

2

2007年度 2月

0

碩士學位論文

0

7

年

2

月

碩

士

學

位

論

文

자

속

결

합

형

초

전

도

한

류

기

의

인

덕

턴

스

에

따

른

특

성

해

석

南

肯

賢

자속결합형 초전도 한류기의 인덕턴스에 따른 특성해석

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

南肯賢

자속결합형 초전도 한류기의 인덕턴스에 따른 특성해석

Analysis on the Inductance Characteristics of
Flux-Coupling Type Superconducting Fault Current Limiter

2007年 2月 日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

南肯賢

자속결합형 초전도 한류기의 인덕턴스에 따른 특성해석

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

南 肯 賢

南肯賢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. 구조 및 동작원리	
A. 초전도 한류기	3
B. 구조 및 동작원리	4
1. 자속결합형 초전도 한류기의 동작특성	4
2. 결선방향에 따른 전압·전류특성	7
3. 자속구속형 초전도 한류기의 동작특성	10
III. 설계 및 제작	
A. 초전도 소자 제작 및 임계특성	12
1. 소자패턴 제작	12
2. 초전도소자 임계특성	14
B. 리액터 설계 및 제작	17
C. 초전도 소자 홀더 설계 및 제작	19
D. 실험 장치의 구성	21
1. 사고발생용 전원 시스템	21
2. 사고발생용 위상 제어 시스템	23

3. 사고발생용 스위치 및 드라이버 시스템 24

IV. 실험결과 및 분석

A. 단위 전류제한소자의 동작특성분석 26

B. 자속결합형 한류기의 초기사고전류 동작특성 분석 27

C. 자속결합형 한류기의 결선방향에 따른 동작특성 30

D. 전압증가에 따른 동작특성 분석 33

E. 자속결합형과 자속구속형 한류기의 특성비교 분석 33

F. 인덕턴스 변화에 따른 동작특성 40

 1. 1차측 인덕턴스 변화에 따른 동작특성 40

 2. 2차측 인덕턴스변화에 따른 동작특성 42

V. 결 론 49

참고문헌

List of table

Table 1. Specification of a YBCO thin film	13
Table 2. The designed parameters for the transformer of a SFCL	18
Table 3. The designed parameter of power system	22
Table 4. The experimental parameters	26

List of figures

Fig. 1. Equivalent circuit of resistive type SFCL	3
Fig. 2. Scheme of a flux-coupling type superconducting fault current limiter	4
Fig. 3. Equivalent circuit of a flux-coupling type SFCL	5
Fig. 4. Voltage polarity and direction of current flow in case of additive polarity winding	7
Fig. 5. Voltage polarity and direction of current flow in case of subtractive polarity winding	6
Fig. 6. The current and inductance curve according to the winding direction	9
Fig. 7. Equivalent circuit of flux-lock type SFCL	11
Fig. 8. Voltage polarity and direction of current flow	11
Fig. 9. The pattern shape of a YBCO thin film	12
Fig. 10. The designed glass mask and YBCO thin film	13
Fig. 11. The critical surface of a superconductor	14
Fig. 12. The phase diagram of a superconductor	15
Fig. 13. The resistance-temperature curve of a superconductor	16
Fig. 14. A designed reactor for the transformer of a SFCL	17
Fig. 15. The self-inductances according to turn numbers	18
Fig. 16. The fixing holder for the YBCO thin films	19
Fig. 17. The contact pole for the mechanical connection	20
Fig. 18. The power system for various fault simulation	21
Fig. 19. The controller of power system	22
Fig. 20. The phase controller for various fault simulation	23
Fig. 21. The switch panel for various fault simulation	24

Fig. 22. The experimental circuit for various fault simulation	25
Fig. 23. The experimental system for the SFCL	25
Fig. 24. The current and voltage curves of a resistive type SFCL	26
Fig. 25. The experimental circuit of a flux-coupling type SFCL	27
Fig. 26. The current and voltage curves of a flux-coupling type SFCL according to additive polarity winding ($N_1:N_2=63:21$)	29
Fig. 27. The current and voltage curves of a flux-coupling type SFCL according to subtractive polarity winding ($N_1:N_2=63:21$)	29
Fig. 28. Current limiting characteristics of a flux-coupling type SFCL in case of additive polarity winding ($N_1:N_2=63:21$)	31
Fig. 29. Current limiting characteristics of a flux-coupling type SFCL in case of subtractive polarity winding ($N_1:N_2=63:21$)	32
Fig. 30. The current curves in case of additive polarity winding ($N_1:N_2=63:21$)	34
Fig. 31. The voltage curves in case of additive polarity winding ($N_1:N_2=63:21$)	34
Fig. 32. The current curves in case of subtractive polarity winding ($N_1:N_2=63:21$)	35
Fig. 33. The voltage curves in case of subtractive polarity winding ($N_1:N_2=63:21$)	35
Fig. 34. The resistance curves in case of winding directions ($N_1:N_2=63:21$) ...	36
Fig. 35. The resistance comparison according to winding directions ($N_1:N_2=63:21$)	38
Fig. 36. The voltage comparison according to winding directions ($N_1:N_2=63:21$)	38
Fig. 37. The line current comparison according to winding directions	

($N_1:N_2=63:21$)	39
Fig. 38. The variation of current curves according to turn ratios of coil 1	41
Fig. 39. The variation of voltage curves according to turn ratios of coil 1	41
Fig. 40. The variation of current curves according to turn ratios of coil 2	44
Fig. 41. The variation of voltage curves according to turn ratios of coil 2	44
Fig. 42. The variation of resistance curves according to turn ratios	45
Fig. 43. Variation of peak line currents according to turn ratios	45
Fig. 44. Measured curves of flux-coupling type SFCL	
in case of additive polarity winding	47
Fig. 45. Measured curves of a flux-lock type SFCL	
in case of additive polarity winding	47
Fig. 46. Measured curves of a flux-coupling type SFCL	
in case of subtractive polarity winding	48
Fig. 47. Measured curves of a flux-lock type SFCL	
in case of subtractive polarity winding	48

ABSTRACT

Analysis on the Inductance Characteristics of Flux-Coupling Type Superconducting Fault Current Limiter

Nam, Geung-Hyun

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

Department of Electrical Engineering,

Graduate School of Chosun University

We investigated a flux-coupling type superconducting fault current limiter (SFCL) using coils and analyzed its operating characteristics. The SFCL consisted of the primary and secondary coils, which were wound in series each other through an iron core. The superconducting unit, which was based on the YBCO thin films, was connected with secondary coil in parallel. The operation of the flux-coupling type SFCL can be divided into the subtractive and the additive polarity windings according to the winding directions between the primary and secondary coils. The short-circuit currents were effectively limited by adjusting the numbers of winding turns of each secondary coil and the winding directions of the coils. The flux generated from a coil in normal operation is cancelled out by its structure and the zero resistance of the superconducting unit. In this paper, in order to compare the influence by turn numbers between coils, the turn number of the secondary coil was varied from 42 to 84 while the turn number of the primary coil was 42, 63 and 84. We

confirmed that the flux-coupling type SFCL was significantly efficient to reduce initial line current after fault instant. The quench time of the flux-coupling type SFCL in the additive polarity winding was also quicker than that of the subtractive polarity winding. The fault current of the flux-coupling 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. In addition, the voltage generated in the superconducting unit was also lowered by reducing power burden of the YBCO thin film in the flux-coupling type SFCL. The structure of the flux-coupling type SFCL is similar to the flux-lock type SFCL but their operational characteristics are slightly different.

Each of magnetically coupled coils makes a difference according to the direction wound on an iron core. In addition, the flux-coupling type SFCL has more flexibility than that of the flux-lock type SFCL by adjusting the inductance between the primary and secondary coils. So, the operational characteristics of the flux-coupling type SFCL were investigated and compared to the flux-lock type SFCL. We confirmed that the flux-coupling type SFCL was significantly efficient to reduce initial line current than that of flux-lock type SFCL after fault instant. The flux-coupling type SFCL has more flexibility and reliability for the inductance variation than the flux-lock type SFCL in case of additive polarity winding. Therefore, it gives the application flexibility for power system when the flux-coupling type SFCL is adopted. In conclusion, the current limiting behavior of our flux-coupling type SFCL was more effective for fault current limiting operation.

I. 서 론

현 전력계통은 지속적인 전력수요증가로 인한 설비증설로 전력계통의 용량이 크게 늘어났으나, 이에 따른 계통내 등가임피던스는 감소하여 사고발생시 기존 차단기의 차단용량을 초과하게 되는 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 사고전류가 급증할 경우 계통내의 보호기기에 전기적·기계적 충격을 주어 경제적 손실과 전력공급의 신뢰성을 저하시키고 있다[1,2].

이에 대한 현 대안으로써 고 임피던스기기, 모선분리, 차단기 교체, 전력퓨즈, 직렬 리액터 사용 등의 방안이 모색되고 있다. 그러나 이러한 방법들은 계통에 효율성 저하를 야기하며, 안정성과 유연성, 신뢰성 등의 문제를 수반하고 있으나 불가피하게 사용되어지고 있다. 이러한 제반부작용을 해결하기 위해 국내·외에서 초전도 한류기에 대한 연구가 실용화를 목표로 진행 중에 있다.

초전도 상태에서 영저항 특성을 갖는 초전도체는 임계값 이상의 외부조건이 인가될 경우 퀘칭 현상이 발생하여 급격하게 임피던스가 증가한다. 이러한 초전도체가 가지고 있는 원리를 이용하여 전력계통에서 발생하는 사고전류를 신속하게 제한한다. 부가적인 제어장치나 감지장치가 불필요한 초전도 한류기는 다양한 형태의 종류가 개발 중에 있다. 미래사업적인 관점에서 필수적으로 요구되는 전력계통의 안정적 운용을 위하여 보호기기에 수반되는 문제요건들을 토대로 적용가능성 있는 합리적인 방안의 모색이 중요하다.

고온 초전도 한류기에 대한 연구는 저항형과 유도형, 브리지형 등으로 분류할 수 있다. 많은 고온 초전도 한류기 중에서 저항형은 한류작용이 저항에 의해서 이루어지며, 위상차에 의한 파형변화가 없으므로 선로에 영향력이 적다[2-5]. 저항형 중 박막형을 이용한 단위 한류소자는 원리 및 구조가 간단하여 소형화가 가능하고 국내 설치 공간에 따른 제약을 해결할 수 있으나, 제조공정상 불균일한 특성으로 각각의 퀘칭특성에서 균일하지 못하여 운용시 사고전류의 직접적인 도통으로 인한 파손의 위험과 환경변화에 의한 소자의 추가적인 조정이 불가피한 단점이 있다. 또한 박막형 한류소자는 허용 전압과 전류가 한정되어 있어 전력계통내에 적용하기 위해서는 다수개의 한류소자를 연결하여 사용해야 한다[6-8].

자속결합형 한류기는 결선방향과 인덕턴스 조절 등의 설계구조적인 장점으로 인

해 사고발생시 과도전류가 분담되어 한류소자의 부담이 적어짐에 따라, 기존의 저항형 한류기보다 사고시 동작특성이 보다 용이하였다. 또한 철심에 감겨진 리액터의 인덕턴스를 조정하여 과도전류 크기를 조절할 수 있으며, 정상조건하에서는 발생자속의 상쇄에 의해 철손손실이 거의 적다. 이는 기존의 저항형 한류기가 갖는 수동적인 운전특성을 탈피함으로써, 설치조건에 요구사항에 따라 탄력적인 운용이 가능하기 때문에 활용도측면에서 보다 효율적이라 할 수 있다. 또한 자속구속형 한류기의 동작원리와 달리 사고 후 양분되는 전압의 크기가 줄어들어 전력계통의 운용에서 절연측면에서 보다 안정적이라고 할 수 있다[9-13].

자속결합형 한류기의 동작요인이 설계구조에 의해 동작특성이 달라지기 때문에 요구되는 설계사항에 대한 성능평가를 위한 설계파라미터 분석은 필수적이다. 본 연구에서는 자속결합형 한류기의 자속증감에 따른 동작요인에 대한 비교·분석을 통해 결선방향에 따른 전류제한특성을 파악하였다. 이는 기존의 강자성체 철심을 자속매개체에 의해 동작되는 자속구속형 한류기의 기본동작원리와 차별화를 구분 지을 수 있도록 자속결합형 초전도 한류기에 대한 운용특성을 비교·분석하여 동작 원리를 이해할 수 있도록 하였다.

II. 구조 및 동작원리

A. 초전도 한류기

기본 저항형 초전도 한류기에 대한 회로도 는 Fig. 1과 같이 구성된다. V_0 는 전원 전압, R_0 는 회로에 흐르는 전류를 측정하기 위한 표준저항, R_L 은 부하저항을 나타낸다. SW_1 은 전원전압을 인가하기 위한 전원스위치이며, SW_2 는 사고를 발생시키기 위한 스위치이다. 사고를 모의하기 위해서 SW_1 을 닫은 후 SW_2 를 이용하여 과도 전류를 발생킨다. 초전도소자를 이용하여 한류기를 설계·제작하기 위해서는 단위소자에 대한 기초 퀘치특성을 파악하는 것이 중요하다.

초전도 상태에서 사고발생시 사고전류가 초전도소자인 YBCO박막의 임계전류를 초과하였을 때 퀘치가 발생하여 상전도 상태로 전이를 일으킨다. 초전도 현상 중 하나인 영저항 특성에 의해 초전도 상태일 때는 저항이 0 Ω 이었다가 퀘치를 일으켜서 상전도 상태로 전이가 일어나면 저항이 급격히 발생하게 된다. 사고가 발생하여 초전도소자의 임계전류를 넘는 전류가 흘렀을 때 소자에 저항이 발생하여 사고 전류를 제한하는 동작원리이다[14-17].

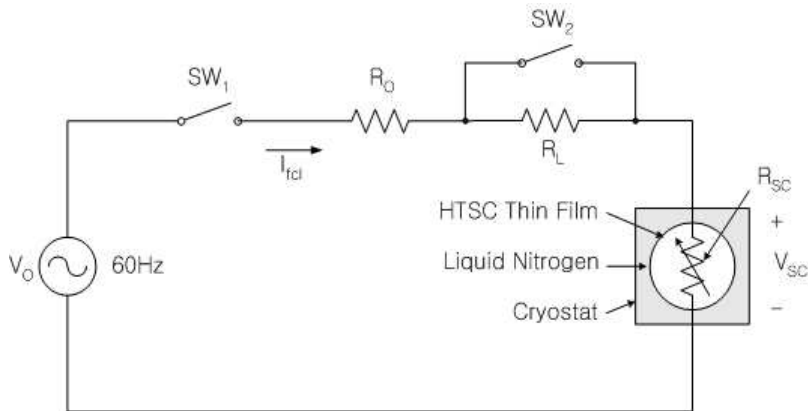


Fig. 1. Equivalent circuit of a resistive type SFCL

B. 구조 및 동작원리

1. 자속결합형 초전도 한류기의 동작특성

자속결합형 초전도 한류기의 구조는 fig. 2와 같이 강자성체 철심에 코일 1과 코일 2가 각각 N_1 , N_2 번 권선되어 선로에 직렬 연결되어 있다. 한류소자(YBCO박막)는 임계온도 특성을 고려해 액체질소가 담겨진 cryostat 내부에 존재하며 2차측 코일에 병렬 연결되어 있다. 자속결합형 초전도 한류기의 동작특성은 직렬로 연결된 1차측 코일과 2차측 코일의 결선 방향에 따라 가극과 감극으로 구분된다.

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

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

1차측 코일과 2차측 코일에 유도되는 전압을 V_1 과 V_2 라 하면 각 코일의 전압은 식(1)과 (2)와 같이 표현되며, 전체전압은 식(3)과 같이 표현된다.

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

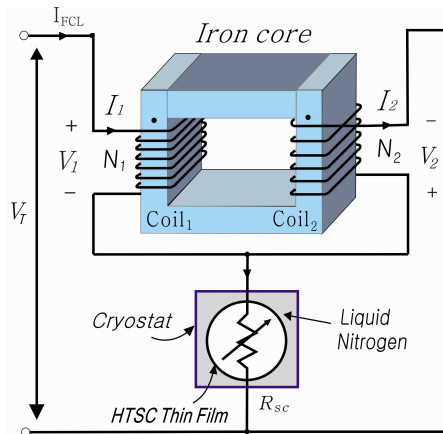


Fig. 2. Scheme of a flux-coupling type superconducting fault current limiter

자속결합형 한류기의 동작 원리는 정상상태에는 고온초전도소자의 양단전압이 0이므로, 1차측 코일과 2차측 코일에서 발생하는 전압이 없기 때문에 식(3)에서 $N_1 \pm N_2 \neq 0$ 이라면 $d\phi/dt = 0$ 은 항상 성립된다. 따라서 정상동작하에서는 각각의 코일에서는 전압이 유기되지 않고 항상 0V라는 것을 알 수 있다.

그러나 사고가 발생하여 임계전류를 초과하는 사고전류가 초전도 한류소자로 통전되면 초전도소자는 켄치되어 소자저항이 급격히 상승하게 된다. 발생한 이 소자저항으로 인해 1차측 코일과 2차측 코일의 쇄교자속은 시간적인 변화가 생겨 이로 인해 코일 양단에 전압이 유기되고, 따라서 사고전류는 급격히 제한된다.

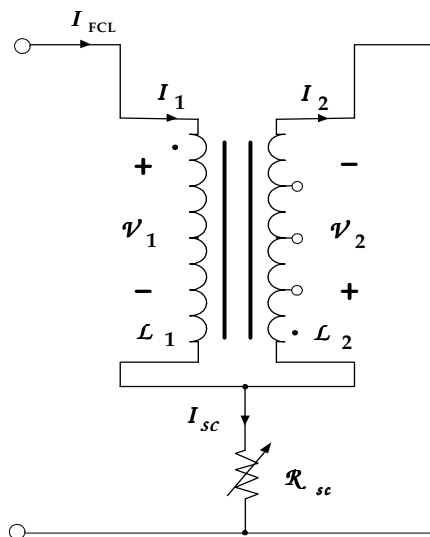


Fig. 3. Equivalent circuit of a flux-coupling type SFCL

Fig. 3의 자속결합형 고온초전도 한류기의 가극 결선된 등가회로도를 유도할 수 있다. L_1 과 L_2 는 두 코일 사이의 자기인덕턴스이며, M_{12} 는 두 코일간 유도되는 상호인덕턴스이다. 각 코일간의 누설자속이 없다는 가정하에서 코일의 저항크기는 무시하였다.

Fig. 3의 등가회로(가극 결선의 경우)부터 식 (4)에서 식 (6)과 같은 관계식을 얻을 수 있다. 한류소자(R_{sc})와 2차측으로 흐르는 전류는 I_2 , 초전도소자로 흐르는 전류는 I_{sc} 이며, 전체사고전류는 $I_{FCL}(=I_1)$ 이다.

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

$$V_1 = j\omega L_1 \cdot I_1 + j\omega M_{12} \cdot I_2 \quad (5)$$

$$V_2 = j\omega M_{12} \cdot I_1 + j\omega L_2 \cdot I_2 = R_{sc} \cdot I_{sc} \quad (6)$$

이 식들로부터 한류기의 임피던스와 전류에 관한 식을 전개할 수 있다.

$$I_{sc} = \frac{j\omega L_2 + j\omega M_{12}}{R_{sc} + j\omega L_2} \cdot I_1 \quad (7)$$

$$Z_T = \frac{j\omega R_{sc}(L_1 + L_2) + j2\omega M_{12}R_{sc}}{R_{sc} + j\omega L_2} \quad (8)$$

이러한 식으로부터 자속결합형 초전도 한류기의 사고 발생 직후에 고온초전도소자에 흐르는 전류가 임계전류값(I_q)에 도달되었을 때, 초기 제한되는 전류를 I_{ini} 로 정의하고 $R_{sc}=0$, $I_{sc}=I_q$ 을 대입하여 정리하면 식(9)을 유도할 수 있다. 여기서, 상호인덕턴스 $M_{12} = k\sqrt{L_1 L_2}$ 에서 결합계수 $k=1$ 로 가정하였다.

$$\left| 1 \pm \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \right| = \frac{I_q}{I_{ini}} \quad (9)$$

$L = \sqrt{L_1} \pm \sqrt{L_2}$ 이고 + 또는 - 부호는 1, 2차 코일에 의한 자속의 증감에 따라 결정된다. 식(9)에서 나타나는 바와 같이 초기 제한되는 선로전류 크기를 코일 1과 코일 2의 인덕턴스 값을 조절함으로써 동작원리를 설정할 수 있음을 확인하였다.

2. 결선방향에 따른 전압·전류특성

Fig. 4는 가극결선시 전압극성 및 전류흐름 방향을 나타낸 것이며, 변압기 동작에 의해 코일 1과 2에 흐르는 전류가 180°위상차가 발생하며, 회로로부터 사고시 식(10)과 (11)에서와 같은 전압·전류관계를 얻을 수 있다.

$$I_{FCL}(I_1) = -I_2' + I_{SC} \quad (10)$$

$$V_T = V_1 + V_2 (= V_{SC}) \quad (11)$$

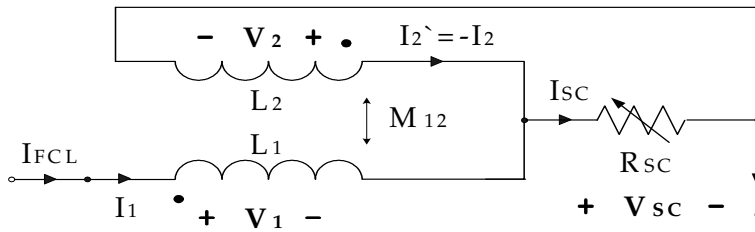


Fig. 4. Voltage polarity and direction of current flow in case of additive polarity winding

Fig. 5는 감극 결선된 전압극성 및 전류흐름 방향을 나타내고 있으며, 결선방향과 상관없이 코일1과 2에 흐르는 전류가 180°위상차가 발생하게 된다.

그리고 사고 발생과 동시에 임계전류이상의 전류가 초전도 소자에 통전됨에 따라 초전도 소자의 저항이 증가로 선로상의 상호전류관계에 의해 선로전류를 제한하게 된다.

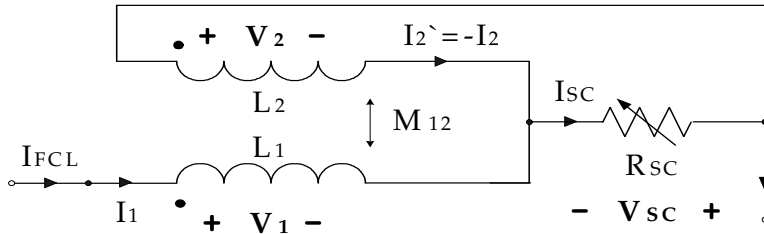


Fig. 5. Voltage polarity and direction of current flow in case of subtractive polarity winding

$$I_{FCL}(I_1) = -I_2' + I_{SC} \quad (12)$$

$$V_T = V_1 - V_2 (= V_{SC}) \quad (13)$$

앞에서 언급한 바와 같이 동작원리는 자속의 증감여부인 감극결선과 가극결선에 따른 운전특성으로 분석할 수 있다. 1차측과 2차측의 권선비에 따른 초전도소자로 흐르는 통전전류 I_{sc} 와 전체전류 관계식인 식(14)과 전체 전압인 식(15)으로 아래와 같이 나타낼 수 있다. 또한 결선방향에 따라 코일 2차측의 전류방향에 영향력이 없으며, I_2 가 실질적으로 음의 부호인 $I_2 = -I_2'$ 이므로 실제계산식에서는 아래와 같은 식을 유도할 수 있다.

$$I_{SC} = \left[1 + \frac{N_1}{N_2} \right] \cdot I_1 \quad (14)$$

$$V_T = \left[1 \pm \frac{N_1}{N_2} \right] \cdot V_1 \quad (15)$$

식(9)에서 나타나는 바와 같이 fig. 6에서 코일 1과 2의 인덕턴스비에 따른 초기 사고전류와 초전도 소자의 임계전류비인 I_q/I_{ini} 과 L_1/L_2 에 대한 상호관계를 나타내었다. 가극결선인 경우에는 1차측 코일에 비해 2차측 코일의 턴수가 감소할수록 초기 제한되는 전류크기가 상대적으로 감소함에 따라 동작특성이 양호해지는 것을 알 수 있다. 감극결선은 가극결선과는 달리 동작됨을 나타내는데, 이는 자속결합형 초전도 한류기의 1차, 2차 코일에 결선방향에 따라 사고시 철심코어에서 발생하는 쇄교자속이 증감여부로 이러한 차이가 발생함을 알 수 있다.

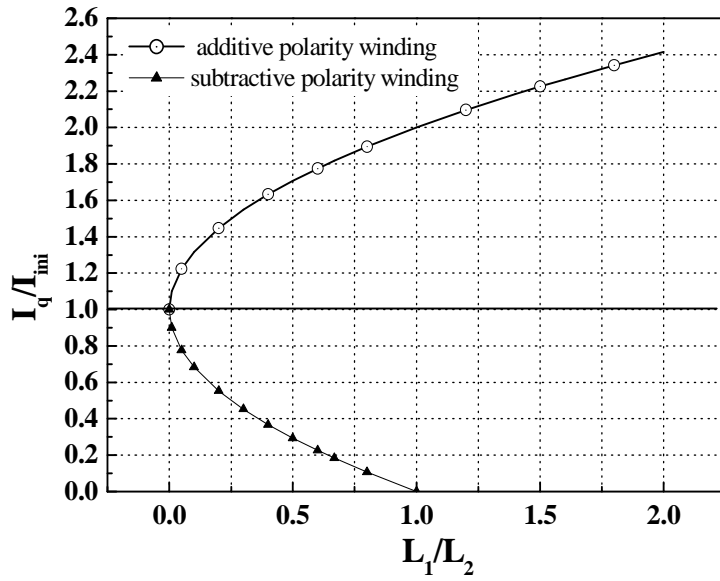


Fig. 6. The current and inductance curve according to the winding directions

3. 자속구속형 초전도 한류기의 동작특성

자속결합형 초전도 한류기와 유사한 구조이나, 강자성체철심에 코일 1과 한류소자와 직렬 결선된 코일 2가 각각 N_1 , N_2 번 권선되어 선로에 병렬 연결되어 있다. 또한 동작특성은 병렬 연결된 코일의 결선 방향에 따라 가극과 감극으로 구분된다.

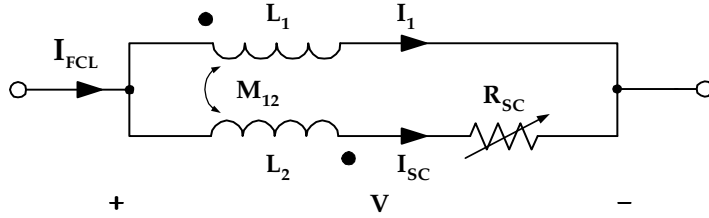


Fig. 7. Equivalent circuit of a flux-lock type SFCL

Fig. 7의 가극 결선된 등가회로도 아래와 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$I_{FCL} = I_1 + I_{SC} \quad (16)$$

$$j\omega L_1 I_1 + j\omega M_{12} I_{SC} = V \quad (17)$$

$$j\omega M_{12} I_1 + (j\omega L_2 + R_{SC}) I_{SC} = V \quad (18)$$

이 식들로부터 자속결합형 한류기와 동일한 방식으로 전체임피던스와 초기제한 전류 I_{ini} 식을 전개할 수 있다. + 또는 - 부호는 1, 2차 코일에 의한 자속의 증감에 따라 결정하며 $L = \sqrt{L_1} \pm \sqrt{L_2}$ 이다.

$$Z_{FCL} = \frac{j\omega R_{SC} L_1}{j\omega L^2 + R_{SC}} \quad (19)$$

$$I_{ini} = \left(1 \pm \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \right) I_q = \frac{L}{\sqrt{L_1}} I_q \quad (20)$$

Fig. 8(a)은 가극 결선시 전압극성 및 전류흐름 방향을 나타내고 있으며 코일 1과 2에 흐르는 전류는 180°위상차가 발생하며, 이로부터 식 (21)과 식 (22)의 관계를 얻을 수 있다. 변압기 동작에 의해 코일 1과 2에 흐르는 전류는 동상의 전류가 흐르게 되며 사고발생과 동시에 고온초전도소자의 저항이 증가함에 따라 코일 2에 흐르는 전류가 감소하게 되면 코일 1의 전류도 감소하게 되어 선로전류를 제한하게 된다.

$$I_{FCL} = -I_1' + I_{SC} \quad (21)$$

$$V_1 = V_2 + V_{SC} \quad (22)$$

Fig. 8(b)은 감극 결선시 전압극성 및 전류흐름 방향을 나타낸 것이며 회로로부터 사고시 식(23)와 (24)에서 전압 · 전류관계를 얻을 수 있다.

$$I_{FCL} = I_1 + I_{SC} \quad (23)$$

$$V_1 = V_{SC} - V_2 \quad (24)$$

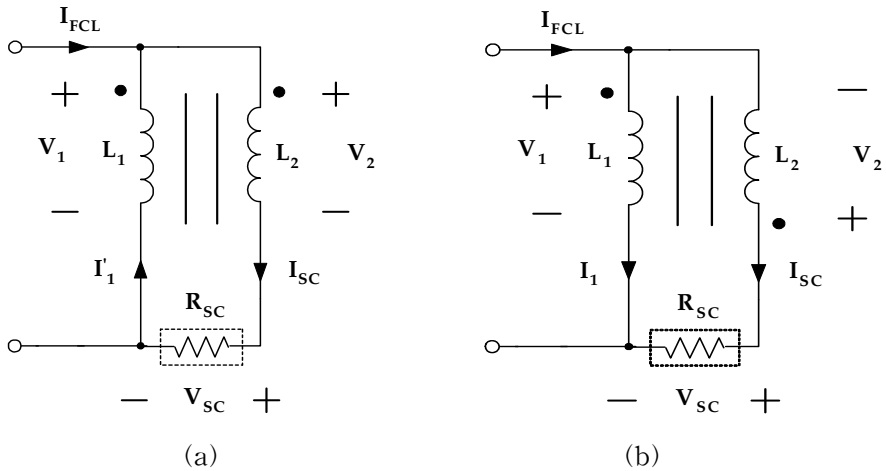


Fig. 8. Voltage polarity and direction of current flow

(a) Additive polarity winding (b) Subtractive polarity winding

Ⅲ. 설계 및 제작

A. 초전도소자 제작 및 임계특성

1. 소자패턴제작

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. Fig. 9는 YBCO박막의 식각된 모양을 보여주고 있으며, 상세사양을 table 1에 나타내고 있다.

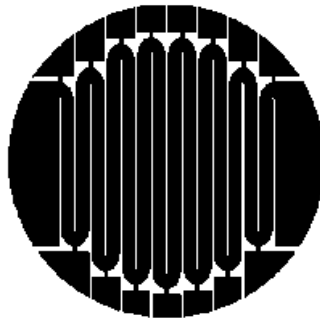
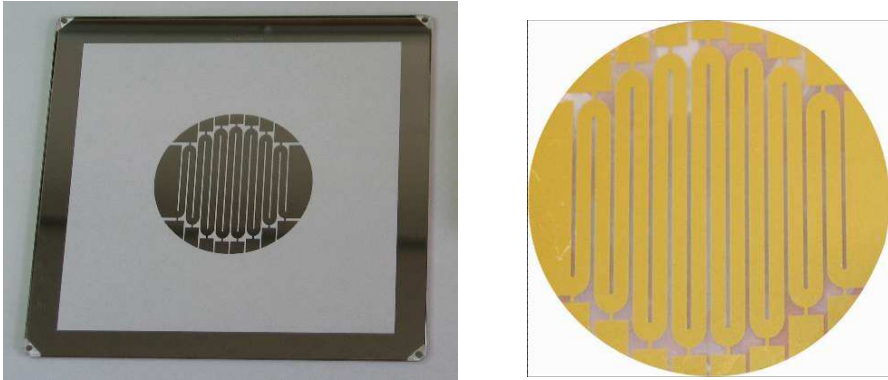


Fig. 9. The pattern shape of a YBCO thin film



(a) Glass mask

(b) YBCO thin film

Fig. 10. The designed glass mask and YBCO thin film

Fig. 9와 같이 설계된 패턴을 바탕으로 하여 패턴을 meander type으로 fig. 10(a)과 같이 유리마스크를 제작하여 fig. 10(b)과 같이 YBCO박막을 제작하였다.

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	μm
금층 두께	0.1~0.2	μm
임계전류	18	A
임계온도	87	K

2. 초전도 소자 임계특성

초전도체의 퀘치는 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하여 발생한다. 초전도 현상을 유지하기 위해서는 fig. 11에서 제시하는 값인 전류, 자장, 온도가 이 임계 곡면의 내부에 존재해야 한다.

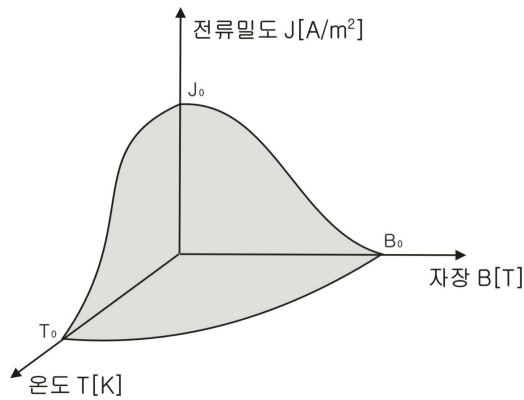


Fig. 11. The critical surface of a superconductor

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. 12와 같이 전류와 온도에 의한 임계특성으로 다시 나타낼 수 있다.

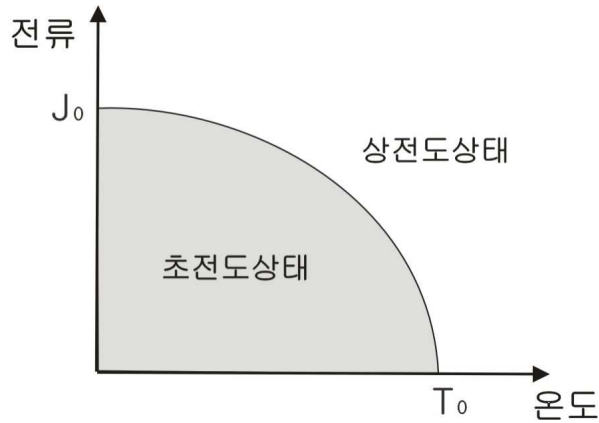


Fig. 12. The phase diagram of a superconductor

Fig. 12을 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)과 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. 12의 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 B_0 가 더욱 감소하게 되고, 임계전류 밀도가 적어져 적은 선로전류에도 퀘치가 일어날 수 있다는 의미가 될 것이다.

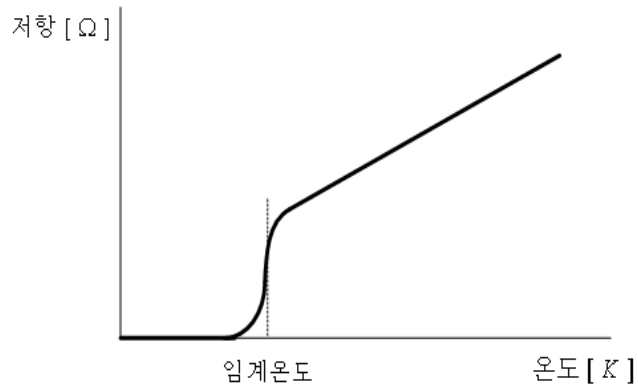


Fig. 13. The resistance-temperature curve of a superconductor

이처럼 초전도체가 퀘칭된 후 저항이 급격히 증가하면 더 많은 열이 발생하는데, 초전도체에 입혀진 금박막의 비저항이 상전도 상태일 때 초전도체의 비저항보다 훨씬 작기 때문에(약 1%) 퀘칭이 발생한 초전도체에서는 전류가 초전도체를 우회하여 금박막으로 흐르게 되고 금박막에서 열이 발생하게 된다. Fig. 13에서 이러한 초전도 소자의 열적작용에 대한 특성을 나타내고 있다. 이렇게 발생된 열은 초전도체의 온도를 증가시키게 되고 이 과정이 다시 반복되어 퀘칭이 진행된다. 다시 말하면 퀘칭의 진행은 저항에 의한 열의 발생과 발생된 열의 움직임에 의해 크게 영향을 받게 된다.

B. 변압기 설계 및 제작

본 논문에서 제시하는 자속결합형 초전도 한류기의 구성 요소인 변압기는 하나의 철심코어와 두개의 1·2차측 권선으로 구성된다. 사고 전에 두 코일에서 발생하는 자속간의 결합을 최대화하여 상쇄가 일어나도록 하기위해 Fig. 13과 같이 적층된 구조로 두 개의 코일을 결선하였으며 동작원리에 따라 1차측과 2차측 코일의 권선수에 따라 설계하였다. 또한, 1·2차측 코일은 중간에 탭을 내어 권선수를 다양하게 변화시킬 수 있도록 하였다. Table 2는 변압기의 구성요소인 철심과 코일 1, 2의 설계사양을 나타낸 것이며, fig. 14는 제작한 변압기의 외형을 보여준다.

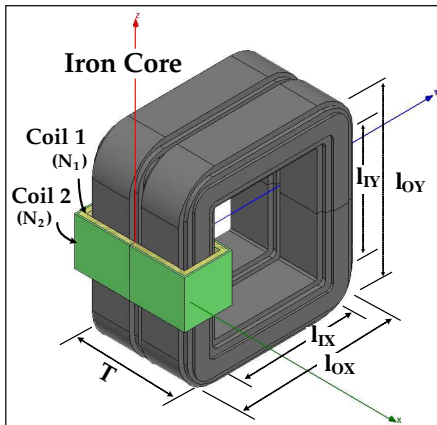


Fig. 14. A designed reactor for the transformer of a SFCL

Fig. 15에서 나타나는 바와 같이 권선수의 변화에 따라 측정된 자기인덕턴스의 변화를 보여주며 권선수가 증가함에 따라 코일의 자기인덕턴스는 권선수의 제곱에 비례하여 증가함을 볼 수 있다. 이는, 철심의 자기저항(R)이 일정할 경우 즉, 철심의 단면적과 가로길이가 고정되었다고 하면 식 (29)에서와 같이 자기인덕턴스와 턴수의 관계에서 확인할 수 있다.

$$L \propto N^2 / R \quad (29)$$

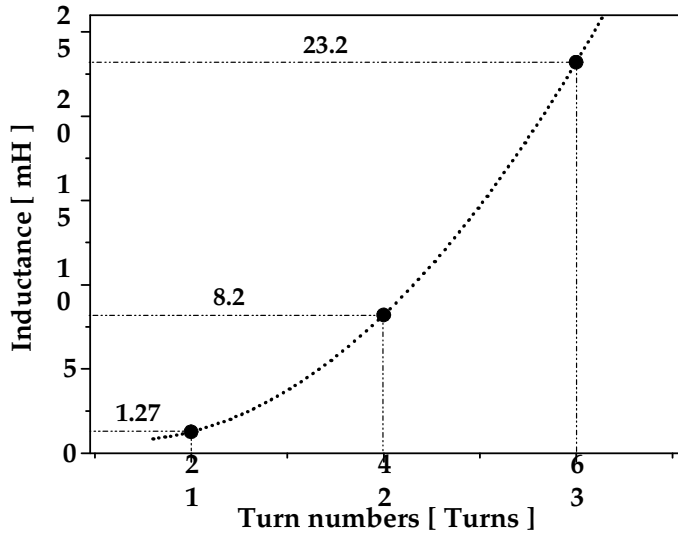


Fig. 15. The self-inductances according to turn numbers

사고전의 변압기 내부의 자속은 각 코일에서 발생하는 자속은 서로 상쇄되지만, 사고가 발생하여 고온 초전도 소자의 저항이 발생하면 상쇄되지 않고 철심 내부에 자속이 발생하게 된다.

Table 2. The designed parameters for the transformer of 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)	18.1(42)	mH
	48.4(63)	(Turns)
코일 2의 자기인덕턴스 (턴수)	2.93 (21)	mH
	18.1 (42)	(Turns)
	48.4 (63)	
	93.8 (84)	
	151.6(105)	

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. Fig. 16는 박막 홀더의 구조를 나타낸 것이다.

홀더는 액체 질소의 극저온에서도 변형되지 않아야하기 때문에 베이클라이트를 이용하여 제작하였다. 그림에서 알 수 있듯이 박막을 고정할 수 있는 부분과 삽입형 전극을 고정하는 부분, 박막이 고정된 부분을 고정할 수 있는 부분으로 나눌 수 있다. 이렇게 고정함으로써 흔들림을 최소화 할 수 있어 안정적인 조립을 할 수 있다. 그리고 진동을 줄이기 위해 조립된 초전도 소자와 삽입형 전극을 고정할 수 있는 박막홀더를 제작하였다. 이 홀더는 직·병렬연결시를 위해 10개까지 고정시킬 수 있도록 설계하였다.

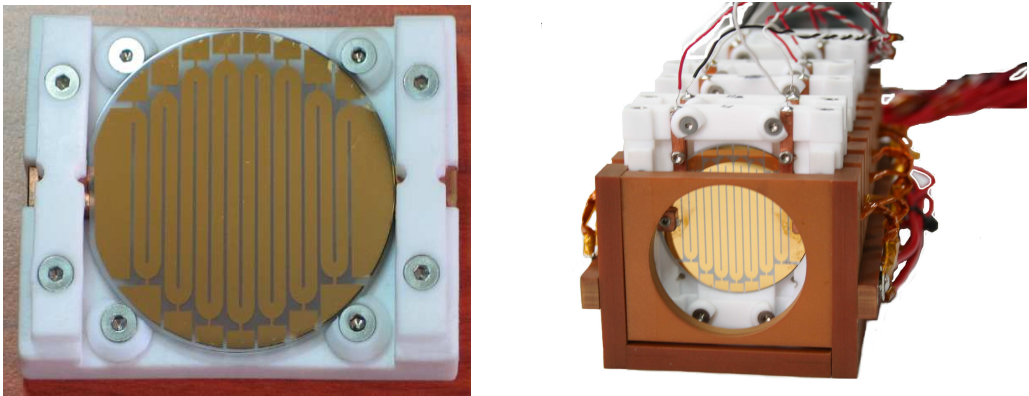


Fig. 16. The fixing holder for the YBCO thin films

D. 실험 장치의 구성

1. 사고발생용 전원 시스템



Fig. 18. The power system for various fault simulation

Fig. 18은 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 조정가능하며, 주 변압기의 출력은 전압조정이 용이하게 하기 위해 마그네틱 컨덕터를 사용하였고 마그네틱 컨덕터의 조절은 전원장치 패널전면에 로터리 스위치를 이용하여 조절할 수 있도록 설계하였다.

각 마그네틱 컨덕터는 운전상태와 유지 및 보수를 편리하게 하기 위해 중판에 부착하여 패널 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 패널전면에 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 조작 방법은 간단하다. 우선 3상 380V를 인 풋 단자에 연결하고 주 차단기를 ON 한 후 패널 전면의 파워 램프를 통해 전원 공급의 여부를 확인한다. 전원 공급이 원활히

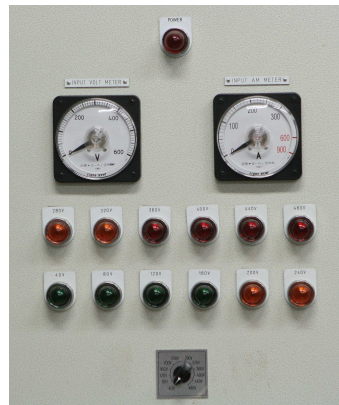
이루어진 것을 확인한 후 판넬전면의 전환 스위치를 이용하여 원하는 전압을 선택한 후 출력 전압계와 전류계를 통해 원하는 값이 출력되는지 확인한다. 이러한 사고발생용 전원장치의 상세 설계사양을 표 3에 나타내었다.

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. 19. The controller of power system

2. 사고발생용 위상제어 시스템



Fig. 20. 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° 에서 180° 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° ~ 180° 까지 1° 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.

3. 사고발생용 스위치 및 드라이버 시스템



Fig. 21. 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. 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, T상을 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. 21은 초전도 한류기의 실험을 위한 사고발생시스템의 실험 회로도이며, fig. 22는 실제 모의실험에 사용된 전력시스템 회로도이며 fig. 23은 실제 실험에 사용된 장치들에 대한 그림이다.

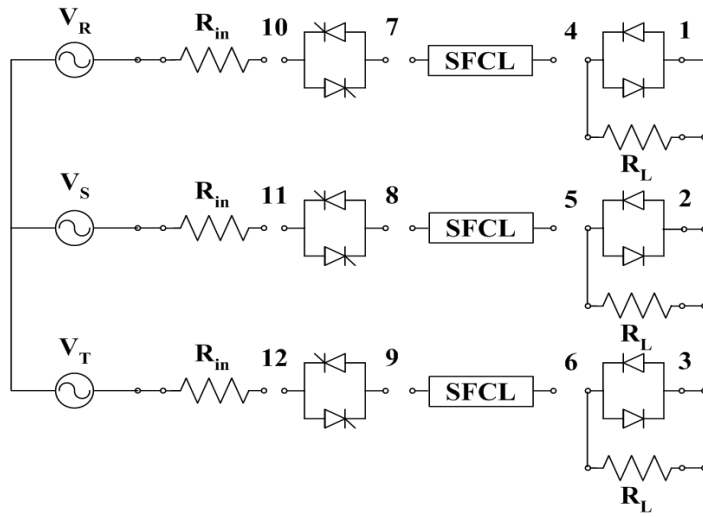


Fig. 22. The experimental circuit for various fault simulation

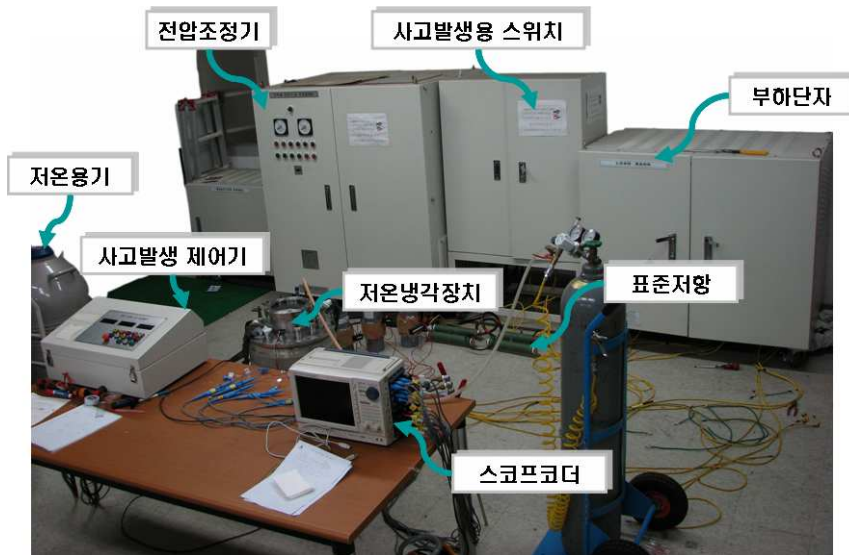


Fig. 23. The experimental system for the SFCL

IV. 실험결과 및 분석

A. 단위 전류제한소자의 동작특성분석

단위 소자의 전류제한 특성을 보기 위해 위의 fig. 1과 같이 회로도를 구성하였다. 회로도를 구성하여 전원을 인가하였을 때 선로에 흐르는 전류는 초전도소자의 임계 전류를 초과하지 않았기 때문에 초전도 상태가 유지되고 소자 양단에는 전압이 유지되지 않는다. 이때 선로에 사고가 발생하면 사고전류가 임계전류를 초과하여 초전도소자는 켄치가 발생하고, 소자의 저항(R_{sc})이 급격히 증가하여 이로 인해 소자에 전압(V_{sc})이 발생하게 된다. 전원전압을 120V를 인가하였을 때, 사고전류제한 특성을 나타내고 있다.

Fig. 24에서 보는 바와 같이 모의 단락사고가 발생하였을 때 선로전류가 빠른 시간내에 제한되는 것을 볼 수가 있다. 사용된 단위소자는 자속결합형 한류기의 소자와 동일한 시편을 사용하였다. 사고 발생한 후의 교류전류에 의한 사고전류가 임계 전류 I_q 인 24.03A인 지점을 통과할 때, 초전도 소자에 전압이 인가됨에 따라 사고 전류가 급격하게 제한됨을 알 수 있었다.

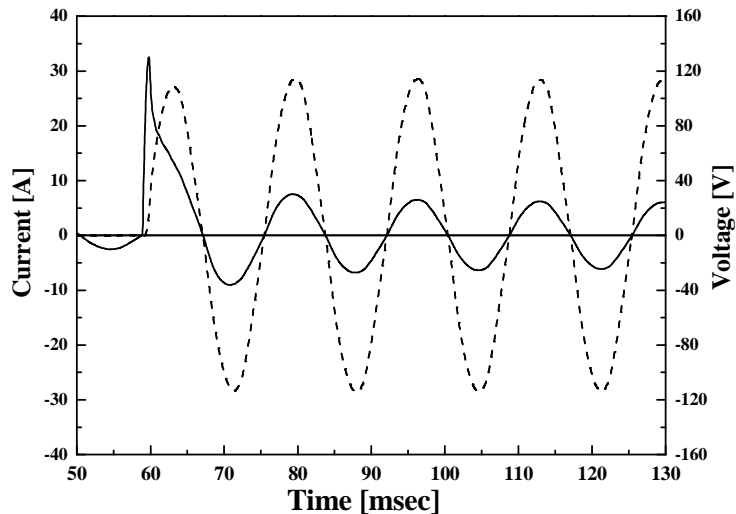


Fig. 24. The current and voltage curves of resistive type SFCL

B. 자속결합형 한류기의 초기사고전류 동작특성 분석

Fig. 25은 자속결합형 초전도 한류기의 실험회로도를 나타낸다. V_S 는 전원전압이며 R_{in} 은 사고시 전원 및 선로측 전체 저항을 모의하기 위한 표준저항 1Ω 이며, R_L 은 부하저항 50Ω 이다. 1차측과 2차측 코일을 가극 결선하여 스위치 SW_1 을 닫아 회로에 전압을 인가하였다. 선로전류의 크기가 초전도 소자의 임계전류를 초과하지 않기 때문에 자속결합형 한류기는 단락선로와 같이 동작된다.

현재 전력계통에서 사용되고 있는 차단기가 5주기 안에 동작하는 것을 감안하여 사고각 0° 에서 사고주기를 5주기로 설정하여 초전도소자가 과도전류에 불필요하게 노출되지 않도록 실험하였다. 단락사고모의를 위해 스위치 SW_2 를 닫아 선로전류를 급격하게 증가되면 한류소자로 흐르는 통전전류가 임계전류를 초과하게 되어 퀘치가 발생하게 된다. 이때 회로에 흐르는 선로전류(I_{FCL})이자 1차측 코일에 흐르는 전류(I_1)와 2차측 코일로 흐르는 전류(I_2), 초전도소자에 흐르는 전류(I_{SC}), 코일 1, 2의 양단전압(V_1, V_2)과 초전도소자 양단전압(V_{SC})을 측정후 특성을 분석하였다. 초전도소자는 meander line형태의 2inch YBCO박막을 사용하였다.

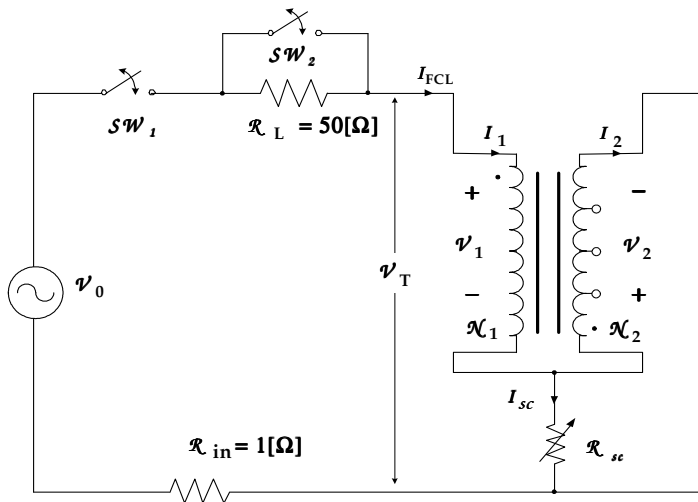


Fig. 25. The experimental circuit of a flux-coupling type SFCL

Fig. 26과 27은 인가전압 120V/60Hz에서 1차측 코일과 2차측 코일의 턴수비가 63턴과 21턴일 때의 결선방향에 따른 반주기동안의 전류, 전압파형을 나타낸 것이다. 결선방향과 관계없이 사고전 1차측 코일과 2차측 코일에 흐르는 전류에서 180° 의 위상차가 발생되고 있으며, 이로 인해 사고발생과 동시에 한류소자로 흐르는 전류가 양의 방향으로 증가됨에 따라 2차측 코일에 흐르는 전류는 음의 방향으로 증가하였다. Fig. 26에서 가극 결선된 자속결합형 한류기의 초기 제한되는 전류의 크기는 5.87A로 식(9)에서 계산한 값인 4.75A에 어느정도 일치함을 확인할 수 있었다. 이러한 초기제한전류 I_{lim} 의 크기에 대한 이론값과 실험값에서 약간의 차이가 나타나는 것은 자속의 누설이 없는 것으로 가정한 이론값과 달리 실제로는 자속리액터에서 어느정도 누설이 존재하기 때문이다.

이미 등가회로 식에서 확인했던 바와 같이 사고 전 코일 1과 코일 2에 흐르는 전류에서 결선방향과 관계없이 180° 의 위상차가 발생되고 있으며, 이로 인해 사고발생과 동시에 2차측 코일과 소자로 흐르는 전류관계에 의해 코일 2의 전류는 음의 방향으로 증가함을 관찰할 수 있었다. 이후 초전도 소자의 저항이 증가함에 따라 선로전류 I_1 에 흐르는 전류는 감소되고 코일 2에 흐르는 전류는 음의 값에서 영점을 향하게 된다. Fig. 26에서 사고발생 후 반주기 동안 제한되는 피크선로전류의 크기는 가극결선인 경우가 8.52A까지 제한되었으며, 같은 조건의 감극결선인 경우는 13.18A로 전류제한 동작특성이 향상되는 것을 알 수 있었다.

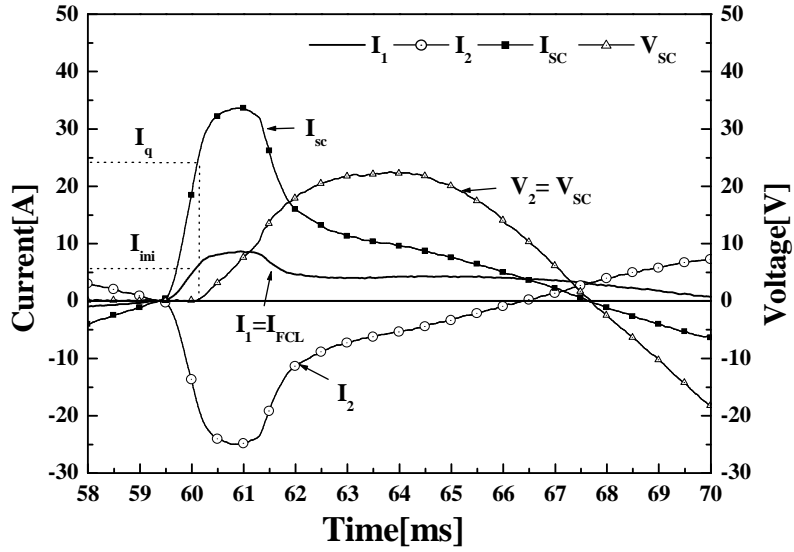


Fig. 26. The current and voltage curves of a flux-coupling type SFCL according to additive polarity winding ($N_1:N_2=63:21$)

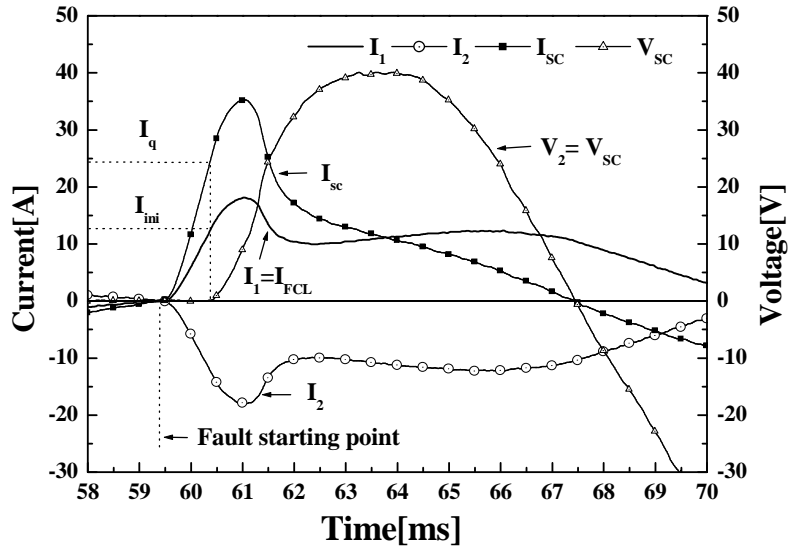


Fig. 27. The current and voltage curves of a flux-coupling type SFCL according to subtractive polarity winding ($N_1:N_2=63:21$)

C. 자속결합형 한류기의 결선방향에 따른 동작특성

Fig. 28은 전원전압 120V에서 철심의 내부자속을 더해지는 방향으로 코일 1과 코일 2의 턴수비를 63턴과 21턴으로 가극 결선한 그림이며, fig. 29는 내부자속을 상쇄시키는 방향인 감극결선 했을 때의 동일한 실험조건하에서의 동작특성을 나타낸다. 사고 직후 초전도 소자의 상전도 저항발생에 의해 소자전류가 제한되는 순간 코일 2와 코일 1의 전류를 포함한 선로전류도 제한되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 28 (a)인 가극결선인 경우의 전류파형을 보면 선로전류 I_{FCL} 은 사고 직후 8.53A까지 제한되었으며, 반주기만에 3.59A까지 감소된다. 또한 코일 2와 소자전류에 흐르는 전류 I_{SC} 의 크기도 반주기만에 거의 정상전류까지 제한되는 것을 확인할 수 있다. 감극결선인 경우에서도 선로전류가 초기 18.1A까지 제한되었다가 반주기만에 9.34A로 감소하였고 5주기 동안에 서서히 감소하여 7.33A까지 감소하는 것을 알 수 있었다. 하지만 감극결선에서는 약간의 철심포화가 나타났음을 fig. 29 (a)의 전류파형에서 확인할 수 있었다. 또한 전류관계에서 가극결선보다 감극결선이 인덕턴스에 의한 위상이 약간 앞서고 뒤지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 28과 29 (b)의 전압파형을 보면 사고발생 직후의 초전도소자에 초기피크압의 크기는 결선방향에 따라 각각 22.93V와 41.02V까지 인가되었다. 이는 소자양단에 인가되는 전압 외에도 소자에서 발생하는 저항 R_{SC} 에서도 가극결선인 경우가 초전도소자의 무리한 부담을 주지 않기 때문에 소자보호차원에서 안정적이라고 생각된다. 또한 1차측 코일에 인가되는 양단전압은 가극결선인 경우 70.02V에 비해 감극결선인 경우에는 125.66V까지 상승하였는데, 이는 전체 전압식 V_T 에 의해 1차측 코일의 양단전압이 감극결선인 경우에는 소자전압 V_{SC} 가 합해지기 때문에 인가되는 전원전압보다 증가하였다. 하지만 자속결합형 한류기의 전류관계식인 식(9)에 의해 코일 1과 코일 2의 인덕턴스 비를 1에 가깝게 설정한 후 감극으로 결선하였을 때 선로전류와 관계없이 코일 1과 코일 2로 구성된 폐루프내에 큰 전류가 순환될 수 있다. 따라서 감극결선인 경우에는 설계·제작시 코일 1과 코일 2의 인덕턴스의 비를 1에 가깝게 설계하지 않는 것이 바람직하리라고 사료된다.

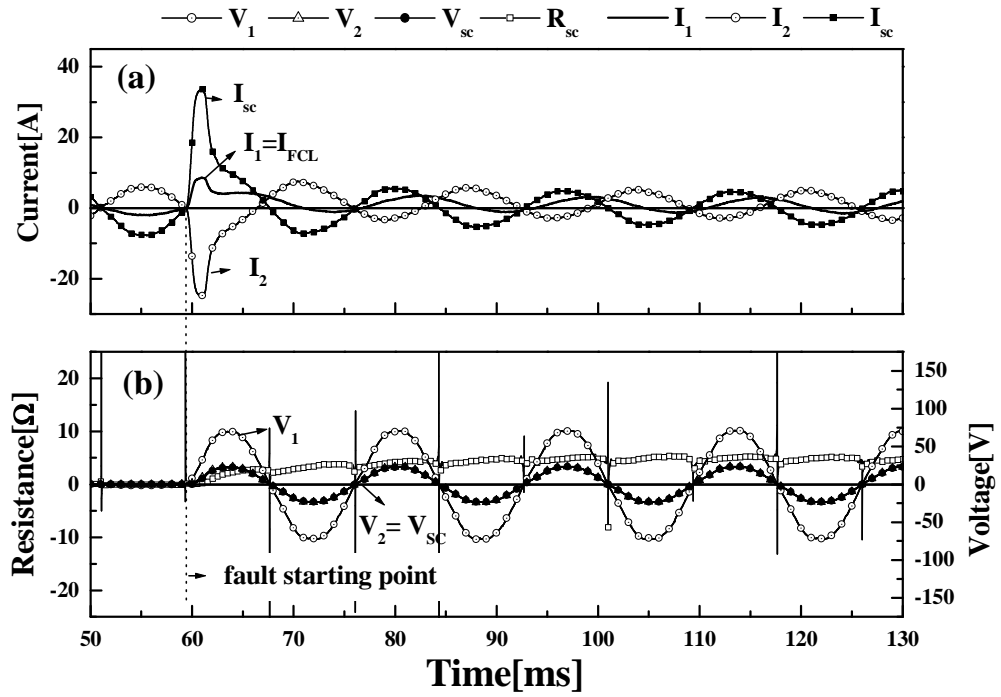


Fig. 28. Current limiting characteristics of a flux-coupling type SFCL in case of additive polarity winding ($N_1:N_2=63:21$)

(a) Current curves (b) Voltage and resistance curves

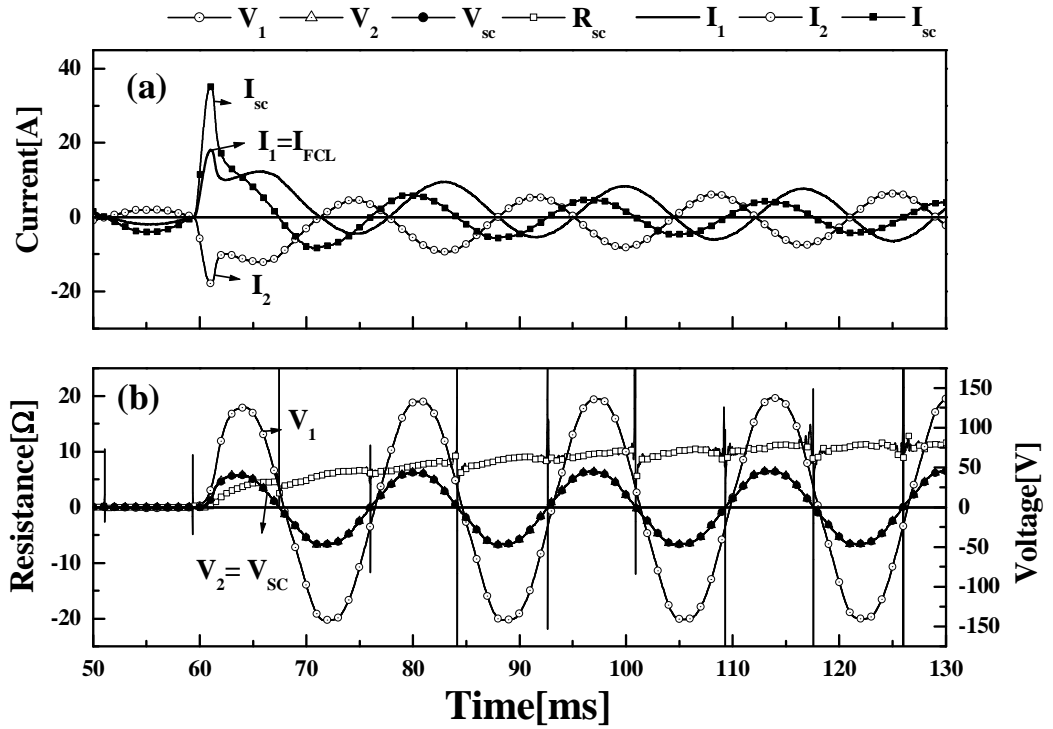


Fig. 29. Current limiting characteristics of a flux-coupling type SFCL in case of subtractive polarity winding ($N_1:N_2=63:21$)
 (a) Current curves (b) Voltage and resistance curves

D. 전압증가에 따른 동작특성 분석

턴수비가 63턴과 21턴인 코일 1과 코일 2의 결선방향에 따라 fig. 30와 31은 가극을 나타내며, fig. 32과 33은 감극으로 전원전압을 각각 120V, 160V, 200V로 점차 전압크기를 증가하여 전압과 전류의 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 사고 발생부터 초전도 소자의 임계전류에 도달할 때까지의 시간, 즉 켄치 시간인 T_q 을 비교해볼 때, 가극결선은 120V에서는 0.51ms, 160V에서는 0.45ms이고, 감극결선에서는 120V일 때 0.71ms, 160V에서는 0.66ms로 전압이 증가하면서 결선방향에 관계없이 켄치시간이 빨라지는 것을 볼 수 있다. 200V에서 감극결선인 경우는 0.63ms이지만, 가극결선인 경우 T_q 는 0.438ms로 감극결선 방향보다 켄치시간이 빨라지는 것을 보여준다. 전압이 증가하면서 초기선로전류와 소자전류는 거의 증가하지 않으나, 감극결선과 비교해보면 전류곡선이 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 전압이 증가함에 따라 자속매개체인 강자성 철심에서 발생하는 철심포화로 인해 선로전류의 상승이 감극결선에서 뚜렷한 차이를 나타내는 것을 보여준다.

전원전압 160V부터 커질수록 감극결선의 선로전류파형의 사고발생 후 전류변화에서 선로전류 I_1 이 반주기동안 재차 상승되는 것을 볼 수 있는데, 이는 철심의 포화현상 때문이다. 철심에서 사고전류에 의해 발생한 초기 상호자속이 사고전류가 감소하여 상호자속이 감소한다고 하여도 철심의 자속은 0이 되지 않고 철심에는 잔류자속이 계속 유지하게 된다. 철심의 비선형의 자기포화특성에 의해 어느 기준점을 초과하게 되면 여자전류가 급격하게 증가하게 되어 철심이 포화하게 된다. 철심의 포화를 방지하기 위해서는 단면적이 큰 철심이 필요하기 때문에 철심의 설치면적을 고려할 경우 감극결선에 비해 가극결선이 유리한 것을 알 수 있다.

Fig. 30와 32에서 전압변화를 비교해 보면 사고 전에는 소자전압 V_{sc} 가 0V였다가 사고가 발생되면 전압이 증가하는 것을 볼 수 있다. 가극결선인 경우에 전압이 증가할수록 소자 양단전압이 22.54V, 29.17V, 37.66V까지 인가되었으나, 감극결선인 경우에는 40.19V, 52.65V, 68.32V까지 전압이 인가되었다. 이는 전압증가에 따른 결선방향에 따라 초전도 소자의 부담이 감극결선에 비해 상대적으로 가극결선이 적은 것을 알 수 있었다.

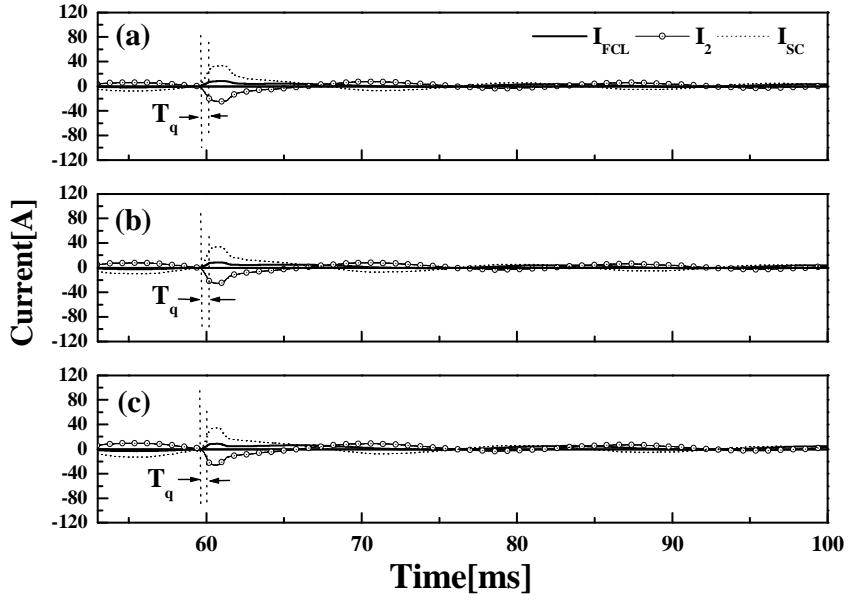


Fig. 30. The current curves case of additive polarity winding ($N_1:N_2=63:21$)
 (a) 120V (b) 160V (c) 200V

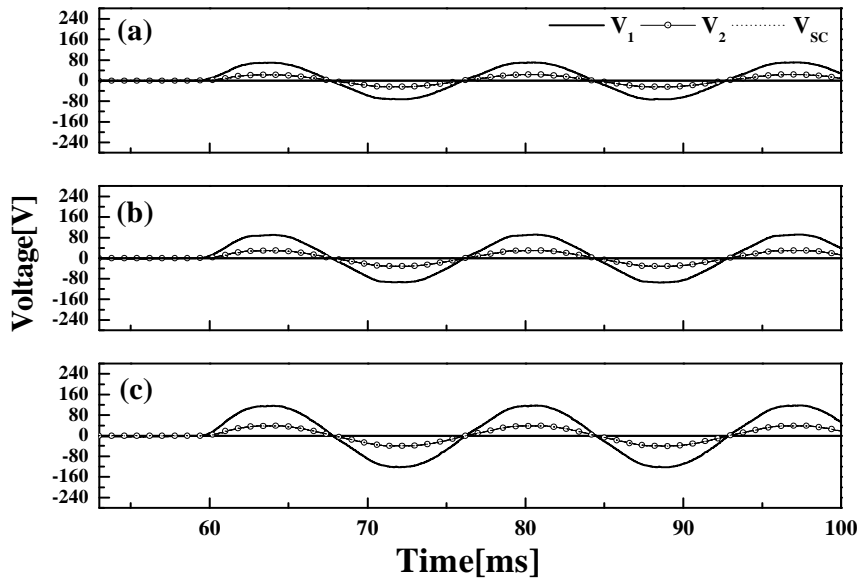


Fig. 31. The voltage curves in case of additive polarity winding ($N_1:N_2=63:21$)
 (a) 120V (b) 160V (c) 200V

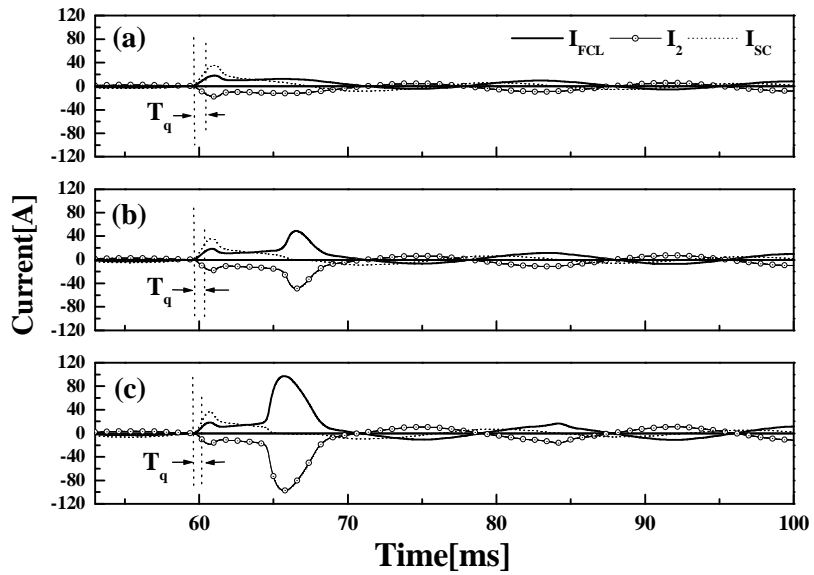


Fig. 32. The current curves in case of subtractive polarity winding ($N_1:N_2=63:21$)
 (a) 120V (b) 160V (c) 200V

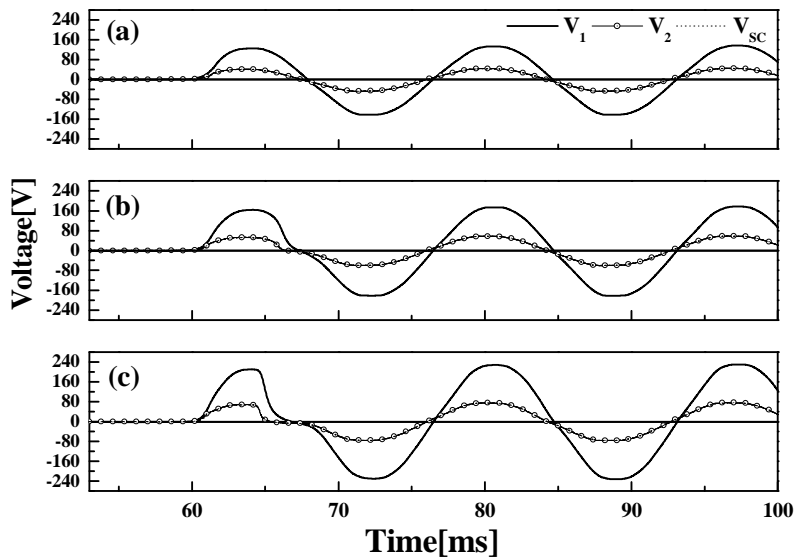


Fig. 33. The voltage curves in case of subtractive polarity winding ($N_1:N_2=63:21$)
 (a) 120V (b) 160V (c) 200V

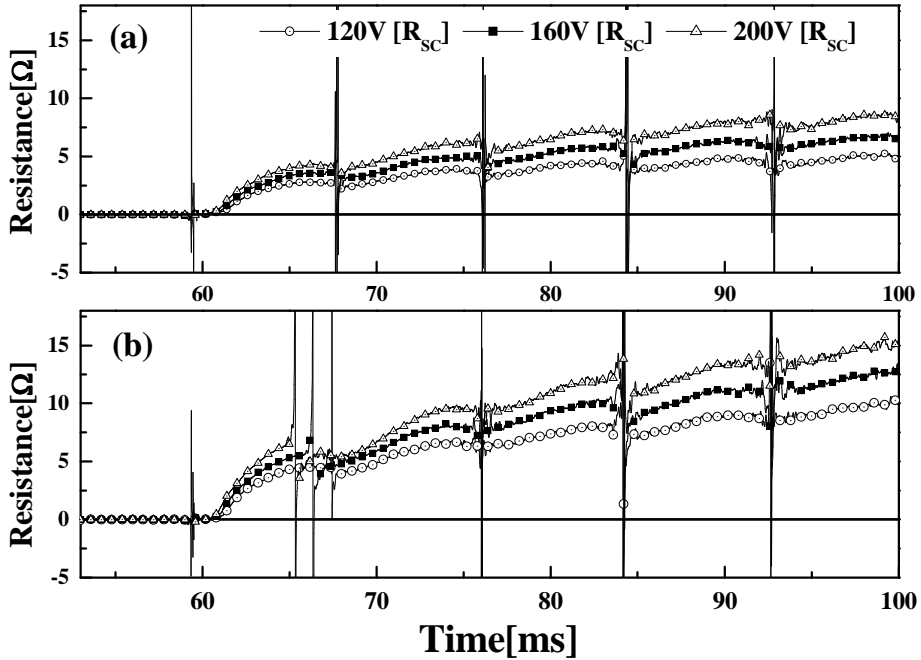


Fig. 34. The resistance curves in case of winding directions ($N_1:N_2=63:21$)
 (a) Additive polarity winding (b) Subtractive polarity winding

Fig. 34은 결선방향에 따른 사고발생 후 초전도 소자의 퀘칭시 발생하는 소자저항변화를 전원전압별로 나타낸 것이다. 사고 발생시 생기는 선로전류가 초전도 소자의 임계전류를 초과했을 때 소자저항이 급격히 증가했다가 점차 일정해지는 것을 볼 수 있다. 그리고 감극결선에 비해 가극결선에서 발생하는 초전도 소자에서 발생하는 저항의 크기가 작아졌다.

또한 전압이 증가할수록 초기에 발생하는 저항성장곡선의 시간적인 변화량도 결선방향과 관계없이 점차 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 64.72ms를 기준으로 전원전압이 증가할수록 가극결선에서는 120V에서는 2.52Ω, 160V에서는 3.32Ω, 200V에서는 3.93Ω로 점차 커졌다. 감극결선에서는 전원전압이 증가할수록 4.20Ω, 5.17Ω, 6.38Ω까지 발생하였으나, 점차 안정적인 가극결선의 저항곡선에 비해 점차 증가하는 현상을 나타내었다.

E. 자속결합형과 자속구속형 한류기의 특성비교 분석

Fig. 35는 전원전압이 120V에서 코일 1차측과 2차측의 권선수가 63턴과 21턴인 경우에 자속결합형 한류기의 가극결선과 감극결선시와 동일조건하에서 자속구속형 한류기의 소자저항을 비교하여 나타내고 있다. Fig. 34에서 사고발생 후 3주기인 96.70ms에서 자속결합형 한류기의 가극결선과 감극결선의 저항값은 각각 4.89 Ω , 9.57 Ω 이고, 자속구속형 한류기인 경우에는 각각 12.10 Ω , 18.87 Ω 이 발생하였다. 동일 조건에서 한류기 모두 가극결선에 비해 감극결선의 저항값이 높았으나, 자속구속형 한류기의 결선조건에서보다 자속결합형 한류기의 발생저항이 결선조건과 관계없이 작기 때문에 초전도 소자의 부담측면에서 자속결합형 한류기의 동작특성이 유리함을 알 수 있었다. Fig. 36의 소자양단에 인가되는 전압의 파형비교를 통해서도 재차 확인할 수 있었다. Fig. 36 (a)에서 사고발생 후 반주기동안 초기피크전압의 크기는 가극결선은 22.96V, 감극결선은 40.02V이고 fig. 36(b)는 각각 57.26V와 99.82V까지 인가되었다.

Fig. 37에서는 선로전류를 보여주고 있다. 사고 발생 후 반주기동안 초기 피크 선로전류의 크기는 자속결합형의 가극결선에서는 8.58A, 감극결선인 경우는 18.06A 까지 제한되었다. 자속구속형인 경우에는 각각 24.17A와 48.89A 값을 보였다. 그리고 반주기만에 자속결합형은 3.49A와 9.46A까지 감소하였고, 자속구속형인 경우에는 6.53A와 11.76A까지 감소하였다. 가극결선시 초기 피크전류 값이 상대적으로 작기 때문에 용량측면에서도 두 구조 모두 유리할 것을 생각된다. 또한 켄치 발생시간 T_q 은 자속결합형인 경우 각각 0.41ms, 0.78ms인 것에 비해 자속구속형은 각각 0.78ms, 1.37ms로 자속결합형의 구조가 동작원리에서 유리함을 입증하였다.

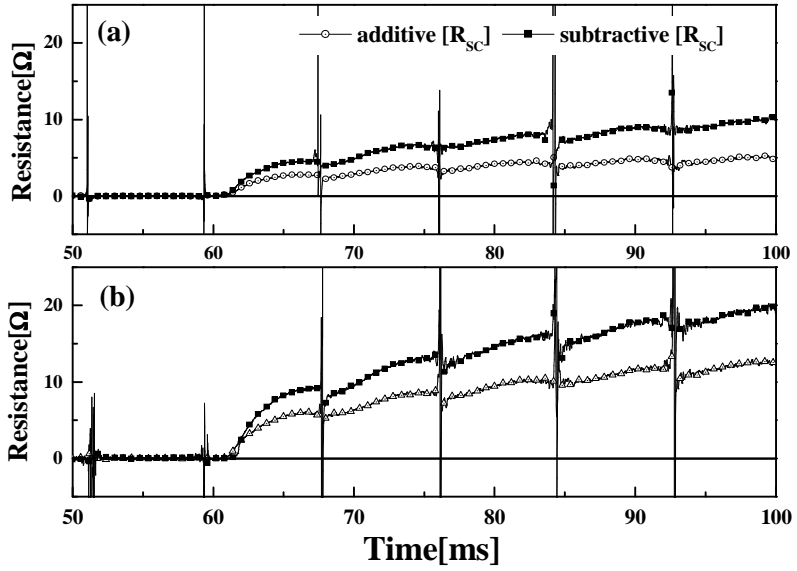


Fig. 35. The resistance comparison according to winding directions ($N_1:N_2=63:21$)
 (a) Flux-coupling type SFCL (b) Flux-lock type SFCL

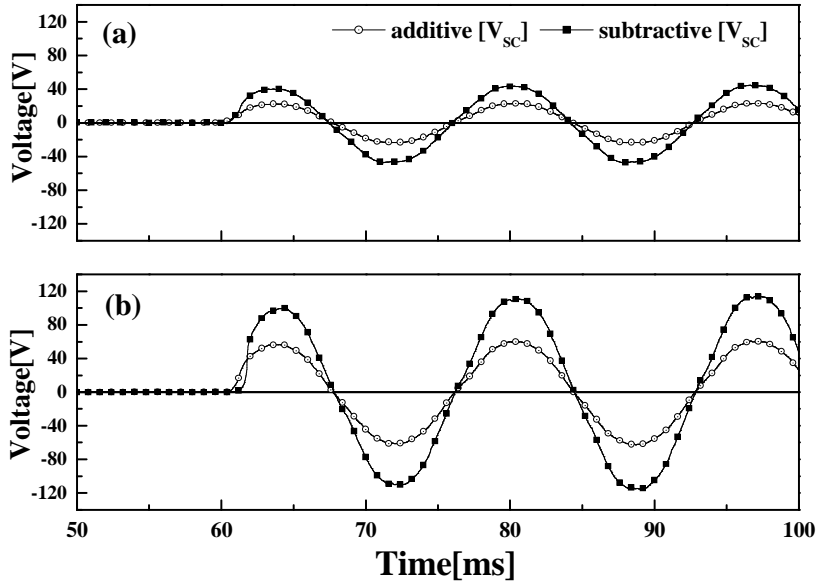


Fig. 36. The voltage comparison according to winding directions ($N_1:N_2=63:21$)
 (a) Flux-coupling type SFCL (b) Flux-lock type SFCL

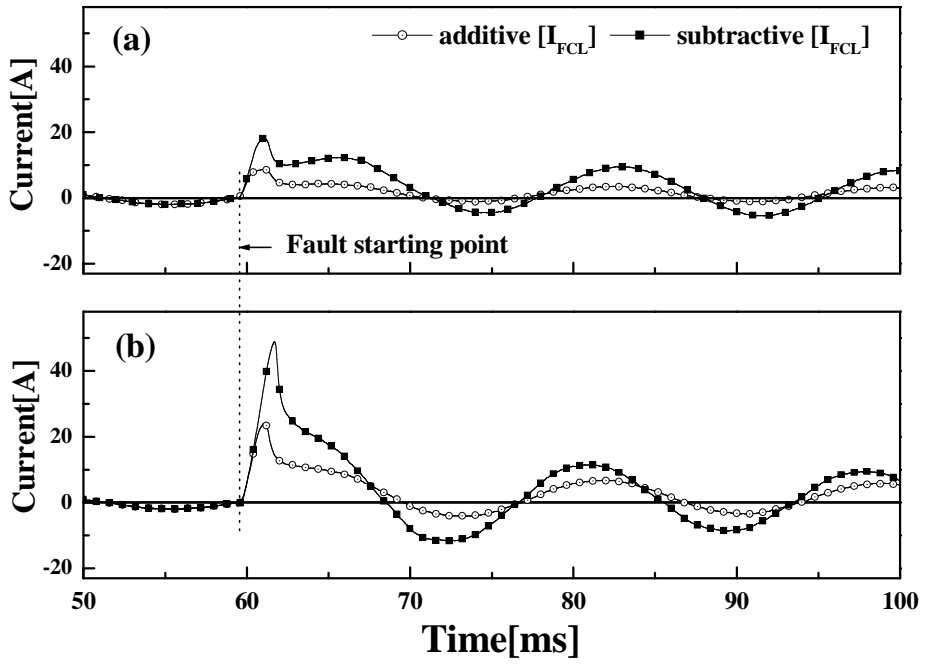


Fig. 37. The line current comparison according to winding directions ($N_1:N_2=63:21$)
 (a) Flux-coupling type SFCL (b) Flux-lock type SFCL

F. 인덕턴스 변화에 따른 동작특성

1. 1차측 인덕턴스 변화에 따른 동작특성

Fig. 38는 가극결선인 경우의 전원전압 120V에서 자속결합형 한류기의 2차측 권선수를 63턴으로 고정하고, 1차측 권선수를 42턴, 63턴, 84턴으로 증가시켰을 때 전류제한특성을 나타내고 있다. 1차측 권선수가 증가하여도 사고가 발생한 후 소자로 흐르는 전류의 크기변화는 거의 없는 반면에, 사고발생한 후 반주기동안 1차측과 2차측 코일에 흐르는 전류의 초기 피크전류에서 차이를 나타남을 확인 할 수 있었다. Fig. 38 (a)에서 1차측 턴수가 증가함에 따라 선로전류의 크기는 코일 1과 코일 2의 42턴과 63턴에서는 21.86A까지 제한되었으며, 63턴과 63턴에서는 17.95A, 84턴과 63턴에서는 15.22A로 1차측 권선수가 증가할수록 선로전류가 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 코일 1차측 권선수의 증가로 전류제한률이 커짐에 따라 사고초기에 제한되는 전류크기가 감소한 것이다. 이는 식(9)에서 나타나는 바와 같이 2차측 인덕턴스에 비해 1차측 인덕턴스의 크기가 증가함에 따라 초기제한 선로전류의 크기가 줄어들기 때문이다.

Fig. 39는 동일조건에서 권선수 증가에 따른 초전도 소자의 양단전압과 각 코일의 전압과형을 나타낸 것이다. 그림에서 비교하여 살펴보면 코일의 권선수가 증가함에 따라 1차측 코일전압이 36.56V, 45.90V, 52.76V로 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면에 초전도 소자의 양단전압의 크기는 52.58V, 44.19V, 37.90V로 점차 감소하였다. 이러한 결과들로부터 가극 결선된 자속결합형 한류기는 1차측 권선이 증가할수록 전류제한폭도 커지고, 초전도 소자의 양단전압이 줄어들음에 따라 부하용량 증대시 소자수 감소측면에서 이점이 있을 것으로 생각된다.

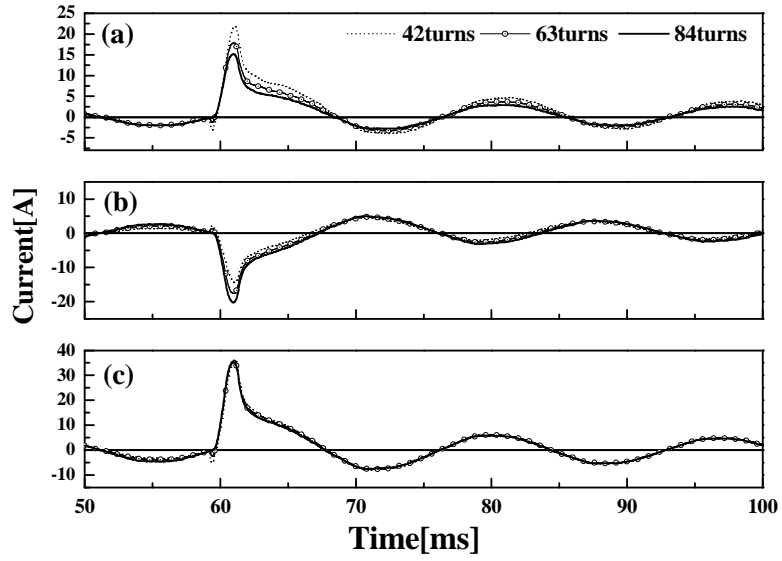


Fig. 38. The variation of current curves according to turn ratios of coil 1
 (a) I_{FCL} (b) I_2 (c) I_{SC}

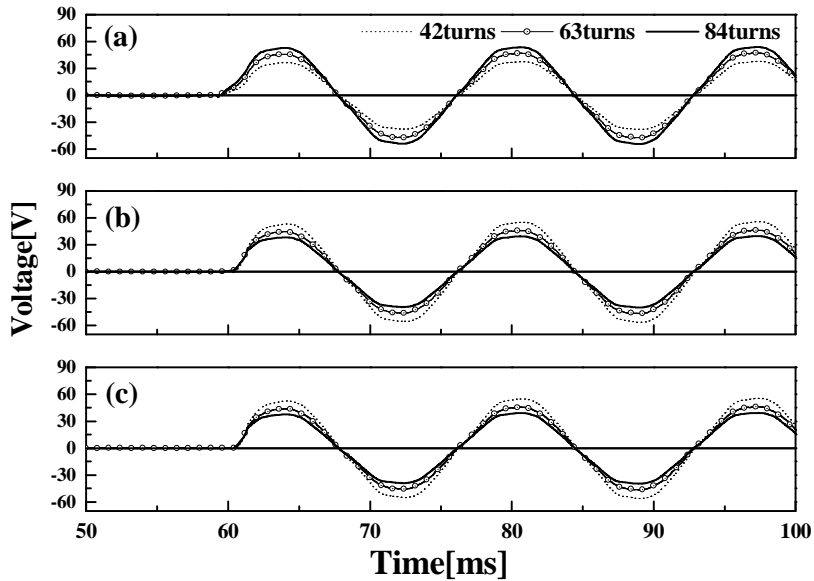


Fig. 39. The variation of voltage curves according to turn ratios of coil 1
 (a) V_1 (b) V_2 (c) V_{SC}

2. 2차측 인덕턴스 변화에 따른 동작특성

Fig. 40는 전원전압 120V에서 자속결합형 한류기의 가극결선에 따른 1차측 권선수를 63턴으로 고정하고, 2차측 권선수를 42턴, 63턴, 84턴까지 증가함에 따른 선로전류변화를 나타내고 있다. 사고발생한 후 초기반주기동안 선로전류변화는 코일 1차측과 2차측이 63턴과 42턴인 경우 14.12A, 63턴과 63턴인 경우 17.95A, 63턴과 84턴인 경우에는 20.78A로 1차측 코일의 인덕턴스 변화에 따른 동작특성에 비해 2차측 코일의 인덕턴스가 증가할수록 선로전류의 크기가 증가한 것을 알 수 있었다. 코일 2차측 전류파형이 180° 의 위상차가 턴수변화에 관계없이 발생되었으며, 이로 인해 사고발생과 동시에 1차측으로 흐르는 선로전류가 반전된 코일 2에 흐르는 전류와 소자전류의 합으로 나타난 것으로 기인한다.

또한 fig. 41의 전압파형에서 사고발생 후 초기반주기동안 코일 1차측 피크전압도 각각 55.54V, 45.91V, 39.20V이었으며, 소자양단의 전압도 35.51V, 44.19V, 49.94V로 2차측 인덕턴스가 증가할수록 소자전압의 부담이 가중되었다. 1차측 코일 변화에 따른 전압파형과 비교해보면 코일 1차측과 코일 2차측의 권선수가 1차측이 큰 경우인 84턴과 63턴, 63턴과 42턴에서 초전도 소자양단 전압의 크기가 상대적으로 작아 소자부담이 적어지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 42은 1차측 코일과 2차측 코일의 인덕턴스변화에 따른 저항곡선을 나타낸다. 66.46ms에서 초전도 소자에서 발생하는 저항의 크기순으로 권선수를 나열할 경우 코일 1차측과 2차측 권선수비가 42턴과 63턴일 때 5.78Ω , 63턴과 84턴에서 5.43Ω , 63턴과 63턴에서 4.81Ω , 84턴과 63턴에서는 4.50Ω , 63턴과 42턴에서는 4.07Ω 을 나타내었다. 이는 1차측 코일의 인덕턴스가 증가한 경우에는 소자저항은 점차 감소하였고, 2차측 코일이 증가한 경우에는 소자저항이 점차 증가한 것을 나타내었다.

이는 식 (14)에 의해 2차측 인덕턴스가 1차측에 비해 큰 경우에 선로전류크기가 상대적으로 커졌음을 나타낸다. 또한 fig. 42 (a)와 (b)에서 소자저항이 작게 발생된 경우가 오히려 사고전류크기가 줄어들었는데, 1차측 코일에 비해 2차측 코일턴수가 작은 경우에 이러한 동작이 발생되었다.

또한 Fig. 43에서 코일의 1차측과 2차측의 각각의 인덕턴스 변화에 따른 사고발생 후 초기반주기 동안 피크선로전류의 전류파형에서 제차 확인할 수 있다. 즉 사

고발생 후 초기반주기동안 선로전류 크기들을 비교해보면 코일 2차측의 인덕턴스 증가는 초기피크전류를 증가시켰으며, 코일 1차측의 인덕턴스 증가는 초기피크전류를 감소한다는 것을 알 수 있다.

자속결합형 한류기의 코일 1과 코일 2의 결선방향이 가극결선인 경우에는 기존의 변압기에서 인덕턴스비가 1이 될 수 없었던 것과 달리 42턴과 42턴, 63턴과 63턴 등에서 정상적으로 동작되었음을 알 수 있다.

이는 식(20)에 자속구속형 한류기가 가극 결선된 경우 전류관계식 식(20)에서 코일 1과 코일2의 인덕턴스 비가 1이 되면 선로전류의 크기에 비해 고온초전도소자로 흐르는 전류가 상대적으로 매우 커지므로 설계, 제작시 이러한 점을 고려해야 한다. 하지만 자속결합형 한류기인 경우 감극결선에서 이러한 동작특성이 나타난다. 자속구속형과 자속결합형 한류기의 전류제한동작측면에서 가극결선으로 한 경우 감극결선에 비해 한류소자수와 소자부담이 줄어들었으며, 소자의 켄치시간도 빨라졌다. 이러한 동작측면에서 자속결합형 한류기의 가극결선에서 1차측 코일과 2차측 코일의 인덕턴스비가 1인 경우에도 안정적으로 동작됨에 따라 페루프에 의한 오작동이 발생할 경우 자속결합형 한류기가 자속구속형 한류기에 비해 신뢰성 및 안전성 측면에서 유리하다고 생각된다.

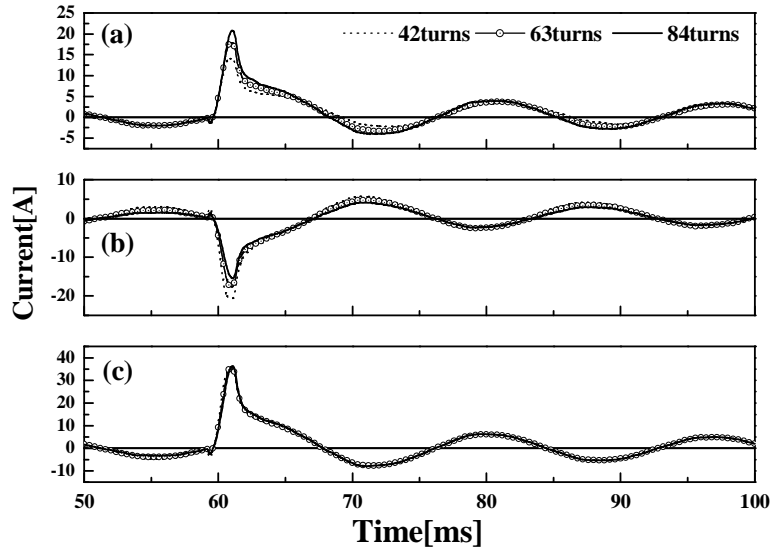


Fig. 40. The variation of current curves according to turn ratios of coil 2
 (a) I_{FCL} (b) I_2 (c) I_{SC}

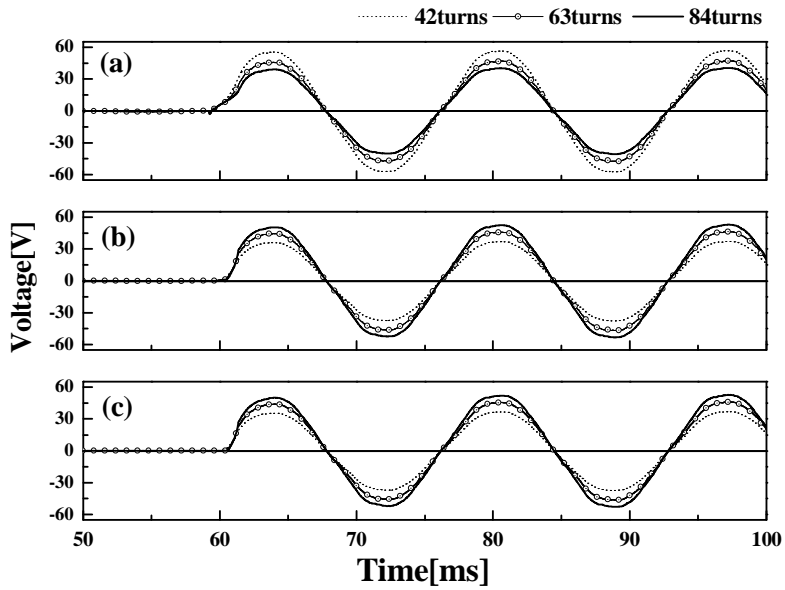


Fig. 41. The variation of voltage curves according to turn ratios of coil 2
 (a) V_1 (b) V_2 (c) V_{SC}

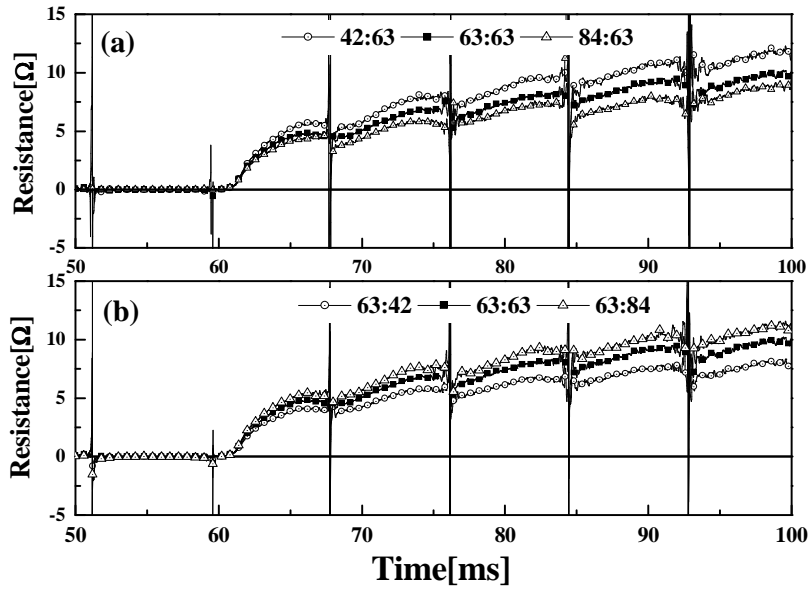


Fig. 42. The variation of resistance curves according to turn ratios
 (a) Inductance variation of coil 1 (b) Inductance variation of coil 2

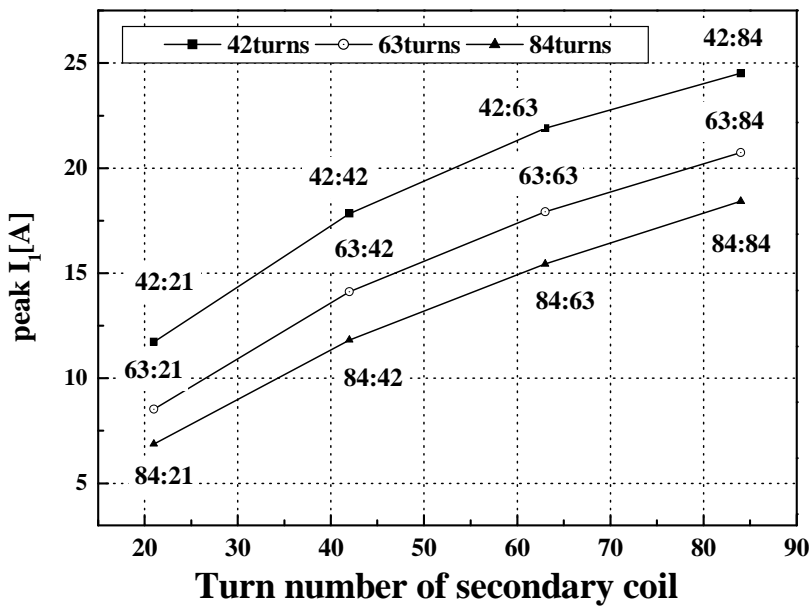


Fig. 43. Variation of peak line currents according to turn ratios

자속결합형과 자속구속형 한류기는 결선방향과 리액터의 코일턴수로 인덕턴스를 조절함으로써 사고발생 후 선로전류를 제한하는 동작특성을 설정할 수 있다.

그림 44과 45은 전원전압이 120V이고 가극결선일 때 1차측 코일을 63턴으로 고정시키고, 2차측 코일의 턴수를 21턴과 42턴으로 조정하여 자속결합형과 자속구속형 한류기를 실험하였다. 자속구속형 SFCL의 선로전류는 I_{FCL} , 1차측 전류는 I_1 , 2차측 전류인 ($I_2=I_{SC}$)이며, 자속결합형 한류기의 선로전류는 코일 1차측 전류와 동일하며, 2차측 전류 I_2 와 소자로 흐르는 전류 I_{SC} 로 구조적인 조건하에서 나타내었다. 자속구속형 한류기는 턴수가 증가할수록 초기 제한되는 선로전류 I_{ini} 의 크기가 21턴에서는 15.7A, 42턴에서는 8.2A로 점차 감소하였으나, 이러한 동작특성과 반대로 자속결합형 한류기는 각각 5.92A와 9.29A로 코일의 2차측 권선수가 적을수록 초기선로전류(I_{ini})의 크기가 감소했음을 확인할 수 있었다.

자속결합형 한류기의 가극결선시 퀘칭 발생시간(T_q)은 21턴인 경우 0.41ms, 42턴의 경우 0.58ms로 자속구속형 한류기의 각각 0.75ms와 0.96ms에 비하여 빨라졌다.

그림 46와 47은 동일조건에서 자속결합형과 자속구속형 한류기를 감극 결선했을 때의 전류제한특성을 나타낸다. 감극결선에서는 자속결합형 한류기는 턴수가 증가할수록 초기제한되는 선로전류 I_{ini} 의 크기가 21턴에서는 5.5A, 42턴에서는 12.05A로 점차 증가하였고, 자속결합형 한류기도 각각 32.01A와 40.1A로 코일의 2차측 권선수가 적을수록 초기선로전류(I_{ini})의 크기가 감소하였다. 가극결선인 경우와 달리 감극결선에서 2차측 턴수가 증가해도 자속결합형 한류기의 2차측 코일의 전류방향이 결선방향과 관계없이 180°위상차를 나타내었기 때문에 자속구속형 한류기의 감극결선에 따른 동작특성과 유사하게 나타났다. 하지만 자속결합형의 퀘칭 발생시간(T_q)은 21턴인 경우 0.78ms, 42턴에서는 2.23ms이고, 자속구속형 한류기는 각각 1.37ms, 2.50ms까지 소요되었다. 이는 자속결합형 한류기의 동작특성은 인덕턴스변화에도 자속구속형 한류기의 전류제한측면에서도 효율적임을 확인할 수 있었다.

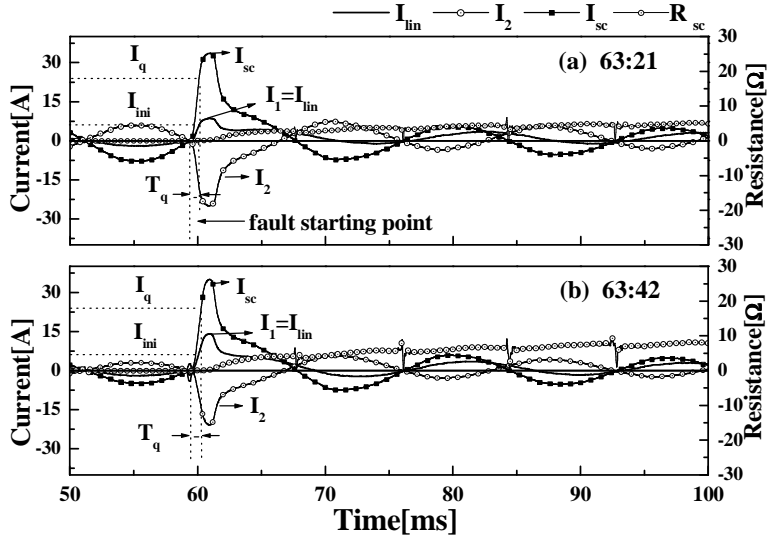


Fig. 44. Measured curves of a flux-coupling type SFCL
in case of additive polarity winding
(a) $N_1=63, N_2=21$ (b) $N_1=63, N_2=42$

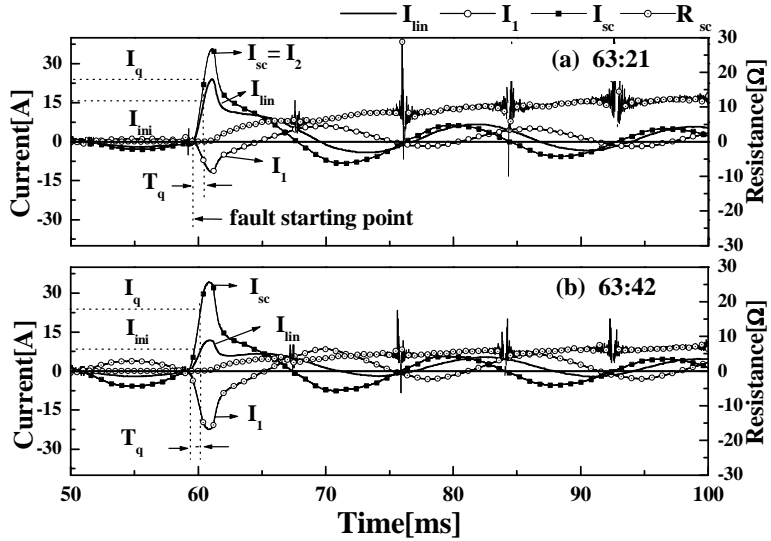


Fig. 45. Measured curves of a flux-lock type SFCL
in case of additive polarity winding
(a) $N_1=63, N_2=21$ (b) $N_1=63, N_2=42$

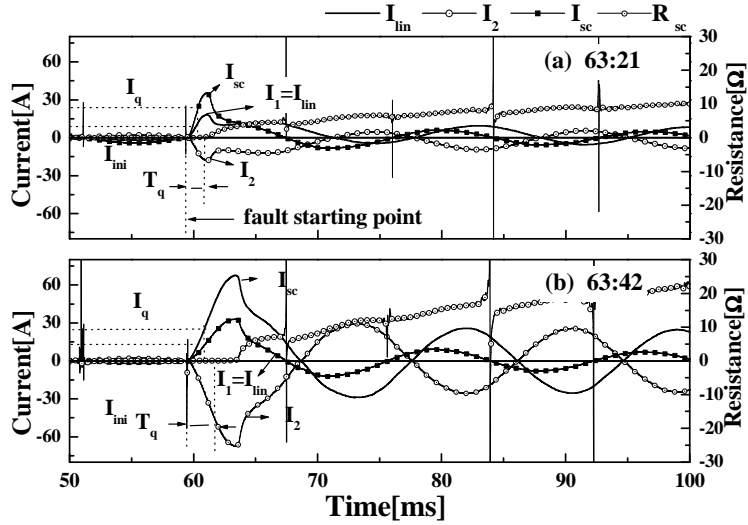


Fig. 46. Measured curves of a flux-coupling type SFCL in case of subtractive polarity winding
 (a) $N_1=63$, $N_2=21$ (b) $N_1=63$, $N_2=42$

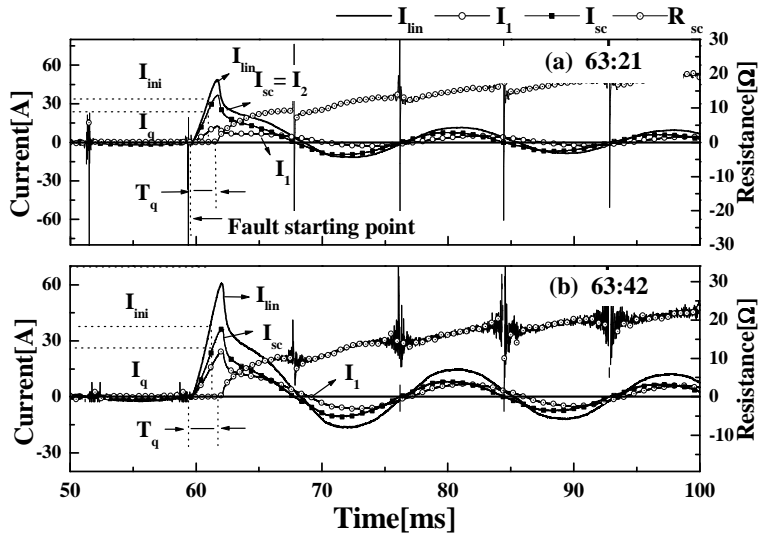


Fig. 47. Measured curves of a flux-lock type SFCL in case of subtractive polarity winding
 (a) $N_1=63$, $N_2=21$ (b) $N_1=63$, $N_2=42$

V. 결 론

본 논문에서는 YBCO 박막을 사용한 단상 자속결합형 초전도 한류기를 설계·제작하여 자속매개체로 강자성체 철심을 사용하여 인덕턴스변화에 따른 동작특성을 비교·분석하였다. 자속결합형 한류기의 등가회로를 이용하여 각 결선방향에 따른 동작원리를 유도하였다. 결선방향과 리액터의 코일턴수로 인덕턴스를 조절함으로써 사고발생 후 선로전류를 제한하는 동작특성을 설정할 수 있다.

1) 결선방향에 따른 동작특성

자속결합형 한류기는 결선방향에 관계없이 코일 2로 흐르는 전류가 180° 도 위상차가 발생하였으나, 선로전류크기는 같은 조건의 감극결선인 경우보다 가극결선에서 작았으며, 켄치시간 T_q 도 빨라져서 전류제한특성이 향상된 것을 확인할 수 있었다. 또한 사고발생 후 소자양단의 전압이 감극결선보다 가극결선이 작았고 소자에서 발생하는 저항 R_{sc} 에서도 작기 때문에 초전도소자의 무리한 부담을 주지 않기 때문에 소자보호차원에서 가극결선이 안정적이라고 생각된다.

2) 전압증가에 따른 동작특성

자속결합형 한류기는 전압이 증가하여도 결선방향에 관계없이 켄치시간이 빨라졌으나, 감극결선에 비해 가극결선의 경우에는 전원전압이 증가하여도 켄치시간이 빨라졌다. 하지만 전압이 증가함에 따라 가극결선에 비해 감극결선에서 강자성 철심에서 발생하는 철심포화현상이 빨리 발생함에 따라 감극결선에 비해 가극결선으로 한류기를 설계할 경우 철심부피를 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

3) 인덕턴스변화에 따른 동작특성

자속결합형 한류기는 코일의 1차측 권선수가 증가할수록 전류제한률이 증가함에 따라 사고초기에 제한되는 전류크기가 감소하였다. 가극 결선인 경우 1차측 권선이 증가할수록 전류제한폭도 커지고, 초전도 소자의 양단전압이 줄어들어 따라 부하용

량 증대시 소자수 감소측면에서 이점이 있을 것으로 생각된다. 1차측 코일의 인덕턴스 변화에 따른 동작특성에 비해 2차측 코일의 인덕턴스가 증가할수록 선로전류의 크기와 소자전압의 부담이 가중되었다. 이는 1차측 코일의 인덕턴스가 증가한 경우에는 소자저항의 크기는 줄어드는 반면에 2차측 코일이 증가한 경우에는 소자저항이 점차 증가한 것을 나타내었다. 사고발생 후 초기반주기동안 선로전류 크기를 비교해보면 코일 2차측의 인덕턴스 증가는 초기피크전류를 증가시켰으며, 코일 1차측의 인덕턴스 증가는 초기피크전류를 감소한다는 것을 알 수 있다.

4) 자속구속형과 자속결합형 한류기의 비교

동일조건에서 한류기 모두 가극결선에 비해 감극결선의 저항값이 높았으나, 자속구속형 한류기의 결선조건에서 자속결합형 한류기의 소자저항이 결선조건과 관계없이 작기 때문에 초전도 소자의 부담이 적으며, 선로전류의 크기가 상대적으로 작기 때문에 용량측면에서도 자속결합형 한류기가 유리한 것으로 생각된다. 가극으로 결선한 경우 자속구속형 한류기는 턴수가 증가할수록 초기 제한선로전류 I_{lim} 의 크기가 점차 감소하였으나, 이러한 동작특성과 반대로 자속결합형 한류기는 코일의 2차측 권선수가 적을수록 초기선로전류(I_{ini})의 크기가 감소하였다.

감극결선에서는 자속결합형 한류기는 턴수가 증가할수록 초기 제한선로전류 I_{ini} 의 크기가 점차 증가하였고, 자속결합형 한류기도 코일의 2차측 권선수가 적을수록 초기선로전류(I_{ini})의 크기가 감소하였다. 가극결선인 경우와 달리 감극결선에서 2차측 턴수가 증가해도 자속결합형 한류기의 2차측 코일의 전류방향이 결선방향과 관계없이 180°위상차가 발생했기 때문이다. 따라서 자속결합형 한류기의 동작특성은 인덕턴스변화에도 자속구속형 한류기의 전류제한측면에서도 효율적임을 확인할 수 있었다. 이러한 동작측면에서 자속결합형 한류기의 가극결선에서 1차측 코일과 2차측 코일의 인덕턴스비가 1인 경우에도 안정적으로 동작됨에 따라 페루프에 의한 오작동이 발생할 경우 자속결합형 한류기가 자속구속형 한류기에 비해 신뢰성 및 안전성 측면에서 유리하다고 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 김준환, 이강완, “전력계통, 고장전류 증대와 대응방안”, 전기저널, p. 19-31, 1998
- [2] 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.
- [3] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, 김상준, 문승현, 한병성, “YBCO박막의 저항형 초전도 한류기에 대한 동작특성”, 전기학회논문지, 48B권, 10호, p. 537, 1999.
- [4] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, “15 kVA급 박막형 초전도 전류제한기의 한류특성”, 전기전자재료학회논문지, 13권, 12호, p. 1058, 2000.
- [5] 최효상, 황시돌, 현옥배, “1선 지락사고에 대한 배전급 저항형 초전도 한류기의 전류제한특성”, 전기전자재료학회논문지, 14권 6호, p. 505, 2001.
- [6] A. Shikov, I. Akimov, A. Nikulin, V. Pantscyrnyi, and A. Vorobieva, “HTS materials for electric power application,” *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 10, p. 1126, 2000.
- [7] N. Nanato, M. Yanagishita, and K. Nakamura, “Quench detection of Bi-2223 HTS coil by partial active power detecting method,” *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 11, p. 2391, 2001.
- [8] N. Nanato and K. Nakamura, “Quench detection method without a central voltage tap by calculating active power,” *Cryogenics*, Vol. 44, p. 1, 2004.
- [9] 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, 2001.
- [10] S.-H. Lim, H.-S. Choi, and B.-S. Han, “The fault current limiting characteristics of a flux-lock type high-T_c superconducting fault current limiter

- using a series resonance," *Cryogenics*, Vol. 44, pp. 249-254, 2004.
- [11] Sung-Hun Lim, Hyeoung-Gon Kang, Hyo-Sang Choi, Seoung-Ryoung Lee, Byoung-sung Han, "Current limiting characteristics of flux-lock type High-Tc superconducting fault current limiter with control circuit for magnetic field", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 13, No. 2, p. 2056, 2003.
- [12] 박형민, 임성훈, 박충렬, 최효상, 한병성, "자속구속형과 저항형 초전도 전류제한기의 특성비교", 전기전자재료학회논문지. 18권 4호 p. 363, 2005.
- [13] 최효상, "10kVA급 자속구속형 사고전류제한기 및 계통적용기술 개발 보고서", 산업자원부, Vol. 1, p. 1, 2005.
- [14] 현옥배, 황시돌, 김혜림, 최효상, "초전도 사고전류 제한기술개발 보고서", 한국전력공사 전력연구원(KEPRI), Vol. 1, p. 1, 2002.
- [15] Y. Xiaoyan, T. Yuejin, L. Jingdong, Z. Saijun, and P. Yuan, "Quench developing process of HTS tape in sinusoidal over currents with different amplitudes," *Cryogenics*, Vol. 44, p. 755, 2004.
- [16] F. Chovanec and P. Usak, "Instabilities above critical current region in Bi-2223/Ag superconducting coils cooled by liquid nitrogen," *Cryogenics*, vol. 42, p. 543, 2002.
- [17] Y. A. Ilyin, V. S. Vysotsky, T. Kiss, M. Takeo, H. Okamoto, and F. Irie, "Stability and quench development study in small HTSC magnet," *Cryogenics*, vol. 41, p. 665, 2001.

감사의 글

또 다른 가능성을 찾고, 그 것에 모든 것을 걸어보기 위해 들어온 대학원 생활이 어느덧 2년이라는 긴 시간을 지나 마무리 할 시점이 되어버린 지금 되돌아보니 감사를 드려야 할 분들이 참으로 많습니다. 그 동안 여러모로 부족한 저에게 많은 도움을 주신 모든 분들께 감사의 마음을 전합니다.

대학원 생활동안 아낌없는 가르침으로 새로운 학문의 길과 인생의 방향을 지도해주신 최효상 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한, 부족한 저의 논문을 심사해주시고 지도해주신 오금곤 교수님과 백형래 교수님께 감사드립니다. 2년이라는 대학원 생활동안 남다른 사랑으로 학문적 지도편달을 아낌없이 해주신 이상일 교수님, 정수복 교수님, 이우선 교수님, 조금배 교수님께 감사드립니다.

대학원 생활의 여유로움과 큰 힘이 되어준 많은 분들께 감사드립니다. 항상 뒤에서 묵묵하게 조언을 아끼지 않았던 형민이형과 한태희 박사님, 힘들 때 마다 대화를 통해 새로운 방향을 제시해주던 용선이형, 힘들 때나 기쁠 때 항상 내 옆에 있어주고 모든 것을 함께 해결해주던 나영이, 힘든일도 웃음으로 이겨버리는 태양광 실험실의 동기 지훈이와 정민선배님, 정국선배님 그리고 항상 웃으시며 원우회 모두를 아껴주시는 연옥선배님, 항상 바로 옆에서 제 고민을 받아주고 힘이 되어주던 필주형, 동고동락을 같이 하며 대학원 생활을 도와주던 후배 변문걸, 전영길, 정판검, 정남인, 모두에게 심신한 고마움을 전합니다.

마지막으로 항상 뒤에서 묵묵히 저를 바라봐주시고 아껴주시는 부모님께 정말 감사드립니다. 또한 곧 1월의 신랑·신부가 될 누나와 매형, 공무원 공부하는 동생 보라에게 2007년도에 꼭 합격하길 바라며 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

2006년 12월 남 궁 현

(별 지)

저작물 이용 허락서

학 과	전기공학과	학 번	20057617	과 정	석 사
성 명	한글: 남 긍 현 한문 : 南 肯 賢 영문 : NAM GUENG HYUN				
주 소	광주 광역시 서구 금호동 남양아파트 104동 603호				
연락처	E-MAIL : kkoragi@hanmail.net				
논문 제목	한글 : 자속결합형 초전도 한류기의 인덕턴스에 따른 특성해석 영문 : Analysis on the Inductance Characteristics of Flux-Coupling Type Superconducting Fault Current Limiter				

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 : 남 긍 현 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하