



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2009年度 2月
碩士學位論文

2009年
2月
碩士學位論文
전력계통용
매트릭스형
한류기의
사고전류
저감
특성
연구
李周炯

전력계통용 매트릭스형 한류기의 사고전류 저감 특성 연구

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

李周炯

전력계통용 매트릭스형 한류기의 사고전류 저감 특성 연구

A study on the suppression characteristics for
fault current of a matrix-type fault current
limiter

2009年 2月 日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

李周炯

전력계통용 매트릭스형 한류기의 사고전류 저감 특성 연구

指導教授 崔 孝 祥

이 論文을 工學 碩士學位申請 論文으로 提出함.

2008年 10月 日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

李 周 炯

李周炯의 碩士學位 論文을 認准함.

委員長 朝鮮大學校 教授

吳金坤



委員 朝鮮大學校 教授

金容載



委員 朝鮮大學校 教授

崔孝祥



2008年 11月 日

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT

I. 서론	1
II. 매트릭스형 초전도 한류기의 동작원리	
A. 초전도 한류기의 정의와 특성	3
1. 초전도 소자의 기본 동작원리	3
2. 초전도 한류기의 동작특성	6
B. 매트릭스형 초전도 한류기의 동작특성	7
1. 매트릭스형 초전도 한류기의 기본원리	7
2. 매트릭스형 초전도 한류기의 회로구성	9
III. 매트릭스형 초전도 한류기의 구조와 동작특성	
A. 초전도 소자 설계 및 제작	11
1. 초전도 소자의 임계특성	11
B. 매트릭스형 초전도 한류기용 coil 설계 및 제작	14
1. Trigger 및 current-limiting coil의 설계 및 제작	14
2. Trigger 및 current-limiting part의 설계	16
3. Current limiting part내 shunt coil의 설계 및 제작	20

IV. 실험결과 및 분석

A. EMTP를 이용한 매트릭스형 초전도한류기의 사고전류

제한특성 시뮬레이션 21

1. EMTP-ATP를 이용한 단상 매트릭스형 초전도 한류기의

사고전류제한 특성 모의 21

2. 배전계통으로 삼상용 매트릭스형 초전도 한류기를 적용하기

위한 시뮬레이션 25

B. 외부자장인가 리액터의 전자장 해석 28

1. 외부자장인가 리액터의 자계방정식 28

2. 외부자장인가 리액터의 전자장 해석 결과 33

C. 전류제한특성에 따른 동작 특성 및 분석 41

1. 2×3 매트릭스형 초전도 한류기의 원리 41

2. 분리형 외부자장인가 리액터의 2×3구조의 전류제한 특성분석 44

1) Current-limiting part의 R_{CLC} 에 따른 특성분석 44

2) L_{TC} 의 턴수 변화에 따른 특성분석 49

V. 결 론 58

참고문헌

List of table

Table 1. Specification of a YBCO thin film	12
Table 2. The parameter values of the separated reactors	19
Table 3. The parameter values of an integrated reactor	19
Table 4. The parameter values of shunt coils	20
Table 5. The parameter value of a reactor	35

List of figures

Fig. 1. The critical surface of a superconductor	3
Fig. 2. The phase diagram of a superconductor	4
Fig. 3. The resistance-temperature curve of a superconductor	5
Fig. 4. The experimental circuit of the SFCL	6
Fig. 5. The current curves of the system with and without SFCL	6
Fig. 6. The basic module of an matrix-type SFCL	7
Fig. 7. An experimental diagram of the matrix-type SFCL	9
Fig. 8. The quench mechanism of the current limiting element	10
Fig. 9. The pattern shape of a YBCO thin film	11
Fig. 10. The design of a circular holder for a YBCO thin film	12
Fig. 11. The current-voltage curves of each superconducting element ..	13
Fig. 12. The design drawing of the holder for the trigger coil	14
Fig. 13. The appearance of a YBCO thin film and contact pole	15
Fig. 14. Equivalent circuits of the matrix-type SFCL with 1×3 matrix	16
Fig. 15. The diagram of an SFCL with an integrated reactor	17
Fig. 16. The fixed shapes of an integrated reactor	18
Fig. 17. The shunt coil in a current-limiting part	20
Fig. 18. A schematic diagram using EMTP in single phase	21
Fig. 19. The resistance curve of the superconducting element using EMTP	22
Fig. 20. Current waveforms of the matrix-type SFCL using EMTP	23
Fig. 21. The simulated circuit for single line-to-ground fault in the three-phase distribution power system	24

Fig. 22. Current limiting characteristic curves of an matrix-type SFCL with single line-to-ground fault in the distribution power system	25
Fig. 23. The basic structure of a reactor	28
Fig. 24. The improved structure of a reactor	31
Fig. 25. The structure of a reactor by Maxwell 3D	33
Fig. 26. The cross sections of a reactor by Maxwell 3D	34
Fig. 27. The magnetic field of a reactor	36
Fig. 28. The magnetic field of a improved reactor	37
Fig. 29. The distribution shapes of magnetic field in a external reactor	39
Fig. 30. The distribution shapes of magnetic field in an improved external reactor	39
Fig. 31. The magnetic flux density of inner center reactors	40
Fig. 32. Equivalent circuits of the matrix-type SFCLs with 2×3 matrix	42
Fig. 33. The current curves of a 2×3 matrix-type SFCL with separated reactors ($L_{TC} = 240$ turns)	44
Fig. 34. The current curves of a 2×3 matrix-type SFCL with separated reactors ($L_{TC} = 520$ turns)	45
Fig. 35. The voltage curves of a 2×3 matrix-type SFCL with separated reactors ($L_{TC} = 240$ turns)	46
Fig. 36. The voltage curves of a 2×3 matrix-type SFCL with separated reactors ($L_{TC} = 520$ turns)	46
Fig. 37. The resistance curves of a 2×3 matrix-type SFCL with separated reactors ($L_{TC} = 240$ turns)	48

Fig. 38. The resistance curves of a 2×3 matrix-type SFCL with separated reactors ($L_{TC} = 520$ turns)	48
Fig. 39. The line current curves according to turn numbers of magnetic coils	50
Fig. 40. The line resistance curves according to turn numbers of magnetic coils	51
Fig. 41. Time interval between quenching point of six-element according to turn numbers of magnetic coils	51
Fig. 42. The current curves of a 2×3 matrix-type SFCL with integrated reactors ($L_{TC} = 170$ turns)	52
Fig. 43. The current curves of a 2×3 matrix-type SFCL with integrated reactors ($L_{TC} = 510$ turns)	53
Fig. 44. The current curves of an SFCL with separated reactors ($L_{TC}=520$ turns, $R_{CLC}=20[\Omega]$)	54
Fig. 45. The current curves of an SFCL with integrated reactors ($L_{TC}=510$ turns, $R_{CLC}=20[\Omega]$)	54
Fig. 46. The voltage curves of a 2×3 matrix-type SFCL with integrated reactors ($L_{TC} = 170$ turns)	55
Fig. 47. The voltage curves of a 2×3 matrix-type SFCL with integrated reactors ($L_{TC} = 510$ turns)	55
Fig. 48. The resistance curves of a 2×3 matrix-type SFCL with integrated reactors ($L_{TC} = 170$ turns)	56
Fig. 49. The resistance curves of a 2×3 matrix-type SFCL with integrated reactors ($L_{TC} = 510$ turns)	56

ABSTRACT

A study on the suppression characteristics for fault current of a matrix-type fault current limiter

Lee, Ju-Hyoung

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

Department of Electrical Engineering,

Graduate School of Chosun University

The domestic power demand has been gradually increased. Therefore, When the short circuit accident occurred in the power system, the fault current was increased. As the counterplan to solve this problem, the superconducting fault current limiter(SFCL), Which provided the zero impedance at normal state and the high impedance at fault state, was proposed. Among the various SFCLs, We investigated the suppression characteristics for fault current of the matrix-type SFCL, which consisted of the trigger and current-limiting parts connected in series. The trigger part connected with the shunt reactor in parallel senses the fault current, and then exposes the magnetic field into the superconducting elements. The current-limiting part connected with resistance-inductance elements in parallel limits the fault current when the line current in the power system exceeds the critical current of the superconducting elements.

We manufactured the matrix-type SFCL with 2×3 matrix structure using the

separated or integrated reactors. For the exact experiment, We simulated the suppression characteristics for fault current of the matrix-type SFCL by using the EMTP program. As a result, the fault current of the system with matrix-type SFCL was limited to 80% lower than that of the system without matrix-type SFCL. We also simulated the effects of the external magnetic field in separated or integrated reactors by using the MAXWELL 3D program. We found that the external magnetic field generated in the integrated reactor was larger than that of the separated reactor. From the result, We found the optimal structure between the reactors and superconducting elements.

We investigated the characteristics of the matrix-type SFCL with separated or integrated reactors according to the variation of resistances and inductances through the experiment. The limited currents of the matrix-type SFCL with separated or integrated reactors after fault instant were nearly identical. This was because the total impedance of the matrix-type SFCLs was nearly same. In the meantime, the differences of voltages among superconducting elements in matrix-type SFCL with integrated reactor were decreased because the differences of critical currents among the superconducting elements were reduced by the external magnetic field.

Consequently, we confirmed that the critical behavior among the superconducting elements of the matrix-type SFCL with an integrated reactor was more improved than that of the matrix-type SFCL with the separated reactors due to the generation of the larger external magnetic field. In addition, the volume of the matrix-type SFCL with an integrated reactor could be reduced when it was compared to the matrix-type SFCL with the separated reactors.

I. 서 론

현재 국내 전력계통(154kV, 및 345kV)은 송전선로가 비교적 짧고, 전력공급의 신뢰도 향상 및 계통 운용의 유연성을 위하여 송전선로가 계통 변전소간을 연계하여 망상(mesh network) 형태로 구성되어 있다. 또한, 최대 수요전력의 증가에 따른 지속적인 설비 증설로 계통 등가임피던스가 점점 작아져 사고시의 고장전류(fault current)가 계속 증대되고 송전계통의 차단기들 중 차단내력을 초과하는 개소가 증가 추세에 있다.[1] 이에 대한 대책으로 모선분리 또는 선로분리와 같은 고장전류 억제 대책이 적용되고 있거나 또는 이의 채택이 계획되어 있다. 이와 같은 고장전류 억제 대책에도 불구하고 계속 증대되는 고장전류에 대응하기 위해 고가의 차단기를 적용할 예정에 있다. 그러나 차단기의 차단내력을 증가시키는 것은 기술적인 면 및 경제적인 면을 고려할 때 많은 제약이 따르게 되고, 상위전압 계통 차단내력을 상승시키면 하위전압 계통 차단내력도 동시에 상승되어 이에 대한 대책이 필요하게 되는 악순환이 뒤따르게 되므로 필요 충분한 사전 검토를 실시해야 한다.[2-4] 고품질 전력공급을 목표로 이러한 손실을 최소화하기 위한 해결책의 하나인 초전도 한류기(superconducting fault current limiter: SFCL)는 신개념의 보호기기로서 기존의 보호기기보다 정상상태에서 계통에 미치는 손실이 적고, 사고 발생 후 고속스위칭 동작에 따른 회복속도가 빨라 즉각적인 재투입이 가능하다는 장점이 있다. 또한 사고발생 후 차단기가 사고를 감지하여 동작되는 시간에 비해 고장전류를 빠르게 감소시키므로 선로의 차단용량을 증가시키는 효과를 지닌다.[5-11]

초전도 한류기는 계통 내 전력응용을 안정적으로 하기 위하여 저항형, 유도형, 변압기형 등의 다양한 형태가 연구 및 개발되고 있다. 그 중 저항형 형태는 원리와 구조가 간단하여 소형화가 가능하고 국내 설치 공간에 따른 제약을 해결할 수 있으나, 초전도 소자의 제조 공정상 불균일한 특성으로 각각의 임계전류가 다르기 때문에 사고발생 직후 초전도 소자의 불균형 전압분배를 야기한다. 이와같은 불균일 쥬치 문제를 해결하기 위하여 다양한 종류의 한류소자 개발과 최적화 구조설계를 중점으로 활발한 연구가 진행되고 있다[12-21].

따라서, 본 연구에서는 EMTP 시뮬레이션을 이용하여 매트릭스형 초전도 한류기의 필요성을 확인하였다. 또한 전자장 해석 프로그램인 Maxwell 3D 프로그램을 이용하여 외부자장 인가 리액터의 최적 조립 조건을 도출하기위한 전자장 해석 프

로그램인 Maxwell 3D 프로그램을 이용하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 외부 자장 인가 리액터의 설계·제작하여 일체화된 모듈을 통한 실험 및 비교·분석을 하며 각 조건에 따른 전류제한 특성 분석을 실험하였다. 그리하여 초전도 소자들의 퀘칭 특성 및 사고전류제한 실험에 대한 분석결과를 통해 최적화된 매트릭스형 초전도 한류기의 특성 및 사고전류 저감특성을 분석하였다.

II. 매트릭스형 초전도 한류기의 동작원리

A. 초전도 한류기의 정의와 특성

1. 초전도 소자의 기본 동작원리

초전도 소자의 퀘치 현상은 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하여 발생한다. 초전도 현상을 유지하기 위해서는 전류, 자장, 온도가 그림 1에서 보여주는 바와 같이 임계곡면의 내부에 존재해야 된다. 일반적인 초전도 소자는 저항 없이 전류통전이 가능하지만, 실제 흐를 수 있는 전류의 상한점인 임계전류밀도가 존재한다. 초전도 소자는 외부자기장을 인가한 상태에서 전류를 흘릴 경우, 초전도 내부에 존재하는 자속선과 수직방향으로 Lorentz 힘을 받게 되는데, 이러한 힘에 비례하여 초전도 소자 내에 자속선이 유동하게 되어 전기저항이 발생된다. 따라서 외부자기장이 인가한 상태에서는 외부자장이 인가되지 않을 때보다 낮은 임계 전류값을 가지게 된다.

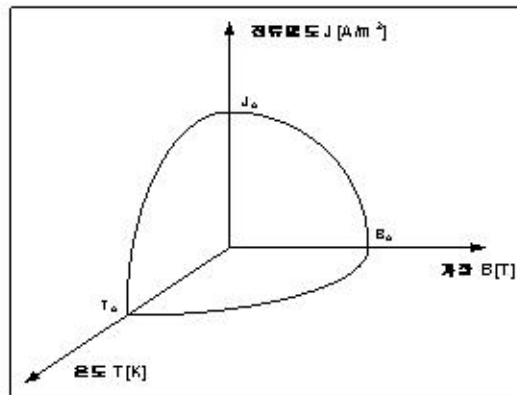


Fig. 1. The critical surface of a superconductor

퀘치특성을 분석하기 위한 자기장이 인가되지 않는 실험조건에서는 초전도 소자를 선로에 직접 연결하기 때문에 유도 성분이 거의 없어 자기장의 영향을 받지 않는다. 따라서 그림과 같이 전류와 온도에 의한 임계특성으로 나타낼 수 있다.

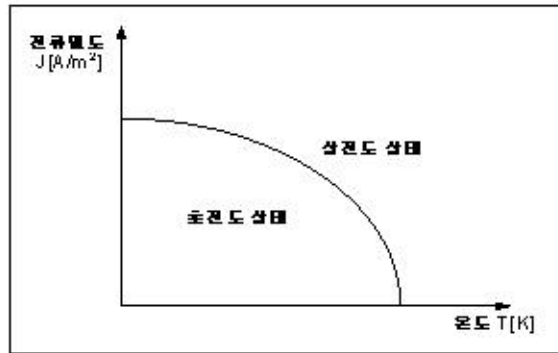


Fig. 2 The phase diagram of a superconductor

그림 2를 통해 알 수 있듯이 초전도 상태를 유지하고 있다하더라도 임계전류나 임계온도 중 어느 하나만이라도 그 값을 넘으면 상전도 상태로 전이를 일으킨다는 것을 알 수 있다. 상태 전이가 일어나면 저항이 발생하게 되는데, 이때 전압(V)과 전류(I)는 식 (1)과 같은 비선형 관계를 갖는다.

$$V \propto I^n \tag{1}$$

어떤 이유로 소자의 저항이 발생하게 되면 $P=I^2R$ 의 Joule열이 발생하여 초전도 소자의 온도가 증가할 것이다. 그림 1의 임계곡면을 보면 온도(T)가 증가 하면 임계전류 밀도(J_c)와 임계 자장(B_c)이 감소할 것이다. 이러한 변화가 작기 때문에 동작점이 임계 곡면 내부에 있다면 퀘치가 발생하지 않을 것이다. 하지만 선로에 흐르는 전류가 증가하여 발생하는 열이 많아지면 J_c 와 B_c 가 더욱 감소하게 될 것이며, 이는 임계전류가 작아져서 작은 선로전류에도 퀘치가 일어날 수 있다는 의미가 될 것이다.

이처럼 저항이 급격히 증가하면 더 많은 열이 발생하는데, 초전도 소자에 입혀진 금박막의 비저항이 상전도 상태일 때의 비저항보다 훨씬 작기 때문에(약 1%) 퀘치가 발생한 초전도 소자에서는 전류가 초전도 소자를 우회하여 금박막으로 흐르게 되고 금박막에서 열이 발생하게 된다. 이렇게 발생된 열은 초전도 소자의 온도를 증가시키게 되고 이 과정이 다시 반복되어 퀘치가 진행된다. 다시 말하면 퀘치에

진행은 저항에

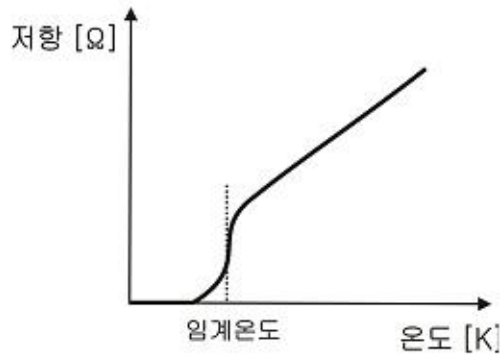


Fig. 3. The resistance-temperature curve of a superconductor

의한 열의 발생과 발생된 열의 움직임에 의해 크게 영향을 받게 된다.

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

$$P(r,t) = C \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} + G(T(r,t) - T_b) - \nabla \cdot (K \nabla T(R,t)) \quad (2)$$

$$R = aT + b \quad (3)$$

$$I = V_a \sin \omega t / (R + R_o) \quad (4)$$

여기서 P는 소비전력, C는 열용량, K는 열전도도, G는 액체질소로의 열전달계수, T_b는 액체질소의 온도, a와 b는 상수, R_o와 R은 각각 소자와 회로의 선로 저항이다. 저항이 발생한 부분에서 전력 P가 소비되어 발생한 열이 일부 초전도 소자(YBCO) 자신의 온도를 올리는데 사용되고(식 (2)의 우변 첫째항), 일부의 열은 주변의 액체질소와 sapphire기판으로 전달(우변의 둘째항)되며, 나머지의 열(우변의 셋째항)은 열 부분으로 전달됨을 나타낸다. 초전도 소자에서 국부적인 퀸치가 발생하였을 때 소자의 온도 변화를 설명해주므로 저항과 온도의 연관성은 그림 3으로부터 초전도 소자의 저항 변화를 이해할 수 있다. 초전도 소자의 온도가 증가함에 따라 식(3)에 의해 소자의 저항이 선형적으로 증가되고, 식(4)에 의해서 회로에 흐르는 전류가 감소되어 제한된다는 것을 알 수가 있다.[6]

2. 초전도 한류기의 동작특성

그림 4는 초전도 한류기에 대한 실험회로도이다. 정상시에는 일반적으로 통전전류가 흐르지만 전력계통내 임계전류 이상의 고장전류가 초전도 소자에 유입되는 경우 초전도 소자에서 발생된 임피던스가 선로에 투입되어 고장전류를 빠르게 제한하는 방식이다.

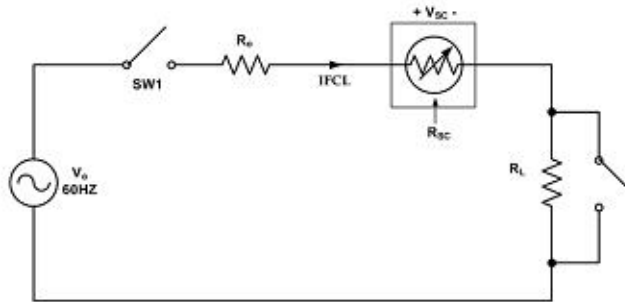


Fig. 4 The experimental circuit of the SFCL

초전도 소자의 동작특성을 설계에 활용하기 위해 그림 5와 같이 초전도 한류기의 존재성 여부를 비교하였다. 초전도 한류기가 없는 경우에는 사고전류가 지속적으로 계통내에 유입되어 전력기기에 영향을 미쳐 전체시스템의 안정성을 저하시키는 요인으로 작용한다. 반면에 초전도 한류기가 있는 경우인 그림 5에서 나타나듯이 1주기 이내에 고장전류가 신속하게 제한됨에 따라 전체시스템의 안정을 도모할 수 있다.

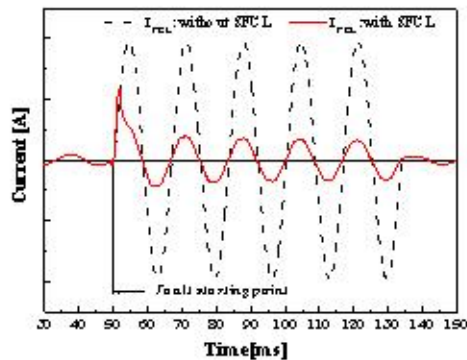


Fig 5. The current curves of the system with and without SFCL

B. 매트릭스형 초전도 한류기의 동작특성

1. 매트릭스형 초전도 한류기의 기본원리

매트릭스형 초전도 한류기는 trigger matrix part와 current-limiting matrix part로 나누어져 있다. Trigger matrix part는 고장전류가 발생되었을 때 사고를 감지하는 역할인 사고감지 소자와 각 한류소자에 자장을 인가하는 외부자장코일로 나뉜다. 또한 current-limiting matrix part는 고장전류를 제한하는 한류소자와 병렬로 연결되어 분로역할을 하는 shunt coil로 구성된다.

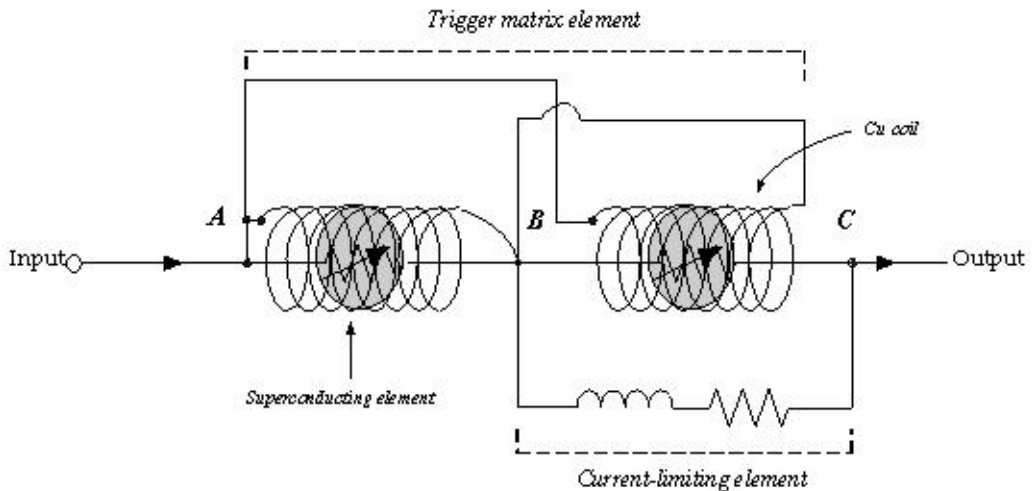


Fig. 6. The basic module of an matrix-type SPCL

그림 6은 1×2 모듈로 이루어진 매트릭스형 초전도 한류기의 기본 형태를 나타낸 것이다. 기본 모듈구조인 초전도 소자의 영저항 특성에 의해 사고전류가 유입되기 전에는 초전도 소자로만 통전된다. 하지만 선로전류의 증가에 따라 사고전류가 trigger part내 사고감지 소자의 임계 전류값 이상으로 초과할 경우, 초전도 소자에서 켄치가 발생하게 되어 정상 상태에 비하여 상대적으로 높아진 저항때문에 고속 스위칭을 하게 된다. 따라서 고장전류의 일부는 각각의 사고감지소자의 병렬 인덕턴스로 분기되어 분류전류에 따른 임피던스를 발생시켜 자계를 사고감지 소자와

한류 소자의 초전도 소자에 동시에 인가함으로써 각각의 초전도 소자에 퀘치를 유도한다. 즉, trigger part내 초전도 소자는 외부장치 없이 고장전류를 감지하여 current-limiting part내 초전도 소자의 한류작용을 가속시키는 역할을 수행한다. Current-limiting matrix part의 한류소자 외부로 연결된 shunt coil은 매트릭스형 한류소자가 고장전류를 제한하는 동안 유입된 사고 전류의 일부를 분기하여 초전도 소자의 I^2R 에 의한 열적 부담을 감소시키고, 사고 후 한류소자의 빠른 정상 상태 회복에 기여한다. 또한 용량을 증대할 경우 각 한류소자의 전압을 균등하게 분담하여 용량증대를 용이하게 한다.

2. 매트릭스형 초전도 한류기의 회로구성

그림 7은 초전도 소자의 설계구조에 따른 켄치 및 전류제한 특성의 측정을 위한 실험회로도이다. 매트릭스형 초전도 한류기는 A구간의 trigger part와 B구간의 current-limiting part로 구성된다.[7] R_0 은 전압변화를 측정하기 위한 표준저항 1Ω 이며, 부하저항 R_L 은 시스템에서 정상상태와 단락상태의 부하를 모의하기 위해 선로에 연결하였으며, 그 값은 50Ω 으로 하였다. SW_1 와 SW_2 는 전원전압을 인가하기 위한 스위치와 사고를 발생시키기 위한 스위치이다.

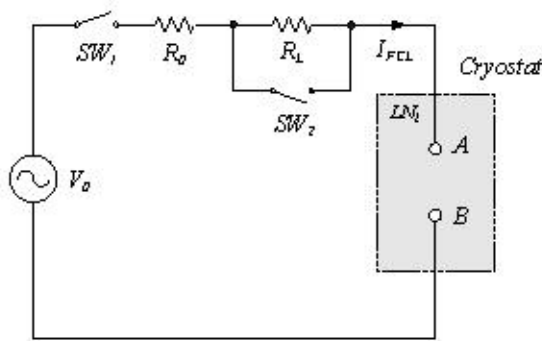


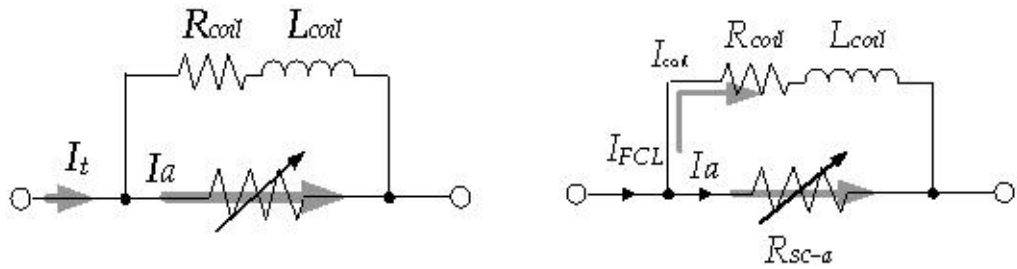
Fig. 7. An experimental diagram of the matrix-type SFCL

사고를 모의하기 위해서 SW_1 을 닫은 후 일정시간 뒤 SW_2 를 이용하여 사고전류를 발생시켰으며, 현재 전력계통내 사용되고 있는 차단기가 5주기 안에 동작하는 것을 감안하여 사고각 0° 에서 사고 주기를 5주기로 설정하여 실험하였다. 모의실험 시스템에 대한 회로방정식은 다음과 같다.

$$V_0 = (R_0 + R_L) \cdot I_{FCL} \quad (5)$$

$$V_0 = V_m \sin \omega t \quad (6)$$

식 (5)은 SFCL이 정상 상태일 때를 나타내며, 식 (6)은 인가전압을 나타낸다. 시스템의 전원전압 V_0 는 $40V_{rms}/60Hz$ 단위로 설정하였다. 실험의 전과정에서 초전도 소자와 외부인가자장코일은 정상조건을 위하여 액체질소 속에 담겨져 있다.



(a) Before the quench generation

(b) After the quench generation

Fig. 8. The quench mechanism of the current limiting element

그림 8은 A-B구간의 단위소자와 자장코일에 대한 세부구조이다. 사고가 발생한 순간에 전체전류($I_t = I_0$)가 초전도 소자의 임계전류이상으로 선로에 통전될 때, 발생된 초전도 소자의 저항으로 인하여 고장전류($I_{FCL} = I_{coil} + I_0$)는 자장코일과 초전도 소자로 분담되어 흐르게 된다. 코일의 임피던스는 식 (7)과 같으며, 자장코일과 초전도소자가 병렬구조이므로 소자전압을 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{coil} = R_{coil} + jX_{coil} \quad (7)$$

$$V_{sc-a} = I_a \cdot R_{sc-a} = R_{coil} \cdot I_{coil} + L \frac{dI_{coil}}{dt} \quad (8)$$

사고 전에는 초전도 소자가 저항이 0이므로 대부분 초전도 소자로 흐르므로 $I_{coil}(t)$ 은 0이 되어 식 (9)와 같다.

$$\frac{dI_{coil}}{dt} + \frac{R}{L}I_{coil} = 0, \quad I_{coil}(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \quad (9)$$

따라서, 초전도소자에 빠른 자장인가를 위해서는 사고가 발생한 순간의 자장코일과의 상호관계에 대한 전류응답도 고려해야 한다.

III. 매트릭스형 초전도 한류기의 구조와 동작특성

A. 초전도 소자 설계 및 제작

초전도 한류소자는 YBCO 박막을 이용하여 제작하였다. YBCO 박막의 임계온도는 87~88K이며 임계전류밀도는 $2\sim 3\text{MA}/\text{cm}^2$ 이내로 박막 전면에서 $\pm 0.5\%$ 로 균일하였다. YBCO 박막은 제조공정상 두께의 불균일성으로 인해 열이 발생하는데 금 박막이 증착되어 있어 열을 분산시킨다. 금이 증착된 YBCO 박막은 meander-line 형태로 식각하고 개발하여 한류소자를 제작하였다. 그림 10은 YBCO 박막의 식각된 모양을 보여주고 있으며 상세사양은 표 1에 나타내고 있다.[8-10]

그림 10은 이러한 YBCO 박막을 지지대 내부에 위치시키기 위한 홀더의 설계도를 나타낸 것이다.

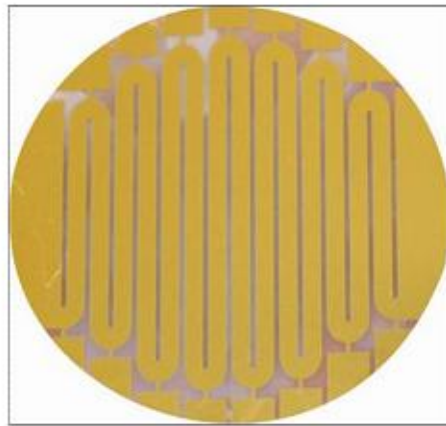


Fig. 9. The pattern shape of a YBCO thin film

Table 1. Specification of a YBCO thin film

Parameter	Value	Unit
소자 직경	2	inch
스트립 폭	2	mm
전체 길이	540	mm
YBCO층 두께	0.3	μm
금층 두께	0.1~0.2	μm
임계 온도	87	K

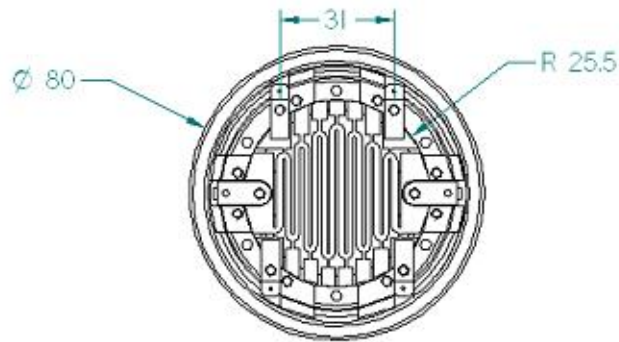


Fig. 10. The design of a circular holder for a YBCO thin film

1. 초전도 소자의 임계특성

그림 11은 실험에 사용된 초전도 소자 6개의 V-I특성을 나타낸 것이다. 그림에서 1[mV/cm]를 기준으로 하였을 때, 초전도 소자 A~F가 켜치되는 임계전류는 각각 17.7, 19.3, 19.9, 19.4, 20.0, 20.4A이었다. 이처럼 임계전류값이 다른 이유는 제작상 불균일한 임계 전류값 때문이다.

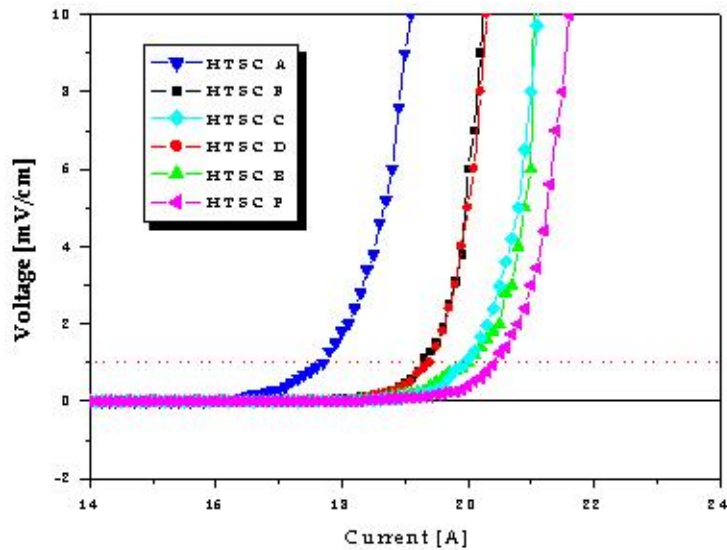


Fig. 11. The current-voltage curves of each superconducting element

B. 매트릭스형 초전도 한류기용 coil 설계 및 제작

1. Trigger coil 및 current-limiting coil의 설계 및 제작

그림 12는 trigger coil 지지대의 설계도를 나타낸 것이다. Trigger coil의 설계에 있어 중요한 점은 coil 내부로 들어가는 초전도 소자와의 절연문제이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 베이클라이트 재질의 coil 지지대를 제작하였다. 초전도 소자 중 YBCO 박막을 이용할 시 coil 중앙에 위치하여 최대의 자장효과를 볼 수 있도록 하였다. 홀더와 지지대의 고정은 저온에서의 장시간 사용으로 인한 변형, 변질을 막기 위해 SUS재질의 볼트·너트를 사용하여 고정하였고, YBCO 박막 하부에서 퀘칭시 발생하는 기포의 영향을 최소화시키기 위해 박막과 지지대 사이를 3mm 가량 띄워 놓았다.

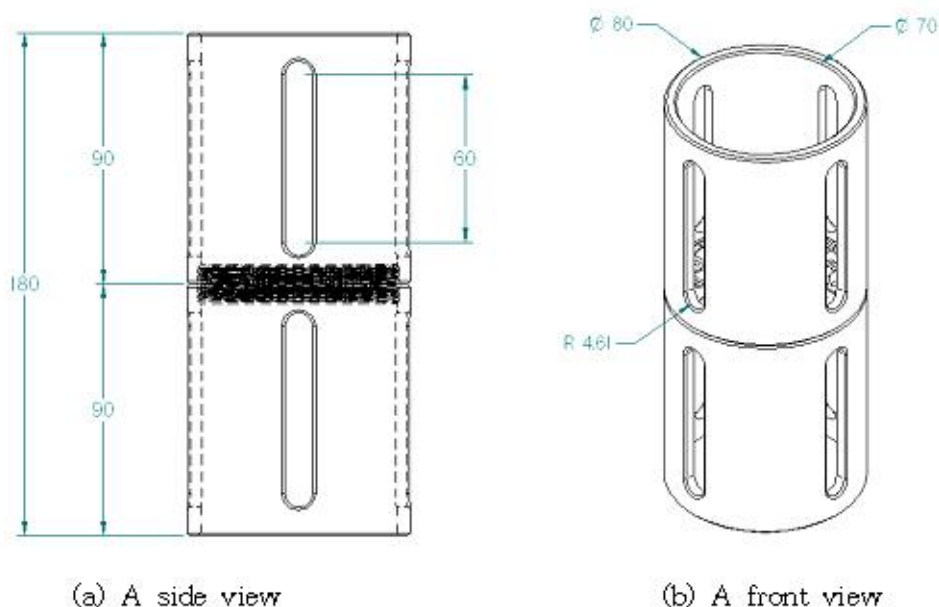


Fig. 12. The design drawing of the holder for the trigger coil



(a) A holder for a YBCO thin film



(b) Voltage taps

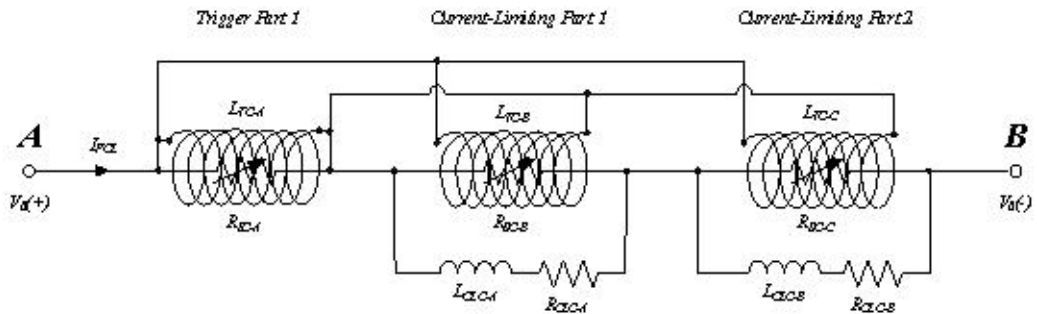


(c) Current tap

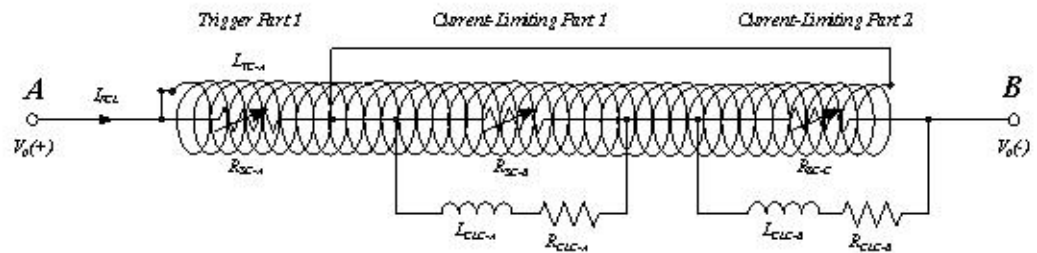
Fig. 13. The appearance of a YBCO thin film and contact pole

그림 13 (a)는 trigger coil에 설치된 원형의 박막에 초전도 소자에 사고전류를 흐르게 하기 위해 전류탭에서 나온 선과 선로를 연결하는 단자가 결합된 초전도 박막의 사진이다. 초전도 소자와 상전도체의 접합에 있어서 중요한 점은 균일한 접촉 저항으로 전류리드선과 전극이 접합되어야 한다. 서로 다른 도체를 접촉할 경우에는 접합점에서 hot-spot 발생으로 인해 열이 생기게 된다. 이러한 발열은 초전도 소자의 임계온도를 저하시키고, 소자의 특성을 떨어뜨리는 요인이 된다. 전류탭은 초전도 박막과의 전극이 나사를 이용하여 직접 접촉이 되고, 전류 리드선과 전극이 연결되는 구조이다. 전압탭은 전극의 tip 부분과 초전도 박막이 직접 접촉이 되고, 전극은 나사를 조정하여 고정시키며, 전압 리드선과 전극이 연결된다. 전극은 구리 소재로 만들었는데 구리 접촉자와 박막의 Au층 사이의 접촉저항의 균일성과 기계적 안정성을 확보하기 위해 그 사이에 0.25mm두께의 인듐(In) foil과 은풀(silver paste)을 삽입하고 나사를 조여 고정하였다.

2. Trigger part 및 Current-limiting part 설계



(a) An SFCL with separated reactors



(b) An SFCL with an integrated reactor

Fig. 14 Equivalent circuits of the matrix-type SFCL with 1×2 matrix

기존의 매트릭스형 초전도 한류기를 위해 제작된 전류제한 소자는 그림 14 (a)와 같이 trigger part 및 current-limiting part의 초전도 소자에 각각의 외부자장인가 리액터가 그 외부를 감싸고 있는 구조로써 3개의 리액터를 가진다. 그러나 그림 14 (b)와 같이 하나의 리액터에 1개의 trigger part용 초전도 소자와 current-limiting 용 소자로 설계할 수 있다. 그리하여 하나의 외부자장인가 리액터에 넣어 1개의 리액터로 할 수 있다. 그러므로 기존의 3개로 분리된 리액터를 가지게 되어 규모의 크기를 줄임과 동시에 자장의 효과가 줄어들지 않도록 일체형의 사고전류 제한소자를 설계·제작하였다. 그림 14 (b)는 일체형 사고전류제한 소자의 설계도를 나타낸 것이다. 1개의 trigger part와 current-limiting part가 1개의 리액터에 들어가 있는 일체형 외부자장인가 리액터는 기존과 동일한 자장을 각 초전도 소자에 인가할

수 있을 뿐만 아니라 trigger-part의 초전도 소자에 병렬로 연결되는 리액터의 수가 줄어들어 큰 전류를 흘릴 수 있어 자장의 크기를 증가시킬 수 있다.

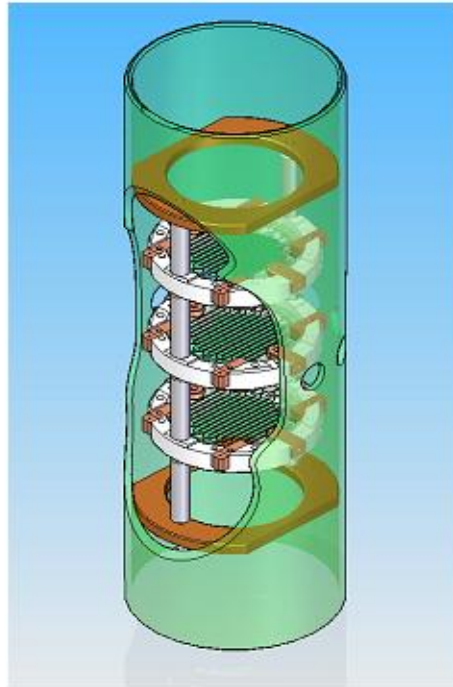


Fig. 15. The diagram of an SFCL an with integrated reactor

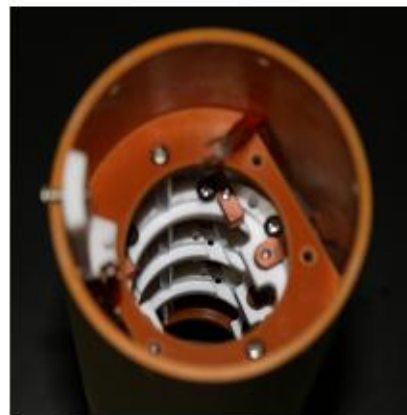
그림 15는 제작된 일체형 외부자장인가 리액터의 사진을 나타낸 것이다. 3개의 초전도 소자는 3cm의 간격으로 리액터의 중심을 기준으로 배치되어 있으며, 외부틀의 중앙에는 초전도 소자의 퀘치시 발생하는 버블이 유출될 수 있도록 비워두었다. 이렇게 제작된 일체형 외부자장인가 리액터는 전자장해석의 결과를 바탕으로 그림 15와 같이 리액터 중심은 일정 간격을 두고 공극을 만들어 코일을 감았다. 또한 기존의 리액터와 턴수 증가에 따른 특성을 비교하기 위해 리액터의 턴수를 240, 340, 510턴으로 하여 각각 텀을 만들었으며, 그 제원은 표 2, 3과 같다. 내부에 존재하는 3개의 초전도 소자에 전류를 공급하기 위한 선은 리액터의 외부에 단자대를 설치하여 조립에 편리하도록 하였으며, 자장의 불필요한 유도장해를 최소화시키기 위해 리액터 내부는 전류·전압단자와 고정나사 4개를 제외하고 모두 베이클라

이트와 테프론 재질로 제작하였다.

Trigger coil은 절연유가 발라진 1.4mm의 코일을 사용하였으며, 권선수는 240, 340, 520회의 3층으로 감아 외부에서 연결함으로써 권선수의 조절을 용이하게 하였다. 표 3은 감긴 trigger coil의 임피던스를 나타낸 것이다.



(a) The fixed holder



(b) The fixed shape of an integrated reactor

reactor



(c) An integrated reactor

Fig. 16. The fixed shapes of an integrated reactor

Table 2 The parameter values of the separated reactors

Parameter	The Number of Turns	Value of Inductance [mH]	Value of Resistance [m Ω]
LTC-A	240	2,19	271,8
	380	5,68	484,3
	520	10,86	716,0
LTC-B	240	2,11	239,2
	380	5,31	418,3
	520	10,01	688,3
LTC-C	240	2,08	271,4
	380	5,48	483,5
	520	10,09	693,7
LTC-D	240	1,97	262,5
	380	5,05	400,3
	520	9,59	694,2
LTC-E	240	1,62	252,7
	380	4,23	452,5
	520	8,19	668,3
LTC-F	240	2,0	263,3
	380	5,26	473,3
	520	10,17	703,3
LCLCA	100	1,09	0,23 [Ω]
LCLCB	100	1,10	0,24 [Ω]
LCLCC	100	1,08	0,24 [Ω]
LCLCD	100	1,07	0,24 [Ω]
RCLCA~RCLCB	-	-	10, 15, 20 [Ω]

Table 3 The parameter values of an integrated reactor

	Turn's Number	Inductance [mH]	Resistance [Ω]
A-Module (L _{T1})	170	4.55	1.18
	340	7.6	2.36
	510	12.54	3.58
B-Module (L _{T2})	170	4.5	1.17
	340	7.54	2.36
	510	12.57	3.58

3. current-limiting part내 shunt coil의 설계 및 제작

그림 17은 current-limiting 부분에 있는 초전도 소자에 병렬로 연결되는 coil을 나타낸 것이다. 저온에서 초전도 소자를 감싸고 있는 trigger coil과는 달리 current-limiting coil은 외부에서 초전도 소자에 병렬로 연결되고 그림과 같이 자체 제작하였다. 표 4는 제작된 shunt coil의 파라미터를 나타낸 것이다.



Fig. 17. The shunt coil in a current-limiting part

Table 4 The parameter values of a shunt coils

	Inductance [mH]	Resistance [Ω]
Coil A	1.09	0.23
Coil B	1.1	0.24
Coil C	1.08	0.24
Coil D	1.07	0.24

IV. 실험결과 및 분석

A. EMTP를 이용한 매트릭스형 초전도 한류기의 사고전류제한 특성 시뮬레이션

1. EMTP-ATP를 이용한 단상 매트릭스형 초전도 한류기의 사고 전류제한 특성 모의

전력계통에 초전도 한류기를 적용 하기 위한 실험을 하기 이전에 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 모의 적용 실험을 해야 한다. 이로 인해 전력계통에서 발생할 수 있는 모든 가정하에서 초전도 한류기의 적용을 고려하여야 한다. 이 장에서는 전력계통 과도해석 프로그램인 EMTP-ATP를 이용하여 매트릭스형 초전도 한류기의 사고전류제한 특성을 모의하였다.[18,19]

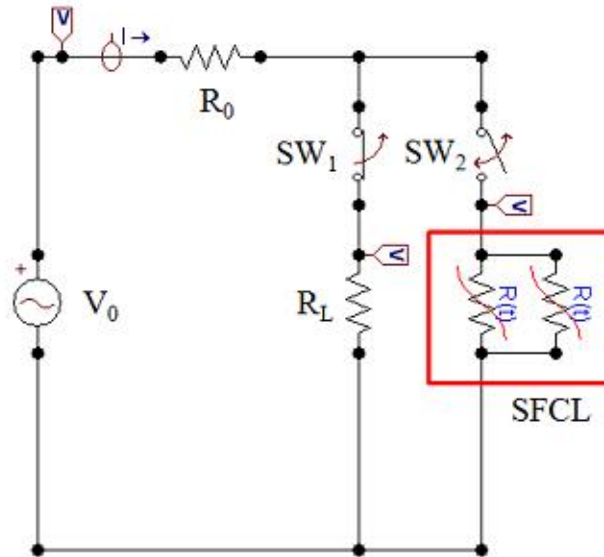


Fig. 18. A schematic diagram using EMTP in single phase

그림 18은 EMTP-ATP 프로그램을 이용하여 2×3구조를 갖는 단상 매트릭스형 초전도 한류기를 설계한 회로도이다. 실험과 동일한 조건으로 모의하기 위해 R_0 와 R_L 은 각각 1과 50[Ω]으로 하였고, 인가전압 V_0 는 320[V]로 하였다. SW_1 과 SW_2 는 각각 전원인가와 사고 발생을 위한 스위치이다. 매트릭스형 초전도 한류기를 모의하기 위해 가변저항을 이용하여 초전도 소자에서 발생하는 저항을 그림 19와 같이 설계하였다. 이는 실제 실험을 통해 얻은 저항곡선을 기본으로 한 것이다.

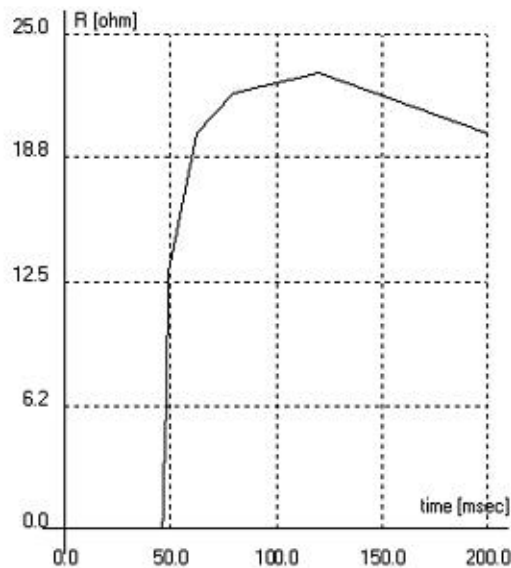
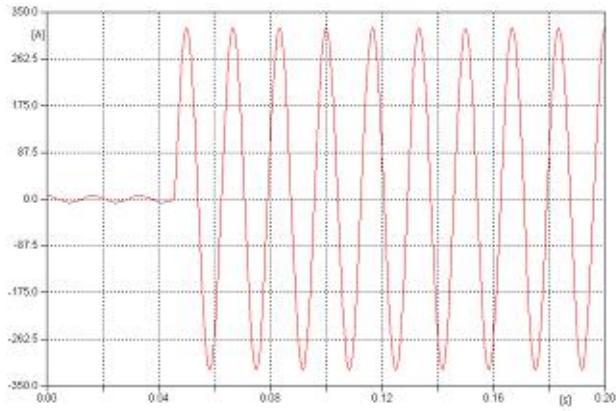


Fig. 19. The resistance curve of the superconducting element using EMTP

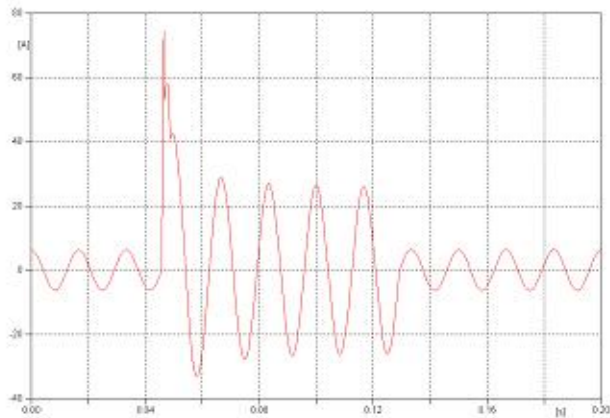
그림 20 (a)와 (b)는 EMTP-ATP 프로그램을 이용해 매트릭스형 초전도 한류기의 유무에 따른 사고전류 제한 특성곡선을 나타낸 것이다. 매트릭스형 초전도 한류기가 없는 경우 사고전류는 320A까지 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 매트릭스형 초전도 한류기가 있는 경우 그림 22과 같이 사고전류는 76.4A로 제한되었다. 또한 정상상태에서 흐르는 전류는 6A로서 실험 데이터와 거의 같았다.

EMTP-ATP 프로그램을 이용하여 2×3구조를 갖는 단상 매트릭스형 초전도 한류기를 모의한 결과, 실험 데이터와 거의 일치한다는 것을 확인하였으며, 이로써

시뮬레이션 결과의 신뢰성을 입증할 수 있었다.



(a) Without superconducting element



(b) With superconducting element

Fig. 20. Current waveforms of the matrix-type SFCL using EMTF

2. 배전계통에서 삼상용 매트릭스형 초전도 한류기를 적용하기 위한 시뮬레이션

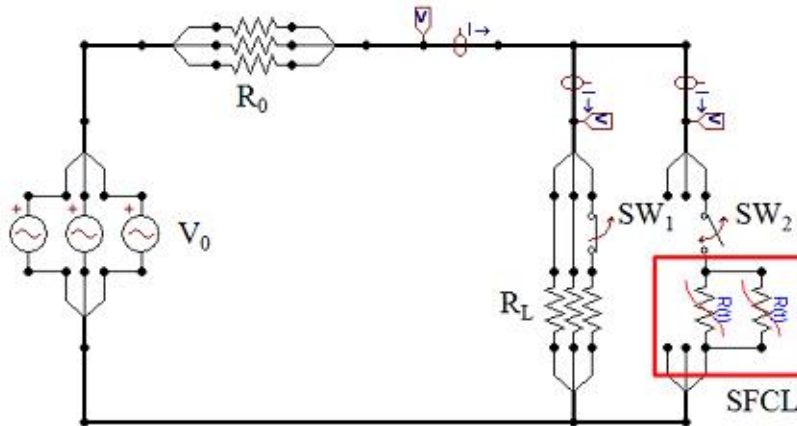
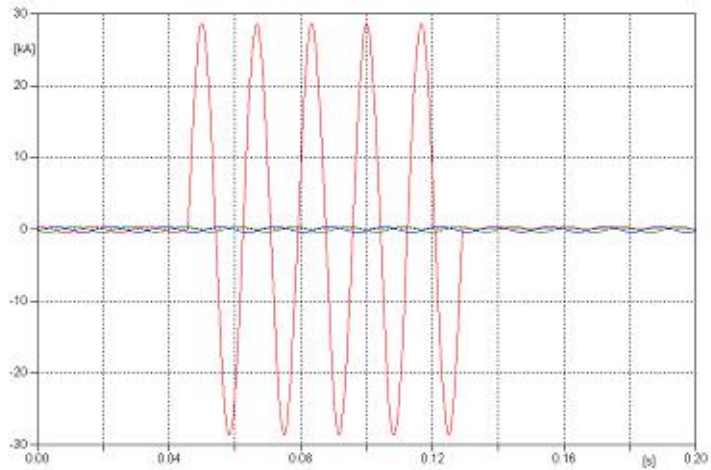
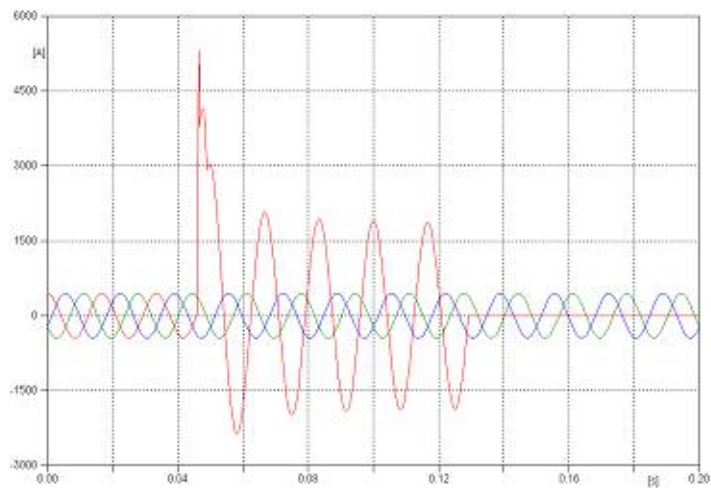


Fig. 21. The simulated circuit for single line to ground fault in the three-phase distribution power system

EMTP-ATP 프로그램을 이용하여 22.9kV급 배전계통으로 삼상용 매트릭스형 초전도 한류기를 적용하기 위해 그림 23과 같이 시뮬레이션 회로도를 설계하였다. 인가전압(V_0)은 배전계통의 공칭 전압인 22.9kV로 하였으며, SW_2 를 이용하여 3상 중 R상만 지락시켜 사고를 모의하였다. R_0 와 R_L 은 각각 1과 50 Ω 으로 설정하였다.



(a) Without superconducting element



(b) With superconducting elements

Fig. 22 Current limiting characteristic curves of an matrix-type SPCL with single line-to-ground fault in the distribution power system

그림 24과 25는 삼상용 매트릭스형 초전도 한류기의 유무에 따라 배전계통에서 발생하는 사고전류의 특성곡선을 나타낸 것이다. 초전도 한류기가 없는 경우 22.9kV급 배전계통에서 발생하는 사고전류는 28.5kA까지 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 사고전류는 배전계통에 배전용 변압기의 절연파괴나 수용가의 정

전 등 심각한 악영향을 미칠 수 있다. 그러나 삼상용 매트릭스형 초전도 한류기가 설치된 경우 1선 지락사고시 사고전류가 5.35kA까지 제한된다는 것을 확인할 수 있다. 이는 매트릭스형 초전도 한류기가 없는 경우와 비교하였을 때, 사고전류를 81.2%까지 제한시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

이러한 매트릭스형 초전도 한류기를 22.9kV급 배전계통에 설치함으로써 배전급 변압기 및 차단기 등 배전계통의 보호기기들을 사고로부터 보호할 수 있으며, 사고 발생으로 인한 악영향이 송전계통으로 파급되는 것을 미연에 방지할 수 있을 것으로 사료된다.

A. 외부자장인가 리액터의 최적조립을 위한 전자장 해석

1. 외부자장인가 리액터의 자계 방정식

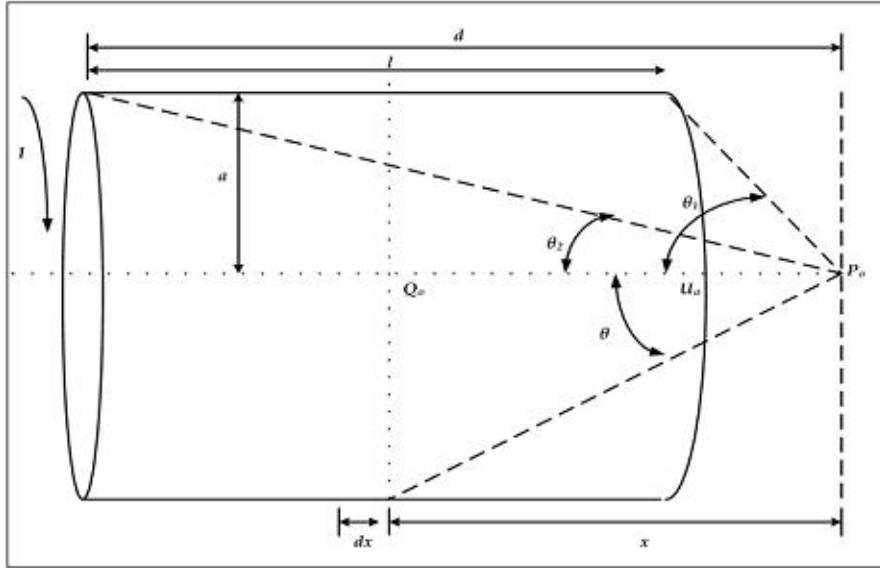


Fig. 23. The basic structure of a reactor

매트릭스형 초전도 한류기의 구성요소 중 하나인 외부자장인가 코일은 trigger 영역에 있는 초전도 소자와 병렬로 연결된다. 외부자장인가 코일은 유한한 길이를 갖는 솔레노이드로서 P_0 에서의 자계를 구하기 위해서 biot-savart 법칙을 이용하였다. 길이 l [m], 반경 a [m], N 번의 코일이 감긴 유한장 솔레노이드에 전류 I 가 그림과 같은 방향으로 흐를 때 중심축 상의 중심점인 Q_0 가장자리에 있는 U_0 임의의 P_0 의 자계 H_Q, H_U, H_P 를 구해보았다.

Biot-savart 법칙에 의해 원형 코일에 의한 자계 H 는 N 번의 코일이 감겨 있으므로 다음의 식 (10)과 같다.

$$H = \frac{Na^2 I}{2(a^2 + x^2)^{3/2}} [AT/m] \quad (10)$$

여기서 미소길이 dx 에 의한 자계 dH 를 생각하면 $N=ndx$ 이므로 식 (10)은

$$dH = \frac{na^2 I dx}{2(a^2 + x^2)^{3/2}} [AT/m] \quad (11)$$

로 다시 쓸 수 있다. 또한 그림에서 $a = r \sin\theta$ 이므로

$$\sin\theta = \frac{a}{(a^2 + x^2)^{1/2}} \quad (12)$$

이고

$$\tan\theta = \frac{a}{x}, \quad dx = -\frac{a}{\sin^2\theta} d\theta \quad (13)$$

이다. 따라서 자계 dH 는

$$dH = -\frac{nI}{2} \sin\theta d\theta \quad (14)$$

이므로 점 P에서의 합성자계 H_P 는 $\theta=\theta_1$ 에서 θ_2 까지의 적분이다.

$$H_P = \int_{\theta_1}^{\theta_2} dH = -\frac{nI}{2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta = \frac{nI}{2} (\cos\theta_2 - \cos\theta_1) [AT/m] \quad (15)$$

여기서 $\cos\theta_1$ 과 $\cos\theta_2$ 는

$$\cos\theta_1 = \frac{d-\ell}{\{(d-\ell)^2 + a^2\}^{1/2}} \quad (16)$$

$$\cos\theta_2 = \frac{d}{(d^2 + a^2)^{1/2}} \quad (17)$$

이다. 식 (16)과 (17)을 식 (15)에 대입하면 H_P 를 구할 수 있다.

$$H_P = \frac{nI}{2} \left(\frac{d}{\sqrt{a^2 + d^2}} - \frac{d - \ell}{\sqrt{a^2 + (d - \ell)^2}} \right) [AT/m] \quad (18)$$

중심점 Q_0 에서의 합성자기 H_Q 는 $d = \ell/2$ 이므로 식 (16), (17)에 대입하면

$$\cos\theta_1 = \frac{-\ell}{2\sqrt{(\ell^2/4) + a^2}} \quad (19)$$

$$\cos\theta_2 = \frac{\ell}{2\sqrt{(\ell^2/4) + a^2}} \quad (20)$$

이므로 식 (15)에 대입하면

$$H_Q = \frac{nI}{2} \left(\frac{\ell}{2\sqrt{(\ell^2/4) + a^2}} - \frac{-\ell}{2\sqrt{(\ell^2/4) + a^2}} \right) = \frac{n\ell I}{\sqrt{\ell^2 + 4a^2}} [AT/m] \quad (21)$$

으로 나타낼 수 있다.

또한 가장자리 점 U 에서의 합성자기 H_U 는 $d = \ell$ 이므로 식 (16)과 (17)에 대입하면

$$\cos\theta_1 = 0 \quad (22)$$

$$\cos\theta_2 = \frac{\ell}{\sqrt{\ell^2 + a^2}} \quad (23)$$

이므로 식 (15)에 대입하면

$$H_U = \frac{nI}{2} \left(\frac{\ell}{\sqrt{\ell^2 + a^2}} \right) = \frac{n\ell I}{\sqrt{4\ell^2 + 4a^2}} [AT/m] \quad (24)$$

이다.

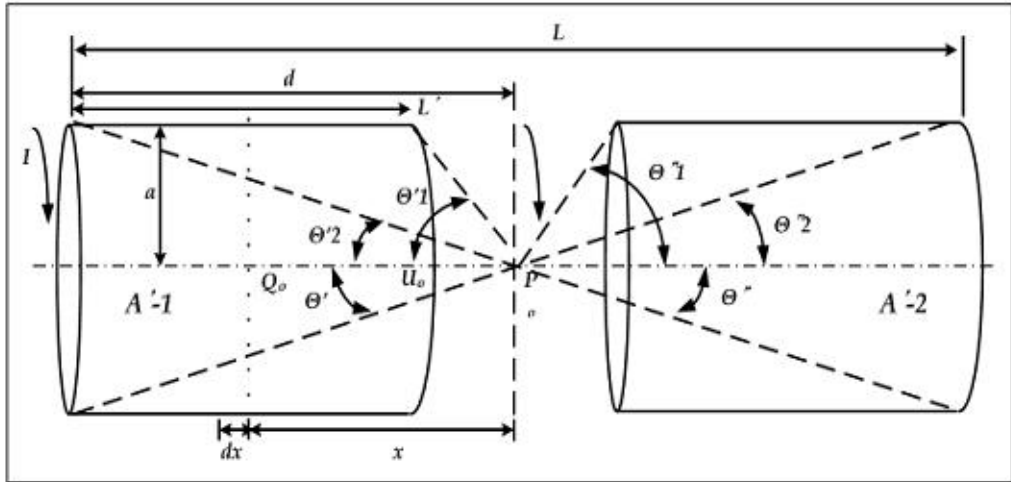


Fig. 24 The improved structure of a reactor

그림 24는 2개의 리액터를 이용해 새롭게 고안한 외부자장인가 리액터이다. 기존의 방식은 trigger-part의 초전도 소자에 병렬로 trigger-part 및 current-limiting part에 자장을 인가하기 위한 외부자장인가 리액터를 각각 연결하였다. 이 방식은 다수의 병렬연결로 인해 전류가 분배되어 자장의 크기가 줄어든다. 박막형 YBCO 소자의 특성상 자장에 따른 임계특성의 변화가 적다는 것을 고려할 때 이 방식으로는 좋은 특성을 얻기 힘들다. 그러나 이번에 고안된 외부자장인가 리액터는 중간에 공간을 줌으로써 자장의 크기를 크게 해줄 수 있다.

그림 24는 그림 23의 유한장 솔레노이드의 중간에 코일의 일정 간격만을 준 것으로 평등자계를 갖는다. 이때 두 개의 코일에 흐르는 전류는 I 이고 N 번의 턴이 감겨있을 때 Q' , U' , P' 의 자계를 구해보자. 그림 24의 중심점 P' 에서의 자계 H_P 는 $A'-1$ 과 $A'-2$ 의 중심으로 두 코일의 영향을 모두 받는다.

$$H_P = nI(\cos\theta'_2 - \cos\theta'_1) + nI(\cos\theta''_2 - \cos\theta''_1) [AT/m] \quad (25)$$

여기서 $\cos\theta'_1$, $\cos\theta'_2$ 와 $\cos\theta''_1$, $\cos\theta''_2$ 는

$$\cos\theta'_1 = \cos\theta''_1 = \frac{d' - \ell'}{\{(d' - \ell')^2 + a^2\}^{1/2}} \quad (26)$$

$$\cos\theta'_2 = \cos\theta''_2 = \frac{d'}{(d'^2 + a^2)^{1/2}} \quad (27)$$

이므로 식 (25)에 대입하면 식 (28)과 같이 된다.

$$H_P = nI \cdot \left\{ \frac{d'}{(d'^2 + a^2)^{1/2}} - \frac{(d' - \ell')}{\{(d' - \ell')^2 + a^2\}^{1/2}} \right\} [AT/m] \quad (28)$$

Q'에서의 자기 H_Q 는 $d' = \ell'/2$ 이므로 식 (26)과 (27)에 대입하면

$$\cos\theta'_1 = \frac{-\ell'/2}{(\ell'^2/4 + a^2)^{1/2}} \quad (29)$$

$$\cos\theta'_2 = \frac{\ell'/2}{(\ell'^2/4 + a^2)^{1/2}} \quad (30)$$

이다. 식 (29)과 (30)을 식 (25)에 대입하면 식 (31)와 같다.

$$H_Q = nI \left\{ \frac{\ell'/2}{(\ell'^2/4 + a^2)^{1/2}} - \frac{-\ell'/2}{(\ell'^2/4 + a^2)^{1/2}} \right\} = \frac{nI\ell'}{(\ell'^2/4 + a^2)^{1/2}} [AT/m] \quad (31)$$

또한 가장자리 점 U에서의 합성자기 H_U 는 $d' = \ell'$ 이므로 식 (26)과 (27)에 대입하면

$$\cos\theta'_1 = 0 \quad (32)$$

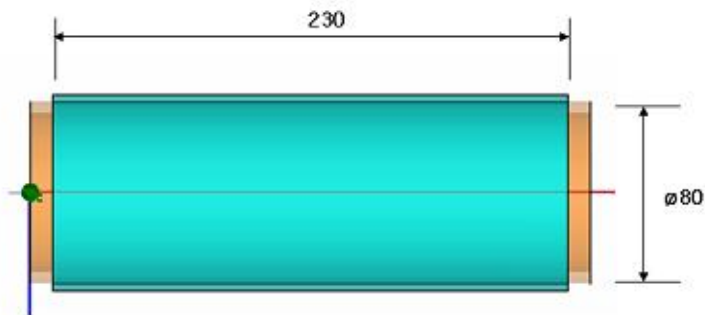
$$\cos\theta'_2 = \frac{\ell'}{(\ell'^2 + a^2)^{1/2}} \quad (33)$$

이다. 식 (32)과 (33)을 식 (25)에 대입하면 식 (34)와 같다.

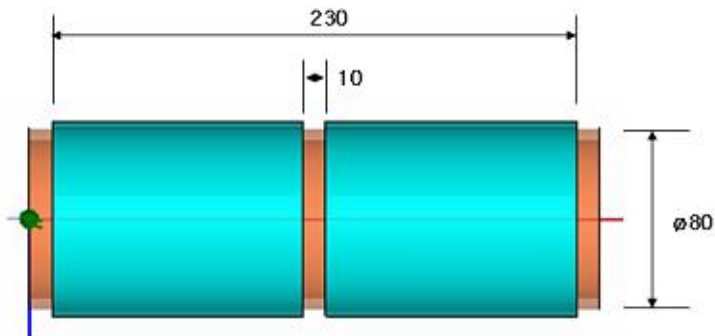
$$H_U = \frac{nI\ell'}{(\ell'^2 + a^2)^{1/2}} [AT/m] \quad (34)$$

2. 외부자장인가 리액터의 전자장 해석 결과

외부자장 인가코일은 trigger-part에 병렬로 연결되며 current-limiting part의 초전도 소자에 자장을 인가하는 외부자장인가 리액터의 전자기학적 구조는 유한장 솔레노이드의 해석으로 유한요소법을 이용한 시뮬레이션 프로그램인 Maxwell 3D를 이용하여 전자장 해석을 수행하였다.[20]



(a) The basic structure a reactor (250mm)

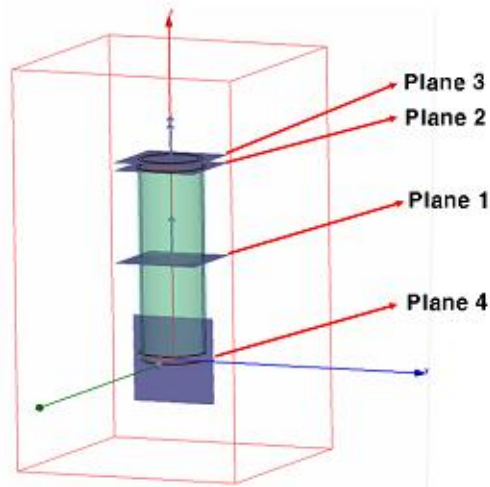


(b) The improved structure of a reactor (250mm_gap)

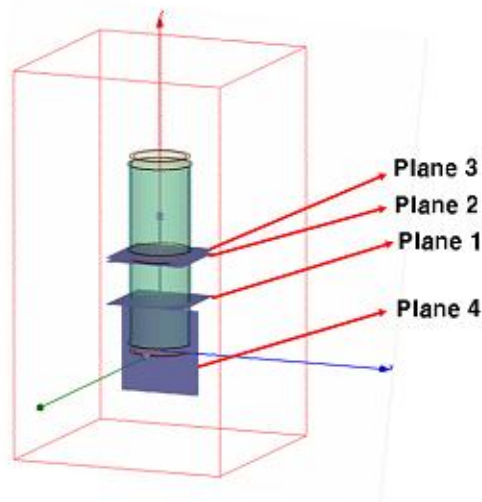
Fig. 25. The structure of a reactor by Maxwell 3D

그림 25는 trigger-part에 병렬로 연결되는 외부자장인가 리액터의 해석을 위해 Maxwell 3D를 이용하여 설계한 모델이다. 기존에 설계된 리액터는 trigger part 및 current-limiting part에 있는 초전도 소자에 각각 1개씩 설치되어야 했다. 그러므로 설치 공간이 넓어 저온 용기 및 주변 장치들의 규모가 커지고, 또한 용량증대를 위

한 다수의 직렬 연결시 리액터에 흐르는 전류의 분배로 인해 초전도 소자에 인가하는 자장의 크기가 작아 큰 잇점을 기대할 수 없는 문제점이 발생하였다.



(a) The cross sections of a reactor (250nm)



(b) The improved cross sections of a reactor (250nm_gap)

Fig. 26. The cross sections of a reactor by Maxwell 3D

이러한 이유로 trigger part 및 current-limiting part를 모듈화하기 위해 리액터의 길이를 250mm로 하여 그림 26 (a)와 같이 설계를 하였고, 자장의 크기를 증대시키기 위해 그림 26 (b)와 같이 설계하였다. 이렇게 설계된 리액터 내부에는 trigger part의 초전도 소자 1개가 중앙에 위치하고, current-limiting part의 초전도 소자 2개가 일정 간격을 두고 양쪽으로 배치되었다. 표 5는 기존의 리액터와 새롭게 설계된 리액터의 상세한 제원을 나타낸 것이다.

Table 5. The parameter values of a reactor

No.		(a)	(b)
Coil (Copper)	Current [A]	20	20
	Inner radius [mm]	80	80
	Outer radius [mm]	86	86
	Length [mm]	230	230
	Coil space [mm]	-	10
지지대 (Bakelite)	Inner radius (mm)	70	70
	Outer radius (mm)	80	80
	Length (mm)	250	250

그림 27은 설계한 모델들을 해석하기 위해 2차원 평면을 분류해 놓은 plane 구성도이다. 자계를 분석하기 위해 기본적으로 코일 내부의 중심면과 가장자리, 외부에 일정 간격을 유지한 면을 기준으로 하였으며, 리액터 내부 및 외부를 한눈에 볼 수 있도록 plane 4를 구성하였다. 그림 27의 경우 두 코일 사이의 자계를 분석하기 위해 그림과 같이 plane을 구성하였다.

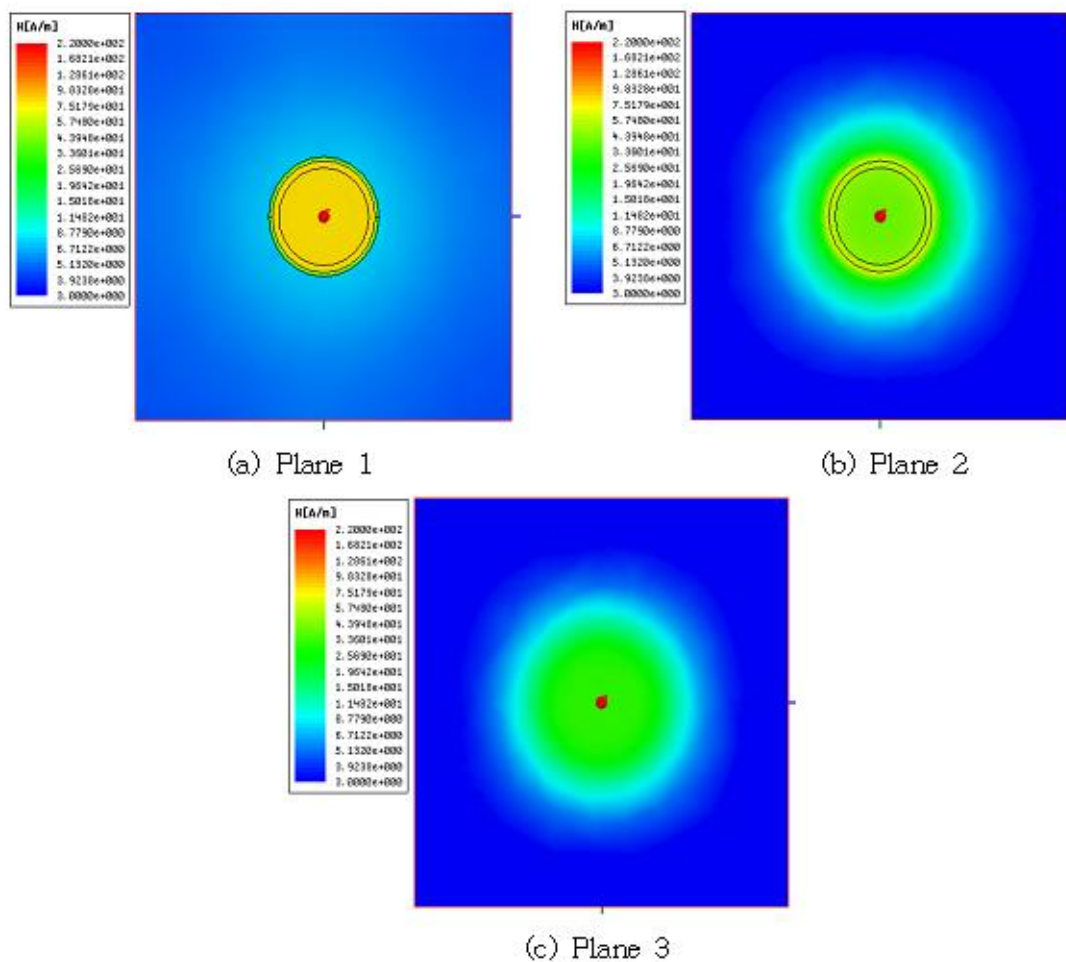


Fig. 27. The magnetic field of a reactor

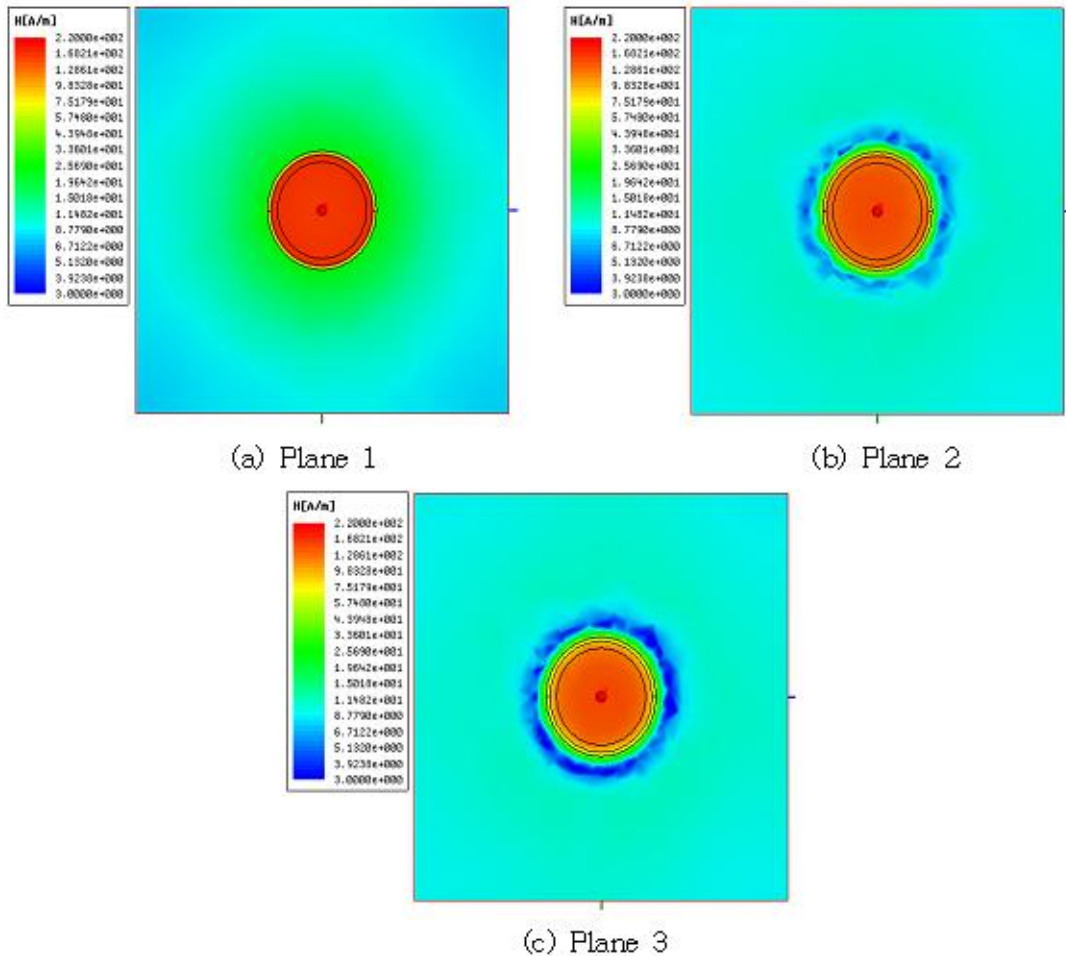


Fig. 28. The a magnetic field of a new reactor

그림 27와 28은 설계된 2개의 리액터들의 plane 1, 2, 3에 대한 자계 H 곡선을 나타낸 것이다. 그림 27에서 기존의 250mm 리액터의 자계 H곡선에서 plane 1, 2, 3의 중심 자계는 각각 75.18, 43.95, 33.6A/m이었다. 리액터는 중심에서의 자계가 가장 강하고 중심에서 멀어질수록 값이 작아진다. 그러므로 가장 큰 자계를 trigger part 및 current-limiting part의 초전도 소자에 인가하기 위해 중심에 위치시켜 실험을 수행하였다. 이로부터 리액터의 크기의 변화에 따라 자계를 비교할 때 동일한 전류에서 리액터의 길이가 길어져 자계가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 식 (18), (21), (24)에서 증명할 수 있다.

Trigger part에 있는 초전도 소자는 병렬로 연결되어 있는 외부자장인가 리액터가 동작될 수 있도록 하는 스위치 역할을 한다. 또한 current-limiting part에 있는 2개의 초전도 소자는 동일한 자기장이 인가가 되어야 하므로 상호 대칭되는 배치를 해야 한다. 이러한 조건에서 trigger part 및 current-limiting part에 있는 초전도 소자에 인가하는 자기장의 크기를 증가시키고자 그림 26 (a)와 같이 설계된 기존의 250mm 리액터에 coil을 두 부분으로 나누어 그림 26 (b)와 같이 다시 설계를 하였다. 그림 28은 250mm 리액터의 coil이 두 개로 나누어진 경우의 각 plane에 대한 자계 H를 나타낸 그림이다. Plane 1, 2, 3에 대한 자계는 각각 198,79, 168,21, 128,61A/m로 나타났다. 이로부터 그림 26 (a)의 자계와 비교하였을 때보다 더 큰 자계를 나타낸다는 것을 확인할 수 있다. 그림 26 (b)의 리액터에서 두 coil 사이의 간격은 공극으로 작용하여 누설자속이 존재하게 된다. 이 누설자속에 의해 코일 안쪽의 가장자리에서 최대의 자계값이 존재하게 되며 초전도 소자의 임계값 조정이 용이할 것으로 판단된다.

그림 29와 30은 두개의 리액터의 자계 흐름 및 크기를 그림 29의 plane 4를 기준으로 하여 해석한 결과이다. 그림 29 (a)와 30 (a)는 일반 리액터에서 발생하는 자계의 흐름과 동일하며, 그림 30 (a)를 통해 coil 사이에서 누설이 발생하여 자계가 형성되고 있다는 것을 확인할 수 있다. 그림 30 (b)의 plane 4를 기준으로 한 자계 크기는 그림 29 (b)에서 발생하는 자계의 크기보다 더 크다는 것을 확인할 수 있으며, 그 자계가 균일하게 리액터 내부에서 발생한다는 것을 알 수 있다.

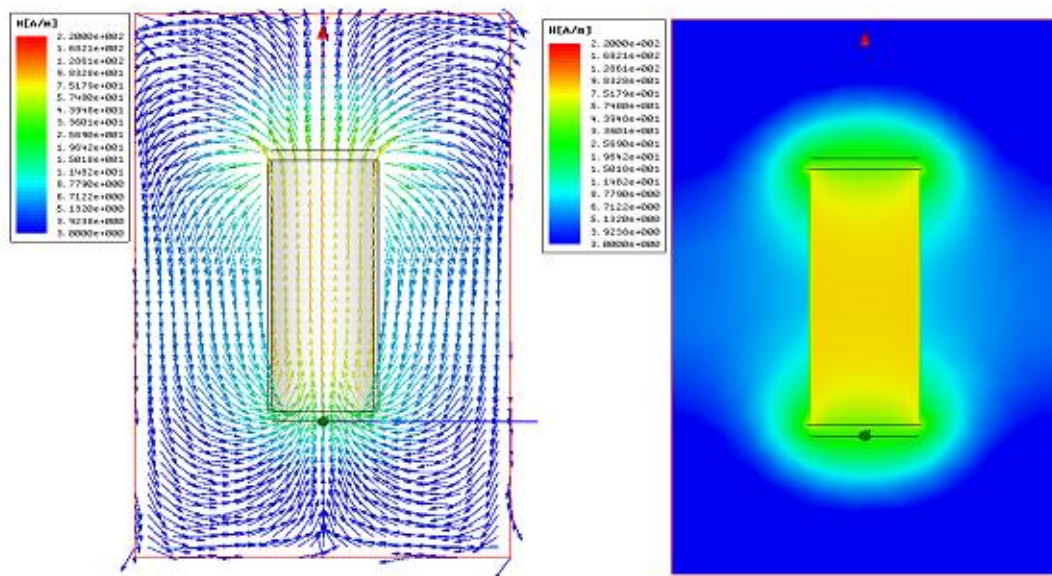


Fig. 29. The distribution shapes of magnetic field in a external reactor

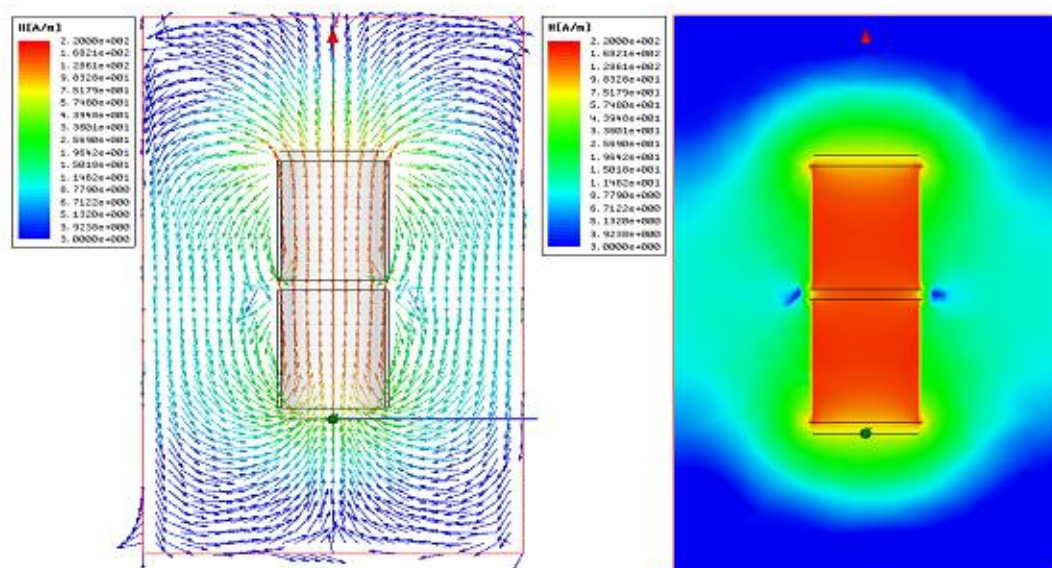
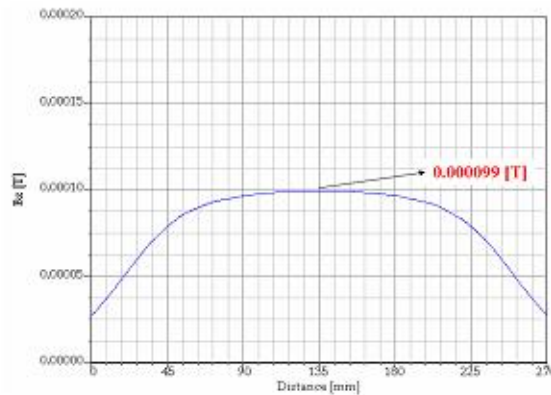
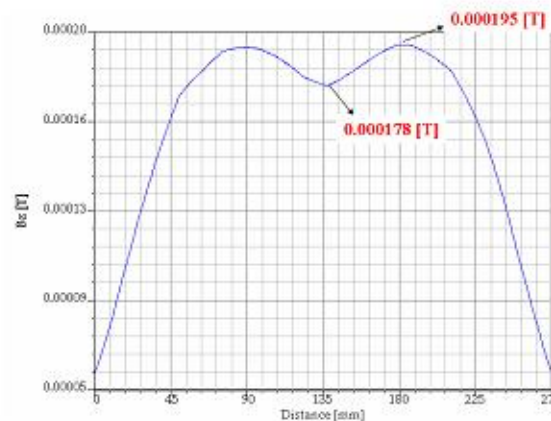


Fig. 30. The distribution shapes of magnetic field in an improved external reactor

그림 31은 두개의 리액터의 내부 중심에 가상의 선을 그리고 그 선에서 발생하는 자속밀도를 리액터의 길이에 따라 나타낸 것이다. 그림 25 (b)의 리액터에서 중심으로부터 발생하는 자속밀도보다 $\pm 45\text{mm}$ 지점에서 발생하는 자속밀도가 더 크다는 것을 알 수 있다. 이로부터 trigger part에 있는 초전도 소자는 리액터의 중심에 위치시키며, current-limiting part에 있는 2개의 초전도 소자는 자속밀도가 최고점인 $\pm 45\text{mm}$ 지점에 위치시키는 것이 가장 큰 자계를 인가시키는 조건이라 할 수 있다.



(a) The curve on magnetic flux density of a reactor (250mm)



(b) The curve on magnetic flux density of an improved reactor (250mm_gap)

Fig. 31. The magnetic flux density of inner center reactors

B. 전류제한특성에 따른 동작특성 및 분석

1. 2×3구조의 매트릭스형 초전도 한류기의 원리

매트릭스형 초전도 한류기는 외부자장인가 리액터가 초전도 소자에 자장을 인가하는 구조이기 때문에 저온용기 내부에 존재해야 한다. 그러므로 1개의 초전도 소자에 1개의 리액터가 존재하는 분리형 외부자장인가 리액터는 초전도 한류기의 용량 증대시 그 규모가 커지게 된다. 그러나 trigger part에 current-limiting part 전체에 자장을 인가하는 리액터가 존재하고 current-limiting part의 초전도 소자 2개가 존재하는 일체형 외부자장인가 리액터는 분리형보다 1/3으로 규모를 줄일 수 있다. [17]

그림 32는 분리형과 일체형 전류제한소자에 따라 2×3 구조를 갖는 매트릭스형 초전도 한류기의 등가회로도를 나타낸 것이다. 등가회로도의 전체 임피던스 및 전압·전류 방정식을 분석하기 위해 식 (35)~(38)에서와 같은 가정하에 다음과 같이 방정식을 세울 수 있다. 그리고 설계에 따라 제작된 전류제한 소자를 2×3의 행렬구조로 연결하여 trigger-part 및 current-limiting part의 전류제한 특성 및 동시퀀치 특성을 분석하였다.

A) 분리형 외부자장인가 리액터를 갖는 2×3 구조를 나타내는 방정식

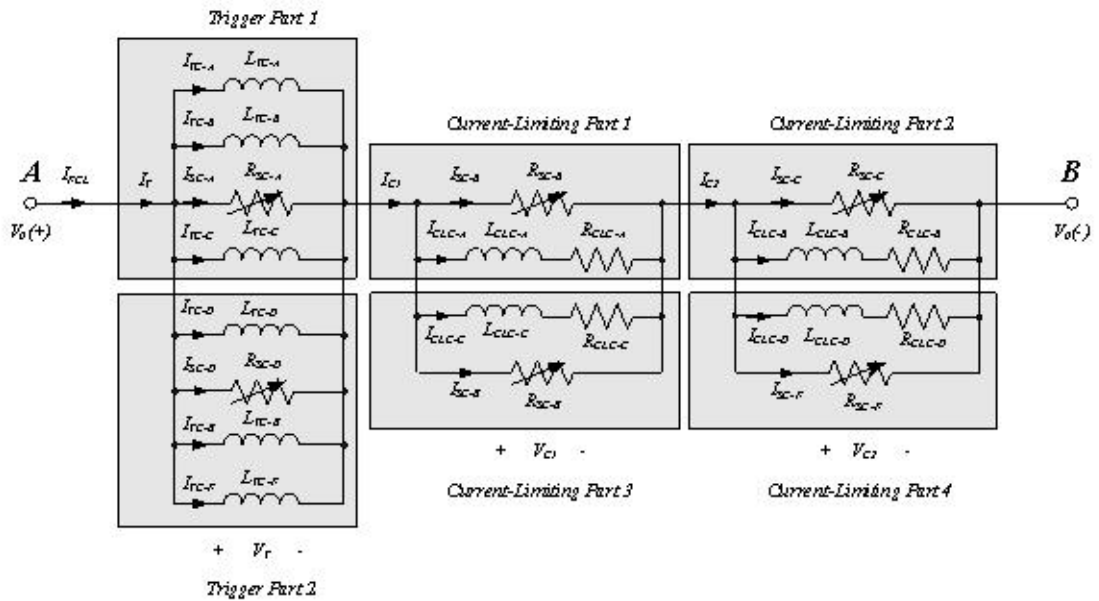
$$Z_{total} = \frac{R_{SCR} \cdot j\omega L_{TC}}{2(3R_{SCR} + j\omega L_{TC})} + \left[\frac{R_{SCC}(R_{\alpha C} + j\omega L_{\alpha C})}{2R_{SCC} + (R_{\alpha C} + j\omega L_{\alpha C})} \right] \quad (35)$$

$$\begin{aligned} I_{total-1} = I_{F\alpha} = I_T = I_{\alpha} = I_{\alpha} &= \frac{(6R_{SCR} + 2j\omega L_{TC})}{j\omega L_{TC} \cdot R_{SCR}} \cdot V_T \\ &= 2 \left[\frac{1}{R_{\alpha C} + j\omega L_{\alpha C}} + \frac{1}{R_{SCC}} \right] \cdot V_{\alpha} \end{aligned} \quad (36)$$

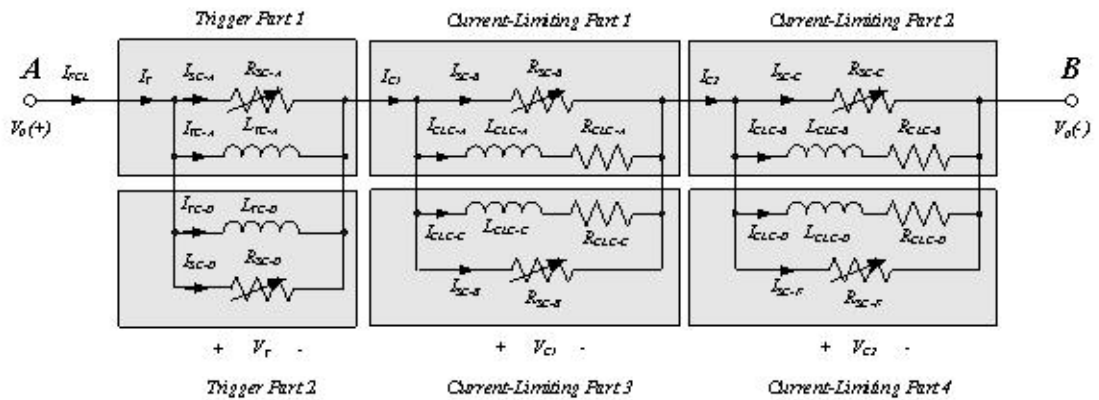
B) 일체형 외부자장인가 리액터를 갖는 2×3 구조를 나타내는 방정식

$$Z_{total} = \frac{R_{SCR} \cdot j\omega L_{TC}}{2(R_{SCR} + j\omega L_{TC})} + \left[\frac{R_{SCC}(R_{\alpha C} + j\omega L_{\alpha C})}{2R_{SCC} + (R_{\alpha C} + j\omega L_{\alpha C})} \right] \quad (37)$$

$$\begin{aligned}
 I_{total-1} = I_{FCL} = I_T = I_{\alpha} = I_{\alpha} &= \frac{(2R_{SGT} + 2j\omega L_{TC})}{j\omega L_{TC} \cdot R_{SGT}} \cdot V_T \\
 &= 2 \left[\frac{1}{R_{\alpha G} + j\omega L_{\alpha G}} + \frac{1}{R_{SGC}} \right] \cdot V_{\alpha}
 \end{aligned}
 \tag{38}$$



(a) An SFCL with separated reactors



(b) An SFCL with integrated reactors

Fig. 32 Equivalent circuits of the matrix-type SFCLs with 2×3 matrix

식 (35)과 (37)에서 우변의 첫째항은 trigger-part의 임피던스이고, 두번째항은 current-limiting part의 임피던스를 나타낸다. 분리형과 일체형의 trigger part의 임피던스 크기를 비교하면 일체형의 임피던스가 더 작다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 trigger part에 더 많은 전류가 흐르고, 이것으로 인하여 외부자장인가 리액터에서 발생하는 자장이 더 많다는 것을 확인할 수 있다.

매트릭스형 초전도 한류기의 실험을 위한 회로도 는 그림 7이다. 그림에서 A-B 구간은 trigger part 및 current-limiting part가 연결되는 구간이다. V_0 는 회로에 인가되는 전원전압이며, R_0 와 R_L 은 선로의 전류를 측정하기 위한 표준저항과 부하를 나타내는 저항으로서 각각 1Ω 과 50Ω 의 저항을 사용하였다. SW_1 과 SW_2 는 초전도 한류기에 전원을 인가하기 위한 스위치와 단락 및 지락사고를 모의하기 위한 스위치로서 전력용 SCR을 사용하였다.

2. 분리형 외부자장인가 리액터의 2×3구조의 전류제한 특성분석

1) Current-limiting part의 R_{CLC}에 따른 특성 분석

6개의 초전도 소자를 이용하여 2×3 구조로 배열한 매트릭스형 초전도 한류기의 특성에 대해서 분석하였다. Trigger part에 병렬로 연결된 셉트리액터의 턴수를 240, 520턴으로 변화시켰으며, current-limiting part의 초전도 소자에 병렬로 연결된 셉트저항의 값을 10, 20Ω으로 변화시켰다. 인가전압은 $320/\sqrt{3} V_{rms}$ 로 하였으며, 사고가 발생하는 각도는 0°이다.

그림 33와 34은 trigger part의 셉트리액터의 턴수가 240, 520턴일 때 current-limiting part의 셉트저항이 10, 20Ω인 경우의 제한된 사고전류의 파형을 나타낸 것이다. 그림 33에서 셉트저항이 10Ω인 경우와 20Ω인 경우의 제한된 사고전류는 77.7A와 78.3A로 거의 같았다. 또한 10Ω의 경우 trigger part의 초전도 소자에 흐르는 전류는 각각 34.9, 33.5A이었고 current-limiting part의 소자 전류는 37.93~33.5A사이에서 흘렀다. 그리고 20Ω의 경우 trigger part의 소자에 흐르는 전류는 각각 35.2A, 33.3A이었고, current-limiting part에 흐르는 소자전류는 38.3~37.2[A] 사이에서 흘렀다. 그림 34의 520턴일 때 셉트저항 10Ω과 20Ω에서 제한되

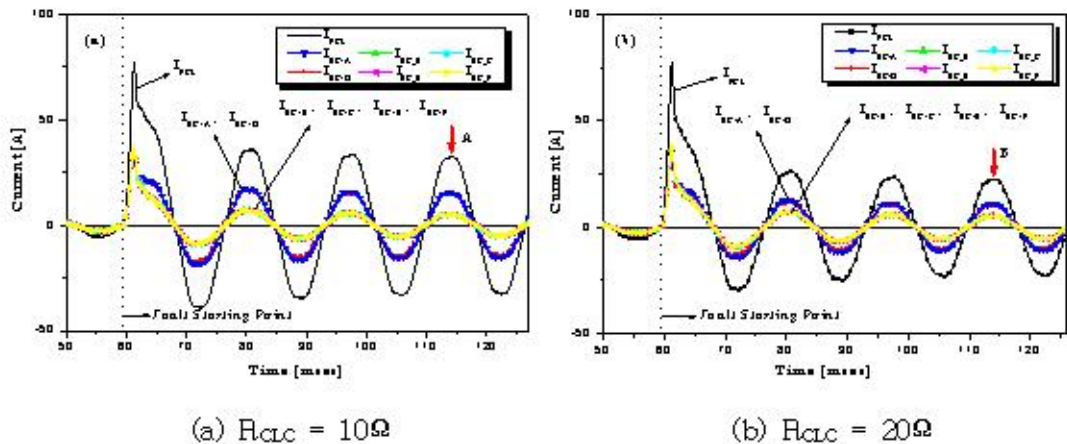


Fig. 33. The current curves of a 2×3 matrix-type SFCL with separated reactors ($L_{TC} = 240$ turns)

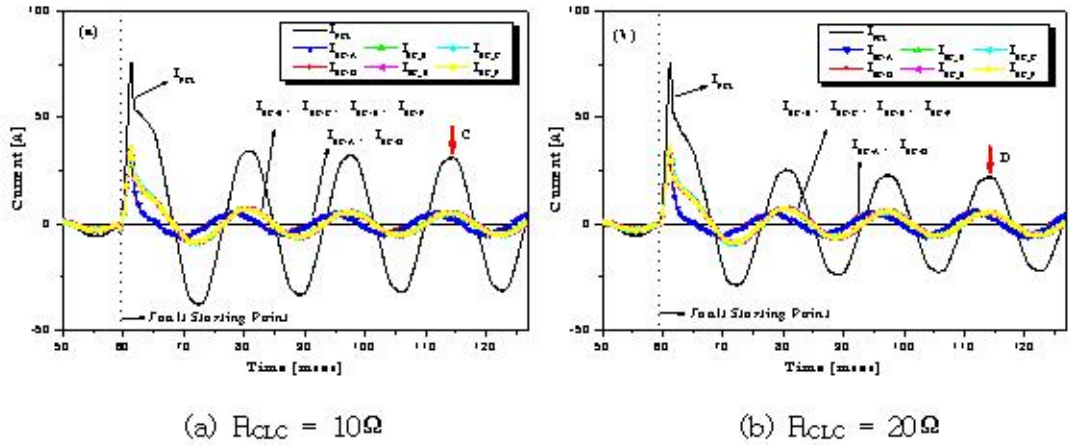
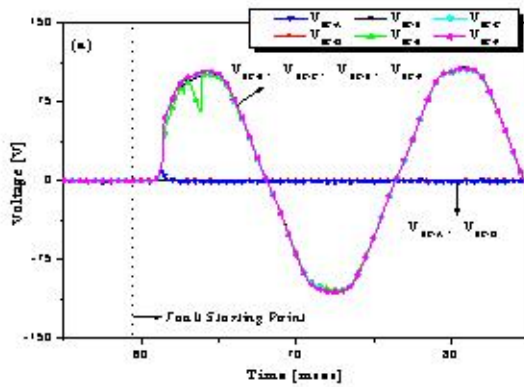
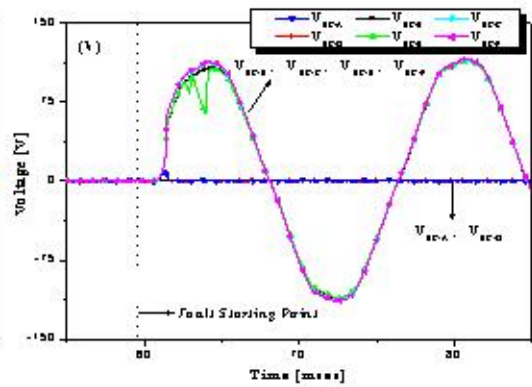


Fig. 34 The current curves of a 2×3 matrix-type SFCL with separated reactors ($L_{TC} = 520$ turns)

는 사고전류는 각각 75.8A과 75.7A이었다. 10Ω 의 경우 trigger part의 소자에 흐르는 전류는 각각 37.6A과 35.6A이었고, current-limiting part의 소자에 흐르는 전류는 37.3~36.4A 사이에서 흘렀다. 또한, 20Ω 인 경우 각각 37.6, 35.3, 37.7~36.83A 이었다. 외부자장인가 리액터의 턴수가 증가할수록 제한되는 사고전류의 크기가 약간 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 리액터에서 발생하는 자장이 턴수 증가로 커지므로 current-limiting part에 있는 소자의 임계 특성이 균일해지기 때문이다. 셉트저항의 증가에 따라 그림 33 (a), (b)에서 사고 후 A와 B점에서의 사고전류를 비교하면 각각 32.6A과 22.6A로 큰 차이를 보이고 있다. 또한 그림 34 (a), (b)에서 C와 D점에서는 각각 31.1A와 21.8A로 차이를 보이고 있다. 이것은 사고초기 사고전류는 저항이 거의 없는 초전도 소자로 흐르기 때문에 셉트저항은 전체 임피던스에 영향을 주지 않는다. 그러나 사고시간이 증가함에 따라 초전도 소자에서 발생하는 저항이 증가하기 때문에 이와 병렬로 연결된 셉트저항과 셉트리액터 축으로 흐르는 전류가 증가하게 되고 전체임피던스는 점차 증가하게 된다. 그러므로 셉트저항이 증가함에 따라 사고 2주기 이후에 제한되는 전류의 크기는 큰 차이가 발생하게 된다.

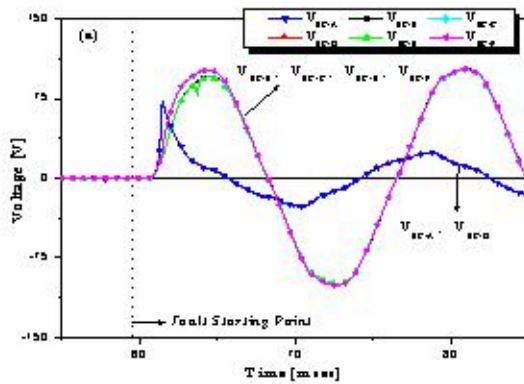


(a) $R_{CLC} = 10\Omega$

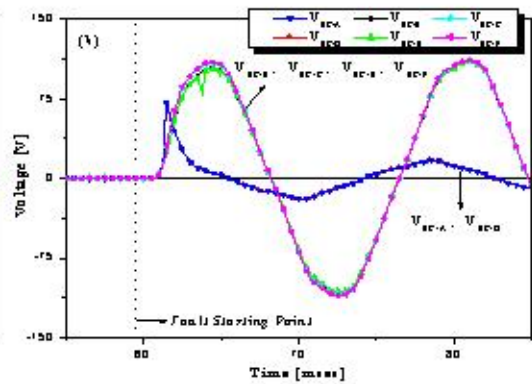


(b) $R_{CLC} = 20\Omega$

Fig. 35. The voltage curves of a 2x3 matrix-type SFCL with separated reactors ($L_{TC} = 240$ turns)



(a) $R_{CLC} = 10\Omega$

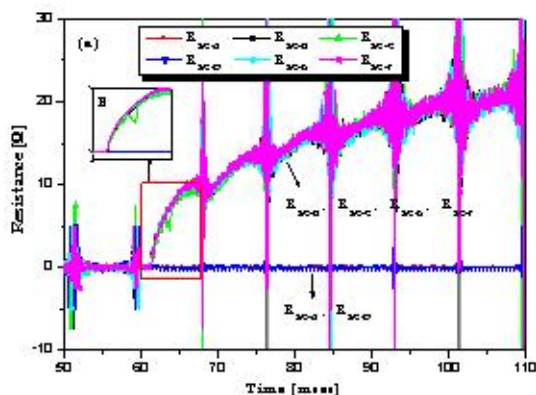


(b) $R_{CLC} = 20\Omega$

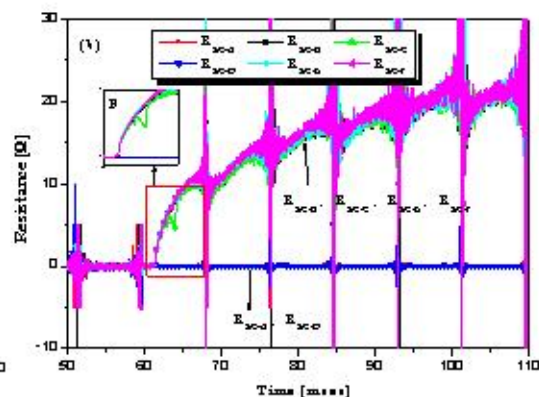
Fig. 36. The voltage curves of a 2x3 matrix-type SFCL with separated reactors ($L_{TC} = 520$ turns)

그림 35과 36는 켄치 후 초전도 소자에서 발생하는 전압의 파형을 나타낸 것이다. 그림 36에서 V_{sc-BC} 와 V_{sc-BF} 에서 발생하는 전압은 (a)에서 101, 104.5V이고 (b)에서 107, 112V이었다. 또한 그림 36에서는 (a)에서 96, 101.5V, (b)에서 104, 109.6V이었다. 션트저항이 증가함에 따라 각 초전도 소자에서 발생하는 전압이 증가하는 이유는 current-limiting part 1, 2, 3, 4의 각각 임피던스가 증가하였기 때문이다. Trigger part에 있는 초전도 소자는 병렬로 연결된 외부자장인가 리액터의 임피던스가 작아 전류가 대부분 리액터측으로 흐르기 때문에, 초전도 소자를 켄치시킬 수 있을 정도의 전류가 흐르지 않아 켄치가 발생하지 않았다. 그러나 그림 36에서는 병렬로 연결된 외부자장인가 리액터의 임피던스가 커져 초전도 소자 A, D가 켄치되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 trigger part의 외부자장인가 리액터의 값을 정하는 데 중요한 요소이다.

그림 37과 38는 켄치 후 초전도 소자에서 발생하는 저항의 파형을 나타낸 것이다. 션트 리액터가 240턴일 때 trigger part에 있는 초전도 소자 A, D가 무켄치로 인해 저항이 발생하지 않은 것을 그림 37에서 확인할 수 있다. 그러나 540턴일 때 켄치가 발생하여 소자의 저항이 발생하는 것을 그림 38에서 확인할 수 있다. Current-limiting part에 있는 초전도 소자간에 저항의 차이가 발생한다는 것을 E와 F, G와 H의 확대 창에서 확인할 수 있다. 이것은 션트 저항의 크기가 클수록 초전도 소자로 흐르는 전류가 커져 동시켄치에 유리하다는 것을 알 수 있다.

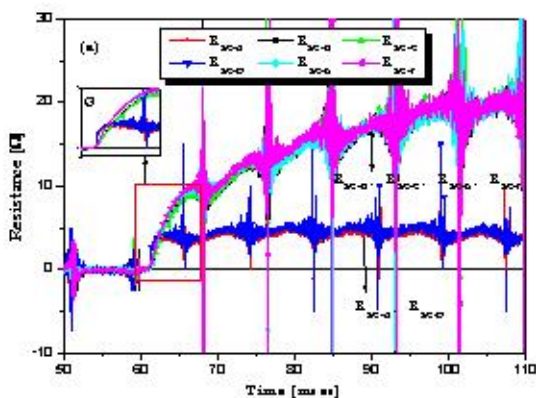


(a) $R_{CLC} = 10\Omega$

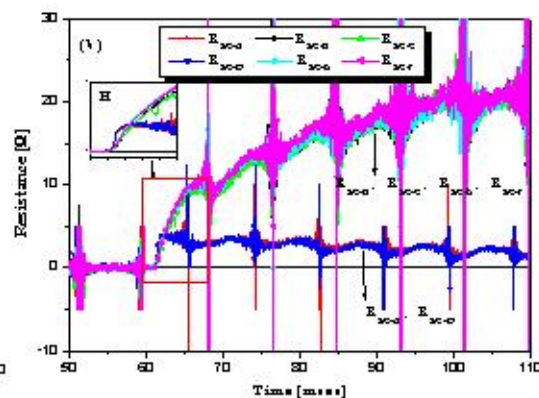


(b) $R_{CLC} = 20\Omega$

Fig. 37. The resistance curves of a 2×3 matrix-type SPCL with separated reactors ($L_{TC} = 240$ turns)



(a) $R_{CLC} = 10\Omega$



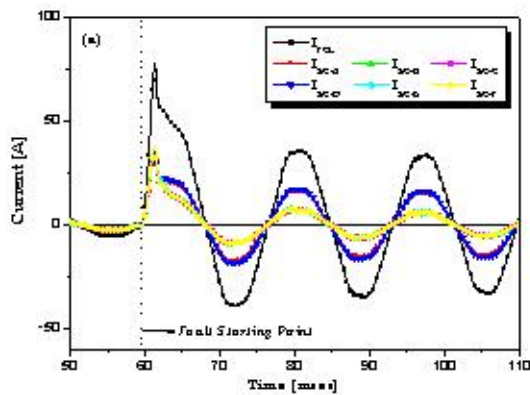
(b) $R_{CLC} = 20\Omega$

Fig. 38. The resistance curves of a 2×3 matrix-type SPCL with separated reactors ($L_{TC} = 520$ turns)

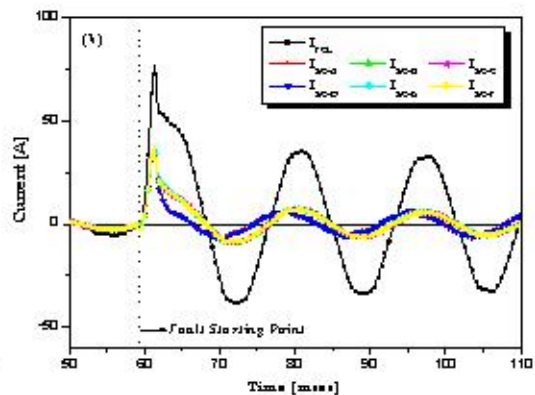
2) Lrc의 턴수 변화에 따른 전류제한 특성

Trigger part에 있는 외부자장인가 리액터의 턴수를 240, 380, 520턴으로 변화시켜 2×3 행렬의 전류제한 특성을 분석하였다. 여기서 인가전압은 $320/\sqrt{3}V_{rms}$ 로 고정하였으며, current-limiting part에 있는 션트저항의 크기를 10Ω 으로 하였다.[21]

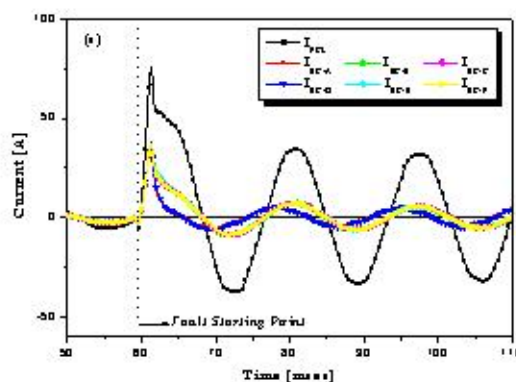
그림 39는 2×3구조를 갖는 매트릭스형 초전도 한류기의 턴수에 따른 전류 곡선을 나타낸 것이다. 턴수의 증가에 따라 제한되는 사고전류는 240턴의 경우 78A, 380턴의 경우 76.8A, 520턴의 경우 75.7A이었다. 그러나 사고 1주기 후 trigger part에 흐르는 전류 I_{sc-A} , I_{sc-D} 를 비교해 보면 턴수별로 각각 16.3, 5.2, 4.9A이었다. 그림 40의 초전도 소자에서 발생하는 저항곡선을 보면 trigger part에 있는 소자가 켄치가 발생하지 않은 것을 확인할 수 있다. 이것으로 사고시 trigger part에 있는 초전도 소자의 무켄치로 인해 외부자장인가 리액터로 사고전류가 분배되지 않는다. 그 결과 외부자장인가 리액터에서 자장이 발생하지 않아 current-limiting part에 있는 초전도 소자로 인가할 수 없게 된다. 그러나 턴수 증가에 따라 trigger part에 있는 초전도 소자가 켄치되어 사고전류가 외부자장인가 리액터로 흐른다는 것을 저항곡선에 의해 확인할 수 있다. 그림 41은 턴수 증가에 따라 각 소자별 켄치 시간을 나타낸 것이다. 켄치시간은 사고가 발생한 후부터 초전도 소자에서 전압이 발생하기까지의 시간이다. 턴수가 증가하면서 켄치 시간이 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 외부자장인가 리액터에 의해 초전도 소자에 자장이 인가되면서 임계전류가 줄어들고 이로 인해 켄치시간이 줄어들었다는 것을 확인할 수 있다. 또한 각 소자의 켄치시간 간의 차이가 턴수가 증가할수록 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 제작상 불가피한 소자의 불균일 특성이 턴수 증가에 따라 보다 균일해진다는 것을 알 수 있다.



(a) 240[turns]

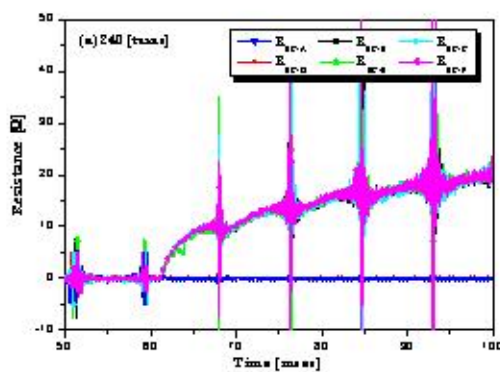


(b) 380[turns]

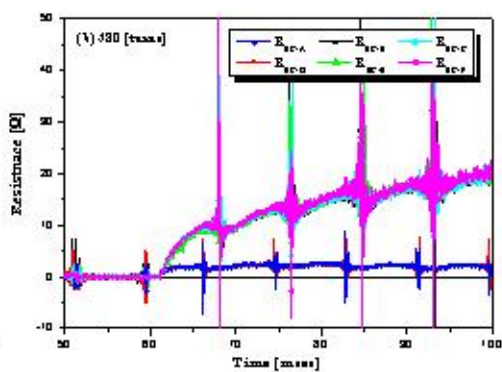


(c) 520[turns]

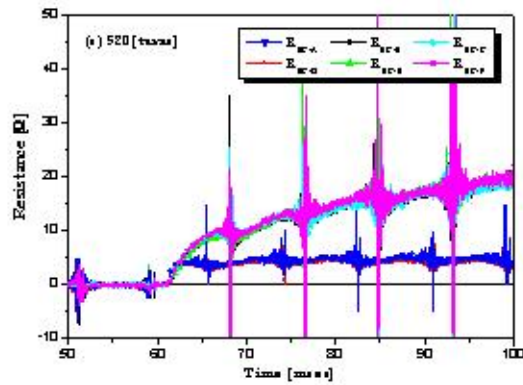
Fig. 39. The line current curves according to turn numbers of magnetic coils



(a) 240[turns]



(b) 380[turns]



(c) 520[turns]

Fig 40. The line resistance curves according to turn numbers of magnetic coils

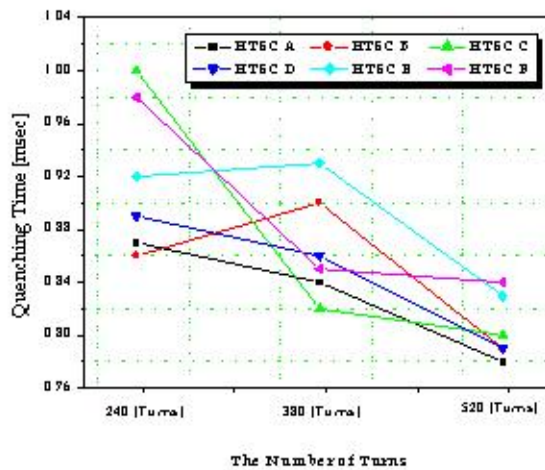


Fig 41. Time interval between quenching point of six-element according to turn numbers of magnetic coils

3. 일체형 외부자장인가 리액터의 파라미터에 따른 2×3구조의 전류제한특성 분석

일체형으로 된 외부자장인가 리액터를 갖는 trigger part를 2×3 구조로 구성하여 전류제한 특성을 분석하였다. 일체형 리액터의 턴수는 170, 510턴으로 변화시켰으며, 셉트저항은 10, 20Ω으로 하였다. 인가전압은 $320/\sqrt{3} V_{rms}$ 로 하였으며, 사고가 발생하는 각도는 0° 이다. 그림 42와 43는 외부자장인가 리액터의 턴수와 셉트저항에 따라 제한되는 사고전류와 6개의 초전도 소자에 흐르는 전류의 곡선을 나타낸 것이다.[22] 그림 42에서 셉트저항이 10Ω인 경우 제한된 사고전류의 크기는 78.4A이고, 20Ω인 경우 77.6A이었다. 또한 10Ω의 경우 trigger part의 초전도 소자에 흐르는 전류는 각각 36.5A, 35.6A이었고 current-limiting part의 소자 전류는 38.4~36.9A 사이에서 흘렀다. 그리고 20Ω의 경우 trigger part의 소자에 흐르는 전류는 각각 36.3A, 35.1A이었고, current-limiting part에 흐르는 소자전류는 38.4~37.1A 사이에서 흘렀다. 그림 43의 510턴일 경우 셉트저항이 10Ω일 때 제한된 사고전류의 크기는 76.7A이고, 20Ω인 경우 76.4A이었다. 또한 10Ω의 경우 trigger part의 초전도 소자에 흐르는 전류는 각각 38.2, 37.7A이었고 current-limiting part의 소자 전류는 37.8~36.7A 사이에서 흘렀다. 그리고 20Ω의 경우 trigger part의 소자에

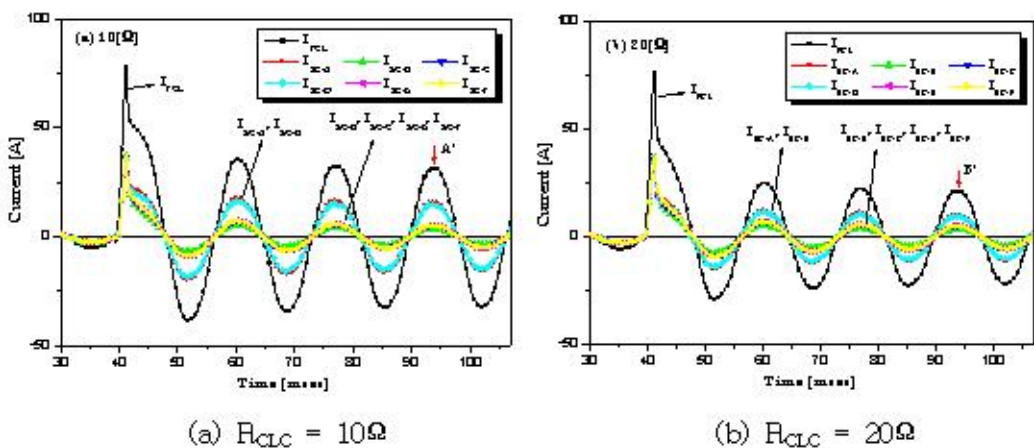


Fig. 42. The current curves of a 2×3 matrix-type SFCL with integrated

reactors ($L_{TC} = 170$ turns)

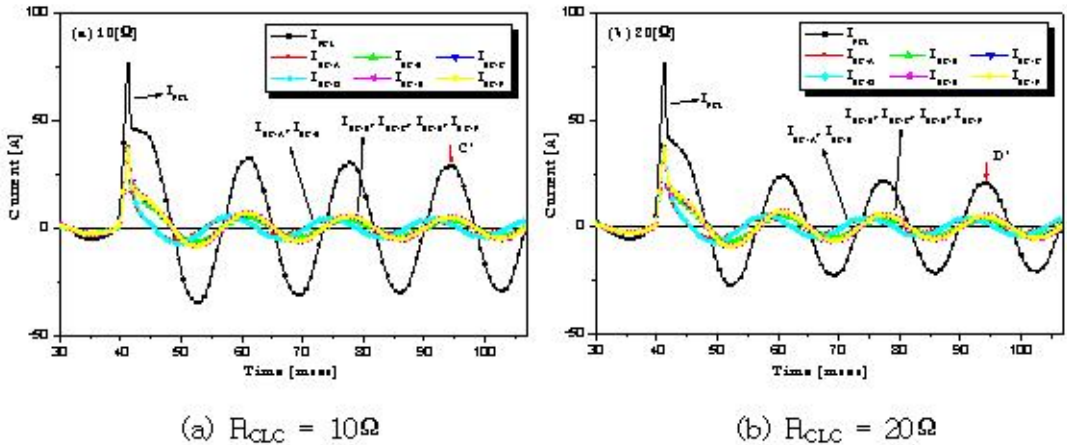


Fig. 43. The current curves of a 2x3 matrix-type SFCL with integrated reactors ($L_{TC} = 510$ turns)

흐르는 전류는 각각 38.2A, 37.7A이었고, current-limiting part에 흐르는 소자전류는 37.8~37.1A 사이에서 흘렀다. 분리형 외부자장인가 리액터를 갖는 매트릭스형 초전도 한류기와 비교하였을 때, 제한되는 사고전류나 current-limiting part에서 초전도 소자에 흐르는 전류가 거의 같다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 trigger part에 있는 초전도 소자로 흐르는 전류는 더 크다는 것을 확인할 수 있다. 또한 두 소자간의 전류차이도 줄어든다. 분리형 리액터의 경우 6개의 외부자장인가 리액터와 두개의 초전도 소자가 병렬 연결되어 있기 때문에 전체임피던스가 줄어들어 리액터로 흐르는 전체 전류가 커지게 된다. 그러나 각각의 리액터에 흐르는 전류는 1/6로 분배되므로 더 작아지고, 리액터에서 발생하는 자장의 크기가 작아지게 된다. 그러나 일체형의 경우 1개의 trigger part에 1개의 외부자장인가 리액터가 존재하기 때문에 전류 분배없이 큰 전류가 흘러 많은 자장을 발생시킨다. 그림 44과 45에서 분리형과 일체형 외부자장인가 리액터에 흐르는 전류곡선을 통해 확인할 수 있다.

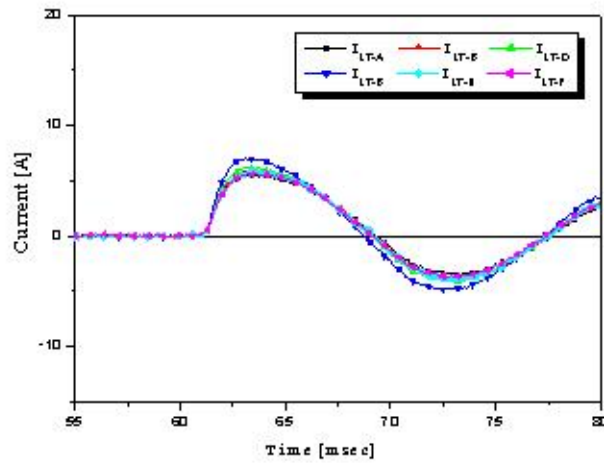


Fig. 44 The current curves of an SPCL with separated reactors
($L_{TC}=520$ turns, $R_{CLC}=20\Omega$)

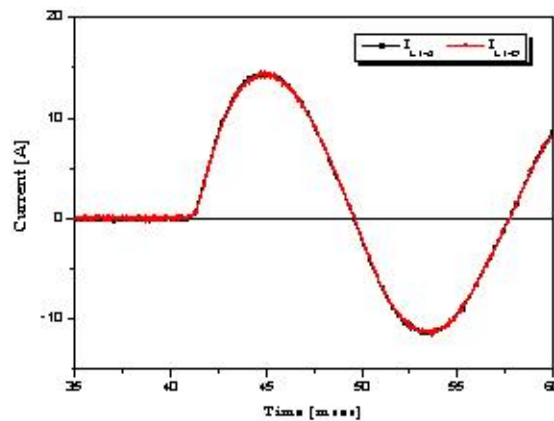
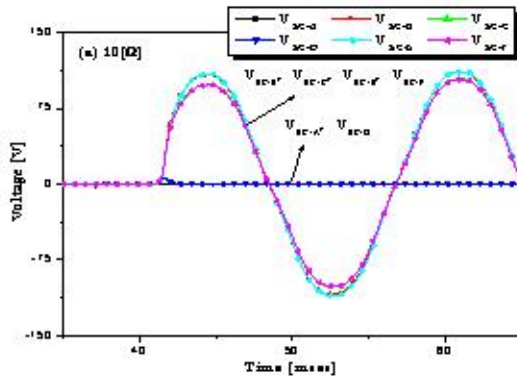
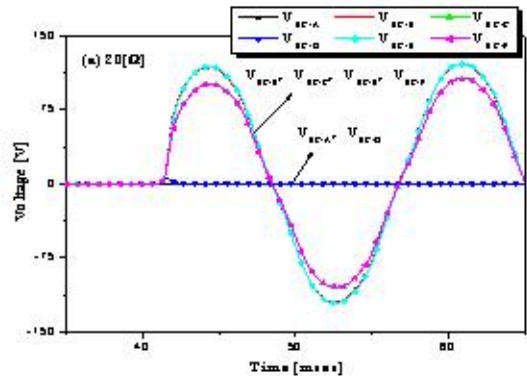


Fig. 45 The current curves of an SPCL with integrated reactors
($L_{TC}=510$ turns, $R_{CLC}=20\Omega$)

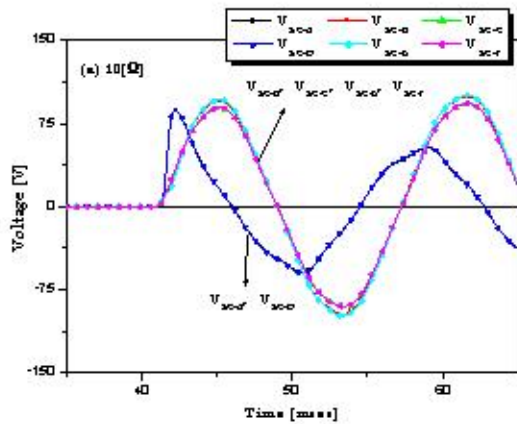


(a) $R_{CLC} = 10\Omega$

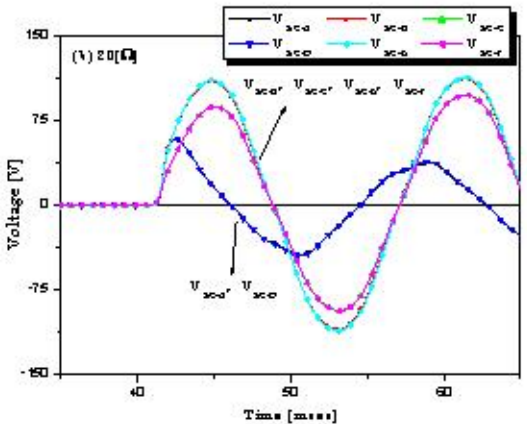


(b) $R_{CLC} = 20\Omega$

Fig. 46. The voltage curves of a 2x3 matrix-type SFCL with integrated reactors ($L_{TC} = 170$ turns)



(a) $R_{CLC} = 10\Omega$



(b) $R_{CLC} = 20\Omega$

Fig. 47. The voltage curves of a 2x3 matrix-type SFCL with integrated reactors ($L_{TC} = 510$ turns)

그림 46와 47은 켄치 후 초전도 소자에서 발생하는 전압의 파형을 나타낸 것이다. 그림 46에서 V_{SC-BE} 와 V_{SC-CF} 에서 발생하는 전압은 (a)에서 107.9V, 98.2V이고 (b)에서 111.86V, 101V이었다. 또한 그림 47에서는 (a)에서 97V, 95.9V, (b)에서 110, 87.1V이었다. 션트저항이 증가함에 따라 각 초전도 소자에서 발생하는 전압이

증가하는 이유는 current-limiting part 1, 2, 3, 4의 임피던스가 각각 증가하였기 때문이다. 170턴에서 trigger part에 있는 초전도 소자는 퀘치가 발생하지 않았다. 그러나 510턴에서는 퀘치가 발생하여 각각 86.9V, 58.2V의 전압이 발생하고 있다. 션트저항이 증가하면서 current-limiting part의 전체 임피던스가 증가하기 때문에 trigger part의 소자 전압이 감소한다는 것을 확인할 수 있다.

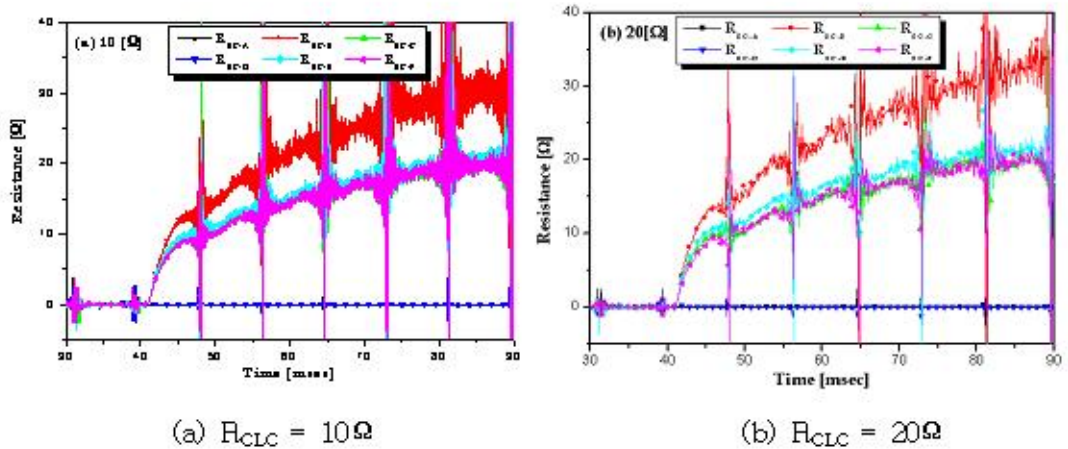


Fig. 48. The resistance curves of a 2×3 matrix-type SFCL with integrated reactors ($L_{TC} = 170$ turns)

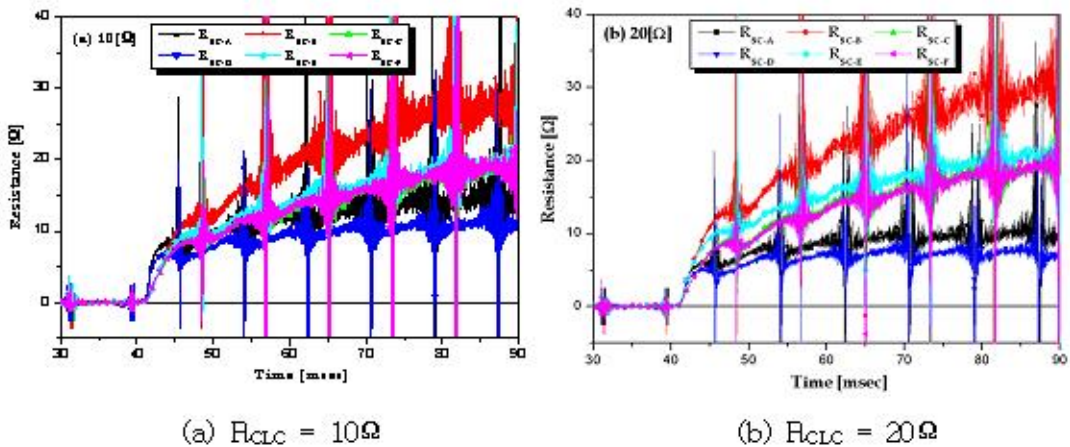


Fig. 49. The resistance curves of a 2×3 matrix-type SFCL with integrated reactor ($L_{TC} = 510$ turns)

그림 48과 49는 초전도 소자에서 발생하는 저항의 곡선을 나타낸 것이다. 170턴수의 경우 trigger part에 있는 초전도 소자의 무퀵치로 저항이 발생하지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 510턴수인 경우 퀵치로 인해 저항이 발생하였고 셉트 저항의 증가에 따라 그 크기가 작아진다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 current-limiting part의 임피던스가 증가하면서 trigger part에서 발생하는 전압이 작아지기 때문이다. Current-limiting part의 초전도 소자 B에서 발생하는 저항의 크기가 크게 다르다는 것을 알 수 있다. 이것은 current-limiting part에 병렬로 연결되는 셉트 저항과 셉트 리액터의 조건이 맞지 않아 나타나는 미세한 전압·전류의 차이로 인해 발생한 것이다. 매트릭스형 초전도 한류기의 설계 파라미터는 그 조건에 따라 상호 영향이 크므로 최적의 조건을 찾아야 할 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 2×3구조의 매트릭스형 초전도 한류기의 사고전류 저감 특성을 분석하였다. 이에 매트릭스형 초전도 한류기의 필요성을 확인하기 위해 전력계통 과도 해석 프로그램인 EMTP-ATP를 이용하여 배전계통에서 매트릭스형 초전도 한류기의 사고전류제한 특성을 모의하였다. 매트릭스형 초전도 한류기가 있는 경우에서 사고전류의 80%까지 제한시킬 수 있어 매트릭스형 초전도 한류기의 필요성을 확인하였다.

매트릭스형 초전도 한류기의 구성요소 중 하나인 외부자장인가 코일은 trigger 영역에 있는 초전도 소자와 병렬로 연결된다. 분리형의 방식은 trigger-part의 초전도 소자에 병렬로 trigger-part 및 current-limiting part에 자장을 인가하기 위한 외부자장인가 리액터를 각각 연결하였다. 이 방식은 다수의 병렬연결로 인해 전류가 분배되어 자장의 크기가 줄어들어 초전도 소자의 자장에 따른 임계특성의 변화가 적었다. 그래서 새로운 방안으로 외부자장인가 리액터의 중간에 공간을 줌으로써 자장의 크기를 크게 해줄 수 있었다. 그리고 리액터 안의 가장 큰 자계를 trigger part 및 current-limiting part의 초전도 소자에 인가하기 위해 중심에 위치시켜 Maxwell 3D를 이용하여 전자장 해석을 수행하여 리액터 중심에서 외부로 멀어질수록 자계는 작아진다는 것을 확인 하였다. 그리고 외부자장인가 리액터가 동작될 수 있도록 스위치 역할을 하는 trigger part에 있는 초전도 소자는 리액터의 센터에 current-limiting part에 있는 2개의 초전도 소자는 전류 밀도가 최대이고 동일한 자장이 인가가 되는 지점인 $\pm 45\text{mm}$ 지점에 위치시키는 것이 가장 큰 자계를 인가시키는 조건임을 확인할 수 있었다. 전자장 해석 결과를 바탕으로 분리형인 3개의 리액터에 각각 1개의 초전도 소자를 포함하고 있는 구조를 새롭게 설계·제작된 일체형 외부자장 인가 리액터는 분리형의 제작규모를 1/3으로 줄일 수 있었다.

전자장 해석을 바탕으로 2×3매트릭스형 초전도 한류기의 분리형과 일체형을 R_{CLC} 와 L_{TC} 의 변화에 따라 실험하였다. 분리형 240턴수에서 션트저항이 10Ω과 20Ω 경우 제한된 사고 전류는 거의 일치하였으나 20Ω인 경우 current-limiting part에 흐르는 소자전류가 1~3A 정도 높았다. 520턴수에 션트저항이 10Ω과 20Ω 경우 제

한된 사고 전류는 240턴수 보다 2A정도 낮았으며 trigger part와 current-limiting part에서 발생하는 소자에서 흐르는 전류는 거의 일치 하였다. 외부자장인가 리액터의 턴수가 증가할수록 제한되는 사고전류의 크기는 약간 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 리액터에서 발생하는 자장이 턴수 증가로 커지므로 current-limiting part에 있는 소자의 임계 특성이 균일해지기 때문이다. 션트저항의 증가에 따라 2주기 이후 사고전류를 비교하면 차이를 보이고 있다. 이것은 사고초기 사고전류는 저항이 거의 없는 초전도 소자로 흐르기 때문에 션트저항은 전체 임피던스에 영향을 주지 못한다. 그러나 사고시간이 증가함에 따라 초전도 소자에서 발생하는 저항이 증가하기 때문에 이와 병렬로 연결된 션트저항과 션트리액터 축으로 흐르는 전류가 증가하게 되고 전체임피던스는 점차 증가하게 된다. 그러므로 션트저항이 증가함에 따라 사고 2주기 이후에 제한되는 전류의 크기는 큰 차이가 발생하게 된다.

일체형을 비교하였을 때, 제한되는 사고전류나 current-limiting part에서 초전도 소자에 흐르는 전류가 거의 같았다. 그러나 trigger part에 있는 초전도 소자로 흐르는 전류는 더 크다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 두 소자간의 전류차이도 줄어든다. 분리형 리액터의 경우 6개의 외부자장인가 리액터와 2개의 초전도 소자가 병렬 연결되어 있기 때문에 전체 임피던스가 줄어들어 리액터로 흐르는 전체 전류가 커지게 된다. 그러나 각각의 리액터에 흐르는 전류는 1/6로 분배되므로 더 작아지고, 리액터에서 발생하는 자장의 크기가 작아지게 된다. 그러나 일체형의 경우 1개의 trigger part에 1개의 외부자장인가 리액터가 존재하기 때문에 전류 분배 없이 큰 전류가 흘러 많은 자장을 발생시킬 수 있다.

초전도 소자의 임계특성 개선을 통해 일체형 외부자장인가 리액터를 갖는 경우가 균일한 퀘치가 발생하고 더 큰 자장을 발생하여 사고전류제한 특성을 확인할 수 있었다. 초전도 소자들의 제작상 불균일한 임계전류의 차이를 줄여 불균일 퀘치 개선 방안 및 사고전류제한 특성 실험에 대한 분석결과를 통해 최적화된 매트릭스형 초전도 한류기의 특성 및 모델링을 하였다. 이로서 매트릭스형 초전도 한류기의 사고전류제한 특성을 이용하여 보호기기들을 사고로부터 보호할 수 있고 사고발생으로 인한 악영향이 송전계통으로 파급되는 것을 미연에 방지할 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] 박충렬, 임성훈, 박형민, 최효상, 한병성, "자속구속형 전류제한기의 초기 사고전류 제한시점 변화", *전기전자재료학회논문지*, Vol. 18, No. 3, p. 269, 2005.
- [3] 최효상, 황시돌, 현옥배, "1선 지락사고에 대한 배전급 저항형 초전도 한류기의 전류제한특성", *전기전자재료학회논문지*, Vol. 14, No. 6, p. 505, 2001.
- [4] B.-W. Lee, J. Sim, K.-B. Park, I.-S. Oh "Practical Application Issues of Superconducting Fault Current Limiters for Electric Power Systems", *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 18, p. 620, 2008.
- [5] L. Kovalsky, Yuan Xing, K. Tekletsadik, A. Keri, J. Bock, F. Breuer, "Applications of superconducting fault current limiters in electric power transmission systems", *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 15, p. 2130, 2005.
- [6] K. Ryu, S.-W. Kim, B.-J. Choi, S.-D. Hwang, "Fault current characteristics in a technical high T_c superconductor", *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 14, p. 658, 2004.
- [7] S.-I. Kopylov, N.-N. Balashov, S.-S. Ivanov, A.-S. Veselovsky, V.-S. Vysotsky, V.-D. Zhemerikin, "The Effect of Sectioning on Superconducting Fault Current Limiter Operation", *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 17, p. 1799, 2007.
- [8] K.-B. Park, J.-S. Kang, B.-W. Lee, I.-S. Oh, H.-S. Choi, H.-R. Kim, O.-B. Hyun, "Quench behavior of YBaCuO films for fault current limiters under magnetic field", *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 13, p. 2092, 2003.
- [9] M. Sjostrom, R. Cherkaoui, B. Dutoit, "Enhancement of power system transient stability using superconducting fault current limiters", *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 9, p. 1328, 1999.
- [10] H.-S. Choi, H.-R. Kim, O.-B. Hyun, and S.-J. Kim, "Quench properties of

- Y-Ba-Cu-O films after overpowering quenches”, *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 11, p. 2418, 2001.
- [11] E. Calixte, Y. Yokomizu, H. Shimizu, T. Matsumura, H. Fujita, “Reduction of rating required for circuit breakers by employing series-connected fault current limiters”, *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 15, p. 36, 2004
- [12] G.-A. Putrus, M.-M.-R. Ahmed, L. Han, K.-R. Chu, T. Funabashi, “Integration of fault current limiters in power distribution networks”, *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 1, p. 311, 2004
- [13] Li, Yijie J. Reeves, X. Xiong, Y. Qiao, Y. Xie, P. Hou, A. Knoll, K. Lenseth, V. Selvaranickam, “Fast growth process of long-length YBCO coated conductor with high critical current density”, *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 15, p. 2771, 2005.
- [14] J.-L. Reeves, D.-M. Feldmann, C.-Y. Yang, D.-C. Larbalestier, “Current barriers in Y-Ba-Cu-O coated conductors”, *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 11, p. 3663, 2001.
- [15] H. Yamaguchi, T. Kataoka, K. Yaguchi, S. Fujita, K. Yoshikawa, and K. Kaiho, “Characteristics analysis of transformer type superconducting fault current limiter”, *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 14, p. 815, 2004
- [16] J. Bock, F. Breuer, H. Walter, M. Noe, R. Kreutz, M. Kleirmaier, K.H. Weck, S. Elschner, “Development and successful testing of MCP-BSCCO 2212 components for a 10 MVA resistive fault current limiter”, *Supercond. Sci. Technol.* 17, p. S122, 2004.
- [17] B.-W. Lee, J.-S. Kang, K.-B. Park, H.-M. Kim, I.-S. Oh, “Optimized current path pattern of YBCO films for resistive superconducting fault current limiters”, *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 15, p. 2118, 2005.
- [18] Cheng-Tsung Liu, Wen-Lin Chang, “Synchronized solution of power electronics system equations using flexible MODELS component connected to the EMTP”, *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 11, p. 1868, 1996.
- [19] Qi.-Bin Zhou, Y. Du, “Using EMTP for evaluation of surge current

- distribution in metallic gridlike structures", *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 41, p. 1113, 2005.
- [20] 최효상, 조용선, 이주형, 정병익, "10kVA급 매트릭스형 초전도 한류기 개발 연구 보고서", 산업자원부, Vol. 2, p. 001, 2007.
- [21] D.-C. Chung, H.-S. Choi, N.-Y. Lee, G.-Y. Nam, Y.-S. Cho, T.-H. Sung, Y.-H. Han, B.-S. Kim, S.-H. Lim, "Optimum design of matrix fault current limiters using the series resistance connected with shunt coil", *Physica C*, Vol. 463, p. 1193, 2007.
- [22] Y.-S. Cho, H.-S. Choi, "The current limiting effects of a matrix-type SFCL according to the variations of designed parameters in the trigger and current-limiting parts", *Physica C*, Vol. 468, p. 2054, 2008.

감사의 글

“나는 할 수 없어 못해” 라고 생각 하지 말고 끝까지 견진하자는 생각으로 남다른 각오와 큰 목표를 안고 대학원에 들어왔습니다. 어느덧 시간이 흘러 제가 졸업할 시기가 온 것이 믿기지 않습니다. 저를 항상 믿어주시며 아낌없는 격려와 관심을 가져주신 최효상 교수님께 감사드립니다. 항상 목표 지향적으로 생각하며 본질을 우선시 하라는 말씀은 앞으로 사회생활을 해나가는 동안 제가 삶의 지향점으로 추구하는 신념으로 여겨 매사에 열심히 노력하는 사람이 되도록 하겠습니다. 바쁜 외종에서도 부족한 저의 논문심사를 위하여 관심을 가져주신 오금곤 교수님, 김용재 교수님, 학문의 정진에 대해 지도 편달해 주신 정수복 교수님, 백형래 교수님, 이우선 교수님, 조금배 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 항상 저에게 본보기가 되어준 최연옥 선배님과 최권우 선배님께 기억에 남는 후배가 되도록 노력하겠습니다.

실험실 생활 동안 항상 옆에서 지켜보고 도와주었던 선배이면서 친구인 박형민, 항상 모든면에서 저에게 모범이 되어준 선배 조용선, 그리고 때로는 다름때도 있었지만 정말 들도 없는 친구 같은 고마운 나의 동기 정병익에게 감사드립니다.

바쁜 외종에도 항상 저를 생각해 주었던 물성실험실의 고필주 선배님, 동기인 영균이와 상준이, 후배 주선이와 한용에게도 감사합니다. 또한, 대학원 생활동안 많은 도움을 준 태양광 실험실의 박정국 선배님, 동기 병국이 그리고 후배 대승이 보현이 승호에게도 감사드립니다. 마지막으로 항상 저를 믿어주고 아껴주신 부모님과 동생에게 감사합니다.

2009년에는 대학원이라는 울타리 안에서 벗어나야 한다는 사실에 솔직히 겁도 나고 두려운 마음도 들지만, 도전은 또 다른 도약이라는 말처럼 항상 긍정적이고 진취적인 사람이 되도록 노력하겠습니다.

2008년 12월 이 주 형

(별 지)

저작물 이용 허락서

학 과	전기공학과	학 번	20077083	과 정	석 사
성 명	한글: 이 주 형 한문 : 李 周 炯 영문 : LEE JU HYOUNG				
주 소	광주 광역시 북구 오치2동 삼익1차 101동 903호				
연락처	E-MAIL : ssamzie1201@naver.com				
논문 제목	한글 : 매트릭스형 초전도 한류기의 사고전류 저감특성연구 영문 : A study on the suppression characteristics for fault current of a matrix-type 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.

2008년 11월 일

저작자 : 이 주 형 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하