 분석하였다. 두 번째로 철심과 리액터로 구성된 변압기를 이용하는 초전도 한류기의 2차

회로 증가에 따른 특성을 분석하였다. 세 번째로 계통적용을 위해 용량증대를 위한 초전도 소자의 직·병렬연결이 불가피한 바 2차회로의 직·병렬연결에 따른 초전도 한류기의 특성에 대해 분석하였다. 또한 네 번째로 철심의 개로 및 폐로 구조를 갖는 초전도 한류기의 사고전류제한 특성을 분석하였다.

## II. 초전도 한류기의 구조 및 동작 원리

본 논문에서 제시하는 초전도 한류기의 구조는 fig. 1과 같이 1·2차 권선을 갖는 변압기와 초전도 소자로 이루어져 있다. 변압기는 1차 권선에 흐르는 선로전류를 1·2차 권선수의 비에 따라 변류를 시킨다. 이렇게 변환된 2차 선로전류는 초전도 소자의 임계전류를 초과할 시 소자의 퀘치 작용에 의해 전류를 제한하게 된다. 초전도 소자는 박막형태의 YBCO를 사용하였으며, 특성상 극저온에서만 초전도 상태를 유지할 수 있으므로 액체질소(liquid nitrogen)가 담긴 저온용기(cryostat) 내에 담겨져 있다.

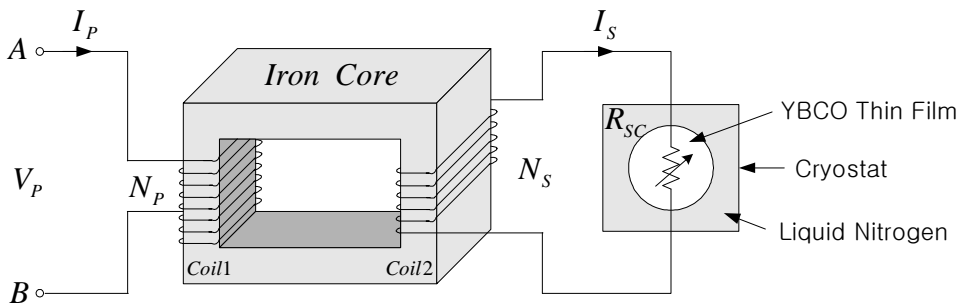
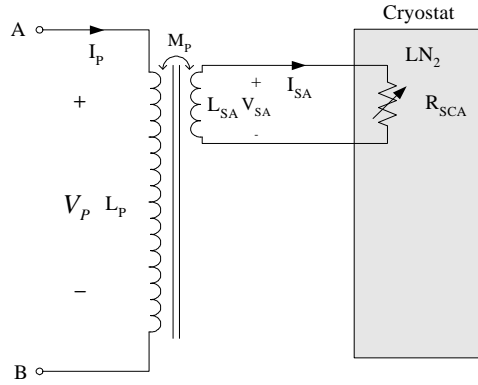


Fig. 1. Conceptive diagram of the SFCL using transformer

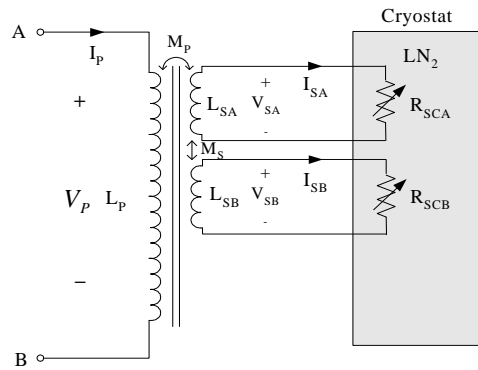
Fig. 2는 2차회로의 증가에 따른 초전도 한류기의 등가회로도를 나타낸 것이다. 사고가 발생하기 전의 초전도 한류기는 초전도 소자의 저항이 0이기 때문에 철심의 손실을 무시한다면 선로 전류( $I_p$ )는  $I^2R$ 의 손실이 없이 흘릴 수 있다. 그러나 사고 후에는 1·2차권선의 인덕턴스 비에 의해 유도된 2차 전류( $I_s$ )에 의해 초전도 소자가 퀘치되어 사고전류는 제한이 된다. 식 (1)과 (2)는 변압기를 이용하는 초전도 한류기의 사고전과 사고후의 상태를 방정식으로 나타낸 것이다.

$$j\omega L_p I_p - j\omega M I_s = V_p \quad (1)$$

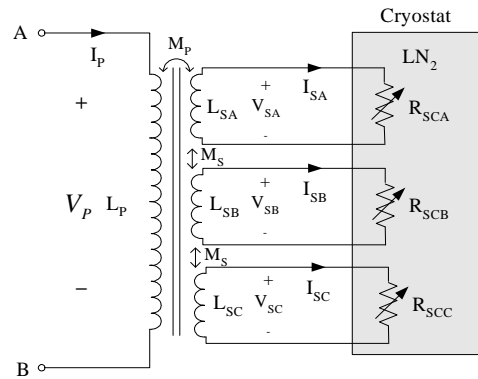
$$j\omega M I_p - (j\omega L_s + R_{sc}) \cdot I_s = 0 \quad (2)$$



(a) one circuit



(b) two circuits



(c) three circuits

Fig. 2. Experimental circuits of the SFCLs according to the increase of secondary windings



$L_P$ 는 변압기 1차측 회로의 인덕턴스를 나타내며,  $L_{SA}$ ,  $L_{SB}$ ,  $L_{SC}$ 는 2차측 회로의 인덕턴스를 각각 나타낸다.  $R_{SCA}$ ,  $R_{SCB}$ ,  $R_{SCC}$ 는 초전도 소자에서 발생하는 저항을 나타내며,  $I_{SA}$ ,  $I_{SB}$ ,  $I_{SC}$ 는 2차측 회로에 흐르는 전류를 각각 나타낸 것이다.

변압기의 1차측과 2차측이 서로 자기누설자속이 없고 상호자속만 존재하며 결합 계수가 1이고 초전도 소자에 흐르는 전류( $I_{SA}$ ,  $I_{SB}$ ,  $I_{SC}$ )가  $I_S$ 로 동일하며, 초전도 소자에서 발생하는 저항( $R_{SCA}$ ,  $R_{SCB}$ ,  $R_{SCC}$ )가  $R_{SC}$ 로 동일하다고 가정하였을 때, 다음 식 (3)~(11)과 같이 2차측 권선의 개수에 따라 제한되는 사고전류의 크기( $I_S$ )와 초기에 제한되는 전체 임피던스( $Z_{lim}$ ), 초기 제한전류( $I_{ini}$ )를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

1. 1개의 2차측 권선을 갖는 SFCL

$$I_S = \frac{j\omega M_P}{R_{SC} + j\omega L_S} \cdot I_P \quad (3)$$

$$Z_{lim} = \frac{V_P}{I_P} = \frac{\omega^2 L_P L_S + j\omega L_P R_{SC} - \omega^2 M_P^2}{R_{SC} + j\omega L_S} \quad (4)$$

$$I_{ini} = \frac{L_S}{M_P} \cdot I_C \quad (5)$$

2. 2개의 2차측 권선을 갖는 SFCL

$$I_S = \frac{j\omega M_P}{R_{SC} + j\omega(L_S + M_S)} \cdot I_P \quad (6)$$

$$Z_{lim} = \frac{V_P}{I_P} = \frac{\omega^2 L_P(L_S + M_S) + j\omega L_P R_{SC} - 2\omega^2 M_P^2}{R_{SC} + j\omega(L_S + M_S)} \quad (7)$$

$$I_{ini} = \frac{L_S + M_S}{M_P} \cdot I_C \quad (8)$$

3. 3개의 2차측 권선을 갖는 SFCL

$$I_S = \frac{j\omega M_P}{R_{SC} + j\omega(L_S + 2M_S)} \cdot I_P \quad (9)$$

$$Z_{\text{lim}} = \frac{V_P}{I_P} = \frac{\omega^2 L_P(L_S + 2M_S) + j\omega L_P R_{SC} - 3\omega^2 M_P^2}{R_{SC} + j\omega(L_S + 2M_S)} \quad (10)$$

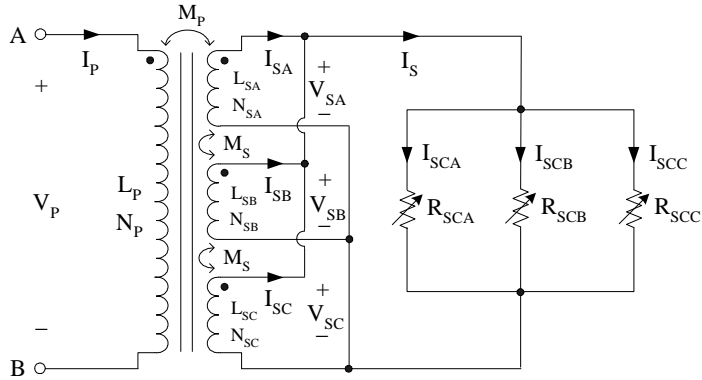
$$I_{\text{ini}} = \frac{L_S + 2M_S}{M_P} \cdot I_C \quad (11)$$

위의 식에서 알 수 있듯이 2차측 권선의 개수가 증가할수록 2차측 권선들이 상호 쇄교하는 자속  $M_S$ 가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것으로 사고시 전체 임피던스의 크기가 작아지므로 사고전류의 제한되는 효과는 증가한다는 것을 알 수 있다.

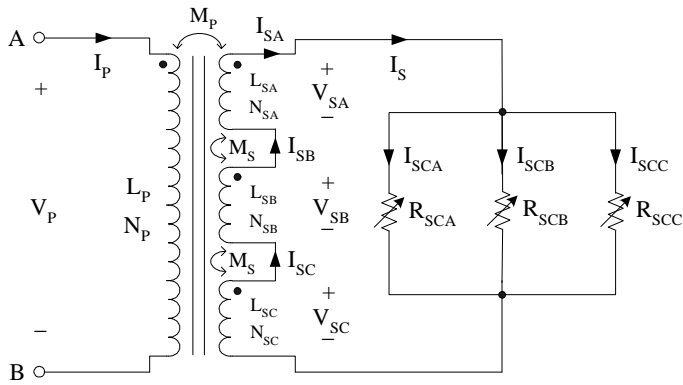
변압기를 이용하는 SFCL의 사고발생 후 초전도 소자에 흐르는 전류가 임계전류 ( $I_C$ )에 도달하였을 때의 초기 제한되는 전류를  $I_{\text{ini}}$ 라고 정의하였을 때, 식 (3), (6), (9)에  $R_{SC}=0$ ,  $I_S=I_C$ ,  $I_P=I_{\text{ini}}$ 를 대입하면 다음 식 (5), (8), (11)과 같이 유도할 수 있다. 이 식을 통해서 2차 권선의 인덕턴스( $L_S$ )와 2차측 권선들 간의 상호 쇄교자속의 크기( $M_S$ )에 따라 초기 제한되는 사고전류의 크기를 조절할 수 있다는 것을 확인할 수 있다[14].

초전도 한류기의 전력계통 적용을 위해서는 계통의 상시 허용용량을 견딜 수 있도록 초전도 한류기의 용량을 증대시켜야 한다. 이러한 용량증대 방안으로는 초전도 소자의 직·병렬연결 방안이 현재로서는 전부이다. 그러나 초전도 소자의 직·병렬연결시 소자의 제작상 동등한 임계특성을 갖도록 만들기 어렵기 때문에 불가피하게 불균형 켄치가 발생한다. 변압기를 이용하는 본 논문의 초전도 한류기에서는 초전도 소자의 병렬연결에 따라 2차측 권선의 직·병렬연결을 하여 그에 따른 사고전류제한 특성을 저항형 초전도 한류기와 비교하여 분석하였다.

Fig. 3은 2차측 권선 3개의 직·병렬연결과 3개의 초전도 소자의 병렬연결에 따른 초전도 한류기의 등가 회로도를 나타낸 것이다.



(a) A SFCL with serial connections



(b) A SFCL with parallel connections

Fig. 3. Equivalent circuits of the SFCLs according to the serial and parallel connections of three secondary coils

1차측 권선과 2차측 권선의 상호 결합계수( $k$ )가 1이고 각 초전도 소자에서 발생하는 저항은  $R_{SC}$ 로 동일하며, 각 2차측 리액터의 인덕턴스( $L_{SA}$ ,  $L_{SB}$ ,  $L_{SC}$ )는  $L_S$ 로 같다고 가정하였을 때, 초전도 한류기에서 제한되는 사고전류  $I_p$ 와 전체 임피던스  $Z_{lim}$ , 초기에 제한된 사고전류  $I_{im}$ 는 다음과 같다.

1) 2차측 권선 3개의 직렬연결에 따른 초전도 한류기

$$I_P = \frac{j\omega(L_S + 2M_S) + Z_{SS}}{j\omega M_P} \cdot I_S \quad (Z_{SS} = \frac{R_{SC}}{3} + 2j\omega L_S) \quad (12)$$

$$Z_{lim} = \frac{V_P}{I_P} = \frac{j\omega L_P(2j\omega M_S - 2j\omega L_S + Z_{SS})}{j\omega L_S + 2j\omega M_S + Z_{SS}} \quad (13)$$

$$I_{ini} = \frac{3(3L_S + 2M_S)}{M_P} \cdot I_C \quad (14)$$

여기서,  $Z_{SS}$ 는 2차측 권선에서 소자측으로 바라본 합성저항이고, 2차측 회로에 흐르는 전류  $I_S$ 는 각 2차측 권선에 흐르는 전류( $I_{SA}$ ,  $I_{SB}$ ,  $I_{SC}$ )들과 같고, 각 소자에 흐르는 전류의 합( $I_{SCA}+I_{SCB}+I_{SCC}$ )과 같다.

2) 2차측 권선 3개의 병렬연결에 따른 초전도 한류기

$$I_P = \frac{j\omega(L_S + 2M_S) + Z_{SB}}{3j\omega M_P} \cdot I_S \quad (Z_{SB} = \frac{L_S R_{SC}}{2R_{SC} + 3j\omega L_S}) \quad (15)$$

$$Z_{lim} = \frac{V_P}{I_P} = \frac{j\omega L_P(2j\omega M_S - 2j\omega L_S + Z_{SB})}{j\omega L_S + 2j\omega M_S + Z_{SB}} \quad (16)$$

$$I_{ini} = \frac{L_S + 2M_S}{M_P} \cdot I_C \quad (17)$$

여기서,  $Z_{SB}$ 는 2차측 권선에서 소자측으로 바라본 합성임피던스이고, 2차측 회로에 흐르는 전류  $I_S$ 는 각 2차측 권선에 흐르는 전류의 합( $I_{SA}+I_{SB}+I_{SC}$ )과 같고, 각 소자에 흐르는 전류의 합( $I_{SCA}+I_{SCB}+I_{SCC}$ )과 같다.

3개의 2차측 권선을 직렬연결한 초전도 한류기의 경우 2차측 권선의 직렬연결로 인한 합성임피던스가 커서 1차측에 흐르는 전류( $I_P$ )가 2차측 리액터를 병렬연결한 경우보다 더 크다는 것을 식 (12)와 (15)를 통해서 확인할 수 있다. 즉, 2차측 권선을 병렬로 연결한 경우 제한되는 사고전류는 직렬연결한 경우보다 약 1/3정도로 더 많이 제한된다는 것을 확인할 수 있다.

2차측 권선의 직렬연결로 인한 합성임피던스( $Z_{SS}$ )는 병렬연결한 경우의 것( $Z_{SB}$ )보다 더 크므로 전체 임피던스( $Z_{lim}$ )의 크기는 2차측 권선의 직렬연결한 경우가 더

작다는 것을 식 (13)과 (16)을 통해서 확인할 수 있다.

초전도 소자에 흐르는 전류( $I_{SCA}$ ,  $I_{SCB}$ ,  $I_{SCC}$ )가 임계전류밀도( $I_C$ )에 도달하였을 때 초기 제한되는 전류( $I_{lim}$ )는 식 (12)와 (15)에  $R_{SC}=0$ ,  $I_S=3I_C$ ,  $I_P=I_{lim}$ 를 대입함으로써 식 (15), (16)과 같이 구할 수 있다. 이 식을 통해서 초기 제한되는 전류는 1, 2차측 인덕턴스( $L_P$ ,  $L_S$ )의 값을 조정함으로써 제어할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 이것으로 변압기를 이용한 초전도 한류기는 사고전류를 유연하게 제어할 수 있음을 알 수 있다.

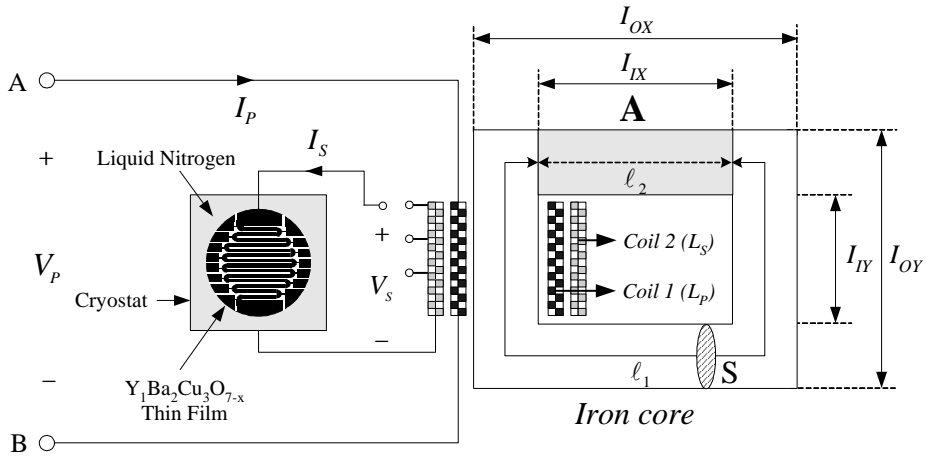


Fig. 4. Conceptive diagram of a SFCL with an iron core of the closed or open loop

Fig. 4는 개로 또는 폐로 철심의 구조를 갖는 변압기를 이용한 초전도 한류기의 개략도를 나타낸 것이다. 초전도 한류기는 철심과 권선의 변압기 구조를 갖기 때문에 저항형 초전도 한류기에 비해 큰 면적을 차지하게 된다. 개로 또는 폐로 철심의 변압기 구조를 갖는 초전도 한류기의 특성을 분석하여 이러한 문제점을 해결하고자 한다.

식 (18)~(20)는 1·2차측 권선에서 저장되는 자기 에너지와 전체 에너지를 나타낸 식이다.

$$W_P = \frac{1}{2} I_P \phi_P = \frac{1}{2} (L_P I_P^2 - M I_P I_S) [J] \quad (\phi_P = L_P I_P - M I_S) \quad (18)$$

$$W_S = \frac{1}{2} I_S \phi_S = \frac{1}{2} \{ (L_S + R_{SC}) I_S^2 - M I_P I_S \} [J] \quad (\phi_S = L_S I_S - M I_P) \quad (19)$$

$$W = W_P + W_S = \frac{1}{2} \{ L_P I_P^2 + (L_S + R_{SC}) I_S^2 \} - M I_P I_S [J] \quad (20)$$

여기서  $M = \sqrt{L_P \cdot L_S}$ 로서 상호 쇄교자속을 나타내고, 자기자속은 무시한다.  $\phi_P$ 와  $\phi_S$ 는 1·2차측 전류  $I_P$ ,  $I_S$ 가 누설자속 없이 1·2차측 권선에 쇄교하는 자속을 나타낸다.

사고전에는 2차측에 연결된 초전도 소자의 저항이 0이기 때문에 선로의 저항을 무시한다면 손실없이 선로 전류를 흘릴 수 있다. 그러므로 2차측 권선에 저장되는 에너지  $W_S$ 는 0이다. 또한 권선의 자기자속을 무시한다면 1차측 권선에 저장되는 에너지  $W_P$ 도 0이 된다. 그러므로 변압기를 이용하는 초전도 한류기의 전체 소비되는 에너지  $W$ 는 0이 된다.

사고가 발생하면 인덕턴스의 비에 의해 유도되어 2차측 권선에 흐르는 전류에 의해 초전도 소자가 켄치되어 사고전류를 제한하게 된다. 그러므로 사고 후에는 식 (20)과 같은 에너지( $W$ )가 소비된다.

식 (21)과 (22)는 개로 및 폐로 철심의 유무에 따른 자기저항을 식으로 나타낸 것이다.

1) 공극이 없는 폐로 철심의 자기저항

$$R_{gapless} = \frac{\ell_1 + \ell_2}{\mu S} [AT/wb] \quad (21)$$

2) 공극이 있는 개로 철심의 자기저항

$$R_{gap} = \frac{(\ell_1 + \ell_2) + \ell_2(\mu_S - 1)}{\mu S} [AT/wb] \quad (22)$$

개로 및 폐로 철심의 유무에 따른 자기저항의 비는 식 (23)과 같이 나타낸다.

$$\frac{R_{gap}}{R_{gapless}} = 1 + \frac{\ell_2}{\ell_1 + \ell_2}(\mu_s - 1) \quad (23)$$

$$\frac{I_S}{I_P} = \frac{j\omega M}{j\omega L_S + R_{SC}} \quad (24)$$

여기서  $\ell_1$ 은 고정된 철심의 자로 길이로써 890mm이고,  $\ell_2$ 는 개로의 길이로써 210mm이며 fig. 4에서  $A$ 로 나타내었다.  $\mu$ 와  $\mu_s$ 는 철심의 투자율과 비투자율을 나타내며,  $S$ 는 철심의 단면적을 나타낸 것이다.

개로 철심의 자기저항이 폐로 철심의 자기저항보다 식 (23)과 같이 더 크다는 것을 알 수 있다. 또한  $\emptyset \propto I/R$ 이므로 개로 철심의 자속이 폐로 철심의 자속보다 식 (23)만큼 감소한다는 것을 알 수 있다. 이것은 식 (23)의 배수만큼 자속이 누설되어 상호자속( $M = \emptyset/I$ )이 작아지게 된다. 그러므로 개로 철심의 1차측 권선에 흐르는 전류( $I_P$ )가 폐로 철심의 1차측 권선에 흐르는 전류보다 더 커진다는 것을 식 (24)를 통해서 확인할 수 있다[16].

### Ⅲ. 설계 및 제작

#### A. 초전도 소자 제작 및 임계특성

##### 1. 초전도 소자 설계 · 제작

초전도 한류소자는 직경 2인치의 합성 사파이어( $Al_2O_3$ ) 기판 위에 성장된 두께  $0.3\mu m$ 의  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (YBCO)박막을 이용하여 제작하였다. YBCO 박막의 임계온도와 임계전류밀도는 각각  $87\sim 88K$ 와  $2\sim 3MA/cm^2$  이내로 박막 전면에서  $\pm 0.5\%$ 이내로 균일하였다. YBCO박막은 최상부에  $0.1\sim 0.2\mu m$ 의 금박막층이 증착되어 있는데, 이것은 제조공정상 불가피하게 발생하는 두께의 불균일성 때문에 생기는 hot spot에서 발생하는 열을 분산시키기 위해서 이다. 금박막층은 상전도 상태의 YBCO보다 비저항이 훨씬 작기 때문에(약 100분의 1) 켄치된 hot spot으로부터 전류를 우회시켜서 hot spot에서 국소적으로 발생하는 열을 분산시켜 준다. 이외에도 금박막층은 YBCO박막의 표면을 공기 중의 노출로부터 보호하며, 비초전도체를 생성시키는 수분과의 차단역할도 하게 된다. 금박막은 YBCO박막 성장 직후에 진공을 유지한 상태에서 in-situ로 증착하였다. 금이 증착된 YBCO박막을 광리소그래피(photo-lithography)에 인쇄회로기판(PCB) 제작공정을 접목하여 meander-line 모양으로 식각하는 공정을 개발하고 한류소자를 제작하였다[15]. Fig. 5는 YBCO박막의 식각된 모양을 보여주고 있으며, 상세사양을 table 1에 나타내고 있다.



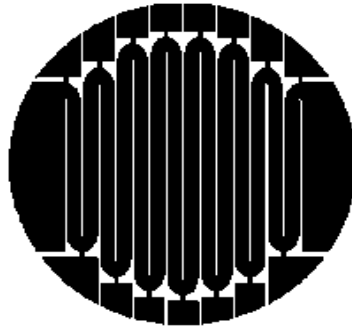


Fig. 5. The pattern shape of a YBCO thin film

Table 1. Specification of a YBCO thin film

<i>Parameter</i>	<i>Value</i>	<i>Unit</i>
소자 직경	2	inch
스트립폭	2	mm
전체길이	540	mm
YBCO층 두께	0.3	$\mu\text{m}$
금층 두께	0.1~0.2	$\mu\text{m}$
임계온도	87	K

## 2. 초전도 소자 임계 특성

초전도체의 퀘치는 여러가지 요인들이 복합적으로 작용하여 발생한다. 초전도 현상을 유지하기 위해서는 fig. 6에서 제시하는 값인 전류, 자장, 온도가 이 임계곡면의 내부에 존재해야 한다.

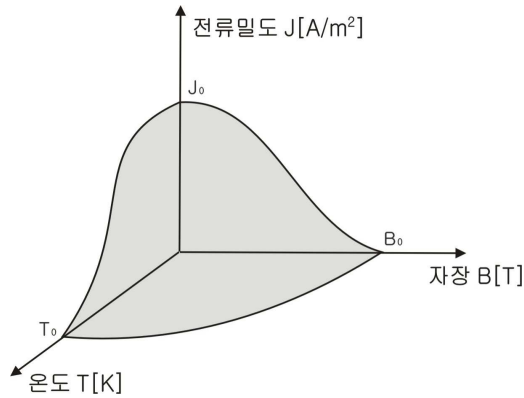


Fig. 6. The critical surface of a superconductor

퀘치특성을 분석하기 위한 실험에서는 초전도 소자를 선로에 직접 연결하고 무유도 구조인 meander-line 모양으로 설계하기 때문에 유도성분이 거의 없어 자기장의 영향을 받지 않는다. 따라서 fig. 7과 같이 전류와 온도에 의한 임계특성으로 다시 나타낼 수 있다.

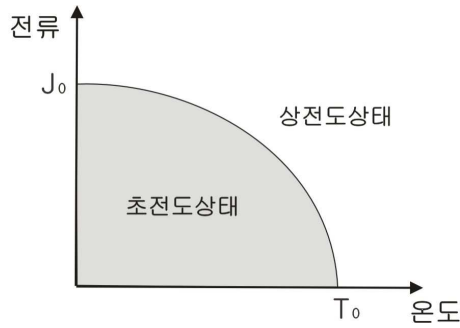


Fig. 7. The phase diagram of a superconductor

Fig. 7을 통해 알 수 있듯이 초전도 상태를 유지하고 있다하더라도 임계전류나 임계온도 중 어느 하나만이라도 그 값을 넘으면 상태 전이를 일으킨다는 것을 알 수 있다. 상태 전이가 일어나면 저항이 발생하게 되는데 이때 전압(V)과 전류(I)는 식 (25)와 같은 비선형 관계를 갖는다.

$$V \propto I^n \quad (25)$$

어떤 이유로 소자의 저항이 발생하게 되면  $P=I^2R$ 의 줄열이 발생하여 초전도 소자의 온도가 증가할 것이다. Fig. 6의 임계곡면을 보면 온도(T)가 증가하면 임계전류 밀도( $J_0$ )와 임계자장( $B_0$ )이 감소할 것이다. 이러한 변화가 적어 동작점이 임계곡면 내부에 있다면 퀘치가 발생하지 않을 것이다. 하지만 선로에 흐르는 전류가 증가하여 발생하는 열이 많아지면  $J_0$ 와  $T_0$ 가 더욱 감소하게 될 것이며, 이는 임계전류 밀도가 적어져 적은 선로전류에도 퀘치가 일어날 수 있다는 의미가 될 것이다.

이처럼 초전도체가 퀘치된 후 저항이 급격히 증가하면 더 많은 열이 발생하는데, 초전도체에 입혀진 금박막의 비저항이 상전도 상태일 때 초전도체의 비저항보다 훨씬 작기 때문에(약 1%) 퀘치가 발생한 초전도체에서는 전류가 초전도체를 우회하여 금박막으로 흐르게 되고 금박막에서 열이 발생하게 된다. 이렇게 발생한 열은 초전도체의 온도를 증가시키게 되고 이 과정이 다시 반복되어 퀘치가 진행된다. 다시 말하면 퀘치의 진행은 저항에 의한 열의 발생과 발생한 열의 움직임에 의해 크게 영향을 받게 된다.

Fig. 8은 본 논문에서 사용한 meander-line 모양을 갖는 YBCO의 임계전류 측정을 위한 실험 회로도이다. DC power supply에서 발생하는 전압을 초전도 소자에 인가함으로써 퀘칭을 유도하고, 이때 발생하는 초전도 소자의 전압과 흐르는 전류를 측정하여 임계전류를 측정한다. 측정 장치로는 X-Y recorder를 사용하여 측정하였다.

Fig. 9는 3개의 초전도 소자에서 발생된  $I-I'$ 곡선을 나타낸 것이다. 초전도 소자들의 퀘칭전류  $I_C$ 는 약간의 차이점이 있다는 것을 수치를 통해서 볼 수 있다. 실험에서 사용된 초전도 소자 3개(HTSC A, HTSC B, HTSC C)의  $I_C$ 는 각각 19.3, 20.2, 21A이었다. 이러한 차이는 초전도 소자의 제작시 불가피하게 발생하는 차이로서 초전도 소자의 직렬연결시 불규칙 퀘칭이 발생할 수 있는 요인이 된다. 여기서  $I_C$ 의 기준선은 1mV/cm로 하였다. 초전도 소자의 상전이 특성을 조사하기 위해 수식  $E=k/i^n$ 을 이용하여 소자 각각의 n-value가 1에서 10mV/cm까지의 등급에서 46.56, 53.92, 55.08mV/cm임을 확인하였다. 우리는 상전이 시 더 높은  $I_C$ 값이 더 좋은 특성을 보임을 확인하였다.

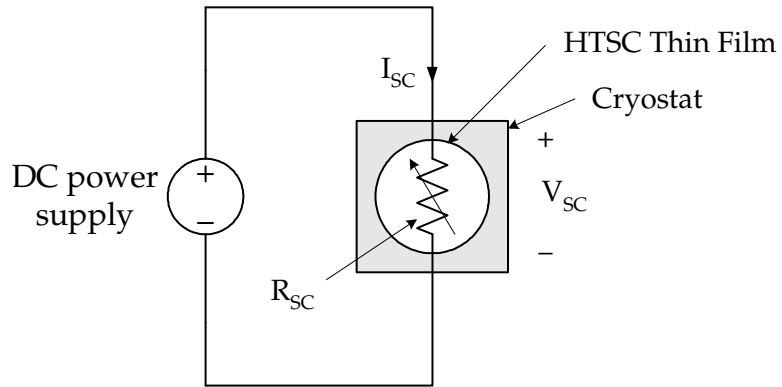


Fig. 8. Experimental circuit for the measurement of the critical current

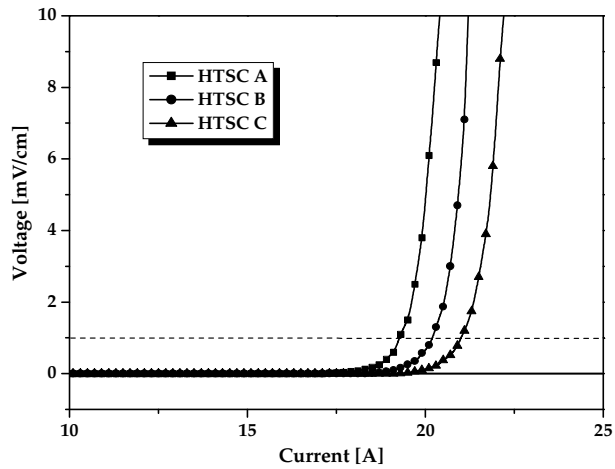


Fig. 9.  $I$ - $V$  curves of the superconducting elements

## B. 변압기 설계 및 제작

본 논문에서 제시하는 고온 초전도 한류기의 구성 요소인 변압기는 하나의 철심코어와 두개의 1·2차측 권선으로 구성된다. 사고 전에 두 코일에서 발생하는 자속간의 결합을 최대화하여 상쇄가 일어나도록 하기위해 fig. 10과 같이 적층된 구조로 두 개의 코일을 결선하였으며, 사고발생 후에 두 코일에 균일하게 흐르는 점을 고려하여 1차측 코일의 턴수를 2차측 코일의 턴수보다 크게 설계하였다. 또한, 2차측 코일은 중간에 탭을 내어 턴수를 2개로 변화시킬 수 있도록 하였다. Table 2는 변압기의 구성요소인 철심과 코일 1, 2의 설계사양을 나타낸 것이며, fig. 11은 제작한 변압기의 외형을 보여준다.

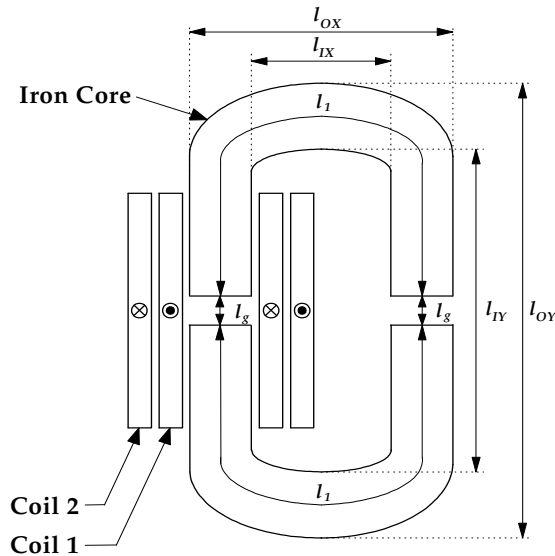


Fig. 10. A design drawing of the transformer for a SFCL

Table 2. The designed parameters of the transformer for a SFCL

<i>Iron Core ( Silicon Plate )</i>	<i>Size</i>	<i>Unit</i>
외측 수평길이 ( $l_{OX}$ )	235	mm
외측 수직길이 ( $l_{OY}$ )	250	mm
내측 수평길이 ( $l_{IX}$ )	137	mm
내측 수직길이 ( $l_{IY}$ )	155	mm
두께 ( $d$ )	66	mm
<i>Coil 1, 2</i>	<i>Value</i>	<i>Unit</i>
코일 1의 자기인덕턴스 (턴수)	23.2 (63)	mH (Turns)
코일 2의 자기인덕턴스 (턴수)	1.27 (21)	mH (Turns)
	8.2 (42)	(Turns)



Fig. 11. The appearance of the designed reactor

Fig. 12는 턴수 변화에 따라 측정된 자기인덕턴스의 변화를 보여주며 턴수가 증가함에 따라 코일의 자기인덕턴스는 턴수의 제곱에 비례하여 증가함을 볼 수 있다. 이는, 철심의 자기저항( $R$ )이 일정할 경우 즉, 철심의 단면적과 가로길이가 고정되었다고 하면 식 (26)에서와 같이 자기인덕턴스와 턴수의 관계에서 확인할 수 있다.

$$L \propto N^2 / R \quad (26)$$

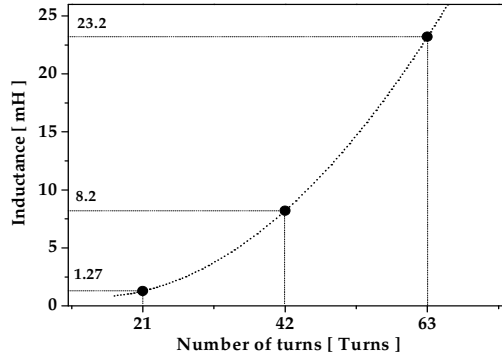


Fig. 12. The self-inductances according to turn number

사고전의 변압기 내부의 자속은 각 코일에서 발생하는 자속은 서로 상쇄되지만, 사고가 발생하여 고온 초전도 소자의 저항이 발생하면 상쇄되지 않고 철심 내부에 자속이 발생하게 된다. 이때, 사고초기에 내부자속이 가장 크게 나타나며 사고각이나 결선방향에 따라 크기가 달라지게 된다. 철심 내부의 자속은 식 (27)으로부터 구할 수 있다.

$$\lambda = N_1 i_1 - N_2 i_2 \quad (27)$$



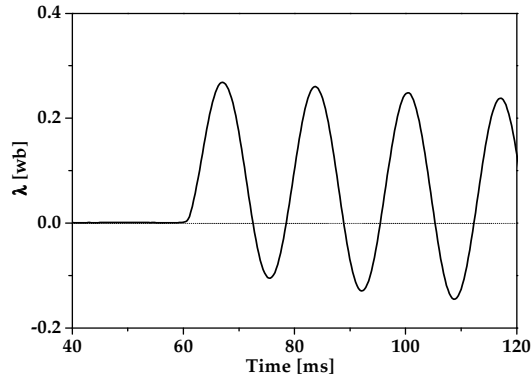


Fig. 13. The flowing flux into the iron core

Fig. 13은 결선방향에 따른 철심 내부의 자속변화를 보여주며, 여기서 사고 전에는 철심내부에 자속이 발생되지 않지만 사고와 동시에 자속이 발생됨을 볼 수 있다. 이와 같은 특성은 차폐유도형 고온초전도 한류기의 원리와 동일하며 튜브나 링 형태의 초전도체를 이용하지 않는다는 점이 변압기를 이용하는 고온 초전도 한류기의 장점이라 볼 수 있다. 그림에서 비교한 것처럼, 두 코일의 결선방향을 가극으로 결선한 경우가 감극으로 결선한 경우에 비해 사고초기에 발생하는 내부 자속의 크기가 크게 나타남을 볼 수 있으며 발생하는 시점도 빠르게 나타남을 확인할 수 있다. 따라서 가극으로 결선하여 설계할 경우에 사고발생 초기에 철심이 포화될 우려가 있을 것으로 예상된다.

## C. 초전도 소자 홀더 설계 및 제작

전력 계통에서 발생한 큰 사고전류를 제한하기 위한 초전도 한류기에는 박막형 YBCO의 초전도 소자가 사용되어 사고시 수십 msec이내에 발생하는 큰 사고전류를 감당하게 된다. 이러한 과도적인 상태를 초전도 소자가 안정적으로 감당하기 위해서는 YBCO박막이나 그 주위에서 발생하는 손실을 최소화시켜야 한다. 또한, 계통 중간에 초전도 한류기를 설치하기 위해서는 초전도 소자에 직접 전류 도입선을 접촉시켜야 한다. 이렇게 초전도소자와 전류 도입선을 접합하기 위해서 삽입형 접촉방식의 전극을 사용한다. 그리고 삽입형 전극과 박막을 고정시키기 위해 홀더가 필요하다.

접합에 있어서 중요한 점은 균일한 접촉저항으로 전류 도입선과 전극이 접합되어야 하며 적은 진동도 일으키지 않아야 한다. 서로 다른 도체를 접촉할 경우에는 접촉점에서 접촉저항이 발생하여 열이 생기게 된다. 이러한 발열은 초전도 소자의 임계온도를 상승시키고, 소자의 특성을 떨어뜨리는 요인이 된다. 전류 도입선을 접합할 때에 200~230℃의 온도에서 인듐(In)을 사용하여 부착하게 된다. 그러나 100~200nm 두께의 금(Au)박막에 이와 같은 높은 온도로 접합을 해야 하기 때문에 박막 표면의 손상에 주의해야 한다. 또한 접합부위에 열이 가해지기 때문에 그 영역에서 YBCO성분 중 산소가 증발될 수 있으므로 열화가 불가피하다. 실험시 박막에 흔들림이 발생하면 박막의 온도가 상승하게 된다. 이러한 발열은 초전도체의 임계자장과 임계온도를 저하시키고 나아가 초전도 한류기의 특성을 떨어뜨릴 수 있을 것이다. 이와 같은 점을 보완하기 위해 전류 도입선과 초전도 소자와의 접합은 그 사이에 0.25mm두께의 인듐 포일을 삽입하여 나사로 조이는 방식의 삽입형 접촉방식을 사용하였다. 그리고 진동을 줄이기 위해 조립된 초전도 소자와 삽입형 전극을 고정할 수 있는 박막홀더를 제작하였다. 이 홀더는 직·병렬연결시를 위해 10개까지 고정시킬 수 있도록 설계하였다.

Fig. 14는 박막 홀더의 구조를 나타낸 것이다. 홀더는 액체 질소의 극저온에서도 변형되지 않아야 하기 때문에 베이클라이트를 이용하여 제작하였다. 그림에서 알 수 있듯이 박막을 고정할 수 있는 부분과 삽입형 전극을 고정하는 부분, 박막이 고정된 부분을 10개까지 고정할 수 있는 부분으로 나눌 수 있다. 이렇게 고정함으로써

흔들림을 최소화 할 수 있어 안정적인 조립을 할 수 있다.

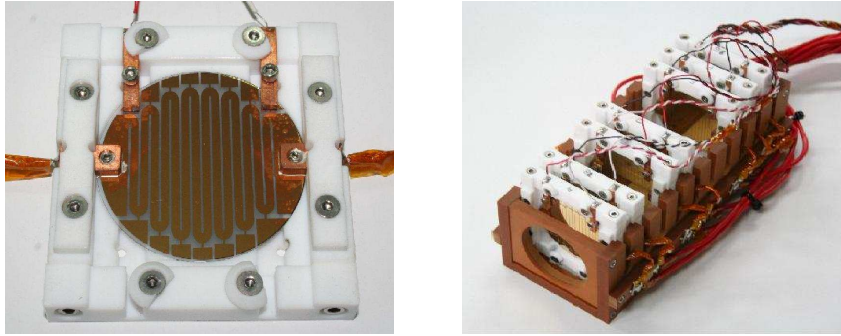
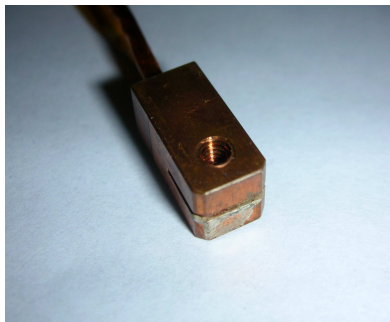


Fig. 14. The fixing holder for the YBCO thin films

Fig. 15는 삽입형 접촉방식의 전극의 구조를 나타낸 것이다. 박막형 초전도 소자와 전극이 나사를 이용하여 직접 접촉되고, 전류 도입선과 전극이 연결되는 구조이다. 전극은 구리소재로 만들었으며, 구리 전극과 박막의 금(Au)층 사이의 접촉저항의 균일성과 기계적 안정성을 확보하기 위해 그 사이에 0.25mm 두께의 인듐(In) 포일을 삽입하고 나사를 조여 고정하였다[17].



(a) Current tap



(b) Voltage tap

Fig. 15. The contact pole for the mechanical connection

## D. 실험 장치의 구성

### 1. 사고발생용 전원 시스템

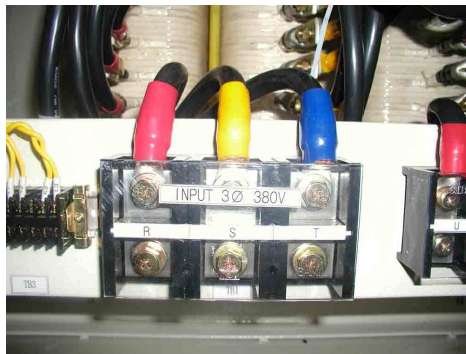


Fig. 16. The power system for various fault simulation

Fig. 16은 사고발생용 전원장치의 내·외부 사진을 나타낸 것이다. 전원장치는 실험시 초전도 소자의 보호와 안전을 위해 낮은 전압에서부터 점진적으로 높은 전압으로 상승시킬 수 있도록 로터리 스위치를 설치하였다. 이러한 전원장치의 출력 전압은 0V~480V까지 40V간격으로 조정가능하다. 사고발생용 전원장치의 상세 설계사양은 table 3에 나타내었다. 주 변압기의 출력은 전압조정이 용이하게 하기 위해 마그네틱 컨덕터를 사용하였다. 각 마그네틱 컨덕터는 운전 상태와 유지 및 보수를 편리하게 하기 위해 중판에 부착하여 판넬 문을 개방할 시 마그네틱 컨덕터 전체의 동작 상태를 한 눈에 파악할 수 있는 구조로 되어있고, 출력단자는 부스 바를 이용하여 각각 연결하였다. 출력 전압의 확인은 판넬 전면에 전압계와 각 전압별 램프를 설치하여 전압의 식별이 용이하게 하였고, 실험시 안전 확보를 위해 입력단의 전류를 검출하여 기기에 과전류가 흐르면 EOCR을 동작시켜 입력 전원을 차단하도록 하였다. Fig. 17은 사고발생용 전원장치의 입력단자와 외부 판넬에 부착된 전압·전류계 및 램프, 로터리 스위치의 사진을 나타낸 것이다[17].

Table 3. The designed parameter of the power system

	항 목	사 양
1	정 격 전 압	380V
2	상 수	3Ø 60Hz
3	정격전류	150A
4	전압 tap	0V ~ 480V ( 0V, 40V, 80V, 120V, 160V, 200V, 240V, 280V, 320V, 360V, 400V, 440V, 480V )
5	전압오차	± 3%이내
6	절연내전압	충전부와 대지간 AC 10000V/분
7	절연저항	충전부와 대지간 100MΩ이상 (2000V MEGGER)
8	결선방법	1차 Δ / 2차 Y



(a) The input part



(b) The control part

Fig. 17. The controller for power system

## 2. 사고발생용 위상제어 시스템



Fig. 18. The phase controller for various fault simulation

전력계통에서 발생하는 다양한 유형의 사고를 모의하기 위해서는 사고각 및 사고주기를 임의로 제어할 수 있어야 한다. 이러한 목적으로 실험에 사용할 부하에 병렬로 SCR를 설치하여 SCR의 도통시점 즉 사고각을  $0^{\circ}$ 에서  $180^{\circ}$  범위에서 임의의 주기 동안 사고를 발생시킬 수 있는 위상제어기가 필요하다.

위상제어기는 위상각, 사고주기 등 사고발생의 모든 조건을 제어할 수 있는 구조를 가지고 있다. 위상각과 사고주기를 제어하기 위해 60Hz 동기펄스를 발생시키는 PLL synthesizer를 사용하였고, 위상각의 조정은 모든 위상각에서 사고를 발생시킬 수 있도록  $1^{\circ}$ ~ $180^{\circ}$ 까지  $1^{\circ}$  간격으로 제어하도록 하였으며, 시험자의 안전을 확보하기 위해 비상버튼을 설치하였다. 사고제어기는 사고조건을 제어하기 위해 많은 케이블이 필요한데 케이블 연결의 혼란을 방지하기 위해 라벨로 인식할 수 있는 전용 케이블을 제작하였고, 외부 계측 장비와의 연동을 위해 BNC 커넥터를 이용하여 외부 트리거 신호를 받아 동작할 수 있도록 하였다[17].

### 3. 사고발생용 스위치 및 드라이버 시스템



Fig. 19. The switch panel for various fault simulation

사고발생용 위상제어 시스템의 신호를 받아 사고를 발생시키는 스위치 역할을 하는 소자로 SCR을 사용하였다. SCR은 평상시 통전전류를 도통하다 사고발생장치의 firing 신호를 받아 단락사고를 발생시켜 사고전류를 흐르게 하는 역할을 한다. 위상제어 시스템은 R, S, T 각 상당 2개의 SCR을 사용하여 모듈형태로 되어 있어 단상은 물론 삼상 실험이 가능하도록 하였다. SCR 소자는 사고전류를 통전할 수 있는 충분한 용량으로 선정하였고, 사고전류 통전시 발생하는 열을 발산하기 위해 V형태의 350mm 두께를 갖는 방열판 위에 부착하였다. 또한 SCR 소자의 보호를 위하여 스너브 회로를 병렬로 구성하였다.

사고발생용 스위치 구동 드라이버는 하나의 firing 신호를 사용하여 R, S, T 상을 제어하기 위하여 병렬구조로 ON/OFF 스위치 부착하여 사고발생을 동시에 제어할 수 있도록 함으로써, 전력계통의 일선, 이선, 삼선 지락 및 단락 사고를 모의할 수 있도록 하였다. 스위치 구동 드라이버는 외부 노이즈에 의해 영향을 받지 않는 구조로 설계하고, firing 신호 케이블 또한 외부 노이즈에 의한 오동작방지를 위해 차폐케이블을 사용하였다. Pulse trans는 SCR 모듈을 제어해야 하므로 두개의 출력을 가지는 구조로 하고, GATE 신호 입력 후 SCR의 통전이 이루어지는 시간 단축을 위해 418:127의 권선비로 제작하였다. Fig. 20은 초전도 한류기의 실험을 위한 사고발생 시스템의 실험 회로도이다[17].

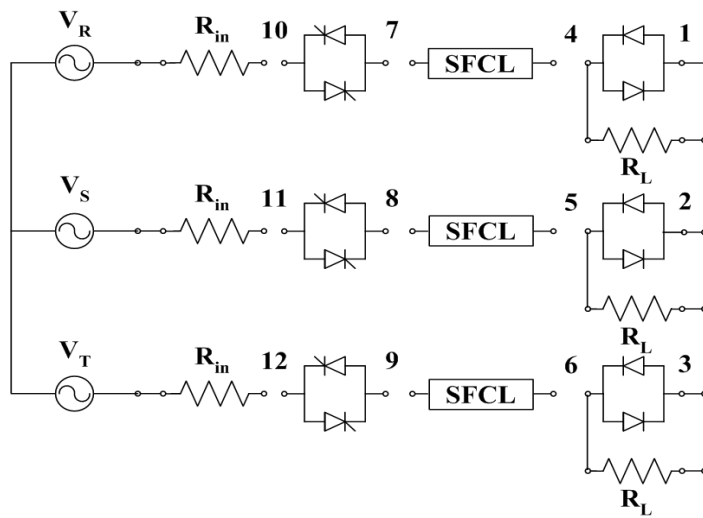


Fig. 20. The experimental circuit for various fault simulation system



## IV. 실험결과 및 분석

### A. 2차회로의 증가에 따른 전류제한 특성 분석

변압기를 이용하는 SFCL의 2차회로의 증가에 따른 특성을 분석하기 위하여 fig. 2와 같이 2차 권선의 수를 3회로까지 증가시키며 실험하였다. 1차 권선과 2차 권선의 권수비는 63 : 21로 하였다. 2차회로의 증가에 따른 SFCL 특성의 비교·분석을 위한 자료로서 초전도 소자 3개의 단순 직렬연결에 따른 저항형 SFCL의 실험을 동시에 수행하였다.

Fig. 21는 저항형 SFCL의 전류와 전압 파형으로써 초전도 소자 3개를 직렬로 연결하면서 실험한 데이터이다. 초전도 소자의 수가 증가하면서 초전도 소자의 켄치가 불규칙하게 발생하여 초전도 소자의 발생 전압이 일정하지 않는다는 것을 그래프를 통해 알 수 있다. 초전도 소자 3개를 직렬로 연결한 저항형 SFCL의 소자발생 전압은 각각 15, 59, 89 [V]이다. 이것은 초전도 소자의 임계전류 밀도(Ic)의 차이로 인해 켄치시 발생하는 초전도 소자의 저항값이 다르기 때문이라는 것을 fig. 23 (c)를 통해 알 수 있다.

Fig. 22은 변압기 2차측 회로의 증가에 따른 SFCL의 전류와 전압의 파형을 나타낸다. 저항형 SFCL과는 달리 변압기를 이용하는 SFCL은 변압기의 2차측 회로가 증가하면서 초전도 소자가 동시에 켄치가 발생한다는 것을 알 수 있다. 그러므로 켄치시 발생하는 초전도 소자의 전압과 저항이 거의 같은 값을 갖게 된다. 변압기의 2차측 회로가 3개회로로 연결된 SFCL의 소자발생 전압은 각각 47, 66, 66 [V]로써 저항형과 비교하여 그 차이가 많이 줄었다. 이것은 변압기 1·2차측의 상호유도 작용에 의해 1차측 전류가 2차측 회로들에 거의 동일하게 분배되어 흐르기 때문이다.

저항형 SFCL의 사고전류제한 특성은 초전도 소자의 직렬연결에 따라 39.5, 37.5, 36.2 [A]로써 거의 비슷한 제한 특성을 가진다. 그러나 변압기를 이용하는 SFCL은 변압기의 2차측 회로의 증가에 따라 각각 12.4, 24.5, 32.4 [A]로써 큰 사고전류 제한 특성을 가진다. 변압기를 이용하는 SFCL은 변압기의 상호유도작용을 이용하기 때문에 저항형 SFCL보다 사고 전류의 제한에 더 유리하다는 것을 알 수 있다.

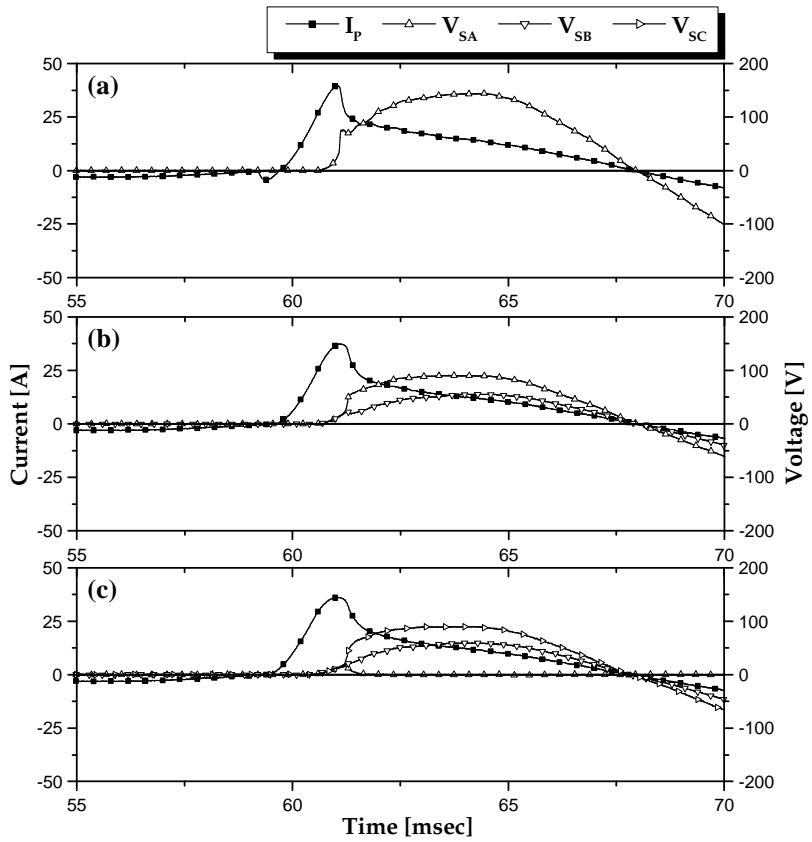


Fig. 21. Fault current limiting curves of resistive-type SFCL according to the number of the serial connection for three superconducting elements

- (a) A superconducting element
- (b) Two superconducting elements
- (c) Three superconducting elements

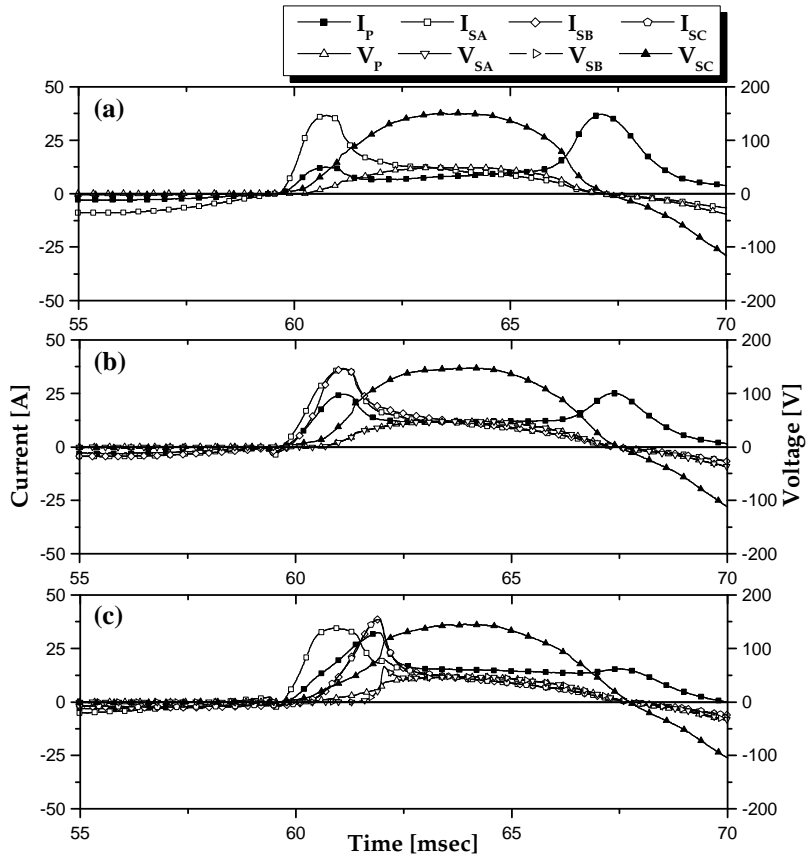


Fig. 22. Fault current limiting curves of SFCL according to the number of the secondary windings for three superconducting elements

- (a) A superconducting element
- (b) Two superconducting elements
- (c) Three superconducting elements

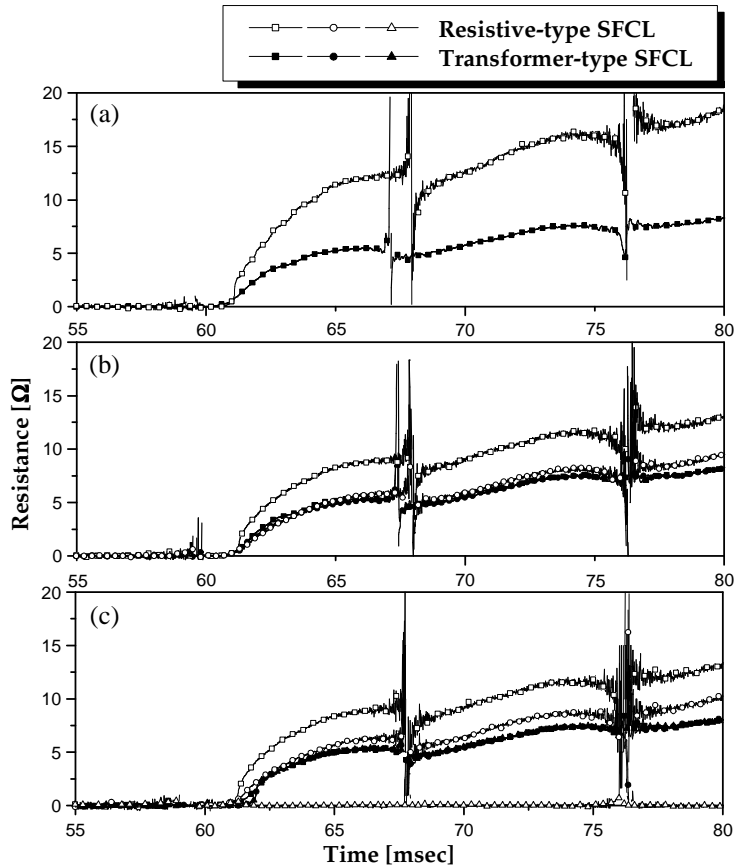


Fig. 23. The resistance curves generated in the superconducting element of resistive-type SFCL and SFCL using the transformer

(a) The resistance curves generated in a superconducting element

(b) The resistance curves generated in two superconducting elements

(c) The resistance curves generated in three superconducting elements.

저항형 SFCL에서 초전도 소자의 켄치시 발생하는 저항이 초전도 소자가 직렬로 연결될수록 차이가 많이 난다는 것을 fig. 23을 통해서 알 수 있다. 3개의 초전도 소자를 연결한 fig. 6 (c)의 파형을 보면 3개 중 1개의 초전도 소자가 켄치되지 않은 것을 볼 수 있다. 저항형의 경우 초전도 소자를 직렬로 연결할수록 불규칙적인 켄치가 발생하여 초전도 소자간에 전력 부담의 불균형이 발생한다는 것을 알 수 있다. 그러나 변압기의 2차측 회로의 증가에 따른 SFCL의 경우 사고시 초전도 소자가 동시에 켄치되므로 발생하는 저항이 같은 값을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 초전도 소자의 동시 켄치는 초전도 소자의 전력 부담을 균일하게 분담시켜 초전도 소자의 전력 부담을 최소화 시킨다.

## B. 2차회로의 직·병렬연결에 따른 전류제한 특성 분석

Fig. 24와 25는 초전도 소자 3개를 병렬연결한 저항형 SFCL과 2차 권선을 직·병렬 연결한 변압기와 3개의 초전도 소자가 병렬로 연결된 SFCL에 대한 전류 및 전압의 파형을 나타낸 것이다. 변압기를 이용하는 SFCL의 1차 권선수는 126턴이고, 2차측 3개의 권선수는 각각 21턴이다. 제한된 사고전류( $I_p$ )의 크기를 비교하면, 저항형 SFCL은 109A이고, 변압기의 2차 권선을 직렬연결한 SFCL은 55A, 병렬연결한 경우는 17.34A로 제한이 되었다. 변압기를 이용하는 SFCL은 사고시 2차측 권선에 병렬로 연결된 3개의 초전도 소자가 2차측에 유도된 사고전류에 의해 켄치되어 2차 전류( $I_s$ )를 제한하게 된다. 이때 1차측 전류( $I_p$ )는 여자전류를 무시한다면 2차측 권선에 흐르는 제한된 전류를 상쇄시키기 위한 전류가 턴수비에 반비례 ( $I_p = (N_s/N_p) \times I_s$ )하여 1차측 권선에 유도되어 흐르게 된다. 2차측 권선을 직렬연결한 SFCL의 경우 직렬연결된 2차측 권선에 흐르는 전류( $I_s$ )는 109.3A로서 1·2차측 권선의 턴수비  $N_p:N_s=126:63$ 에 의해 1/2만큼 사고전류( $I_p$ )가 제한이 된다는 것을 알 수 있다. 2차측 권선이 병렬연결된 SFCL의 경우 2차 권선에 흐르는 전류( $I_s$ )가 102.87A로서 턴수비  $N_p:N_s=126:21$ 에 의해 1/6만큼 사고전류가 제한된다는 것을 확인할 수 있다.

각각의 초전도 소자에 흐르는 전류( $I_{SCA}$ ,  $I_{SCB}$ ,  $I_{SCC}$ )는 병렬로 연결되므로 2차측 권선에 의해 흐르는 전류( $I_s$ )가 1/3로 분배된다는 것을 알 수 있다. 그러므로 2차측 권선이 직·병렬 연결된 SFCL의 초전도 소자에 흐르는 전류는 각각 36.6A와 34.5A로서 비슷하다. 초전도 소자에 걸리는 전압을 fig. 25를 통해서 비교해 보면, 3개의 2차측 권선을 직렬연결한 SFCL의 경우 각각의 권선에 걸리는 전압의 합이 초전도 소자에 모두 나타나게 된다. 그러나 3개의 2차측 권선을 병렬로 연결한 SFCL의 경우 리액터 1개에 걸리는 전압이 각각의 초전도 소자에 걸리게 된다. 2차측 권선이 병렬연결된 SFCL의 초전도 소자에 걸리는 전압은 25.4V로서 직렬연결한 한류기의 소자에 걸리는 전압 64.7V에 비해 대략 1/3정도 적다는 것을 확인할 수 있었다.

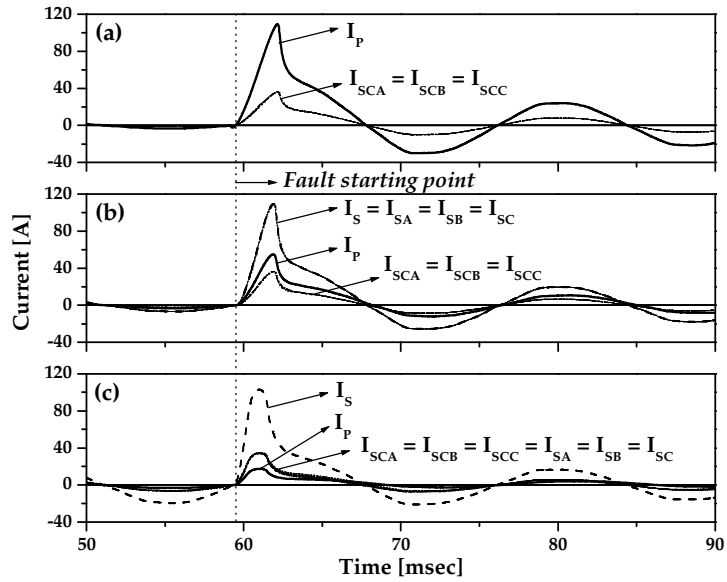


Fig. 24. Current waveforms of the resistive-type SFCL and the SFCLs using the transformer

- (a) A resistive-type SFCL
- (b) A SFCL with serial connection of secondary windings
- (c) A SFCL with parallel connection of secondary windings

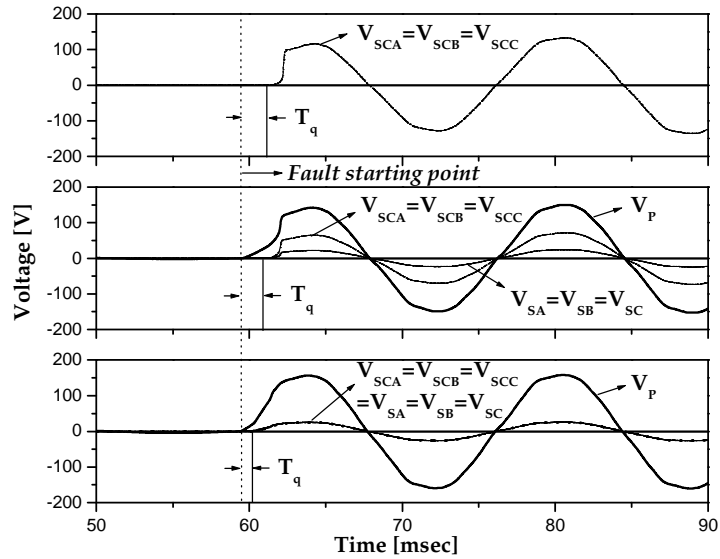


Fig. 25. Voltage waveforms of the resistive-type SFCL and the SFCLs using the transformer

- (a) A resistive-type SFCL
- (b) A SFCL with serial connection of secondary windings
- (c) A SFCL with parallel connection of secondary windings



이러한 초전도 소자에서 발생하는 전압은 소자의 퀘치시 발생하는 저항의 크기를 결정하는 직접적인 요인으로 작용하게 된다. Fig. 26은 각각의 SFCL에 연결된 초전도 소자에서 발생하는 저항과 소비되는 전력을 나타낸 그래프이다. 저항형 SFCL의 경우 초전도 소자에서 발생하는 전압이 116V로서 2주기 이후 소자에서 발생하는 저항은 20 $\Omega$ 이었다. 2차측 권선을 직·병렬로 연결한 SFCL의 경우 소자에서 발생하는 저항은 각각 12 $\Omega$ 과 5 $\Omega$ 이었다. 이것으로 초전도 소자에 큰 전압이 걸림에 따라 각각의 초전도 소자에서 발생하는 저항이 커진다는 것을 확인할 수 있었다.

초전도 소자에 걸리는 전압과 전류에 의해 사고후 반주기동안 소자에서 소비되는 전력을 fig. 26을 통해 비교하면, 저항형 SFCL의 경우 2,885W이고, 2차측 권선을 직렬연결한 SFCL의 경우 1,458W, 병렬연결한 SFCL의 경우 460W이었다. 이것으로 변압기의 2차측 권선을 병렬연결한 SFCL의 경우 초전도 소자의 병렬연결로 인해 소자에 흐르는 전류가 적어지고, 2차측 권선의 병렬연결로 인해 2차측에 걸리는 전압이 작아져서 초전도 소자에서 소비되는 전력이 적어진다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 25에서 사고후 초전도 소자의 퀘치로 인해 전압이 발생할 때까지 걸리는 시간( $T_q$ )을 비교하면, 저항형 SFCL의 경우 1.71msec가 소요되며, 2차측 권선을 직·병렬로 연결한 SFCL의 경우 각각 1.51과 0.72msec가 소요되었다. 초전도 소자에서 발생하는 전압의 퀘치시간( $T_q$ )이 짧아질수록 사고전류를 제한하는 시간이 짧아져 더욱 신속한 사고전류 제한이 이루어진다. 이것으로 2차측 권선을 병렬연결한 SFCL이 더욱 신속한 사고전류를 제한한다는 것을 확인할 수 있었다.

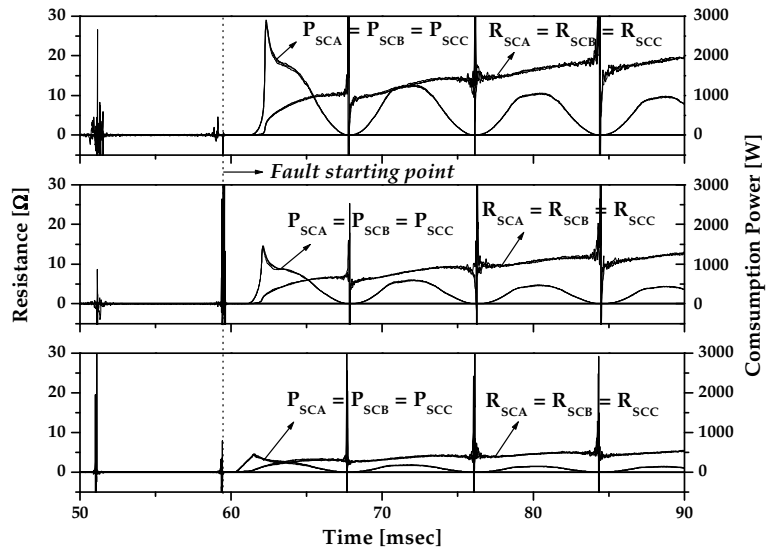


Fig. 26. Resistances and consumption powers of the resistive-type SFCL and the SFCLs using the transformer

- (a) A resistive-type SFCL
- (b) A SFCL with serial connection of secondary windings
- (c) A SFCL with parallel connection of secondary windings.

### C. 철심의 개로 및 폐로 구조에 따른 특성 분석

변압기를 이용하는 SFCL의 폐로와 개로 철심에 따른 특성을 비교하기 위해 2차 권선의 인덕턴스비를 다르게 하여 실험하였다. 변압기를 이용하는 SFCL의 경우 계통 적용시 큰 면적을 차지하므로 실험을 통한 특성 분석을 통한 최적 조건 도출이 필요하다. Fig. 27은 폐로 철심을 이용하여 1, 2차 권선의 인덕턴스 비에 따른 SFCL의 전류제한 특성을 비교한 그래프이고, fig. 28은 개로 철심을 이용한 SFCL의 전류제한 특성을 분석한 그래프이다.

1, 2차 권선의 인덕턴스 비는 다양한 조건에서의 전류제한 특성을 분석하기 위해서 각각 60mH:2mH, 60mH:11mH, 60mH:30mH로 하였다. 개로 철심을 갖는 변압기를 이용하는 SFCL의 1차측 전류( $I_p$ )는 폐로 철심을 사용한 것보다 사고 이후에 더 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 공극의 사용으로 인한 누설자속의 증가로 상호 인덕턴스가 작아져 1차측에 흐르는 전류가 증가하기 때문이다. 이러한 특성은 선로에 연결된 보호기기에 사고기간 동안 폐로 철심을 이용한 것보다 큰 사고 전류를 공급하기 때문에 전력계통에 악영향으로 작용하게 된다.

Fig. 27의 폐로 철심을 이용하는 SFCL의 제한되는 전류( $I_p$ )의 크기를 보면 60:2mH에서는 6.5A, 60:11mH에서는 16.2A, 60:30mH에서는 28A로 각각 나타났다. Fig. 28의 개로 철심에서는 각각 6.9A, 17A, 29.2A를 나타냈다. 폐로 철심과 개로 철심에서 제한되는 전류의 크기는 크게 차이가 없었다. 그러나 그 이후 발생하는 사고 전류가 폐로 철심에서는 각각 8.2A, 9.7A, 11.8A를 나타냈고, 개로 철심에서는 21.5A, 22.5A, 23.5A를 나타냈다. 이러한 사고 이후 사고전류의 크기에 차이가 발생하는 것은 개로 철심의 경우가 폐로 철심의 경우보다 2차권선의 인덕턴스가 커져 상호인덕턴스가 작아지므로 제한되는 사고전류의 크기가 커진다는 것을 식 (24)를 통해 확인할 수 있다.

초전도 소자에서 발생하는 전류( $I_s$ )를 보면 폐로 철심에서는 각각 33A, 36.5A, 37A를 나타냈고, 개로 철심에서는 32.5A, 36.6A, 37.6A로 큰 차이가 없었다. 그러나 사고발생 시작부터 초전도 소자의 켄치로 인해 전압이 발생하는 시간인 켄치시간

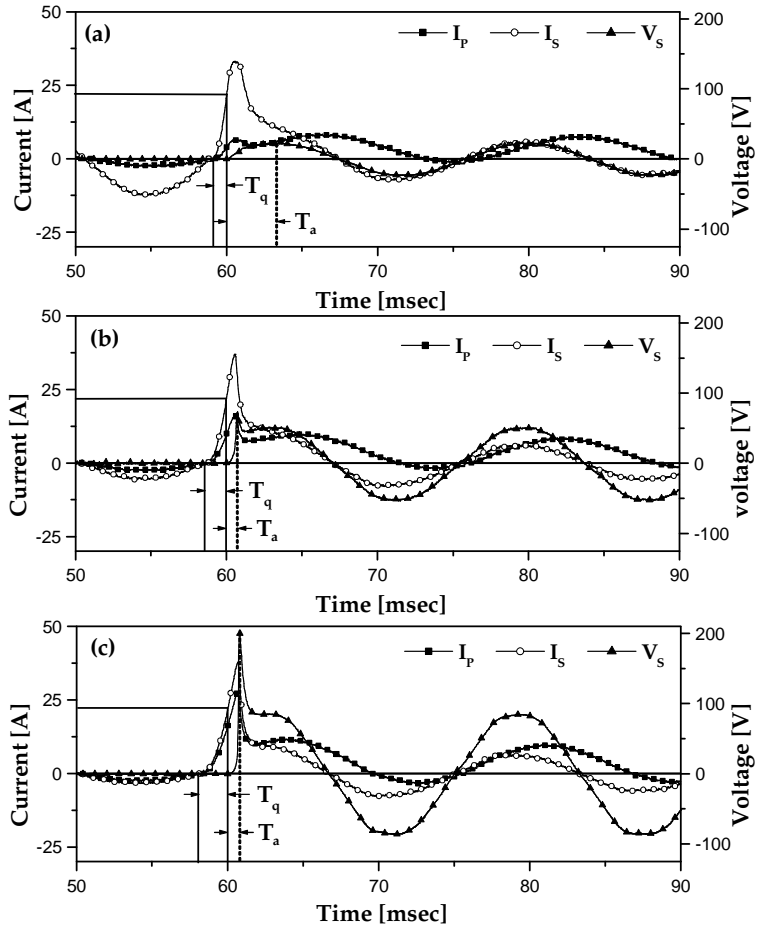


Fig. 27. Fault current limiting characteristics of the closed-loop circuit according to the inductance ratios between primary and secondary windings  
 (a) 60 mH : 2 mH, (b) 60 mH : 11 mH, (c) 60 mH : 30 mH

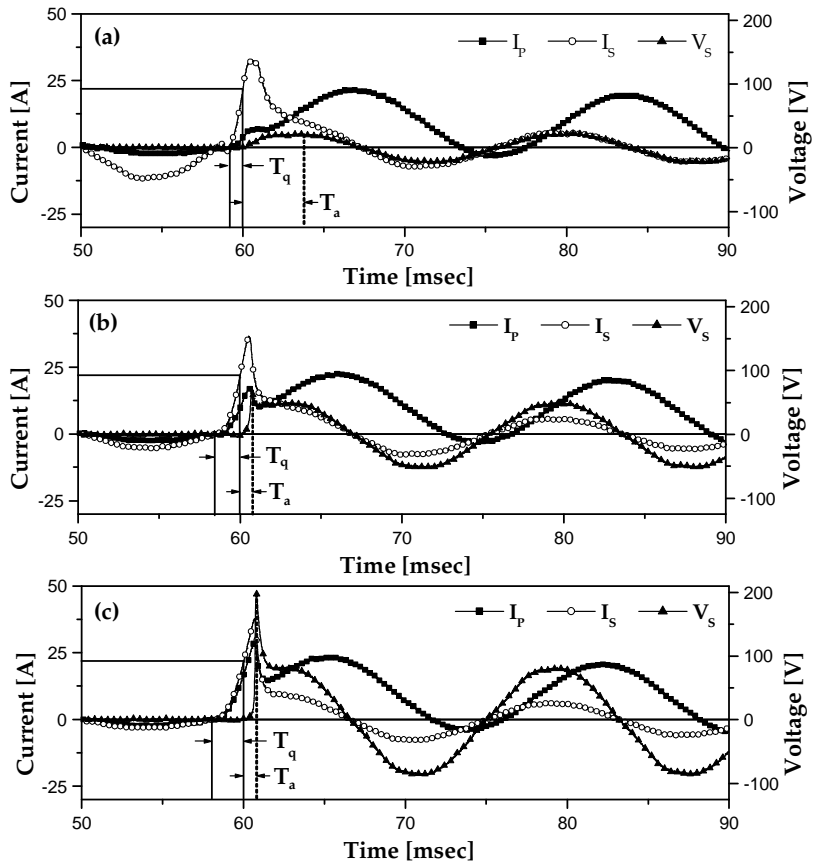


Fig. 28. Fault current limiting characteristics of the open-loop circuit according to the inductance ratios between primary and secondary windings

(a) 60 mH : 2 mH, (b) 60 mH : 11 mH, (c) 60 mH : 30 mH

( $T_q$ )를 보면 폐로 철심의 경우 60:2mH는 0.84msec, 60:11mH는 1.43msec, 60:30mH는 1.79 msec로 점점 켄치가 늦게 일어나는 것을 알 수 있다. 개로 철심의 경우 각각 1.81msec, 3.21msec, 3.7msec로 폐로 철심보다 더 늦게 일어난다. 켄치시간의 지연은 사고 발생시 사고전류의 제한 속도가 늦어진다는 것이므로 초전도 한류기의 특성인 신속한 전류제한을 할 수 없게 된다.

초전도 소자에서 발생하는 전압( $V_S$ )은 폐로 철심에서 각각 22V, 73V, 204V를 나타냈고, 개로 철심에서는 각각 21.2V, 71.2V, 198.8V로 큰 차이가 없이 나타났다. 그러나 초전도 소자의 전압이 발생하는 점부터 최고점까지 도달하는 시간( $T_a$ )을 보면, 폐로 철심의 경우 각각 3.26msec, 0.64msec, 0.76msec로 나타냈고, 개로 철심의 경우 각각 4.47msec, 1.31msec, 1.3msec로 인덕턴스의 비가 커질수록 최고점까지 도달하는 시간이 폐로 철심과 개로 철심 모두 빨라진다는 것을 확인할 수 있다. 전압의 크기는 큰 차이가 없으나 도달시간이 빨라지면 초전도 소자에서 켄치 후 발생하는 저항의 시간적인 증가율이 크다는 것을 나타낸다. 이때 켄치로 발생하는 열 또한 그 증가율이 커지게 되는데 이것은 초전도 소자에 큰 부담을 주게 된다.

Fig. 29와 30은 폐로 철심과 개로 철심을 이용한 SFCL의 1·2차측 권선의 소비전력을 사고기간의 3주기 동안 소비전력 최대값을 1·2차측 인덕턴스비의 증가에 따라 비교한 그래프이다. 1·2차측 소비전력 사이의 차이는 1차측 소비전력이 제한된 사고전류에 의해 계산되어진 값이기 때문이다. 인덕턴스의 비가 커질수록 1·2차 소비전력의 차이가 많이 발생하는 이유는 인덕턴스비의 증가로 인해 2차측에서 발생하는 전압의 크기가 커지기 때문이다. 개로 철심과 폐로 철심을 이용한 SFCL의 소비전력을 비교해 보면 2차측의 소비전력은 큰 차이점이 없다. 그러나 1차측의 소비전력을 비교해 보면 1주기의 1번째 최대값은 큰 차이가 없으나, 2번째 최대값부터 개로 철심을 이용한 경우의 소비전력이 폐로 철심을 이용한 경우보다 더 많이 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 개로 철심을 이용한 경우 철심에서의 누설자속이 많아져 1·2차권선간의 상호자속이 감소하기 때문에 1차측 전류가 증가를 하게 된다. 이것은 식 (24)를 통해서 확인할 수 있었다. 또한 식 (18)~(20)을 통해서 상호자속의 감소로 전체 SFCL에서 소비되는 에너지도 감소를 한다는 것을 확인하였다.

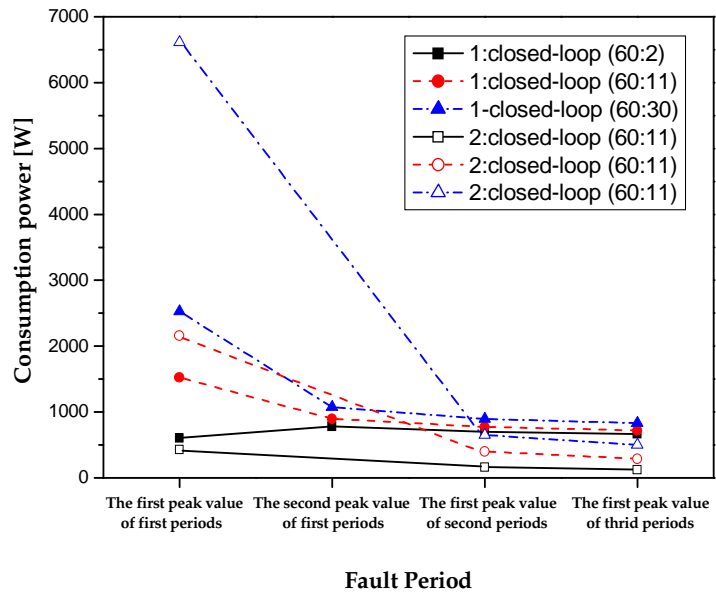


Fig. 29. Consumption power graph compare with primary and secondary windings of SFCL using closed-loop core

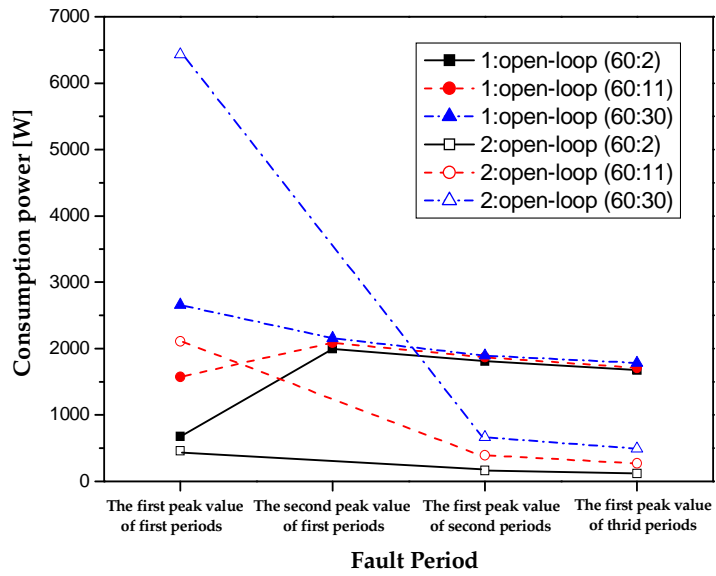


Fig. 30. Consumption power graph compare with primary and secondary windings of SFCL using open-loop core



## V. 결 론

본 논문에서는 변압기를 이용한 초전도 한류기의 특성을 분석함으로써 현 전력계통의 큰 문제점인 사고전류의 급격한 증가를 해결하고자 하였다. 초전도 한류기의 실험을 위해 YBCO 박막형 초전도 소자를 meander-line 형태로 식각을 하였고, 철심 및 권선, 사고발생 시스템을 이용하여 변압기형 초전도 한류기의 실험을 실시하였다.

초전도 한류기의 전력계통 적용을 위해서는 초전도 소자의 직·병렬로 연결을 통해 상시 허용전류의 등급을 상승시켜야 한다. 그러나 저항형 초전도 한류기의 경우 직·병렬 연결시 초전도 소자의 불규칙한 켄치 현상으로 인해 불균일한 전력부담이 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 변압기를 이용한 초전도 한류기의 2차측 회로의 수를 증가시켜 실험을 수행하여 저항형 초전도 한류기와 비교·분석하였다. 또한 2차 권선을 직·병렬로 연결하여 그 특성을 분석하였다.

변압기를 이용하는 초전도 한류기는 철심과 다수의 권선으로 구성되기 때문에 전력계통의 적용시 큰 면적을 차지하게 된다. 이러한 문제점을 보완하고자 철심을 개로 및 폐로로 구성하여 그 특성을 분석하였다. 이러한 실험의 결과를 다음과 같이 요약한다.

### (1) 2차회로의 증가에 따른 초전도 한류기의 실험결과

2차회로의 수를 3회로까지 증가하여 3개의 초전도 소자를 연결하였을 때 철심을 매개로한 2차 권선의 상호 쇄교자속이 서로 동등해져 3개의 초전도 소자는 동시에 켄치가 발생하게 되었다. 또한 3개의 초전도 소자에서 발생하는 저항의 크기가 같아 불규칙 켄치가 발생하는 저항형 초전도 한류기와는 달리 초전도 소자들의 전력부담을 최소화된다는 것을 확인할 수 있었다.

### (2) 2차 권선의 직·병렬연결에 따른 초전도 한류기의 실험결과

2차 권선을 병렬연결한 초전도 한류기의 제한되는 사고전류는 저한형 초전도 한류기보다 80% 이상, 2차 권선을 직렬연결한 초전도 한류기보다 30% 이상 더 제한이 된다는 것을 확인하였다. 이것은 1차 권선에 흐르는 전류가 1·2차 권선간의 턴수비( $N_s/N_p$ )에 반비례하여 흐르기 때문인 것으로 사료된다. 또한 2차 권선의 병렬연결이라는 구조적 이점 때문에 초전도 소자의 소비 전력과 저항의 크기가 저항형이나 직렬연결을 갖는 초전도 한류기의 경우보다 더 작았다. 계통에 사고가 발생한 후 초전도 소자가 켜치되기까지의 시간인 켜치시간은 2차 권선을 병렬로 연결한 초전도 한류기가 다른 두 경우보다 더 빠르게 발생하여 사고전류를 신속히 제한한다는 것을 확인하였다.

### (3) 개로 및 폐로 철심을 사용한 초전도 한류기의 실험결과

급격히 증가하는 사고전류의 제한 특성은 개로 및 폐로 철심의 초전도 한류기에서 비슷하게 나타나지만 사고전류가 제한되는 시간을 비교해 보면 폐로 철심을 이용한 초전도 한류기의 경우가 더 빠르게 제한된다. 초전도 소자가 켜치되어 전압이 발생하는 점부터 최고점까지 도달하는 시간인 도착시간( $T_a$ )은 1·2차 권선의 인덕턴스 비가 커질수록 더 짧아진다는 것을 확인할 수 있었다. 초전도 소자의 켜치로부터 발생하는 저항 때문에 초전도 소자 내에는 줄열이 발생하게 된다. 도착시간이 짧아지면 이러한 줄열의 증가속도가 더 빨라지고, 또한 초전도 소자 내의 전력부담은 증가하게 된다. 개로 및 폐로 철심을 갖는 초전도 한류기의 소비전력을 비교하였을 때 개로 철심의 초전도 한류기가 쇄교자속의 증가로 인한 1·2차 권선 사이의 상호 인덕턴스가 증가하여 개로 철심을 이용한 초전도 한류기보다 더 낮아진다는 것을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김영선, 이강완, “고장전류 저감을 위한 345kV 직렬리액터 설치검토”, 전기저널, Vol. 1, No. 1, p. 37, 2000.
- [2] W. Paul, M. Chen, M. Lakner, J. Rhyner, D. Braun, W. Lanz, “Fault current limiter based on high temperature superconductors - different concepts, test results, simulations, applications”, Physica C, Vol. 354, p. 27-33, 2001.
- [3] Yu Jiang, Shi Dongyuan, Duan Xianzhong, Tang Yuejin, Cheng Shijie, “Comparison of superconducting fault current limiter in power”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, p. 43-47, 2001.
- [4] Yamaguchi M, Fukui S, Satoh T, Kaburaki Y, Horikawa T, Honjo T, “Performance of DC reactor type fault current limiter using high superconducting coil”, IEEE Trans Appl. Supercond., Vol. 9, No. 2, p. 940-943, 1999.
- [5] T. Onishi, M. Kawasumi, K. Sasaki, R. Akimoto, “An experimental study on a fast self-acting magnetic shield type superconducting fault current limiter”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 12, p. 868-871, Mar. 2002.
- [6] S. Kozak, T. Janowski, “Physical and numerical models of superconducting fault current limiters”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 13, p. 2068-2071, June 2003.
- [7] C. A. Baldan, C. Y. Shigue, D. S. S. Figueira, E. R. Filho, R. C. Freitas, “Test results of a superconducting FCL using bifilar coil of BSCCO-2212”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 16, p. 695-698, June 2006.
- [8] R. Wordenweber, J. Schneider, A. I. Zaitsev, R. Kutzner, T. Konigs, P. Lahl, “Current limiting properties of superconducting  $YBa_2Cu_3O_7$  films on various substrates”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 7, p. 1021-1024, 1997.

- [9] V. Meerovich, V. Sokolovsky, J. Bock, S. Gauss, S. Goren, G. Jung, "Performance of an inductive fault current limiter employing BSCCO superconducting cylinders", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 9, p. 4666- 4676, Dec. 1999.
- [10] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H. P. Krämer, P. Kummeth, H. W. Neu- müller, S. Fischer, "Resistive current limiters with YBCO films", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 7, p. 828-831, June 1997.
- [11] H.-S. Choi, H.-R. Kim, O.-B. Hyun, "Operating properties of supercon- ducting fault limiters based on YBCO thin films", Cryogenics, Vol. 41, No. 3, p. 163- 167, 2001.
- [12] H.-S. Choi, H.-R. Kim, O.-B. Hyun, S.-J. Kim, "Quench properties of Y-Ba-Cu-O films after over powering quenches", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 11, p. 2418-2421, 2001
- [13] H.-S. Choi, O.-B. Hyun, H.-R. Kim, K.-B Park, "Switching properties of a hybrid type superconducting fault current limiter using YBCO stripes", IEEE trans Appl. Supercond., Vol. 14, No. 3, p. 1833-1838, 2002.
- [14] H.-S. Choi, Y.-S. Cho, S.-H. Lim, "Operational characteristics of hybrid- type SFCL by the number of secondary windings with YBCO films", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 16, p. 719-722, June 2006.
- [15] 최효상, 조용선, "YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 박막을 이용한 하이브리드형 초전도 사고전류 제한기의 특성", 전기전자재료학회 논문지, 19권, 4호, p. 391, 2006.
- [16] 조용선, 최효상, 남궁현, 임성훈, "하이브리드형 초전도 한류기의 동작 특 성", 대한전기학회 논문지, Vol 55A, No. 6, p. 255, 2006.
- [17] 최효상, 박형민, 조용선, "하이브리드형 초전도 한류기의 특성 연구 보고서", 산업자원부, Vol 1, p. 001, 2006.

# 감사의 글

한결같은 모습으로 저를 지켜봐 주신 모든 분들에게 감사드립니다.

처음으로 대학원에 들어올 때의 설레임이 얼마 안된 것 같은데 벌써 2년이란 시간이 지나 졸업을 하게 되었습니다. 먼저 항상 변함없이 지켜봐 주시고 가르침을 이끌어주신 최효상 교수님께 감사의 말씀을 올립니다. 또한 보잘것 없는 저의 논문을 지도해 주신 이우선 교수님, 조금배 교수님과 부족한 저를 지켜봐 주시고 돌봐주신 이상일 교수님, 정수복 교수님, 오금곤 교수님, 백형래 교수님께도 깊은 감사의 말씀 올립니다.

대학원이라는 큰 문에 들어서도록 많은 이야기와 조언을 해 준 박형민 선배와 같이 동거동락하면서 서로 부족한 면을 채워준 저의 소중한 동기 남궁현, 이나영 동생들에게도 감사하다는 말을 전합니다. 아마 이들과 같이 생활하지 않았다면 지금의 전 없었을 것입니다. 또한 같이 과제를 수행하면서 저에게 많은 도움을 주신 전북대 한병성 교수님, 두호익 박사님, 충렬형, 숭실대 임성훈 교수님께도 깊은 감사의 말씀을 올립니다.

그리고 태양광 실험실 동기 김지훈과 최연옥, 이강연, 박정민 선배님들과 후배 정남인, 물성실험실의 고필주 선배님과 후배 전영길, 정관검에게 감사드립니다. 그리고 항상 힘들때나 기쁠때나 옆에서 믿어주는 고등학교 친구인 양동준, 신철, 임철우, 김승진, 진경구... 많은 도움이 되주어서 너무 고맙고 항상 변치않는 우정을 쌓아가자.

무엇보다 저를 항상 옆에서 말없이 지켜봐 주시고 끊임없는 믿음과 사랑을 주신 우리 어머니와 형, 누나들에게 진심으로 감사를 드립니다. 앞으로도 더 열심히 하는 모습 보이도록 노력하겠습니다.

2006년 12월 조 용 선

## 저작물 이용 허락서

학 과	전기공학과	학 번	20057096	과 정	석 사
성 명	한글: 조 용 선    한문 : 趙 鎔 善 영문 : CHO YONG SUN				
주 소	광주광역시 북구 운암동 일신아파트 102동 703호				
연락처	E-MAIL : <a href="mailto:cys5144@hanmail.net">cys5144@hanmail.net</a>				
논문 제목	한글 : 변압기를 이용한 고온 초전도 한류기의 사고전류제한 특성에 관한 연구 영문 : A Study on Fault Current Characteristics of High-T <sub>c</sub> Superconducting Fault Current Limiter Using a Transformer				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

2006년 11월 일

저작자 : 조 용 선 (서명 또는 인)

## 조선대학교 총장 귀하