

2  
0  
0  
6  
年

2006 年度 2月  
碩士學位論文

2  
月

碩  
士  
學  
位  
論  
文

# 전력계통용 자속구속형 초전도 한류기의 특성연구

전  
력  
계  
통  
용

자  
속  
구  
속  
형

초  
전  
도  
한  
류  
기  
의

특  
성  
연  
구

朴  
炯  
旻

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

朴 炯 旻

# 전력계통용 자속구속형 초전도 한류기의 특성연구

A Study on Characteristics of a Flux-lock Type  
Superconducting Fault Current Limiter for Power System

2006年 2月 日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

朴炯旻

전력계통용 자속구속형 초전도  
한류기의 특성연구

指導教授 崔 孝 祥

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2005年 10月 日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

朴 炯 旻

# 朴炯旻의 碩士學位 論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 鄭壽福 印

委員 朝鮮大學校 教授 吳金坤 印

委員 朝鮮大學校 教授 崔孝祥 印

2005年 11 月 日

朝鮮大學校 大學院

# 목 차

## ABSTRACT

I. 서론	1
II. 자속구속형 한류기의 동작특성	3
A. 구조 및 동작원리	3
B. 결선방향에 따른 분석	5
III. 자속구속형 한류기 설계 및 제작	8
A. 초전도소자 제작 및 퀘칭특성	8
1. 소자패턴 설계	8
2. 초전도소자 퀘칭특성	10
B. 박막홀더 설계 및 제작	13
C. 냉각장치 설계 및 제작	15
D. 자속구속리액터 설계 및 제작	19
E. 사고발생용 전원장치 설계 및 제작	23
F. 위상제어기 설계 및 제작	25

IV. 실험결과 및 분석 . . . . .	26
A. 초기사고전류 특성분석 . . . . .	26
B. 결선방향에 따른 전류제한 특성분석 . . . . .	31
C. 사고각에 따른 전류제한 특성 분석 . . . . .	34
D. 인덕턴스변화에 따른 전류제한 특성 분석 . . . . .	38
1. 감극 결선시 전류제한 특성 . . . . .	38
2. 가극 결선시 전류제한 특성 . . . . .	41
E. 소자저항증가에 따른 전류제한 특성 분석 . . . . .	44
V. 결 론 . . . . .	49

참고문헌

## *List of table*

Table 1 Specification of a YBCO thin film .....	9
Table 2 The designed parameters of a reactor for a flux-lock type SFCL .....	20
Table 3 The designed parameter of power system .....	24
Table 4 The experimental parameters .....	26

## *List of figures*

Fig. 1. Scheme of a flux-lock type superconducting fault current limiter ..	4
Fig. 2. Equivalent circuit of a flux-lock type SFCL .....	5
Fig. 3. Voltage polarity and direction of current flow in case of subtractive polarity winding .....	6
Fig. 4. Voltage polarity and direction of current flow in case of additive polarity winding .....	7
Fig. 5. The pattern shape of a YBCO thin film .....	9
Fig. 6. The critical surface of a superconductor .....	10
Fig. 7. The phase diagram of a superconductor .....	10
Fig. 8. The resistance-temperature curve of a superconductor .....	12
Fig. 9. The fixing holders for YBCO thin films .....	14
Fig. 10. The contact pole for the mechanical connection .....	14
Fig. 11. The incoming path of external heat into the cryostat .....	16
Fig. 12. The appearance of cryostat .....	18
Fig. 13. The design of top flange .....	18
Fig. 14. The structure of a reactor for a flux-lock type SFCL .....	19
Fig. 15. The appearance of the designed reactor .....	20
Fig. 16. The self-inductances according to number of turns .....	21
Fig. 17. The flowing flux into the iron core according to polarity winding .....	21
Fig. 18. The designed power system for fault simulation .....	23
Fig. 19. The controller of power system .....	24
Fig. 20. The phase controller for fault simulation .....	25
Fig. 21. The experimental circuit of flux-lock type SFCL .....	27



Fig. 22. The current waveforms during the fault in case of subtractive polarity winding .....	29
Fig. 23. The voltage waveforms during the fault in case of subtractive polarity winding .....	29
Fig. 24. The current waveforms during the fault in case of additive polarity winding .....	30
Fig. 25. The voltage waveforms during the fault in case of additive polarity winding .....	30
Fig. 26. Current limiting characteristics of flux-lock type SFCL in case of subtractive polarity winding .....	32
Fig. 27. Current limiting characteristics of flux-lock type SFCL in case of additive polarity winding .....	33
Fig. 28. Current waveforms in case of subtractive polarity winding according to fault angles .....	36
Fig. 29. Voltage waveforms in case of subtractive polarity winding according to fault angles .....	36
Fig. 30. Current waveforms in case of additive polarity winding according to fault angles .....	37
Fig. 31. Voltage waveforms in case of additive polarity winding according to fault angles .....	37
Fig. 32. The current waveforms in case of subtractive polarity winding .....	39
Fig. 33. The current and the voltage waveforms in case of subtractive polarity winding immediately after the fault .....	39
Fig. 34. The current waveforms in case of subtractive polarity winding .....	40
Fig. 35. The current and the voltage waveforms in case of subtractive polarity winding immediately after the fault .....	40

Fig. 36. The current waveforms in case of additive polarity winding .....	42
Fig. 37. The current and the voltage waveforms in case of additive polarity winding immediately after the fault .....	42
Fig. 38. The current waveforms in case of additive polarity winding .....	43
Fig. 39. The current and the voltage waveforms in case of additive polarity winding immediately after the fault .....	43
Fig. 40. Current waveforms according to the number of the superconducting element in a flux-lock type SFCL .....	46
Fig. 41. Voltage waveforms according to the number of the superconducting element in a flux-lock type SFCL .....	47
Fig. 42. Resistance waveforms according to the number of the superconducting element in a flux-lock type SFCL .....	48

## *ABSTRACT*

### **A Study on Characteristics of a Flux-lock Type Superconducting Fault Current Limiter for Power System**

Park, Hyoung - Min

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

Department of Electrical Engineering,

Graduate School of Chosun University

We investigated the quench characteristics of a flux-lock type superconducting fault current limiter (SFCL) according to the number of the serial connection between the superconducting elements at the subtractive polarity winding of a transformer. The flux-lock type SFCL consists of two coils. The primary coil is wound in parallel to the secondary coil through an iron core, and the secondary coil is connected to the superconducting elements in series. The operation of the flux-lock type SFCL can be divided into the subtractive and the additive polarity windings according to the winding directions between the primary and secondary coils. In this paper, we investigated the current limiting characteristics of the flux-lock type SFCL. The fault current of the flux-lock type SFCL with the additive polarity winding during first-half cycle after the fault was limited effectively more than that of the subtractive polarity winding. The quench time of the flux-lock type SFCL

in the additive polarity winding was also quicker than that of the subtractive polarity winding. Therefore, we confirmed that the value of limited fault current during the initial fault reduced in the additive polarity winding. The fault current was limited faster with the increase of fault angle in both the subtractive and additive polarity windings because the quench time of superconducting elements shortened. In addition, the fault current in the additive polarity winding was effectively limited with the inductance increase of secondary winding when it was compared to the subtractive polarity winding under the same condition. The analyses of voltage, current, and resistance in serial connection between superconducting elements were performed to increase the voltage rating of the flux-lock type SFCL. The power burden was reduced through the simultaneous quenching between the superconducting elements. This enabled the flux-lock type SFCL to be easy to increase the capacity of power system.

## I. 서 론

지속적인 경제성장과 산업발전은 전력수요의 증가를 가져왔으며 이에 따른 전력설비 증설은 계통의 임피던스 감소를 야기 시키고 단락사고에 의한 고장 전류의 크기를 점점 증가시키고 있다. 국내 전력계통에서 전원밀집지역에서는 임피던스가 낮아 고장전류가 차단기의 차단내력을 초과하고 있으며 그 수는 더욱더 증가할 것으로 예상된다[1]. 고장 전류 대책으로는 차단기를 교체하는 방법이 있으나 대용량 차단기 교체에 따른 막대한 비용과 기술적인 한계에 부딪히고 있고, 모선분리를 통한 고장전류의 저감대책은 과부하 및 계통안정도 저하 등의 문제점이 있다. 또 다른 대책으로는 직렬리액터 설치나 고 임피던스의 전력설비를 설치하는 방법이 있으나 정상 운전시 전압강하를 발생하고 비효율적이라는 문제점이 있다[2-4]. 이러한 문제점을 효과적으로 해결할 수 있는 초전도 한류기는 신 개념의 보호기기이며 사고 전류에 대한 빠른 동작 및 회복시간과 환경친화적이며 수명이 반영구적인 장점 때문에 이에 대한 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다[5-15].

전력계통에서 초전도 한류기의 목적은 기존 차단기 앞에 초전도 한류기를 설치하여 사고가 발생하였을 시 고장전류를 억제하여 차단기의 용량증대효과를 가져온다. 초전도 한류기는 퀘칭특성에 따라 크게 퀘칭형과 무퀘칭형으로 분류할 수 있는데 퀘칭형은 다시 영저항 특성을 이용한 저항형과 마이즈너 효과를 이용한 유도형으로 분류할 수 있다. 저항형 한류기는 구조 및 원리가 간단하고 소형화할 수 있는 장점이 있으나 한류 용량 증대를 위해서는 직·병렬 연결이 필수적이며 동시퀘칭 유도라는 큰 문제점이 있다. 유도형 한류기는 저항형과 다르게 초전도체에 직접 고장 전류가 흐르지 않아 초전도체의 손실위험이 적고 회복시간이 빠른 장점이 있으나 용량증대시 철심 포화문제와 부피 증가의 문제점이 있다[16,17]. 본 논문에서 분석한 자속구속형 한류기는 저항형 한류기와 유도형 한류기의 구조와 특성을 접목한 형태로 볼 수 있으며 자속구속형 한류기의 특성은 정상 운전시 철심에 교류자속이 발생되지 않지만, 사고

가 발생하여 고장전류가 고온초전도 소자의 임계전류를 넘어가면 켄치가 발생하고 소자의 저항으로 인해 쇄교자속에 시간 변화가 생겨 각 코일의 전압이 유기됨으로써 사고전류를 제한할 수 있다.

자속구속형 한류기를 설계통에 적용하기 위해서는 전압용량과 전류용량의 증대를 위하여 고온초전도 소자의 직·병렬연결이 필수적이다. 병렬연결은 전류재분배로 용량증대에 큰 문제가 없으나 직렬연결인 경우 개별 초전도 소자의 약간의 임계전류밀도의 차이 때문에 켄치시점의 불균일 문제가 있다.

본 논문에서는 자속구속형 한류기의 구조와 동작특성을 분석하고 산출된 동작 조건에 따라 자속구속형 한류기를 설계 및 제작하였다. 결선방향에 따른 전류제한특성을 분석하였고 용량 증대를 위한 최적화 설계를 도출하기 위하여 초전도 소자를 직렬 연결한 후 동작특성을 분석하였다.

## II. 자속구속형 한류기의 동작특성

### A. 구조 및 동작원리

자속구속형 고온초전도 한류기의 구조는 그림 1과 같이 강자성체 철심에 코일 1과 코일 2가 각각  $N_1$ ,  $N_2$ 번 권선되어 선로에 병렬 연결되어 있다. 고온초전도소자(YBCO박막)는 임계온도 특성을 고려해 액체질소가 담겨진 cryostat 내부에 존재하며 2차측 코일에 직렬 연결되어 있다. 자속구속형 고온초전도 한류기의 동작특성은 병렬로 연결된 1차측 코일과 2차측 코일의 결선 방향에 따라 가극성과 감극성으로 나누어진다. 1차측 코일과 2차측 코일에 유도되는 전압을  $V_1$ 과  $V_2$ 라 하면 각 코일의 전압은 식(1)과 (2)와 같이 표현된다.

$$V_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

$$V_2 = \pm N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

동작 원리는 정상시 동작과 사고시의 동작으로 분류 할 수 있는데 정상시에는 고온초전도소자의 양단전압이 0이므로 1차측 코일과 2차측 코일의 양단 전압은 같게 되어 식(3)과 같이 표현된다.

$$(N_1 \pm N_2) \frac{d\phi}{dt} = 0 \quad (3)$$

식(3)에서  $N_1 \pm N_2 \neq 0$ 이라면  $d\phi/dt = 0$ 은 항상 성립된다. 즉, 각 코일에 쇄교하는 자속은 시간적 변화가 없이 구속되어 동작한다고 볼 수 있다. 따라서 정상시(사고 전)에 각각의 코일에서는 전압이 유기되지 않고 항상 0V라는 것을 알 수 있다.

그러나, 사고가 발생하여 임계전류를 초과하는 사고전류가 초전도소자에 흐르게 되면 초전도소자는 켄치되어 소자저항이 급격히 상승하게 된다. 발생된 이

소자 저항으로 인해 1차측 코일과 2차측 코일의 쇄교자속은 시간적인 변화가 생겨 이로 인해 코일 양단에 전압이 유기되고, 따라서 사고전류는 급격히 제한된다[18].

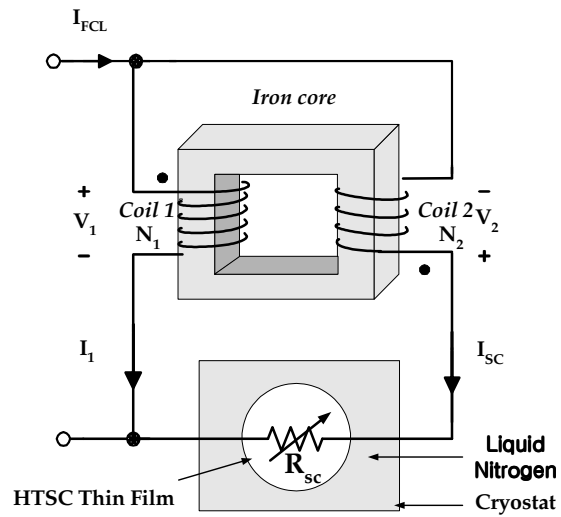


Fig. 1. Scheme of a flux-lock type superconducting fault current limiter



## B. 결선방향에 따른 분석

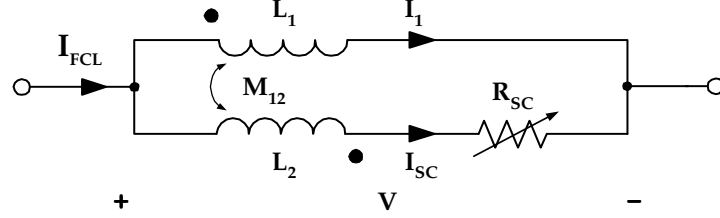


Fig. 2. Equivalent circuit of a flux-lock type SFCL

그림 1의 구조로부터 그림 2의 자속구속형 고온초전도 한류기의 등가회로를 유도할 수 있다.

그림 2의 등가회로(감극 결선의 경우)부터 식 (4)에서 식 (6)과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

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

$$j\omega L_1 I_1 - j\omega M_{12} I_{SC} = V \quad (5)$$

$$-j\omega M_{12} I_1 + (j\omega L_2 + R_{SC}) I_{SC} = V \quad (6)$$

이 식들로부터 식 (7)에서 식 (9)와 같은 한류기의 임피던스와 전류에 관한 식을 전개할 수 있다.

$$Z_{FCL} = \frac{j\omega R_{SC} L_1}{j\omega L^2 + R_{SC}} \quad (7)$$

$$\frac{I_{SC}}{I_{FCL}} = \frac{j\omega (L_1 + \sqrt{L_1 L_2})}{j\omega L^2 + R_{SC}} \quad (8)$$

$$\frac{I_1}{I_{FCL}} = \frac{j\omega \sqrt{L_1 L_2} + j\omega L_2 + R_{SC}}{j\omega L^2 + R_{SC}} \quad (9)$$

여기서, 상호인덕턴스  $M_{12} = k\sqrt{L_1 L_2}$ 에서 결합계수  $k=1$ 로 가정하였다.

자속구속형 고온초전도 한류기의 사고 발생 직후에 고온초전도소자에 흐르는 전류가 임계전류값( $I_q$ )에 도달되었을 때 초기제한 전류를  $I_{ini}$ 로 정의하고 식(8)에서  $R_{sc}=0$ ,  $I_{sc}=I_q$ 을 대입하여 정리하면 식 (10)과 같이 유도할 수 있다.

$$I_{ini} = \left( 1 \pm \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \right) I_q = \frac{L}{\sqrt{L_1}} I_q \quad (10)$$

$L = \sqrt{L_1} \pm \sqrt{L_2}$  이고 + 또는 - 부호는 1, 2차 코일에 의한 자속의 증감에 따라 결정된다. 식(10)에서 보는 것처럼 초기 제한되는 선로전류의 크기는 1차측 코일과 2차측 코일의 인덕턴스 값을 조절함으로써 설정할 수 있음을 확인할 수 있다.

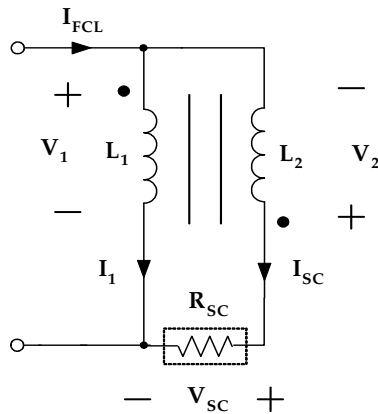


Fig. 3. Voltage polarity and direction of current flow in case of subtractive polarity winding

앞에서 언급한 바와 같이 자속구속형 고온초전도 한류기의 동작은 코일 1, 2의 결선 방향에 따라 사고시 철심코어에서 발생하는 자속이 증가되거나 감소하게 되며 자속의 증감 여부에 따라 감극 결선시 동작과 가극 결선시 동작으로 나누어 분석할 수 있다.

그림 3은 감극 결선시 전압극성 및 전류흐름 방향을 나타낸 것이며 회로로부터 사고시 식(11), (12)와 같은 전압·전류관계를 얻을 수 있다.

$$I_{FCL} = I_1 + I_{SC} \quad (11)$$

$$V_1 = V_{SC} - V_2 \quad (12)$$

변압기 동작에 의해 1차측 코일과 2차측 코일에 흐르는 전류는 동상의 전류가 흐르게 되며 사고발생과 동시에 고온초전도소자의 저항이 증가함에 따라 2차측 코일에 흐르는 전류가 감소하게 되면 1차측 코일의 전류도 감소하게 되어 선로전류를 제한하게 된다. 그림 4는 가극 결선시 전압극성 및 전류흐름 방향을 나타내고 있으며 코일 1과 2에 흐르는 전류는 180°위상차가 발생하며, 이로부터 식 (13)과 식 (14)의 관계를 얻을 수 있다[18].

$$I_{FCL} = -I_1' + I_{SC} \quad (13)$$

$$V_1 = V_2 + V_{SC} \quad (14)$$

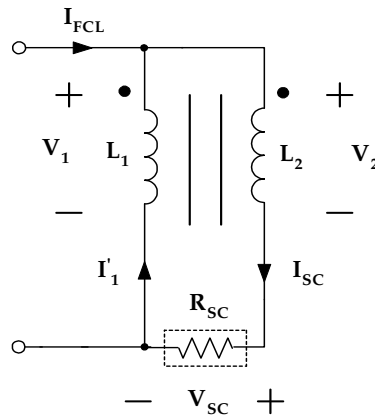


Fig. 4. Voltage polarity and direction of current flow in case of additive polarity winding

### Ⅲ. 자속구속형 한류기 설계 및 제작

#### A. 초전도소자 제작 및 켄치특성

##### 1. 소자패턴 설계

초전도 한류소자는 직경 2인치의 합성 사파이어( $Al_2O_3$ ) 기판 위에 성장된 두께  $0.3\mu m$ 의  $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) 박막을 이용하여 제작하였다. 박막은 한국의 RFtron사와 독일의 Theva사에서 각각 구입하였으며, 두 곳에서 구입한 소자의 임계온도와 임계전류밀도는 각각  $87\sim 88K$ 와  $2\sim 3MA/cm^2$ 으로 비슷하였으며 박막 전면에서  $\pm 0.5\%$ 이내로 균일하였다. YBCO박막은 제조공정상 두께가 불균일한데 이 불균일성 때문에 생기는 hot spot에서 발생하는 열을 분산시키기 위해서 YBCO박막 위에  $0.1\sim 0.2\mu m$  두께의 금을 증착하였다. 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 보호하는 역할도 한다. YBCO박막은 공기 중의 수분과 반응하여 비초전도체를 형성하기 때문에 YBCO박막의 표면을 공기로부터 차단시켜 보호하여야 한다. 금박막은 YBCO박막 성장 직후에 진공을 유지한 상태에서 in-situ로 증착하였다. 금이 증착된 YBCO박막을 광리소그래피(photo-lithography)에 인쇄회로기판(PCB) 제작공정을 접목하여 meander line모양으로 식각하는 공정을 개발하고 한류소자를 제작하였다[19]. 그림 5는 YBCO박막의 패턴형태를 보여주고 있으며, 상세사양을 표 1에 나타내고 있다.

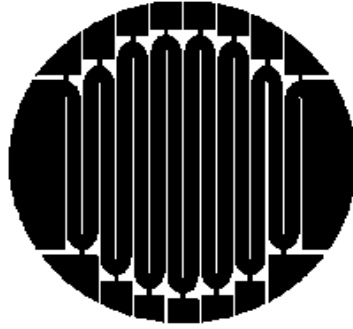


Fig. 5. The pattern shape of a YBCO thin film

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	420	mm
YBCO층 두께	0.3	$\mu\text{m}$
금층 두께	0.1~0.2	$\mu\text{m}$
임계전류	18	A
임계온도	87	K

## 2. 초전도소자 퀘치특성

초전도체의 퀘치는 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하여 발생한다. 초전도 현상을 유지하기 위해서는 그림 6에서 제시하는 값인 전류, 자장, 온도가 임계곡면의 내부에 존재해야 한다.

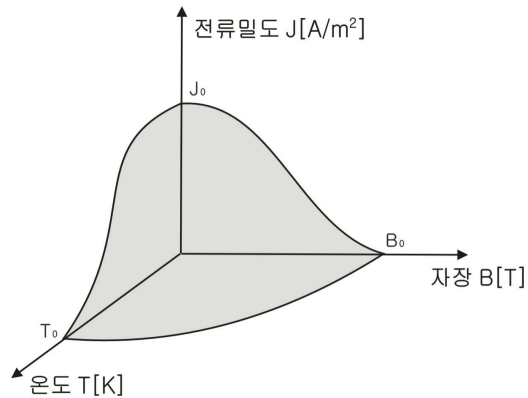


Fig. 6. The critical surface of a superconductor

퀘치특성을 분석하기 위한 실험에서는 초전도소자를 선로에 직접 연결하고 무유도 구조로 설계하기 때문에 유도 성분이 거의 없어 자기장의 영향을 받지 않는다. 따라서 그림 7과 같이 전류와 온도에 의한 임계특성으로 나타낼 수 있다.

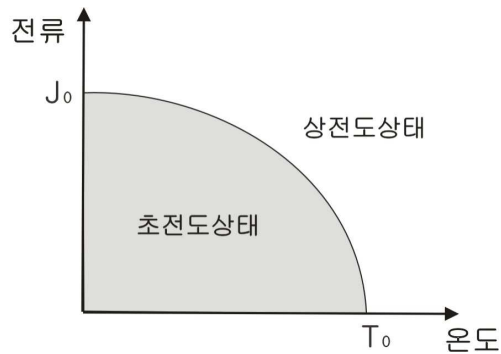


Fig. 7. The phase diagram of a superconductor

그림 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 (15)와 같은 비선형 관계를 갖는다.

$$V \propto I^n \tag{15}$$

어떤 이유로 소자의 저항이 발생하게 되면  $P=I^2R$ 의 Joule열이 발생하여 초전도소자의 온도가 증가할 것이다. 그림 6의 임계곡면을 보면 온도(T)가 증가하면 임계전류 밀도(J)와 임계 자장(B)이 감소할 것이다. 이러한 변화가 적기 때문에 동작점이 임계 곡면 내부에 있다면 퀘치가 발생하지 않을 것이다. 하지만 선로에 흐르는 전류가 증가하여 발생하는 열이 많아지면 J와 B가 더욱 감소하게 될 것이며, 이는 임계전류 밀도가 적어져서 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 발생된 열은 초전도체의 온도를 증가시키게 되고 이 과정이 다시 반복되어 퀘치가 진행된다. 다시 말하면 퀘치의 진행은 저항에 의한 열의 발생과 발생된 열의 움직임에 의해 크게 영향을 받게 된다.

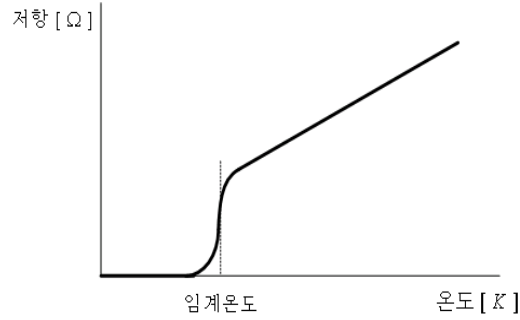


Fig. 8. The resistance-temperature curve of a superconductor

열의 발생과 발생된 열의 움직임은 다음의 열평형 방정식으로 설명할 수 있다.

$$P(r,t) = C \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} + G(T(r,t) - T_b) - \nabla (K \nabla T(R,t)) \quad (16)$$

$$R = aT + b \quad (17)$$

$$I = V_a \sin wt / (R + R_o) \quad (18)$$

여기서 P는 소비전력, C는 열용량, K는 열전도도, G는 액체질소로의 열전달 계수,  $T_b$ 는 액체질소의 온도, a와 b는 상수,  $R_o$ 와 R은 각각 소자와 회로의 선로 저항이다. 저항이 발생한 부분에서 전력 P가 소비되어 발생한 열 중 일부는 초전도체(YBCO) 자신의 온도를 올리는데 사용되고(식(16)의 우변 첫째항), 일부의 열은 주변의 액체질소와 사파이어 기판으로 전달(우변의 둘째항)되며, 나머지의 열(우변의 셋째항)은 옆부분으로 전달됨을 나타낸다. 초전도소자에서 국부적인 쿨치가 발생 하였을 때 소자의 온도 변화를 설명해 주므로 저항과 온도의 연관성(그림 8)으로부터 초전도소자의 저항 변화를 이해할 수 있다. 초전도소자의 온도가 증가함에 따라 식(17)에 의해 소자의 저항이 선형적으로 증가되고, 식(18)에 의해서 회로에 흐르는 전류가 감소되어 제한된다는 것을 알 수가 있다[19].



## B. 박막 홀더 설계 및 제작

전력 계통에서 발생한 큰 사고 전류를 제한하기 위한 자속구속형 한류기에는 박막형 초전도소자가 이용된다. 사고시 수십 msec 이내에 발생하는 큰 사고전류를 초전도소자가 감당하게 된다. 이러한 과도적인 상태를 박막형 초전도소자가 안정적으로 감당하기 위해서는 박막이나 그 주위에서 발생하는 손실을 최소화시켜야 한다. 또한, 계통 중간에 초전도 한류기를 설치하기 위해서는 초전도소자에 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 초전도소자의 임계온도를 상승시키고, 소자의 특성을 떨어뜨리는 요인이 된다. 전류 도입선을 접합 할 때에 200~230℃의 온도에서 인듐(In)을 사용하여 부착하게 된다. 그러나 100~200nm 두께의 금(Au)박막에 이와같은 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 초전도소자와의 접합은 그 사이에 0.25mm두께의 인듐 포일을 삽입하여 나사로 조이는 방식의 삽입형 접촉방식을 사용하였다. 그리고 진동을 줄이기 위해 조립된 초전도소자와 삽입형 전극을 고정할 수 있는 박막홀더를 제작하였다. 이 홀더는 직·병렬연결시를 위해 10개까지 고정시킬 수 있도록 설계하였다.

그림 9는 박막 홀더의 구조를 나타낸 것이다. 홀더는 액체 질소의 극저온에서도 변형되지 않아야하기 때문에 베이클라이트를 이용하여 제작하였다. 그림에

서 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 조립성을 확보할 수 있다.

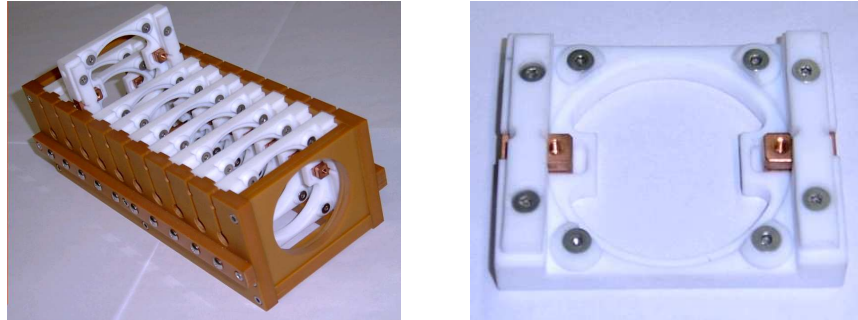


Fig. 9. The fixing holder for YBCO thin films

그림 10은 삽입형 접촉방식의 전극의 구조를 나타낸 것이다. 초전도 박막과 전극이 나사를 이용하여 직접접촉이 되고, 전류 도입선과 전극이 연결되는 구조이다. 전극은 구리소재로 만들었는데 구리 접촉자와 박막의 은(Au)층 사이의 접촉저항의 균일성과 기계적 안정성을 확보하기 위해 그 사이에 0.25mm두께의 인듐(In) 포일을 삽입하고 나사를 조여 고정하였다[20].

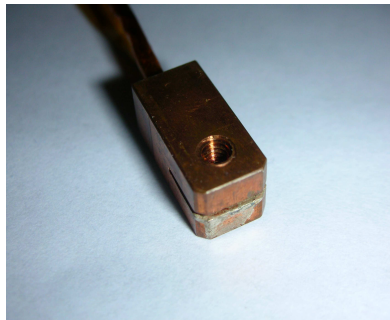


Fig. 10. The contact pole for the mechanical connection

### C. 냉각장치 설계 및 제작

고온초전도체인  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  박막은 초전도성을 유지하기 위하여 임계온도인 87K(-186℃) 이하로 유지를 해야 하는데 이를 위해서 보통은 액체질소(-196℃)를 이용한다. 이러한 액체질소를 기화되지 않고 오랫동안 보관하기 위해 저온 장치를 설계·제작하였다. 초전도 퀘칭특성 실험시 액체 질소의 증발량을 최소화하기 위하여 단열을 최대화 하는 것과 초전도체를 외부에서 육안으로 관찰할 수 있도록 상부에 이중창을 부착하는데 중점을 두었다.

액체질소와 상온과는 약 220℃의 온도차가 생기기 때문에 액체질소의 온도 차이를 줄이기 위해서는 저온장치의 단열효과가 좋아야 한다. 주변에서 액체질소로 들어오는 열의 경로는 그림 11과 같다. 구조는 저온용기에 단열 효과와 실험을 위하여 탑 플랜지를 상부에 장착하였다. 그림에서  $Q$ 와  $q$ 는 저온용기 주변에서 각각 질소증기와 액체질소에 들어오는 열유입량이고, 아래첨자  $R$ ,  $\Omega$ ,  $C$ ,  $C'$ ,  $e$  등은 열의 유입경로가 각각 용기의 외부벽과 탑 플랜지로부터의 방사열과 전도열, 열교환임을 나타낸다. 열의 유입 경로를 차단하기 위하여 다음과 같이 설계를 하였다.  $Q$ 는 저온용기의 내부벽에 도달하여 일부 열교환에 의해 질소증기로 가고 나머지가 전도를 통해 액체질소에 유입된다. 즉  $q_c = Q_c + Q_{c'} + Q_R + Q_\Omega - Q_e$ 이다. 이러한 방사열이나 전도열이 저온용기 내부로 유입되는 것을 막기 위하여 다음과 같은 방법을 사용하였다.  $Q_c$ 와  $q_c$ 는 저온용기 주변의 열에 의해서 용기 내부로 전도되는 열을 나타내며, 이를 차단하기 위해 저온용기의 벽을 이중으로 하고 내외부벽 사이를  $1 \times 10^{-6}$ Torr이하의 진공으로 하였으며 초절연체를 장착하였다.  $Q_{c'}$ 는 탑 플랜지의 외부로부터 들어오는 전도열로서 이를 차단하기 위해 저온용기 내부벽 두께를 얇게 하였다.  $Q_R$  및  $q_R$ 는 저온용기의 내부와 외부의 온도차에 의해서 생기는 방사열로서 이를 줄이기 위해 내부벽에 방사차폐판을 설치하였다.  $Q_\Omega$ 과  $q_\Omega$ 은 탑 플랜지로부터 들어오는 방사열로서 이를 줄이기 위해 알루미늄(Al)원판으로 만든 방사 배플 여러 장을 일정한 간격을 두고 탑 플랜지에 장착하였다. 방사 배플은 탑 플랜지에 장착이 되기 때문에  $Q_{c'}$ 를 증가시키므로 가장 아래에 있는 배플이

액체질소 면에서 일정 거리 이상 떨어지도록 하였다. 그리고 탑 플랜지의 상부에 있는 각종포트에 장착이 되는 부품(진류·진압 유입선용, 신호선 등)은 가능하면 우회하여 액체질소 내의 초전도 박막과 연결시켜 포트를 통하여 들어오는 방사열을 줄였다.  $Q_e$ 는 여러 경로를 통해서 저온장치 내부로 유입되는 열로서 액체 질소로 전도되는 것을 막기 위해 탑 플랜지와 저온용기 사이에 고무로 봉인을 하였다.

초전도 한류기의 켄치실험에서는 초전도 한류소자의 켄치현상을 실험 중에 관찰하는 것이 중요하다. 초전도 한류소자에 켄치가 발생하면 소자 주변에서 많은 열이 발생하며, 이 열에 의해 그 주변에는 액체질소가 기화하면서 많은 기포가 발생한다. 기포는 액체질소의 냉각효율을 떨어뜨리므로 초전도 켄치현상에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 기포를 관찰하기 위하여 탑 플랜지 상부에 투명창을 부착하여야 한다. 투명창은 이중으로 하여 그 사이는 진공을 유지하도록 한다. 외부의 투명창은 상온에서 진공 조건을 만족하면 되므로 보통 진공용 뷰 포트 부품을 사용하면 되나, 내부벽의 투명창은 상온과 액체질소 사이의 열순환을 여러 번 반복한 후에도 진공 조건을 만족하여야 한다.

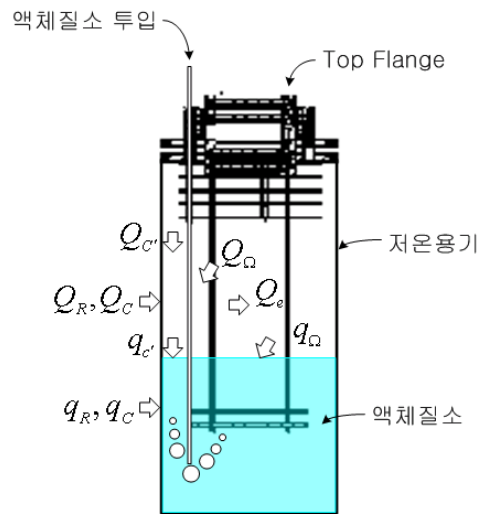


Fig. 11. The incoming path of external heat into the cryostat

액체 질소와 상온과의 온도차를 극복하기 위한 여러 가지 방안들을 감안하여 그림 12의 액체질소 용기와 그림 13과 같은 탑플랜지를 제작하였다. 그림 12는 실험을 하기 위해 초전도소자를 액체 질소에 담가둘 수 있는 액체질소용기이다. 외부와의 열차단을 위해 효율이 좋은 미국 TAYLOR -WHARTON회사 제품인 모델명 3K를 사용하였으며, 스테인리스 스틸재질로 최대 48리터까지 저장할 수 있다. 외부는 내구성을 강화시키기 위해 분말 코팅 처리되었으며, 내부는 절연을 위해 초절연체로 처리하였다.

그림 13은 탑 플랜지의 설계도면을 나타낸 것이다. 액체질소 내부에 초전도소자를 담그기 위한 탑 플랜지는 국내의 CVE사에 의뢰하여 제작하였다. 저온에서의 장시간 사용으로 인한 변형, 변질을 막기 위해 SUS304재료를 사용하였고, 초전도체의 상태를 보기 위해서 탑 플랜지의 상부에 이중창을 설치하여 그 사이를 진공상태로 만들었다. 단상 실험은 물론 삼상실험까지 하기위해 전류도입선 포트를 3조 만들었고, 신호선 및 각종 선을 외부와 연결하기위해 신호선 포트 3개와 범용 port 1개를 각각 설치하였다. 액체 질소를 주입하기 위한 포트를 설치하였으며 저온용기 내부를 진공상태로 만들기 위해 14개의 볼트를 사용하여 완전 밀폐되도록 하였다[19].



Fig. 12. The appearance of cryostat

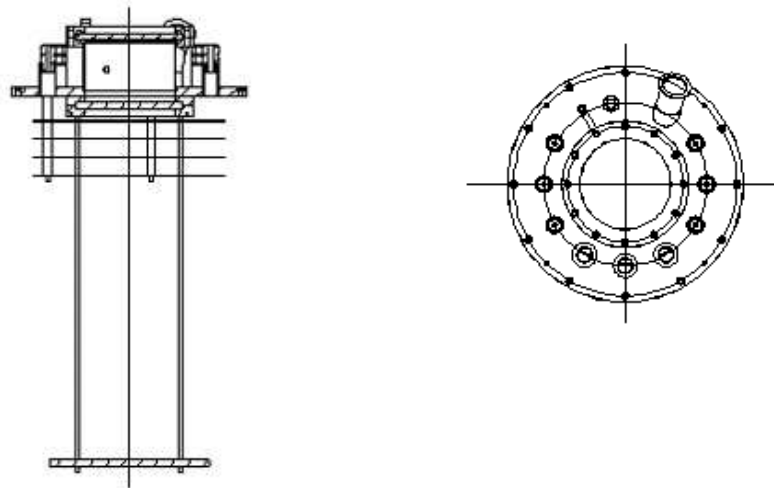


Fig. 13. The design of top flange

#### D. 자속구속리액터 설계 및 제작

자속구속형 고온초전도 한류기의 구성 요소인 자속구속 리액터는 하나의 철심코어와 두개의 코일로 구성된다. 사고 전에 두 코일에서 발생하는 자속간의 결합을 최대로 하여 상쇄가 일어나도록 하기위해 그림 14와 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 2차측 코일의 턴수를 2개로 변화시킬 수 있도록 하였다. 표 2에 자속구속리액터의 구성요소인 철심과 코일 1, 2의 설계 사양을 나타내었으며 그림 15는 제작한 자속구속리액터 외형을 보여준다.

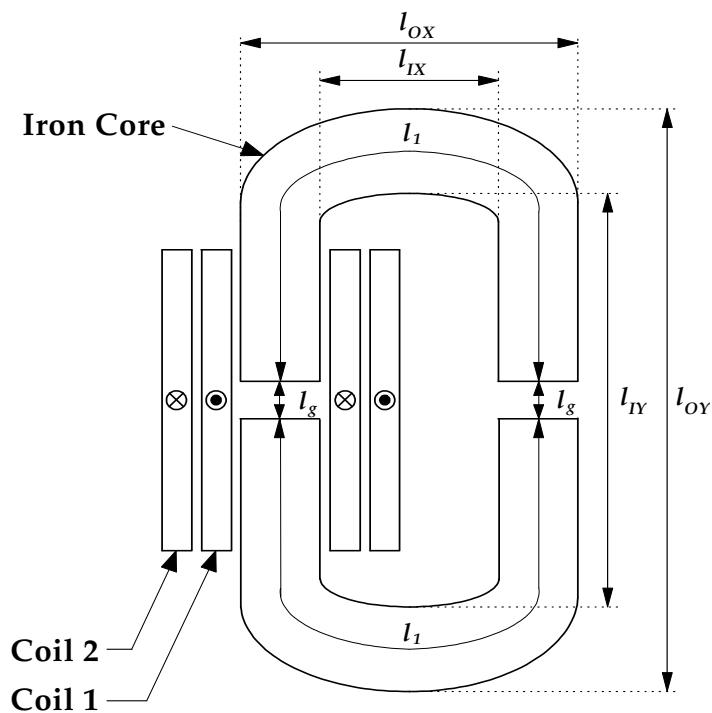


Fig. 14. The structure of a reactor for a flux-lock type SFCL

Table 2. The designed parameters of a reactor for a flux-lock type SFCL

철심코어 ( 규소강판 )	크기	단위
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
코일 1, 2	값	단위
코일 1의 자기인덕턴스( 턴수 )	23.2 (63)	mH (Turns)
코일 2의 자기인덕턴스( 턴수 )	1.27 (21), 8.2 (42)	mH (Turns)



Fig. 15. The appearance of the designed reactor

그림 16은 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 (19)에서와 같이 자기인덕턴스와 턴수의 관계에서 확인할 수 있다.



$$L \propto N^2 / R \quad (19)$$

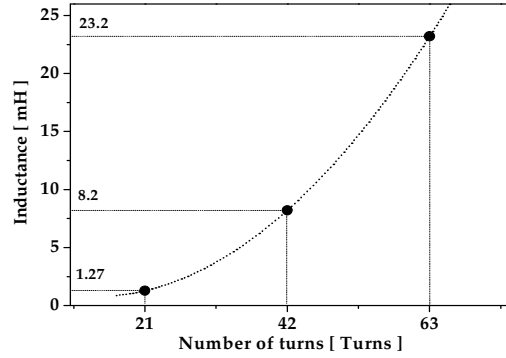


Fig. 16. The self-inductances according to number of turns

사고전의 자속구속리액터의 내부자속은 각 코일에서 발생하는 자속이 서로 상쇄되지만 사고가 발생하여 고온초전도소자의 저항이 발생하면 상쇄되지 않고 철심내부에 자속이 발생하게 된다. 이때, 사고초기에 내부자속이 가장 크게 나타나며 사고각이나 결선방향에 따라 크기가 달라지게 된다. 철심내부의 자속은 식 (20)로부터 구할 수 있다.

$$\lambda = N_1 i_1 - N_2 i_2 \quad (20)$$

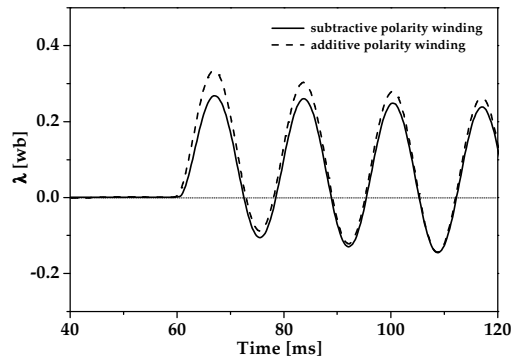


Fig. 17. The flowing flux into the iron core according to polarity winding

그림 17은 결선방향에 따른 철심내부의 자속변화를 보여주며 그림에서 보는 것처럼 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 자속 구속형 고온초전도 한류기의 장점이라 볼 수 있다. 그림에서 비교한 것처럼, 두 코일의 결선방향을 가극으로 결선한 경우가 감극으로 결선한 경우에 비해 사고초기에 발생하는 내부자속의 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[19].

## E. 사고발생용 전원장치 설계 및 제작



Fig. 18. The designed power system for fault simulation

전원장치는 실험시 소자보호와 안전을 위해 낮은 전압에서부터 점진적으로 높은 전압으로 상승시켜 실험을 하기 위해 전원장치의 출력은 0V, 40V, 80V...로 40V tap간격으로 0V~480V의 출력전압을 가지는 구조이고, 주 변압기의 출력은 전압조정이 용이하게 하기 위해 마그네틱 컨덕터를 사용하였고 마그네틱 컨덕터의 조절은 전원장치 판넬전면에 로터리 스위치를 이용하여 조절할 수 있도록 설계하였다. 각 마그네틱 컨덕터는 운전상태와 유지 및 보수를 편리하게 하기 위해 중판에 부착하여 판넬 문을 개방할 시 마그네틱 컨덕터 전체의 동작상태를 한 눈에 파악할 수 있는 구조이고 출력은 부스 바를 이용하여 출력 단자를 공통으로 아웃 풋 단자대와 연결하였다. 출력전압의 확인은 판넬전면에 전압계와 각 전압 탭별 램프를 설치하여 전압의 식별이 용이하게 하였고, 또한, 안전을 위해 입력단의 전류를 검출하여 기기에 과전류가 흐르면 EOCR를 이용하여 입력 전원을 차단한다. 사고발생용 전원장치는 간단한 조작으로 동작하도록 설계, 제작하였으므로 조작방법은 간단하다. 우선 3상 380V를 인풋 단자에 연결하고 주 차단기를 ON 한 후 판넬 전면의 파워 램프를 통해 전원 공급의 여부를 확인한다. 전원 공급이 원활히 이루어진 것을 확인한 후 판넬전면의 전환 스위치를 이용하여 원하는 전압을 선택한 후 출력 전압계와 전류계를 통해 원하는 값이 출력되는지 확인한다[19]. 이러한 사고발생용 전원장치의 상세 설계사양을 표 3에 나타내었다.

Table 3. The designed parameter of power system

	항 목	사 양
1	정 격 전 압	380V
2	상 수	3Ø 60Hz
3	정 격 전 류	150A
4	전 압 tap	0V ~ 480V ( 0V, 40V, 80V, 120V, 160V, 200V, 240V, 280V, 320V, 360V, 400V, 440V, 480V )
5	전 압 오 차	± 3% 이내
6	절 연 내 전 압	충 전 부 와 대 지 간 AC 10000V/분
7	절 연 저 항	충 전 부 와 대 지 간 100MΩ 이상 (2000V MEGGER)
8	결 선 방 법	1차 Δ / 2차 Y



(a) The input part



(b) The control part

Fig. 19. The controller of power system

## F. 위상제어기 설계 및 제작



Fig. 20. The phase controller for fault simulation

전력계통에서 발생하는 다양한 유형의 사고를 모의하기 위해서는 사고각을 포함하여 사고주기를 임의로 제어할 수 있어야 하며 일정한 시간 후에는 회로를 개로할 수 있는 제어기가 필요하다. 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 구조로 설계·제작하였고 위상각과 사고주기를 제어하기 위해 60Hz 동기펄스를 발생시키는 PLL synthesizer를 사용하였고 판넬은 사고조건 확인과 버튼 조작의 편리함을 위해 사선 구조로 제작하였다. 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 컨넥터를 이용하여 외부 트리거 신호를 받아 동작할 수 있도록 제작하였다. 위상각의 조정은 모든 위상각에서 사고를 발생시킬 수 있도록  $1^\circ \sim 180^\circ$  까지  $1^\circ$ 분해가능으로 하였고 시험자의 안전을 위해 비상버튼을 설치하였다 [19].

## IV. 실험결과 및 분석

### A. 초기사고전류 특성 분석

그림 21은 자속구속형 한류기의 실험회로 구성도이며, 표 4는 실험조건을 제시하고 있다.  $V_S$ 는 전원전압이며  $R_{in}$ 은 사고시 전원 및 선로측 전체 저항을 모의하기 위한 저항이며,  $R_L$ 은 부하저항이다. 1차측 코일과 2차측 코일을 감극결선 또는 가극 결선으로 한 후 그림에서 스위치  $SW_1$ 을 닫아 회로에 전압을 인가하였다. 회로에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하지 않기 때문에 자속구속형 고온초전도 한류기는 단락선로처럼 동작하였다. 스위치  $SW_2$ 를 닫아 단락사고를 발생시키면 고온초전도소자에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하게 되고 켄치가 발생한다. 이때 회로에 흐르는 선로전류( $I_{FCL}$ ), 1차측 코일에 흐르는 전류( $I_1$ ), 초전도소자에 흐르는 전류( $I_{SC}$ ), 코일 1, 2의 양단전압( $V_1, V_2$ )과 초전도소자 양단전압( $V_{SC}$ )을 측정 후 특성을 분석하였다.

Table 4. The experimental parameters

$V_S$	$60V_{rms}$
$R_{in}$	$1\Omega$
$R_L$	$50\Omega$
Coil 1	63turns
Coil 2	21turns

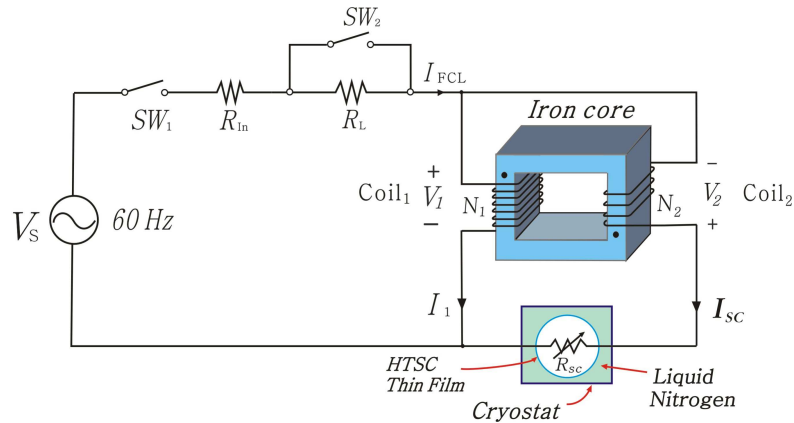


Fig. 21. The experimental circuit of flux-lock type SFCL

그림 22와 23은 감극 결선시 사고발생 직후 반주기 동안의 전류, 전압 파형을 나타낸 것이다. 그림 22에서 초기 제한전류( $I_{ini}$ )의 크기는 24.5A로 식 10에서 계산한 값 28.4A에 어느 정도 일치함을 확인 할 수 있다.

그림 24와 25는 가극 결선시 사고발생 직후 반주기 동안 전류, 전압의 파형을 나타낸 것이다. 이미 식에서 확인했던 바와 같이 사고 전 1차측 코일과 2차측 코일에 흐르는 전류에서  $180^\circ$ 의 위상차가 발생되고 있으며, 이로 인해 사고 발생과 동시에 2차측 코일의 전류가 양의 방향으로 증가됨에 따라 1차측 코일의 전류는 음의 방향으로 증가함을 관찰할 수 있다. 이후 고온초전도소자의 저항이 증가됨에 따라 2차측 코일에 흐르는 전류는 감소되고 1차측 코일에 흐르는 전류는 음의 값에서 영점을 향하게 된다. 그림 24에서 사고 발생 후 반주기 동안 제한되는 선로전류의 크기는 같은 조건의 감극 결선인 경우보다 향상되는 것을 확인 할 수 있다. 또한 가극 결선시 2차측 코일에 흐르는 전류가 고온초전도소자의 임계전류값을 넘게 되는 시점이 감극 결선인 경우보다 더 빨라지는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 초기에 제한되는 선로전류의 크기도 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

그림 24에서 초기제한전류( $I_{ini}$ )의 크기는 11.9A로 식(10)에서 계산한 값 7.6A와 비교적 일치함을 볼 수 있다. 한편, 그림 22와 그림 24에서 보는 바와 같이 감·가극 결선시 초기제한전류( $I_{ini}$ )의 이론값과 실험값이 약간 차이가 나는 것은 자속의 누설이 없는 것으로 가정한 이론값과 달리 실제로는 자속구속 리액터에서 어느 정도의 누설이 존재하기 때문이다.



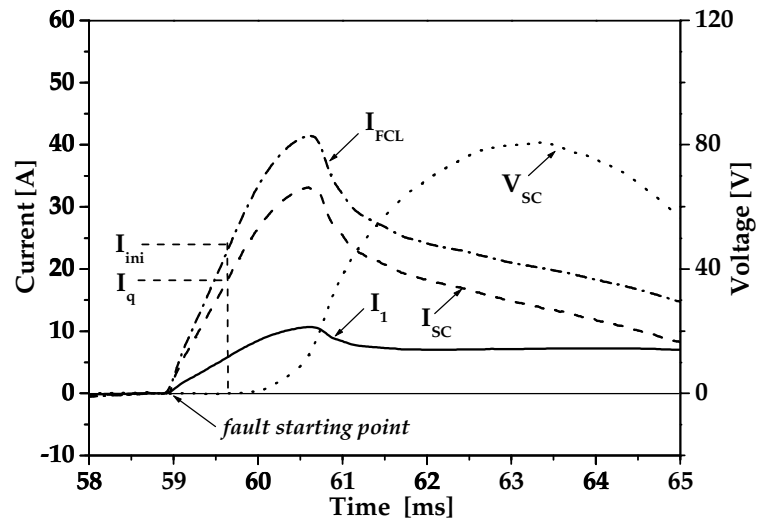


Fig. 22. The current waveforms during the fault in case of subtractive polarity winding

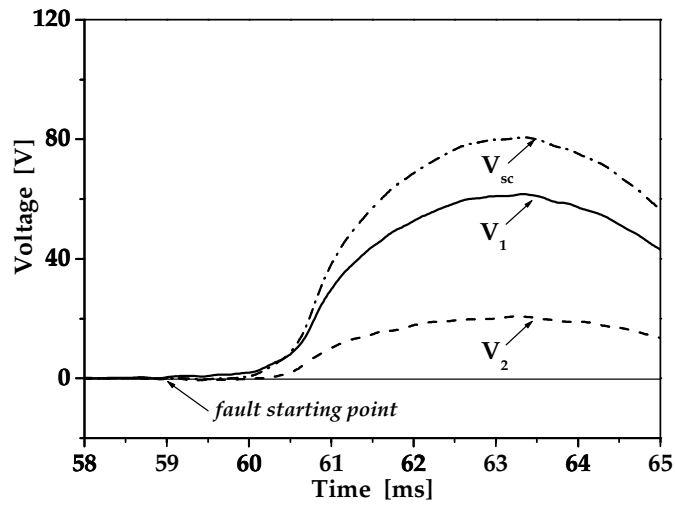


Fig. 23. The voltage waveforms during the fault in case of subtractive polarity winding

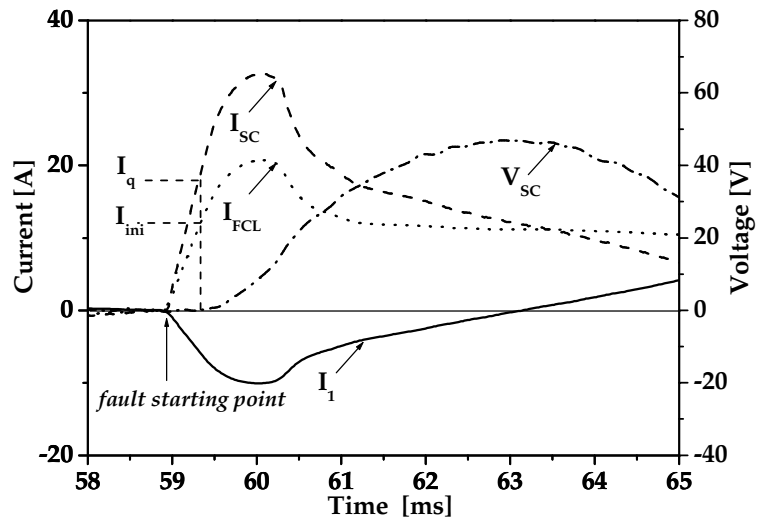


Fig. 24. The current waveforms during the fault in case of additive polarity winding

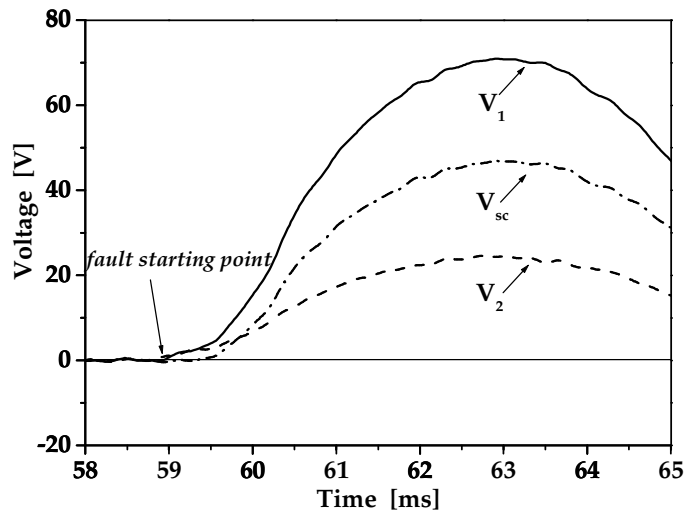


Fig. 25. The voltage waveforms during the fault in case of additive polarity winding

## B. 결선방향에 따른 전류제한 특성분석

그림 26은 자속구속형 한류기를 감극 결선시 사고발생 후 5주기 동안의 전류 및 전압파형을 보여주고 있다. 그림 26(a)의 전류파형을 보면 선로전류( $I_{FCL}$ )는 사고 직후  $39A_{peak}$ 까지 상승하지만 반주기만에 11A까지 감소하고, 5주기 동안 서서히 감소하여 8.5A까지 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 선로전류( $I_{FCL}$ )는 1차측 코일의 전류와 2차측 코일의 전류의 합과 같음을 알 수 있으며 전류가 사고발생 직후 제한되는 것이 아니라 임계전류 값을 넘어 초전도소자에 퀘치가 발생하여 상전도 저항에 의해 2차측 코일에 흐르는 전류가 제한되어 감소되는 순간 2차측 코일의 전류를 포함한 선로전류도 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 선로전류와 1차측 코일의 전류 및 소자전류는 동상이 아니라 인덕턴스에 의해 위상이 약간 앞서고 뒤지는 것을 알 수 있다. 그림 26(b)의 전압파형도 3주기부터 안정된 파형을 나타냄을 알 수 있다. 그림 27은 자속구속형 한류기를 가극 결선시 사고발생 후 5주기 동안의 전류 및 전압파형을 보여주고 있다. 그림 27(a)를 보면 선로전류( $I_{FCL}$ )는 사고 직후 최고  $20.5A_{peak}$ 까지 증가하나 반주기만에 7.5A로 감소되고, 이후 5주기 동안에 걸쳐 서서히 감소하여 5.5A까지 감소되는 것을 알 수 있다. 단락사고가 발생하였을 때 1차측 코일의 전류는 음의 방향으로 증가하고 2차측 코일의 전류는 반대로 양의 방향으로 증가함을 확인 할 수 있다. 임계전류 값을 넘으면 초전도소자에 퀘치가 발생하고 상전도 저항에 의해 2차측 코일의 전류가 감소된다. 1차측 코일의 전류는 음의 값에서 영점을 향하게 되는데, 영점을 지나면 전류가 크게 증가하다가 선로전류와 2차측 코일의 전류와 함께 제한되는 것을 볼 수 있다. 그림 27(b)의 전압파형을 보면 초전도소자의 첫번째 피크에서 전압 값이 46.5V이고, 그 다음 피크에서는 49V로 상승하여 이후 안정된 파형이 나타남을 볼 수 있다. 초전도소자의 전압 및 전류파형으로부터 가극 결선시 저항형이 감극 결선시보다 낮음을 보여주는데, 이는 초전도소자에 무리한 영향을 주지 않아 저항형이 가지고 있는 단점인 초전도체의 파손우려를 보완할 수 있을 것으로 사료된다.

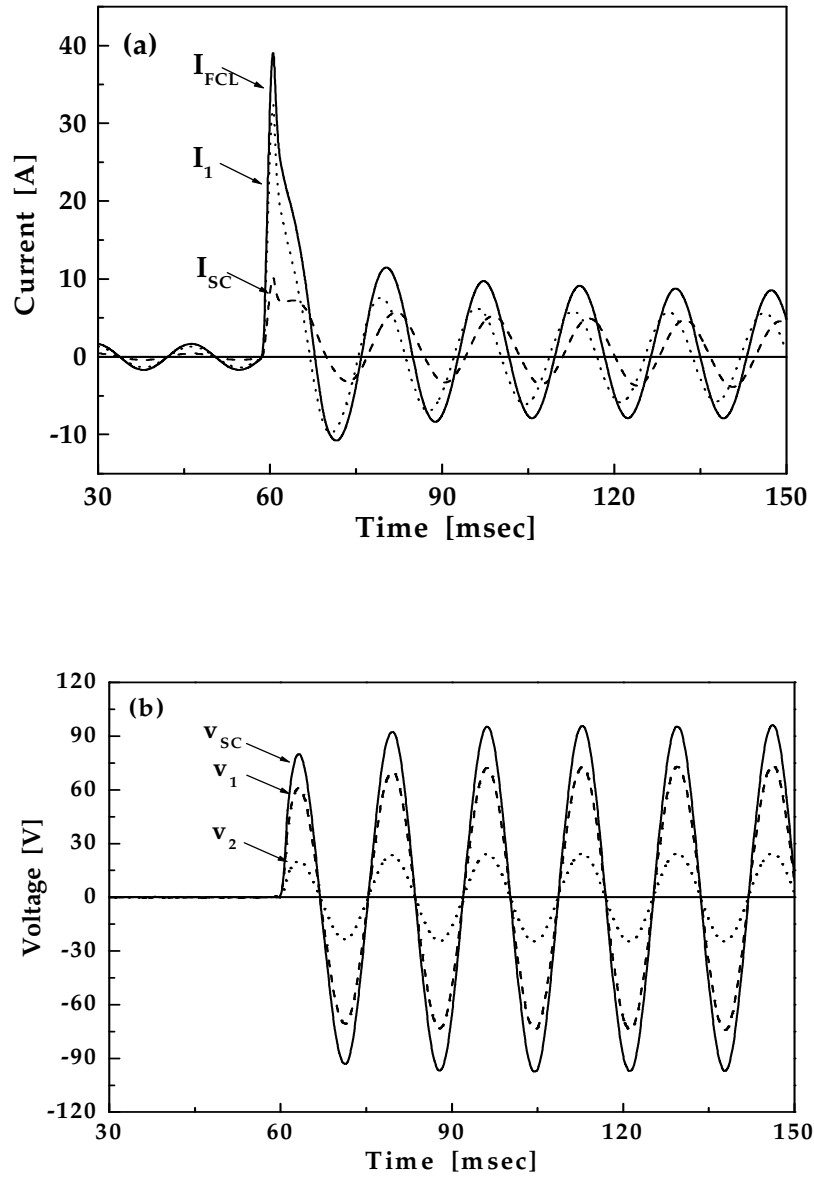


Fig. 26. Current limiting characteristics of flux-lock type SFCL in case of subtractive polarity winding

(a) Current waveforms (b) Voltage waveforms

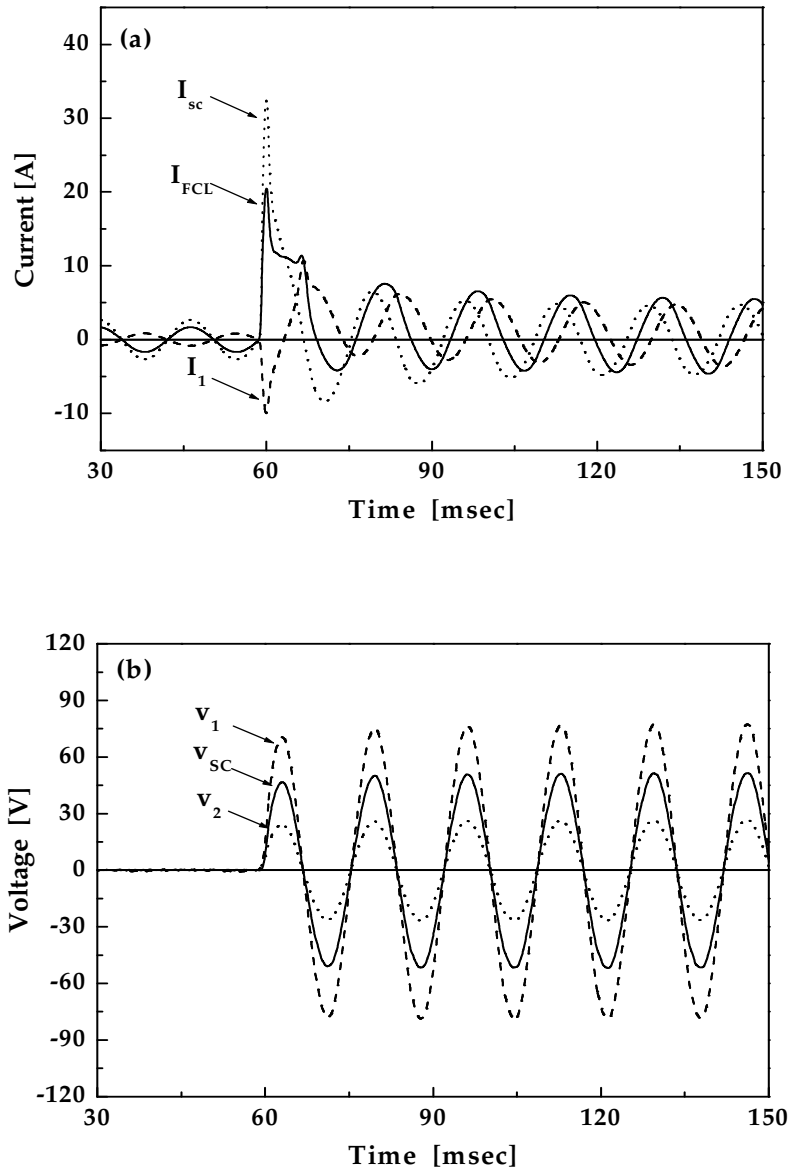


Fig. 27. Current limiting characteristics of flux-lock type SFCL in case of additive polarity winding

(a) Current waveforms (b) Voltage waveforms

### C. 사고각에 따른 전류제한 특성분석

그림 28은 자속구속형 한류기의 감극결선시 사고각에 따른 전류파형을 나타낸 그림이다. 그림 28에서 알 수 있듯이 사고가 발생하여 선로전류( $I_{FCL}$ )가 급격히 증가하지만 초전도 소자의 임계전류를 넘는 순간 선로전류( $I_{FCL}$ )는 소자의 상전도 저항으로 인해 반주기만에 제한되는 것을 알 수 있다. 사고각이 증가할수록 초전도 소자의 켄치 발생속도가 빠르게 진행되기 때문에 신속하게 사고전류를 제한하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 사고 직후 선로전류( $I_{FCL}$ ), 초전도소자에 흐르는 전류( $I_{SC}$ ), 1차측 코일에 흐르는 전류( $I_1$ )의 값들이 증가하지만 모두 반주기만에 제한되어 3주기 이후에는 일정하다는 것을 확인할 수 있다. 이는 사고각이 증가할수록 고장시점의 전류값이 높기 때문에 그 시점의 전류 값들이 증가하는 것을 알 수 있고, 3주기 이후에 초전도체가 완전하게 상전도 상태가 되는 것을 알 수 있다.  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ 에서 선로전류( $I_{FCL}$ )를 비교하였을 때  $90^\circ$ 에서 선로전류 피크값이 49A로 가장 높은 값이 나왔는데 자속구속형 한류기 설계시 최대용량 한계를 결정하는데 이 점을 고려하여 설계할 필요성이 있다.

그림 29는 자속구속형 한류기의 감극결선시 사고각에 따른 전압파형을 나타내고 있다. 그림 29를 보면 사고 발생 직후 전압이 발생하는 것이 아니라 초전도소자가 임계전류를 넘어 켄치가 될 때 상전도 저항에 의해 전압이 발생하는 것을 알 수 있다. 사고각이 증가 할수록 초전도 소자의 전압( $V_{SC}$ ) 피크값에 빠르게 도달하여 것을 확인할 수 있고 초전도소자의 초기 최대전압은 사고각이 증가 할수록 감소하였는데 이는 피크값에 도달할 때까지 켄치 발생시간이 감소되어 발생저항이 감소하였기 때문이다.

그림 30은 자속구속형 한류기의 가극결선시 사고각에 따른 전류파형을 나타내고 있다. 사고각이 증가할수록 감극결선시와 마찬가지로 사고 직후 선로전류( $I_{FCL}$ ), 초전도소자에 흐르는 전류( $I_{SC}$ ), 1차측 코일에 흐르는 전류( $I_1$ )의 값들이 증가하지만, 반주기만에 제한되어 3주기 이후에는 일정한 값을 나타냄을 확인

할 수 있다.

그러나, 동일한 사고각에서 선로전류( $I_{FCL}$ ) 피크값이 감극결선시보다 가극결선시 적은값이 나온 것으로 보아 전류제한특성이 더 좋은 것을 확인할 수 있다. 그림 31은 가극결선시 사고각에 따른 전압파형을 나타내고 있다. 사고각이 증가할수록 감극결선시와 마찬가지로 초전도소자의 전압( $V_{SC}$ )이 피크값에 빠르게 도달하는 것을 확인할 수 있다.

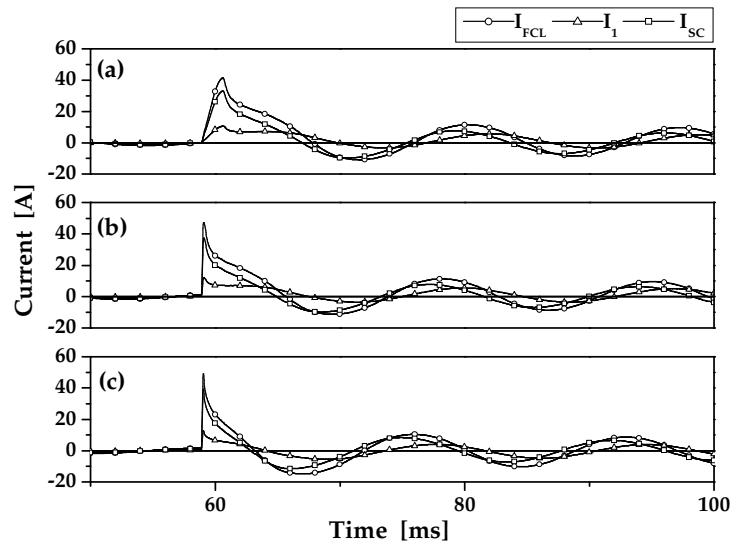


Fig. 28. Current waveforms in case of subtractive polarity winding according to fault angles  
 (a)  $0^\circ$  (b)  $45^\circ$  (c)  $90^\circ$

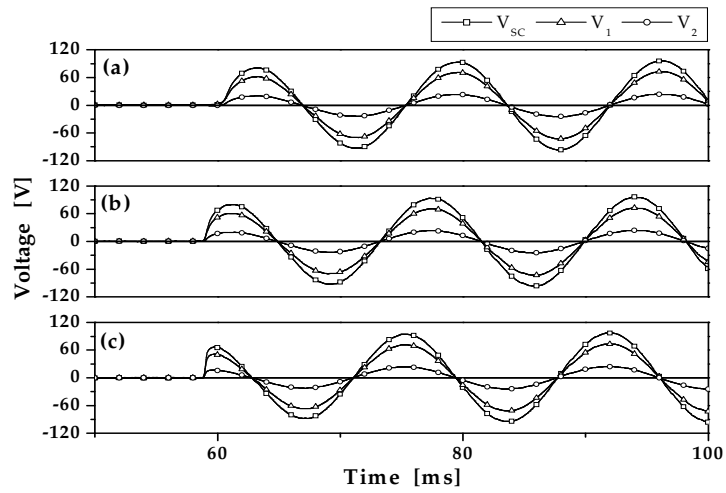


Fig. 29. Voltage waveforms in case of subtractive polarity winding according to fault angles  
 (a)  $0^\circ$  (b)  $45^\circ$  (c)  $90^\circ$



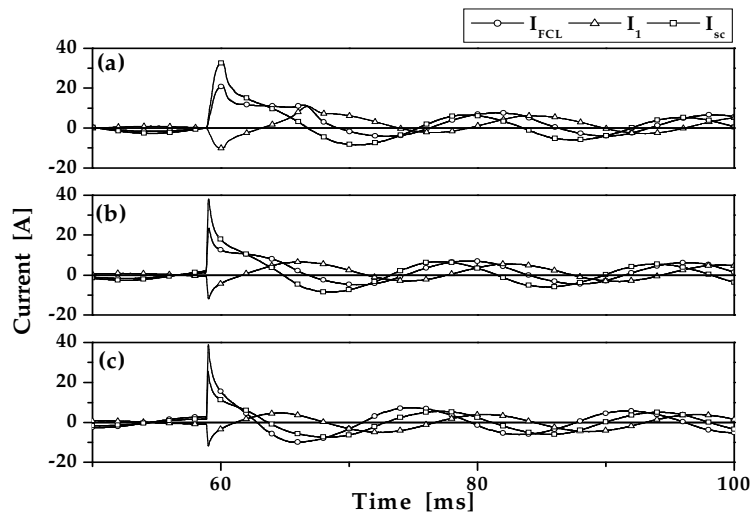


Fig. 30. Current waveforms in case of additive polarity winding according to fault angles  
 (a)  $0^\circ$  (b)  $45^\circ$  (c)  $90^\circ$

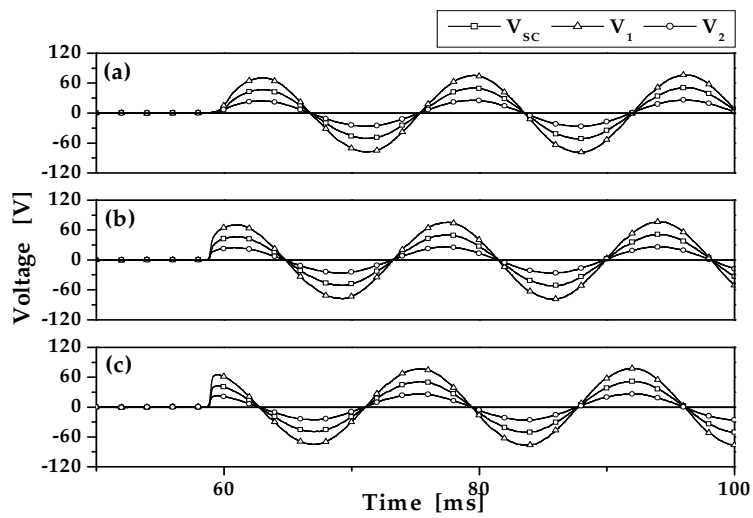


Fig. 31. Voltage waveforms in case of additive polarity winding according to fault angles  
 (a)  $0^\circ$  (b)  $45^\circ$  (c)  $90^\circ$

## D. 인덕턴스변화에 따른 전류제한 특성분석

### 1. 감극 결선시 전류제한 특성

내부자속을 상쇄시키는 방향으로 1차측 코일과 2차측 코일을 결선한 경우, 즉 감극 결선한 경우 선로전류( $I_{FCL}$ )를 포함한 코일 1,2의 전류( $I_1, I_{SC}$ )를 그림 32와 그림 33에 나타내었다. 사고 직후 고온초전도소자의 상전도 저항 발생에 의해 2차측 코일에 흐르는 전류가 제한되는 순간 1차측 코일의 전류를 포함한 선로전류도 제한되는 것을 확인할 수 있다. 고온초전도소자의 저항이 점차 증가함에 따라 1차측 코일과 2차측 코일의 전류의 크기는 동시에 감소되어 3주기 이후부터는 작은 값으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 34는 감극 결선시 코일의 권선수에 따른 전류제한 정도를 조사하기 위하여 1차측 코일의 권선수를 63회로 고정하고 2차측 코일의 권선수를 21회에서 42회로 증가시켰을 때, 사고시 전류제한 특성을 나타낸 것이다. 2차측 코일의 권선수를 42회로 증가시켰을 때 각 코일의 전류가 증가하게 되고 제한되는 선로전류도 증가된 것을 관찰할 수 있다. 이는 2차측 코일의 권선수 증가에 따라 전체적인 발생자속의 크기가 감소된 것에 기인한 것이다. 이는 사고발생 직후 반주기 동안의 소자 양단 전압과 각 코일의 전류를 나타낸 그림 35에서도 확인할 수 있다. 사고발생 후 2차측 코일에 흐르는 전류가 고온초전도소자의 임계전류( $I_c=18A$ )를 넘는 순간 고온초전도소자에서 상전도 저항이 발생하기 때문에 선로전류는 제한되기 시작한다. 또한 사고발생 후 고온 초전도소자의 임계전류를 넘는 시점이 권선수 21회인 경우보다 권선수 42회인 경우가 지연되는 것을 확인할 수 있으며 이로 인해 선로전류의 첫번째 피크값의 크기가 권선수 21회인 경우(41A)보다 권선수 42회인 경우(51A)가 큰 값으로 나타남을 확인할 수 있다. 이는 앞에서 언급한 식 (10)에 의해 잘 설명될 수 있다. 위의 결과들로부터 1차측 코일과 2차측 코일을 감극 결선하여 설계할 경우 고온초전도소자가 단독으로 사용된 저항형 고온초전도 한류기와 비교하여 부하용량 증대시 소자수의 탄력적 운용 측면에서 보다 잇점이 있을 것으로 기대된다.

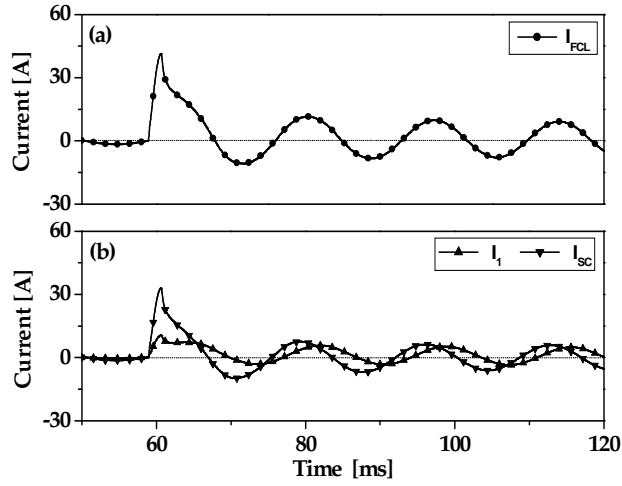


Fig. 32. The current waveforms in case of subtractive polarity winding  
 $(N_1=63, N_2=21)$   
 (a)  $I_{FCL}$  (b)  $I_1, I_{SC}$

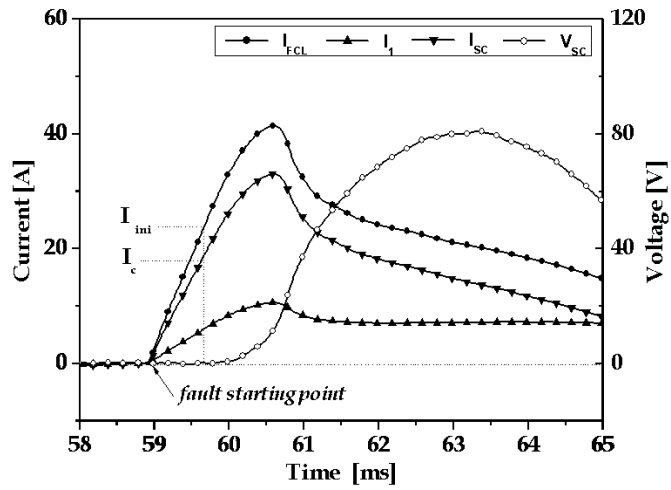


Fig. 33. The current and the voltage waveforms in case of subtractive polarity winding immediately the after fault  $(N_1=63, N_2=21)$

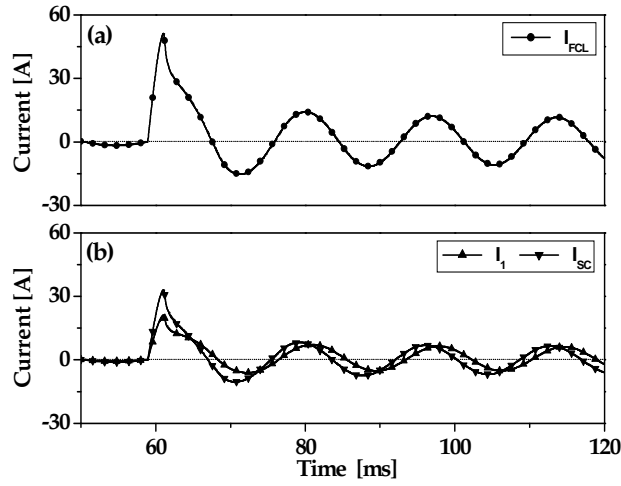


Fig. 34. The current waveforms in case of subtractive polarity winding  
 $(N_1=63, N_2=42)$   
 (a)  $I_{FCL}$  (b)  $I_1, I_{SC}$

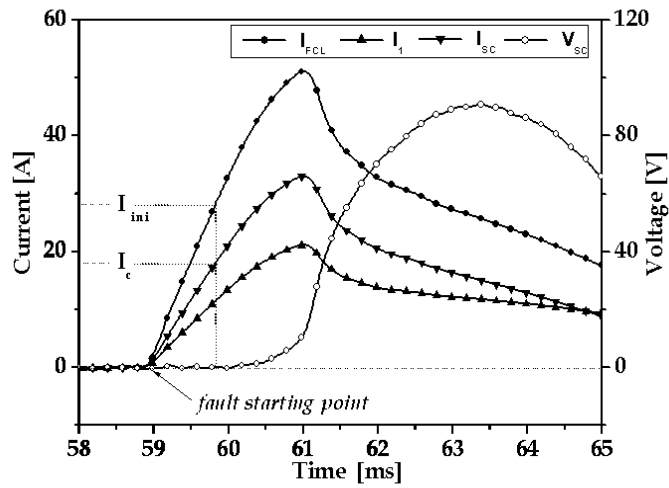


Fig. 35. The current and the voltage waveforms in case of subtractive polarity winding immediately after the fault ( $N_1=63, N_2=42$ )

## 2. 가극 결선시 전류제한 특성

그림 36은 철심의 내부자속을 더해지는 방향으로 1차측 코일과 2차측 코일을 가극 결선하였을 때 사고 발생 후 선로전류( $I_{FCL}$ )를 포함한 코일 1,2의 전류( $I_1$ ,  $I_{SC}$ )를 나타낸 그림이다. 1차측 코일의 권선수가 63회, 2차측 코일의 권선수가 21회일 때의 감극 결선과 비교하여 보면 가극 결선시 선로전류의 제한정도가 현저하게 향상되는 것을 확인할 수 있다. 이는 사고전에 1차측 코일과 2차측 코일에 흐르는 전류가  $180^\circ$ 의 위상차가 발생되고 있으며, 이로 인해 사고발생과 동시에 선로전류가 반전된 두 전류의 합으로 나타난 것에 기인된다. 그림 37은 사고발생 직후 반주기 동안의 소자 양단 전압과 각 코일의 전류를 나타내고 있다. 사고발생 후 코일 2에 흐르는 전류가 고온초전도소자의 임계전류( $I_C=18A$ )를 넘는 순간 고온초전도소자의 상전도 저항 발생으로 소자 양단에 전압이 발생되기 시작하였다. 그림 38은 가극 결선시 코일의 권선수에 따른 전류제한 정도를 조사하기 위하여 1차측 코일의 권선수를 63회으로 고정하고 2차측 코일의 권선수를 21회에서 42회로 증가시킨 경우 사고시 전류제한 특성을 나타낸 것이다. 2차측 코일의 권선수가 42턴인 경우 1차측 코일에 흐르는 전류( $I_1$ )는 2차측 코일의 권선수가 21턴인 경우에 비해 현저하게 커지는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 1차측 코일에 흐르는 전류( $I_1$ )와 2차측 코일에 흐르는 전류( $I_{SC}$ )의 합으로 나타나는 선로전류( $I_{FCL}$ )는 2차측 코일의 권선수가 증가할수록 제한되는 사고전류 크기가 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이는 전체적인 발생자속의 크기가 증가한것에 기인한다. 그림 39는 사고발생 직후 반주기 동안의 소자 양단전압과 각 코일의 전류를 나타내고 있다. 사고발생 후 2차측 코일에 흐르는 전류가 고온초전도소자의 임계전류( $I_C=18A$ )를 넘는 순간 고온초전도소자의 상전도 저항 발생으로 소자 양단에 전압이 발생되기 시작하였다. 한편, 감극결선인 경우와 마찬가지로 사고 발생후 고온초전도 소자의 임계전류를 넘는 시점이 권선수 21회인 경우보다 권선수 42회인 경우가 지연되었으나 그 정도는 줄어들었음을 확인할 수 있다.

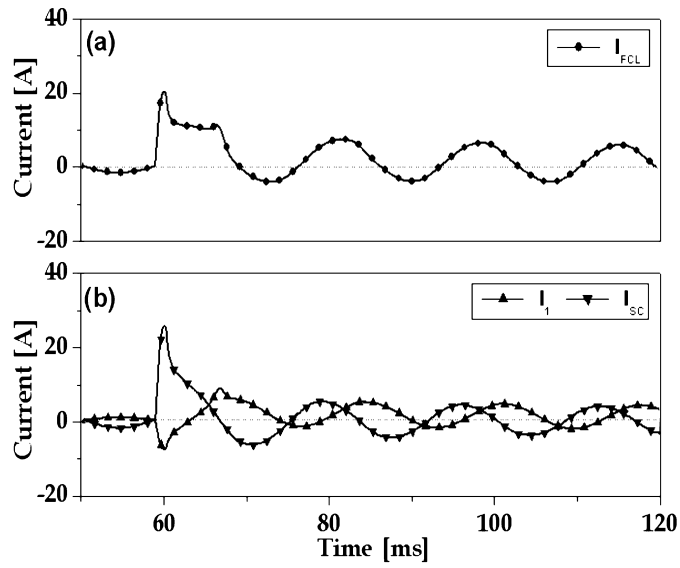


Fig. 36. The current waveforms incase of additive polarity winding  
 $(N_1=63, N_2=21)$   
 (a)  $I_{FCL}$  (b)  $I_1, I_{SC}$

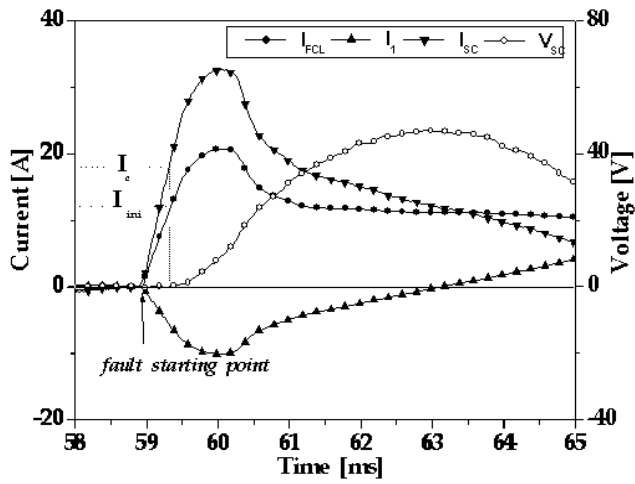


Fig. 37. The current and the voltage waveforms in case of additive polarity winding immediately after the fault  $(N_1=63, N_2=21)$

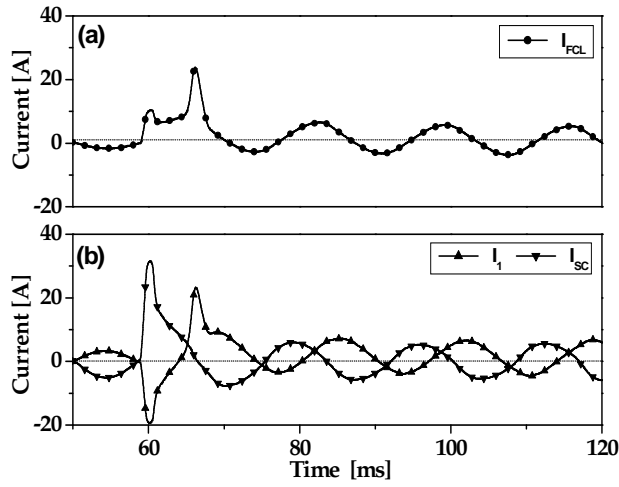


Fig. 38. The current waveforms in case of additive polarity winding  
 $(N_1=63, N_2=42)$   
 (a)  $I_{FCL}$  (b)  $I_1, I_{sc}$

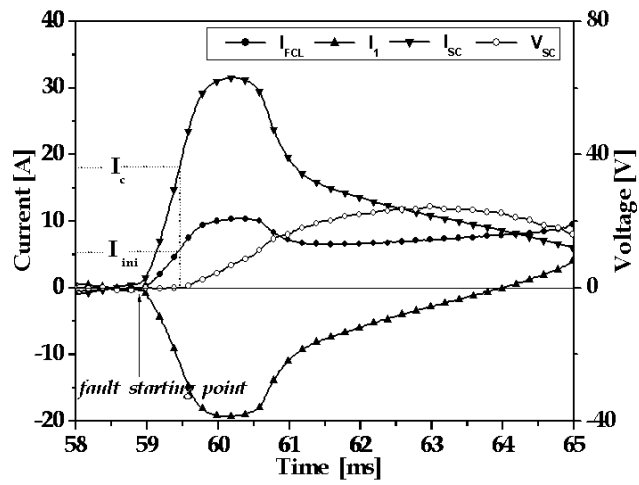


Fig. 39. The current and the voltage waveforms in case of additive polarity winding immediately after the fault  $(N_1=63, N_2=42)$

## E. 소자저항증가에 따른 전류제한 특성분석

그림 40은 감극 결선시 소자를 직렬연결하였을 때 전류파형을 보여주고 있다. 그림 40(a)를 보면 단독소자시 선로전류( $I_{FCL}$ ) 피크값이 53 A에서 3주기에는 13A로 감소되는 것을 알 수 있다. 그림 40(b)를 보면 소자 2개를 직렬 연결하였을 때 선로전류( $I_{FCL}$ ) 피크값은 50A에서 3주기에는 11A로 감소하였고 그림 40(c)를 보면 소자 3개를 직렬 연결하였을 때 선로전류 피크값이 49A에서 3주기에는 10A로 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 자속구속형 전류제한기를 직렬 연결하였을 때 식(10)에서 확인 했듯이 직렬로 연결되더라도 초기에 제한되는 사고전류는 같은 값이이고, 사고후 초전도 소자의 전체저항도 비슷한 값을 나타냄을 의미한다.

그림 41은 소자를 직렬 연결하였을 때 전압 파형을 나타내고 있다. 그림 41(b)의 전압파형을 보면 사고 발생 후 임계 전류값을 넘어 켄치가 발생할 때 직렬 연결된 초전도소자의 약간의 켄치전류( $I_q$ )의 편차 때문에 발생하는 켄치시작의 차이가 보이지만 3주기 이후에는 거의 같음을 알 수 있다. 또한 첫주기의 그림 41(a)의 단독소자일때 초전도 소자의 전압 피크값은 177V, 2개의 직렬 연결시 소자 A( $V_{SC-A}$ )는 81V, 소자 B( $V_{SC-B}$ )는 100V로 전압분배가 확실하게 되는 것을 확인 할 수 있다. 이는 초전도소자1개가 갖는 부담을 줄일 수 있고 자속구속형 전류제한기가 동시켄치와 용량증대에 유리하다는 것을 알 수 있다. 그림 41(c)의 전압파형을 보면 첫주기때 소자 A( $V_{SC-A}$ )는 45V, 소자 B( $V_{SC-B}$ )는 64V, 소자 C( $V_{SC-C}$ )는 96V였고 3주기 이후에 소자 B와 소자 C의 전압값이 비슷하다는 것을 확인할 수 있다. 이는 소자 2개의 직렬 연결시보다 전압분배의 불균형이 있지만 단독 소자시와 소자 2개의 직렬연결시 전압분배의 균형으로 보아 인가전압의 증가시 불균형의 차이는 줄어들 것으로 예상된다. 그림 42는 소자를 직렬연결하였을 때 저항파형을 나타내고 있다. 그림 42(a)의 초전도 저항( $R_{SC-A}$ )을 보면 3주기 이후에 초전도체에 상전도 전이가 완전하게 이루어져 일정한 값에 도달되는 것을 확인할 수 있다. 그림 42(b)를



보면 초전도소자 A, B의 저항이 거의 같음을 알 수 있다. 이는 동시퀀치로 인해 저항이 거의 비슷한 것을 확인 할 수 있다. 그림 42(c)의 저항을 보면 소자 B( $R_{SC-B}$ )와 소자 C( $R_{SC-C}$ )의 저항이 소자 A( $R_{SC-A}$ )의 저항과 큰 차이가 있음을 확인할 수 있다.

이는 초전도소자가 갖고 있는 임계전류 불균일에 의해 발생하며 인가전압을 높이거나 셉트인덕턴스 혹은 외부자장 인가를 통하여 개선할 수 있을 것이다 [18].

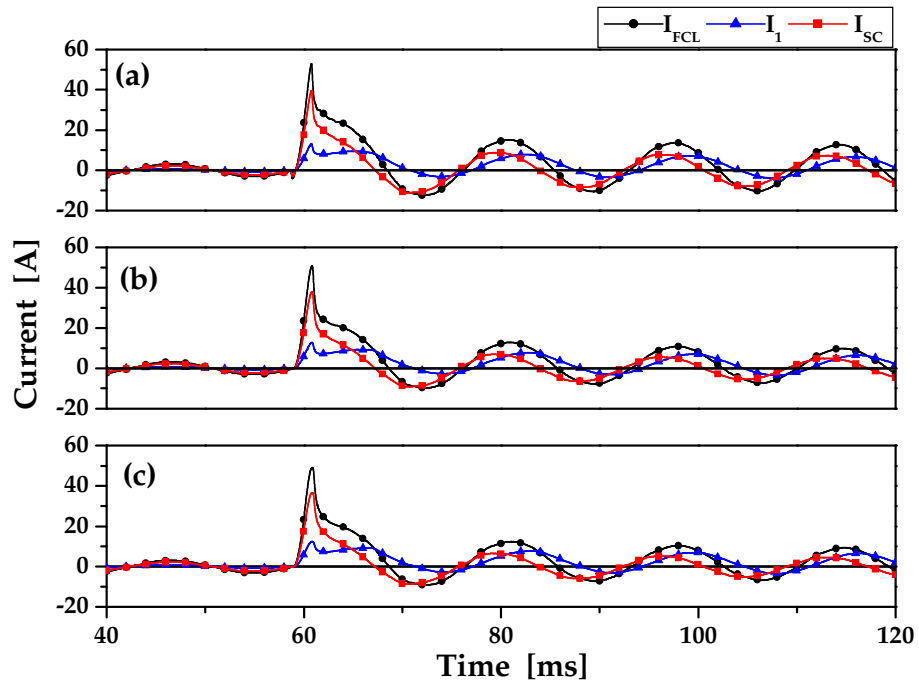


Fig. 40. Current waveforms according to the number of the superconducting element in a flux-lock type SFCL

(a) a element (b) two elements (c) three elements

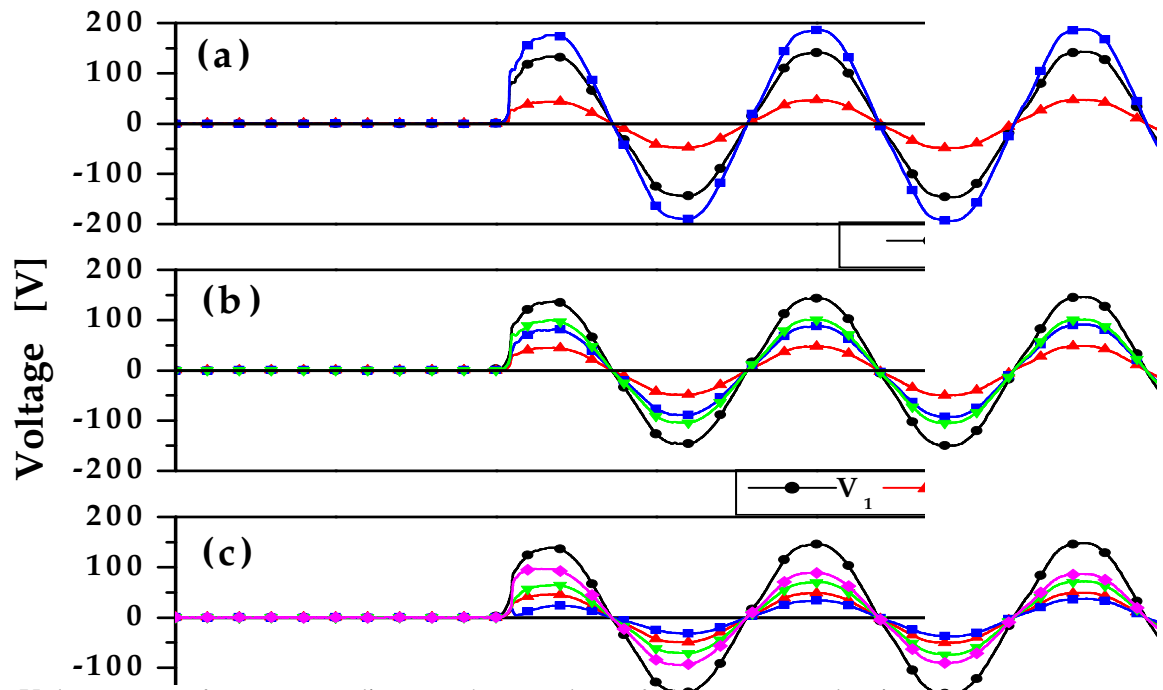


Fig 41. Voltage waveforms according to the number of the superconducting element in a flux-lock type SFCL

(a) a element (b) two elements (c) three elements

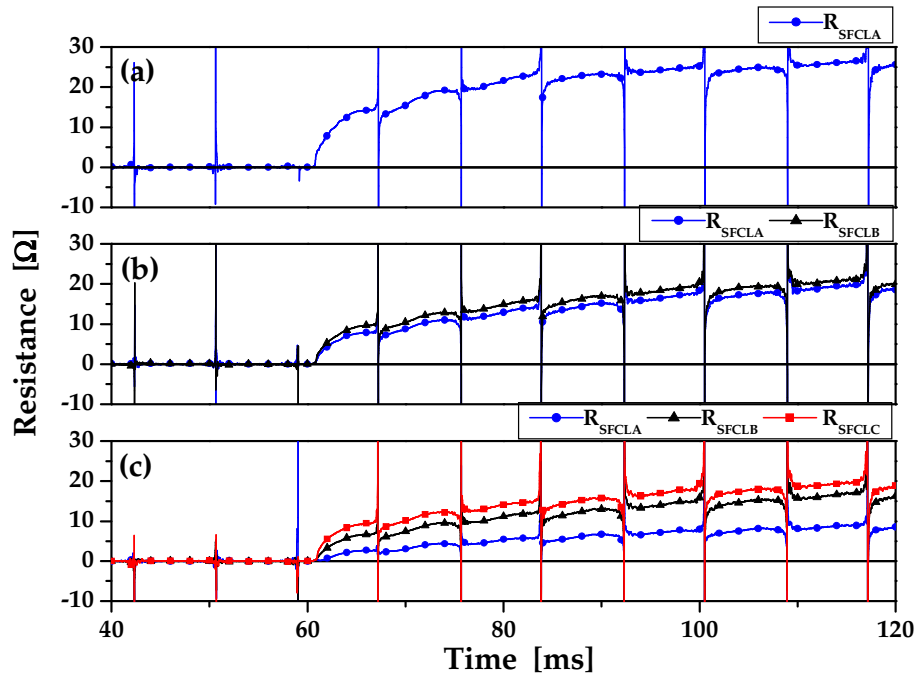


Fig. 42. Resistance waveforms according to the number of the superconducting element in a flux-lock type SFCL

(a) a element (b) two elements (c) three elements

## V. 결 론

본 논문에서는 전력계통에 적용하기 위한 자속구속형 한류기의 전류제한 특성을 분석하였다. 초전도 소자인 YBCO 박막을 이용하여 자속구속형 한류기를 설계 제작하였다. 자속구속형 한류기의 동작원리를 분석하고 등가회로를 이용하여 각 권선에 흐르는 전류와 한류기의 임피던스를 유도하였다. 자속구속형 한류기는 결선방향에 따라 전류제한 특성이 다르게 나타났으며, 가극 결선시 사고 발생 후 반주기 동안 제한되는 선로전류의 크기는 같은 조건의 감극 결선인 경우보다 향상되는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 가극 결선시 2차측코일에 흐르는 전류가 고온초전도소자의 임계전류 값을 넘게 되는 시점이 감극 결선인 경우보다 더 빨라지는 것을 볼 수 있었다. 이로 인해 초기에 제한되는 선로전류의 크기도 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 감극결선과 가극결선시 사고각이 증가할수록 초전도 소자의 켄치발생 속도가 빠르게 진행되기 때문에 사고전류를 더 신속하게 제한 할 수 있다는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 반주기동안에 선로전류, 초전도소자전류, 1차측코일에 흐르는 전류 및 초전도 소자 전압이 증가되는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 고장이 발생한 시점의 전류가 높기 때문이라고 사료된다. 자속구속형 한류기를 감극으로 결선한 뒤 2차측코일의 인덕턴스가 증가할수록 소자의 선로전류( $I_{FCL}$ )가 증가하는 것을 확인 하였다. 또한, 가극으로 결선한 경우 감극으로 결선한 경우보다 전류제한 특성이 우수함을 확인하였고 2차측코일의 인덕턴스가 증가할수록 선로전류의 전류제한 특성이 보다 향상되는 것을 확인 하였다. 자속구속형 초전도 한류기의 적용 전압을 확대하기 위하여 감극결선시 초전도 소자를 직렬 연결하여 분석한 결과 단독 소자일 때와 소자 2개 직렬연결을 비교하였을 때 소자 2개를 직렬로 연결한 경우는 초전도소자에서 켄치전류( $I_q$ )의 편차 때문에 발생하는 켄치시작시점의 차이가 약간 보이지만 3주기 이후에는 거의 같음을 알 수 있었다. 또한 전압분배가 확실하게 되어 초전도소자 1개가 갖는 부담을 줄일 수 있고 자

속구속형 초전도한류기가 동시켄치와 용량증대에 유리함을 것을 알 수 있었다. 소자 3개 연결시 초전도소자 전압의 불균형이 있었지만 단독소자 시와 소자 2개를 직렬연결시 전압분배의 균형으로 보아 인가전압을 높이거나 셉트인덕턴스 혹은 외부 자장인가를 통하여 개선할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김영선, 이강완, “고장전류 저감을 위한 345kV 직렬리액터 설치검토”, 전기저널, Vol. 1, No. 1, p. 37, 2000.
- [2] E. J. Stacey, J. J. Bonk, M. Mehta, M. Sarkozi, P. G. Slade and R. K. Smith, “Solid state distribution current limiter and circuit breaker - application requirements and control strategies”, IEEE Trans. Power Deli., Vol. 8, No. 3, p. 1155, 1993.
- [3] Makan Chen and Willi Paul, “Superconducting control for surge currents”, IEEE Spectrum, Vol. 35, No. 5, p. 49, 1998.
- [4] 임성훈, 최명호, 이현수, 한병성, “차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 설계 및 특성 시뮬레이션”, 전기학회논문지, 48권, 3호 p. 173, 1999.
- [5] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, “15 kVA급 박막형 초전도 전류제한기의 한류특성”, 전기전자재료학회논문지, 13권, 12호, p. 1058, 2000.
- [6] B. Gronoll, B. Ries, W. Schmidt, H. p. Kraemer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies and H. W. Neumueller, E. Baltzer, S. Fischer, “Resistive fault current limiters with YBCO films 100kVA functional model”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 9, No. 2, p. 656, Jun., 1999.
- [7] 이찬주, 이승제, 강형구, 배덕권, 안민철, 현옥배, 고태국, “30kVA급 유도형 고온초전도 한류기의 특성연구”, 한국초전도·저온공학회논문지, 4권, 1호, p. 110-113, May 2002.
- [8] 이재, 임성훈, 강형곤, 고석철, 한병성, “자기차폐형 전류제한기의 전류제한 특성 해석 연구”, Progress in Superconductivity, Vol. 3, No. 2. p. 235, April 2002.
- [9] Tsutomu Hoshino, Khosru Mohammad Salim, Massanori Nishikawa, Itsuya Muta, Taketsune Nakamura, “Proposal of saturated DC reactor type superconducting fault current limiter(SFCL)”, Cryogenics, Vol. 41, No. 7, p. 469, Jul., 2001.

- [10] 김태중, 강형구, 고태국, “유도형 고온초전도 한류기용 prototype 직류 리액터의 설계와 제작”, 전기전자재료학회논문지, 16권, 12S호, p. 1292, 2003.
- [11] M. Yamaguchi, S. Fukui, T. Satoh, Y. Kaburaki, T. Horikawa, T. Honjo, “Performance of DC reactor type fault current limiter using high temperature superconducting coil”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 9, No. 2, p. 940, Jun., 1999.
- [12] 최효상, 황시돌, 현옥배, “1선 지락사고에 대한 배전급 저항형 초전도 한류기의 전류제한특성”, 전기전자재료학회논문지, 14권 6호, p. 505, 2001.
- [13] Sung-Hun Lim, Hyeoung-Gon Kang, Hyo-Sang Choi, Seoung-Ryoung Lee, Byoung-sung Han, “Current limiting characteristics of flux-lock type High-T<sub>c</sub> superconducting fault current limiter with control circuit for magnetic field”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 13, No. 2, p. 2056, 2003.
- [14] 박형민, 임성훈, 박충렬, 최효상, 한병성, “자속구속형과 저항형 초전도 전류제한기의 특성비교”, 전기전자재료학회논문지. 18권 4호 p. 363, 2005.
- [15] X. Grandos, T. Puig, J. Teva, E. Mendoza and X. Obradors, “Quench behavior of the switching elements of a hybrid HTS current limiter”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 11, No. 1, p. 2406, Mar., 2001.
- [16] Yu Jiang, Shi Dongyuan, Duan Xianzhong, Tang Yuejin, and Cheng Shijie, “Comparison of superconducting fault current limiter in power system”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, No. 1, p. 43, 2001.
- [17] 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, No. 1-4, p. 27, 2001.
- [18] 임성훈, “자속구속형 고온초전도 전류제한기의 설계 및 특성해석”, 전북대학교 대학원, 2003.



- [19] 최효상, “10kVA급 자속구속형 사고전류제한기 및 계통적용기술 개발 보고서”, 산업자원부, Vol. 1, p. 001, 2005.
- [20] 현옥배, 황시돌, 김혜림, 최효상, “초전도 사고전류 제한기술개발 보고서”, 한국전력공사 전력연구원(KEPRI), Vol. 1, p. 001, 2002.